

**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DEL RESIDUO DESMINERALIZADO DEL  
COROZO DE LA PALMA AFRICANA EN EL MORTERO Y EL HORMIGÓN**



**JOSE IGNACIO MORELO GONZALEZ**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS, D. T y C. - BOLÍVAR**

**2016**

**INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DEL RESIDUO DESMINERALIZADO DEL  
COROZO DE LA PALMA AFRICANA EN EL MORTERO Y EL HORMIGÓN**

**INVESTIGADOR PRINCIPAL**

**JOSE IGNACIO MORELO GONZALEZ**

**DIRECTOR**

**ING. MODESTO BARRIOS FONTALVO**

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN**

**GEOTECNIA Y MATERIALES (GEOMAT)**

**LÍNEA**

**MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL**

**CARTAGENA DE INDIAS, D. T y C. - BOLÍVAR**

**2016**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo de grado a Dios por guiarme y permitirme obtener todos mis logros propuestos.

A mis padres Anedia Zenith González Catalán y Javier Hernando Morelo Díaz por su gran esfuerzo y apoyo incondicional, han sido el principal cimiento en la construcción de mi vida como profesional.

A mis hermanos Javier Hernando e Isabel Sofía por estar presentes cuando los necesité, por tolerarme y quererme a la vez, los amo mucho.

A mi hermano Darío José, aunque no estás más con nosotros en cuerpo siempre lo estarás en alma y sé que desde el cielo nos cuidas a todos.

A Karen Margarita por tanto apoyo y motivación a ser cada día mejor, por su comprensión y amor, por ser mi novia y compañera de la vida, unidos siempre.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al ingeniero Modesto Barrios Fontalvo por haber sido mi director de trabajo de grado y haberme apoyado a cumplir este logro.

A mis amigos con quienes compartí toda clase de momentos en nuestro camino hacia el título como ingenieros, que estuvieron conmigo durante 5 años compartiendo buenos y malos momentos, Carlos, Roberto, Jhorsy, Xenia, William, Mary, Ana, Mario, Laura, Kevin, Alcides y Gervis, hicieron que el camino fuera mucho mejor.

A mis mejores amigos Tito y Sergio quienes estuvieron presentes siempre en la consecución de este título, gracias por su gran apoyo.

Y por último agradezco a Walberto Rivera y a Guillian Barboza por ser mis evaluadores y a todos los docentes del programa de Ingeniería Civil de la Universidad de Cartagena, que me ayudaron a formar como ingeniero civil.

## TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN .....	3
1 MARCO DE REFERENCIA .....	6
1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE .....	6
1.2 MARCO TEORICO .....	12
1.2.1 Palma Africana.....	13
1.2.2 Cuesco o pericarpio.....	13
1.2.3 Residuos Agroindustriales .....	14
1.2.4 Cenizas .....	15
1.2.5 Cemento .....	19
1.2.6 Agua .....	22
1.2.7 Agregados o áridos.....	26
1.2.8 Pasta o pegante.....	30
1.2.9 Mortero.....	31
1.2.10 Concreto .....	33
1.2.11 Ensayos .....	39
2 JUSTIFICACIÓN .....	47
3 OBJETIVOS .....	50
3.1 OBJETIVO GENERAL .....	50
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	50
4 ALCANCE.....	51
4.1 ESPACIAL.....	51
4.2 TEMPORAL .....	51
4.3 CONCEPTUAL.....	51
4.4 RESULTADOS .....	52
4.5 PRODUCTO FINAL A ENTREGAR .....	52
4.6 PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS.....	52
4.7 LIMITACIONES.....	52

5	METODOLOGIA .....	53
5.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	53
5.2	TECNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS.....	53
5.2.1	Fuentes primarias .....	54
5.2.2	Fuentes secundarias.....	54
5.3	TECNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS .....	54
5.3.1	Variables .....	54
5.3.2	Desmineralización del residuo agroindustrial de la palma africana.....	56
5.3.3	Cenizas de residuo agroindustrial proveniente de la palma africana como adición a la mezcla de mortero.....	57
5.3.4	Cenizas de residuo agroindustrial proveniente de la palma africana como adición a la mezcla de hormigón.....	58
6	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	60
6.1	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES eNSAYAdos para morteros y hormigones	60
6.2	ENSAYOS CORRESPONDIENTES A ESPECÍMENES DE MORTERO Y HORMIGÓN.....	60
6.2.1	Ensayos para Mortero .....	60
6.2.2	Ensayos para hormigón.....	69
6.3	IDENTIFICACIÓN DE VARIACIONES CAUSADAS POR LA ADICIÓN DE CENIZA A LAS MEZCLAS DE MORTERO Y HORMIGÓN EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS .....	86
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	88
9	BIBLIOGRAFÍA .....	91
10	ANEXOS .....	94

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Variables independientes .....	55
Tabla 2: Variables dependientes .....	55
Tabla 3. Número de cubos a elaborar para ensayar a compresión en el mortero.....	58
Tabla 4. Número de cilindros y viguetas a elaborar para ensayar a compresión, tracción y flexión en el hormigón. ....	59
Tabla 5. Datos obtenidos del ensayo de consistencia normal .....	61
Tabla 6. Datos obtenidos del Tiempo de fraguado .....	63
Tabla 7. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en mortero a los 14 días .....	66
Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en mortero a los 28 días .....	67
Tabla 9. Datos obtenidos del ensayo de Slump.....	71
Tabla 10. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros a los 7 días .....	73
Tabla 11. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros a los 14 días .....	74
Tabla 12. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros a los 28 días .....	75
Tabla 13. Datos del ensayo de resistencia a la flexión del concreto a los 7 días .....	79
Tabla 14. Datos del ensayo de resistencia a la flexión del concreto a los 14 días .....	80
Tabla 15. Datos del ensayo de resistencia a la flexión del concreto a los 28 días .....	81
Tabla 16. Datos del ensayo de tracción indirecta de cilindros a los 28 días .....	84
Tabla A 1: Tolerancias de edad de ensayo de los especímenes. ....	98
Tabla B 1: Tolerancias de edad de ensayo de los especímenes. ....	103

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Variación de las proporciones en volumen absoluto de los materiales usados en el concreto. ....	34
Ilustración 2. Aparato de Vicat en ensayo de consistencia normal.....	61
Ilustración 3. Cubos de mortero .....	65
Ilustración 4. Cubo fracturado después de la presión aplicada .....	69
Ilustración 5. Cubo sin ceniza (izquierda) y cubo con ceniza (derecha) fracturados.....	69
Ilustración 6. Realización del ensayo de asentamiento.....	70
Ilustración 7. Medición de asentamiento en el ensayo de Slump .....	70
Ilustración 8. Moldes de cilindros de hormigón.....	72
Ilustración 9. Cilindros sumergidos completamente en agua .....	73
Ilustración 10. Cilindro fracturado después de la presión aplicada .....	77
Ilustración 11. Cilindro fracturado después de la presión aplicada .....	77
Ilustración 12. Vigüeta 1 fracturada después de la presión aplicada .....	82
Ilustración 13. Vigüeta 2 fracturada después de la presión aplicada .....	83
Ilustración 14. Cilindro 1 fracturado después de la fuerza aplicada para la tracción.....	85
Ilustración 15. Cilindro 2 fracturado después de la fuerza aplicada para la tracción.....	86
Ilustración A 1: Aparato de Vicat. ....	95
Ilustración A 2: Esquema para el moldeo de especímenes. ....	99
Ilustración B 1: Molde para determinar el asentamiento. ....	102
Ilustración B 2 : Esquema de un equipo adecuado para el ensayo de flexión del concreto usando una viga cargada en el centro de la luz. ....	104
Ilustración B 3. Detalle en planta del equipo adecuado para la determinación del diámetro final usado para el alineamiento del espécimen.....	106
Ilustración B 4. Cilindro colocado para ensayo de tensión indirecta.....	107

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Penetración vs Cantidad de agua en ensayo de consistencia normal .....	62
Gráfica 2. Penetración vs Tiempo de fraguado .....	64
Gráfica 3. Resistencia de los cubos vs porcentaje de ceniza a los 14 días .....	67
Gráfica 4. Resistencia de los cubos vs porcentaje de ceniza a los 28 días .....	68
Gráfica 5. Resistencia de los cubos vs fecha de ensayo y porcentaje de ceniza .....	68
Gráfica 6. Asentamiento del concreto vs porcentaje de ceniza .....	71
Gráfica 7. Resistencia de cilindros vs porcentaje de ceniza para el ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días .....	74
Gráfica 8. Resistencia del cilindro vs porcentaje de ceniza para el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días .....	75
Gráfica 9. Resistencia de cilindros vs porcentaje de ceniza para el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días .....	76
Gráfica 10. Resistencia de los cilindros vs fecha de ensayo y porcentaje de ceniza para el ensayo de la resistencia a la compresión .....	76
Gráfica 11. Resistencia de viguetas vs porcentaje de ceniza a los 7 días .....	79
Gráfica 12. Resistencia de viguetas vs porcentaje de ceniza a los 14 días .....	80
Gráfica 13. Resistencia de viguetas vs porcentaje de ceniza a los 28 días .....	81
Gráfica 14. Resistencia de los cilindros vs fecha de ensayo y porcentaje de ceniza .....	82
Gráfica 15. Resistencia a tracción indirecta de cilindros vs porcentaje de ceniza a los 28 días .....	85

## **ANEXOS**

<b>ANEXO A</b> .....	94
<b>ANEXO B</b> .....	101

## RESUMEN

En la industria aceitera Oleoflores S.A.S. ubicada en el municipio de María la Baja - Bolívar, se presenta una problemática medioambiental causada por el residuo del cuesco de palma africana, ya que al ser producido en grandes cantidades se tiene mala disposición del mismo, generando contaminación de fuentes hídricas, grandes focos de procreación de insectos, malos olores, entre otros, afectando así la salud de residentes cercanos y trabajadores de la industria, lo cual conlleva a buscar alternativas de solución, entre las cuales se encuentra la utilización de dichos residuos en la industria de la construcción. En la presente investigación se estudió la viabilidad del uso de cenizas de cuesco de palma africana en porcentajes de 0, 5 y 10 % en mezclas de concreto y mortero de acuerdo al comportamiento de las propiedades mecánicas de dichas mezclas, para esto se usó una metodología experimental a partir de ensayos de compresión, flexión, tracción indirecta, asentamiento, consistencia normal y tiempo de fraguado. De los cuales se obtuvieron resultados que permitieron determinar las propiedades afectadas positiva y negativamente al adicionar este residuo en las mezclas con porcentajes previamente dichos, de las que se destacan las posibles a utilizar en la industria de la construcción; la resistencia a la compresión del mortero en mezclas con 5 %, puesto que aumenta la resistencia en un 18% con respecto a la mezcla patrón, así como la resistencia a la compresión del concreto en mezclas con 10 %, puesto que aumenta la resistencia en un 14% con respecto a la mezcla patrón. En propiedades como el asentamiento del concreto, el tiempo de fraguado y la consistencia normal del cemento, las mezclas se destacan porque pueden ser usadas para características específicas como la fluidez y la plasticidad del concreto.

Palabras claves: Resistencia, compresión, fraguado, mortero, concreto, cenizas, cuesco, desmineralización.

## ABSTRACT

In the oil industry Oleoflores S.A.S. located in the town of María la Baja - Bolivar, an environmental problem caused by the residue of African palm shell is presented as being produced in large quantities is bad disposition thereof, generating pollution of water sources, large pockets of procreation of insects, odors, among others, affecting the health of nearby residents and workers in the industry, leading to seek alternative solutions, among which is the use of such waste in the construction industry. In this research the feasibility of using ash African palm Shell in percentages of 0, 5 and 10% in concrete mixes and mortar according to the behavior of the mechanical properties of these mixtures was studied for this methodology was used from experimental tests of compression, bending, indirect tensile, settlement, normal consistency and setting time. Which they results allowed to determine the positive and negatively affected properties by adding this residue in mixtures with previously said percents of the stand possible to use in the construction industry were obtained; the compressive strength of mortar mixtures containing 5%, since resistance increases by 18% over the standard mixture, and the compressive strength of concrete mixtures with 10%, as it increases the resistance in 14% relative to the standard mixture. In properties such as concrete slump, setting time and the normal consistency of the cement mixtures they are highlighted because they can be used for specific characteristics such as flowability and plasticity of the concrete.

Keywords: resistance, compression set, mortar, concrete, ashes, shell, demineralization.

## INTRODUCCIÓN

La fibra y el cuesco de la palma africana son materiales denominados como residuos, que actualmente son causales de contaminación ambiental debido a la falencia de alternativas que conlleven a su aprovechamiento en procesamientos industriales. Inicialmente estos residuos eran tirados en la margen de las fuentes hídricas cercanas generando focos de procreación de insectos además de aumentar la cantidad de sólidos disueltos que dificultan la fotosíntesis y la vida acuática en especies como los peces. En estudios previos realizados se encontró que, gracias a su dureza, el cuesco de la palma puede ser utilizado como sub-base granular en las vías de acceso a las plantaciones, así como también puede ser utilizado como combustible en las calderas para aprovechar su poder calorífico en la producción de vapor de agua. Las cenizas resultantes son apiladas en montañas cerca de las calderas; como consecuencia, la salud de trabajadores se ve alterada por enfermedades en la piel y molestias en los ojos, además de causar molestias respiratorias y malos olores como producto de la descomposición de los compuestos orgánicos.

Hoy en día el aprovechamiento de residuos sólidos contaminantes provenientes de las industrias juega un papel muy importante, ya que, al hacer uso de estos, inmediatamente se minimiza el nivel contaminante generado en el medio ambiente en las zonas industriales, así como los posibles daños o perjuicios que ocasionan al ser humano. El residuo de la extracción mecánica de los racimos de fruta fresca de la palma africana como consecuencia de la elaboración de aceite de palma y de palmiste genera riesgos, también la disposición inadecuada de las cenizas provenientes del residuo calcinado en las calderas productoras de vapor de agua y energía; ya que por estudios previos se conoce que son contaminantes de fuentes hídricas.

Para la industria de la construcción, no es nuevo investigar sobre recientes métodos para obtener morteros y concretos con mejor resistencia mecánica y durabilidad, por lo que cada día surgen nuevos estudios e investigaciones sobre materiales capaces de aumentar la resistencia, la durabilidad, entre otras propiedades mecánicas, basándose en el uso de

materiales como micro-sílice, cenizas volantes, resinas epóxicas, minerales silíceos, fibras reforzadas de polímeros, entre otros. (Ramírez Brewer & Vergara Alvis, 2013)

En Colombia y en muchos otros países se han desarrollado y aplicado distintos métodos y procedimientos para obtener mejores resultados en la industria de la construcción, donde uno de sus fines es mejorar las propiedades del concreto a largo plazo y lograr aligerar la carga muerta de las estructuras. En el logro de este objetivo, se ha utilizado el material residual proveniente de las industrias y la agricultura, entre los que cabe destacar la cascarilla de arroz, la cascarilla de café, el bagazo de la caña de azúcar, el cuesco de la palma africana y la estopa del coco. En el caso de la ceniza resultante de la calcinación de los residuos industriales de la palma africana, se ha analizado mecánicamente y se han observado excelentes resultados en cuanto a la resistencia a la compresión del concreto, hallando el porcentaje óptimo de adición a la hora de preparar la mezcla.

En el municipio de María la Baja, Bolívar, Colombia, se encuentran ubicadas plantaciones e industrias palmeras, donde la producción de cuesco se dispone en altas cantidades, lo que conlleva a un problema ambiental, el cual se ha tratado de minimizar utilizando este material para la adecuación de vías en las plantas de las industrias aceiteras con un corto tiempo de vida media. De acuerdo a estudios previos se ha demostrado que es posible transformar el cuesco en material carbonizado; por medio de un proceso conocido como desmineralización, este es llevado a cabo a distintas temperaturas entre los 800 °C y los 1400 °C, con el fin de obtener una ceniza con alto contenido de sílice, la cual debe ser reducida totalmente a polvo para permitir una mejor hidratación y enlace con los compuestos del cemento.

Se hizo un enfoque especial en éste municipio, puesto que se ve bastante afectado por el cultivo de la palma aceitera a nivel industrial. Conforme a estudios y observaciones se tiene que la palma no puede sobrevivir junto a otros cultivos o plantaciones, ya que la afectan quitándole alimentos de la tierra, y para la economía industrial es aún más importante el

rendimiento con respecto a la cantidad de aceite por hectárea producida, debido a esto y por lo que se percibe, reciben el nombre de “desiertos verdes”. (Justicia y Paz, 2007)

La presente investigación está basada en el problema que generan los residuos agroindustriales provenientes del cultivo y procesamiento de la Palma Africana por parte de las industrias localizadas en el municipio de María la Baja y en el medio ambiente. Esta se encuentra en la línea de “Materiales de Construcción”, puesto que centra su desarrollo en el estudio del comportamiento mecánico de materiales de construcción, así como sus procesos y sistemas constructivos alternativos, partiendo de la utilización de minerales provenientes de residuos agroindustriales, con la finalidad de reducir la problemática medioambiental y visualizar la viabilidad de su uso en el campo de la construcción. (Universidad de la Frontera, 2015). Se hizo un análisis comparativo de las propiedades mecánicas del mortero y el hormigón con adición de estas cenizas en porcentajes de 0% 5% y 10%, los especímenes e indicaciones para la realización de los ensayos de laboratorio fueron realizados teniendo en cuenta la norma INVIAS (Instituto Nacional de Vías), esto con el fin de concluir la viabilidad del uso del residuo de palma africana como material para la industria de la construcción, estos ensayos se realizaron en la ciudad de Cartagena en los laboratorios de la Universidad de Cartagena y en el barrio Los Tamarindos.

De lo anterior surgen varias inquietudes que conllevaron a la siguiente pregunta de investigación:

¿Puede la adición de las cenizas provenientes de la calcinación del residuo agroindustrial de la palma africana generar variaciones positivas en las propiedades mecánicas del mortero y del hormigón?

# 1 MARCO DE REFERENCIA

## 1.1 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En su búsqueda de conocimiento, el hombre ha tratado de satisfacer las necesidades que se le van presentando a lo largo del tiempo. Hasta la fecha, muchas universidades e investigadores a nivel mundial han desarrollado diferentes estudios cuyo fin es mejorar las características físicas y mecánicas del concreto partiendo del uso de fibras naturales extraídas de cáscaras de frutas, residuos orgánicos producidos después de utilizada la fruta o la hoja de la planta, cenizas obtenidas de un proceso de desmineralización del material, entre otros estudios.

Se han realizado investigaciones que por sus resultados se han destacado, como son el uso de la fibra de la cáscara de coco como refuerzo en placas delgadas de concreto, el uso del residuo obtenido del fruto de la palma africana conocido como cuesco para mejorar las propiedades mecánicas del concreto, el uso de la ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción, el uso de ceniza volante y escoria granulada de alto horno molida en las mezclas de concreto de cemento Portland para mejorar sus propiedades, entre otras. Muchas de estas investigaciones han obtenido resultados que resaltan su importancia y su aprovechamiento en la industria de la construcción. Algunas de estas investigaciones se mencionan a continuación:

En la Universidad Corporativa de Colombia se llevó a cabo un estudio titulado “*APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA PALMA AFRICANA*”. Estudio realizado por Msc, Sandra Patricia Reyes Ortiz y el estudiante de ingeniería civil Julio Alberto Ortiz, el cual está enfocado en un análisis estadístico para comprobar la cantidad de residuos de la palma, cuesco y fibra, en dos industrias aceiteras de la región, seguido de una caracterización fisicoquímica de dichos residuos y sus correspondientes cenizas, con discusiones importantes de las propiedades físicas y mecánicas de este material como aditivo del cemento Portland. Se estudia la viabilidad de utilizar las cenizas como material

adicionado al cemento. Los resultados experimentales indican que la mezcla de cemento que contienen las cenizas derivadas de los residuos de aceite de palma muestra satisfactorios tiempos y resultados de las pruebas de solidez. La incorporación de la ceniza es categorizada como buena, y no se observó segregación. Los efectos de la ceniza sobre la densidad y absorción de agua son insignificantes. La resistencia a la compresión del hormigón disminuye con el contenido de cenizas en el cemento utilizando hasta un 10% en peso de la ceniza. Los resultados sugieren que la ceniza podría ser mezclada en pequeñas cantidades con cemento Portland ordinario para hacer hormigón sin efectos perjudiciales a largo plazo sobre la fuerza de la propiedad. La presente investigación tuvo como objetivo contribuir a la disminución del impacto ambiental ocasionado por la acumulación de hueso y fibra de la palma africana en las áreas de extracción aceitera, dándole un valor agregado a este material al ser usado como puzolana, y obtener un material compuesto de menor valor económico y propiedades diferentes a las del cemento Portland. Cabe resaltar que en éste estudio el residuo de las industrias aceiteras es aplicado sólo como adición a la mezcla más no como sustituto de uno de sus componentes, por lo que las conclusiones obtenidas abarcaron parcialmente los posibles usos del residuo en la construcción y no en su totalidad. (Reyes Ortiz & Ortiz, 2009).

Otro estudio realizado que se conoce con el nombre de “*CONCRETO AUTOCOMPACTANTE CON DIFERENTES NIVELES DE CENIZA VOLANTE Y ESCORIA DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN*” realizado en la Universidad del Valle por el ingeniero de materiales Yimmy Silva y el PhD Silvio Delvasto. Se elaboraron diferentes concretos autocompactantes (CAC) de cemento Portland con diferentes niveles de sustitución por ceniza volante (CV) y escoria (E) en mezclas ajustadas para dar permanencia a las propiedades en estado fresco del concreto autocompactante. Las propiedades evaluadas incluyeron la trabajabilidad, resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción y porosidad. La trabajabilidad del concreto fresco se determinó usando la prueba de flujo de asentamiento, la caja en L y el embudo en V. Para poder mantener la capacidad de llenado adecuada, el concreto con ceniza volante requirió un incremento en la relación agua/fino. Los resultados indican que sustituyendo el 35% de cemento por escoria

se obtiene una resistencia de 59,5 MPa a los 90 días de curado bajo agua. La resistencia a la tracción indirecta reportó 4 MPa a la misma edad y porcentaje de sustitución. Al sustituir 50% del cemento por escoria se obtiene un resultado comparable en ambas propiedades mecánicas. Con adición de ceniza volante hasta de un 50% también se obtuvieron resistencias a la compresión importantes, aunque un poco inferiores. Valores altos de absorción se obtuvieron al aumentar la relación agua/finos. Todos los concretos autocompactantes exhibieron valores en un rango de 10,06 - 13,35% de volumen de poros permeables. Este estudio concluyó que es factible obtener concretos autocompactantes de elevadas prestaciones usando elevadas proporciones de escoria y ceniza volante de la combustión de carbón en reemplazo de cemento Portland. Este estudio está limitado, dado que la ceniza volante es usada como sustituto del cemento en relaciones de peso, por lo que las conclusiones y resultados cubrieron únicamente este aspecto y las soluciones del uso del residuo en la construcción fueron parciales. (Silva & Delvasto, 2014).

Estudios muy parecidos se han realizado en Colombia dada la necesidad de aprovechar los desechos provenientes de las industrias, en este caso azucareras, se tiene un estudio conocido con el nombre de *“CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA COMO ADITIVO AL CEMENTO PORTLAND PARA LA FABRICACIÓN DE ELEMENTOS DE CONSTRUCCIÓN”* realizado por los estudiantes de ingeniería Camilo Ernesto Giraldo Escandón, Diana Valentina Vidal Velasco, Carolina Martínez López, Janneth Torres Ágredo y Luis Octavio González Salcedo de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira, en el cual se evaluó el uso de la ceniza de bagazo de caña (CBC) como reemplazo parcial del cemento Portland ordinario (CPO) y arena de Ottawa para la preparación de morteros. Donde las cenizas analizadas fueron tomadas en dos ingenios azucareros del Valle del Cauca, como resultado de la combustión de bagazo en las calderas a temperaturas aproximadas entre 700°C y 900°C. La CBC1 se obtuvo de un vertedero a cielo abierto, las CBC2 y CBC3 procedían del fondo de un multiciclón y un precipitador, respectivamente. Para todas las muestras recolectadas se separaron los materiales no deseados por tamizado con tamices N°140, 170 y 200; adicionalmente, las cenizas se trataron térmicamente a temperaturas entre 600°C y 800°C por 2 y 3 horas para eliminar los materiales no separados

por tamizado. La composición química fue determinada por fluorescencia de rayos X (FRX) con un equipo MagixPro PW – 2440 Philips. La reactividad de la CBC se evaluó mediante ensayo mecánico (índice de actividad puzolánica) norma ASTM C311. Se empleó, además, cemento Portland ordinario (OPC) y arena de Ottawa para la preparación de los morteros. Luego en las muestras de CBC se identificaron porcentajes altos de sílice y alúmina, que corresponden a 76.3% para CBC2 y 11.8% para la CBC1, respectivamente. Adicionalmente la actividad puzolánica fue de 76% en CBC1, 91% en CBC2, y 97% en CBC3. A veintiocho días de curado se encontró un índice de actividad puzolánica del 97% (CBC3), superando el 75% indicado como valor mínimo en la norma ASTM C618. Este índice es alto comparado con otros estudios (Cordeiro et al., 2009; Oliveira et al., 2010), con los cuales se han obtenido valores de 77% y 90%. Por lo tanto, a partir de la determinación de la actividad puzolánica, se puede afirmar que los materiales evaluados pueden ser considerados como una puzolana, de tal manera que pueden ser usados para la elaboración de elementos constructivos. En el estudio, la ceniza de bagazo de caña fue utilizada como sustituto parcial del cemento Portland ordinario y la arena Ottawa, no se presenta adición de la ceniza en relación de peso, por lo tanto, esta limita a éste concepto al igual que sus conclusiones, resultados y posibles soluciones a la problemática del uso del residuo de bagazo de caña. (Giraldo Escandón, Vidal Velasco, Martínez Lopez, Torres Ágreto, & González Salcedo, 2012).

Entre otros estudios internacionales se resaltan por sus temas de investigación y sus resultados los mencionados a continuación:

En el año 2012 en la Universidad de Malaya se llevó a cabo una investigación titulada *“ENGINEERING PROPERTIES OF OIL PALM SHELL LIGHTWEIGHT CONCRETE CONTAINING FLY ASH”* realizada por Payam Shafigh, U. Johnson Alengaram, Hilmi Bin Mahmud y Mohd Zamin Jumaat. La investigación estuvo dirigida a evaluar el efecto de la sustitución del cemento por cenizas volantes obtenidas de una cáscara de la palma aceitera en porcentajes de 0%, 10%, 30% y 50% sobre algunas propiedades del hormigón. Las propiedades estudiadas incluyen trabajabilidad, densidad, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta, resistencia a la flexión, absorción de agua y la

contracción por secado. El efecto de períodos de curado inicial de agua de 2, 4 y 6 días después del desmolde y el secado al aire libre, la resistencia a la compresión a los 28 días también fue estudiado. Los resultados del ensayo mostraron que con 50% de sustitución de cemento por cenizas volantes, se producía una reducción en el peso del hormigón con OPS (Cáscara de Palma Aceitera, por sus siglas en inglés). Aunque la inclusión de las cenizas volantes en el hormigón con OPS hace que sea más sensible al curado; el curado incluso de 2 días después del desmolde reduce esta sensibilidad. Los resultados de la resistencia a la tracción del hormigón con OPS indican que el hormigón con OPS que contiene hasta 50% de cenizas volantes son adecuados para su uso como elementos estructurales de hormigón. El uso de 10% de cenizas volantes en el hormigón con OPS no afectó a la contracción por secado del hormigón con OPS de alta resistencia. Este estudio está limitado por el hecho de que las cenizas volantes son usadas únicamente como sustitución del cemento Portland, por lo tanto, las soluciones que se le pueden dar al uso del residuo agroindustrial proveniente de la palma africana también se ven limitadas. (Shafigh, Johnson Alengaram, Zamin Jumaat, & Bin Mahmud, 2012).

En la Universidad de Obafemi Awolowo en Nigeria se realizó un estudio conocido como “*A COMPARATIVE STUDY OF CONCRETE PROPERTIES USING COCONUT SHELL AND PALM KERNEL SHELL AS COARSE AGGREGATES*”, el cual fue realizado por E.A. Olanipekun, K.O. Olusola, O. Ata. Esta investigación presenta los resultados de una investigación llevada a cabo a partir de análisis de costos comparativos y las características de resistencia del hormigón producido, usando coco granular y cáscaras de nuez de palma trituradas como sustitutos de agregado grueso en proporciones de 0% 25% 50% 70% y 100%. Se usaron dos relaciones de mezcla (1:1:2 y 1:2:4), utilizando 320 cubos de 100\*100\*100 mm de los cuales fueron probadas sus propiedades físicas y mecánicas. Los resultados de las pruebas mostraron que la resistencia a la compresión del hormigón disminuyó a medida que el porcentaje de las cáscaras de las mezclas aumentaba. Sin embargo, el hormigón obtenido a partir de cáscaras de coco mostró una mayor resistencia a la compresión que el hormigón obtenido a partir de cáscaras de nuez de palma, en todas las proporciones de mezclas. Los resultados indicaron la reducción de costos de 30% y 42%

para el hormigón producido a partir de cáscaras de coco y cáscaras de nuez de palma, respectivamente. Teniendo en cuenta la relación de resistencia/economía, se concluyó que las cáscaras de coco eran más adecuadas que las cáscaras de nuez de palma cuando se utiliza como sustituto de agregados gruesos convencionales en la producción de Hormigón. Cabe resaltar que dicho estudio pretende buscar la mayor economía posible a la hora de usar coco granular y cáscaras de nuez de palma trituradas como sustitutos de agregados gruesos, por lo que no tiene como principal objetivo la solución a la problemática ambiental que presentan los residuos en el medio ambiente. (Olanipekun, Olusola, & Ata, 2006).

Otro estudio internacional conocido con el título de “*PROPERTIES OF SUSTAINABLE CONCRETE CONTAINING FLY ASH, SLAG AND RECYCLED CONCRETE AGGREGATE*” realizado por el profesor M.L. Berndt, en el cual fue investigada la conveniencia de utilizar "concreto sostenible "para cimentaciones de aerogeneradores y otras aplicaciones que implican grandes cantidades de hormigón. El enfoque adoptado era hacer las sustituciones de material para que el medio ambiente, la energía y que el impacto del CO<sub>2</sub> en el hormigón pudiera reducirse. Esto se logró mediante la sustitución parcial del cemento con grandes volúmenes de cenizas volantes o escoria de alto horno y mediante el uso de agregados de concreto reciclado. Se consideraron cinco mezclas de concreto básicos. Estos fueron: (1) mezcla convencional sin sustituciones de material, (2) 50% de reemplazo de cemento con cenizas volantes, (3) la sustitución del 50% de cemento con escoria de alto horno, (4) 70% de sustitución del cemento con escoria de alto horno y (5) la sustitución del 25% de cemento con ceniza volante y 25% de sustitución con escoria de alto horno. El agregado de concreto reciclado se investigó en hormigones convencionales y escorias modificadas. Las propiedades investigadas fueron la resistencia a la compresión y tracción, módulo de elasticidad, coeficiente de permeabilidad y durabilidad en soluciones de cloruro y sulfato. Se concluyó que las mezclas que contienen 50% de escoria dieron el mejor rendimiento global. La escoria era particularmente beneficiosa para el hormigón con árido reciclado y podría reducir las pérdidas de fuerza. Los ensayos de durabilidad indican un ligero aumento en el coeficiente de permeabilidad y en el coeficiente de difusión de cloruro cuando se utiliza agregado de concreto reciclado. Sin embargo, los valores permanecieron

aceptables para el hormigón durable y el coeficiente de difusión de cloruro se ha mejorado mediante la incorporación de escoria en la mezcla. El hormigón con 50% de cenizas volantes tenía relativamente un rendimiento pobre en relación a los materiales y proporciones de mezclas utilizados en este estudio y se recomienda que tales mezclas se puedan probar a fondo antes de su uso en proyectos de construcción. En el proceso de sustitución de cemento por cenizas volantes y escorias de alto horno se tomaron porcentajes relativamente altos, dado esto, no se contaron con datos, resultados y conclusiones donde se presenten dichas sustituciones en bajos porcentajes. (Berndt, 2009).

Por otra parte, en la Universiti Sains Malaysia se realizó una investigación recopilando varios artículos, el cual fue realizado por el profesor B.H. Hameed y K.Y. Foo, conocido con el nombre de “*VALUE-ADDED UTILIZATION OF OIL PALM ASH: A SUPERIOR RECYCLING OF THE INDUSTRIAL AGRICULTURAL WASTE*”. Este trabajo presenta un estado de opinión técnica de la industria de ceniza de la palma de aceite, sus características fundamentales y las repercusiones ambientales. Por otra parte, se resumen y comentan; el avance clave de sus implementaciones y los principales retos junto con la expectativa de futuro. En conclusión, la expansión de la ceniza de la palma de aceite en campos de aplicación numerosos representa una circunstancia plausible y poderosa, para acumular el beneficio del medio ambiente en todo el mundo y dar forma a la economía nacional. En este estudio no se llevó a cabo ningún tipo de procedimiento experimental, ya que se recopila información de otras investigaciones, por lo tanto, las conclusiones sacadas son provenientes de información secundaria y no propia del estudio. (Hameed & Foo, 2009).

## 1.2 MARCO TEORICO

A continuación, se muestran los conceptos básicos y las definiciones que se tuvieron en cuenta a lo largo del estudio, que permiten aclarar posibles dudas e informar detalladamente algunos de los aspectos relacionados con la palma africana y lo que ésta comprende, el mortero, el hormigón, las distintas características que éstos presentan y los métodos de ensayo a emplear en el estudio.

### **1.2.1 Palma Africana**

*Elaeis Guineensis* comúnmente conocida como palma africana es una planta nativa del golfo de Guinea, creciendo en este sitio de manera silvestre en los claros del bosque tropical húmedo, por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar a lo largo de la franja costera entre los países de Senegal y Angola incluyendo la cuenca del río Congo. La palma africana es una planta monocotiledónea, que requiere para su obtención un proceso que demora entre 12 y 14 meses los cuales comprenden la germinación de la semilla y el desarrollo de la planta en vivero. (Buzón Ojeda, 2010).

La palma africana es también conocida como palma aceitera, porque de ella se extrae el aceite comestible, pero también tiene diversos usos, como por ejemplo; para productos alimenticios, medicinales, fabricación de fibras, la savia sirve para la producción de vino, fabricación de escobas, el Palmiste es usado como alimento para ganado, como lubricante para la industria de la laminación en frío de láminas metálicas, lo mismo que en la trefilación de alambres, especialmente de plata, donde se ha encontrado que este aceite es el único de resistir altas temperaturas y presiones requeridas, se utiliza también en panadería, confitería, en la fabricación de jabones tanto de ropa como de tocador, velas, betunes y tinta de imprenta, en la industria del acero inoxidable se ha empleado el aceite de palma en la laminación y en el pulimento y brillo de los aceros especiales, también tiene grandes usos en la industria de concentración de minerales, en la industria del cuero ya que le da flexibilidad, usándose también en la industria textil. (Buzón Ojeda, 2009).

### **1.2.2 Cuesco o pericarpio**

Como se puede apreciar, los diversos usos o aplicaciones que se obtienen del proceso industrial de la palma africana llevan a pensar en las grandes ventajas que posee este tipo de plantaciones lo cual lo convierte en un producto de alta demanda, conjuntamente con una alta producción por unidad de superficie que lo hace uno de los más económicos, este fruto

maduro es de color amarillento, con un peso de 10 gr. y forma ovalada, una palma puede producir 12 a 13 racimos/año, con un peso de 20 a 30 kg, con 1.000 a 3.000 frutos/racimo. El cuesco queda como desecho, luego de un proceso industrial, posee una alta resistencia, de hecho, su desprendimiento en el racimo se da solo por el calentamiento en hornos y su trituración por altos procesos industrializados, por lo que ha sido utilizado en las haciendas y plantas extractoras como capa fortalecedora de la sub-rasante, brindando hasta el momento resultados satisfactorios. Por lo anterior surge la razón de utilizar este material en la elaboración de mezclas de concreto y mortero, buscando con ello mejorar sus propiedades a la compresión, reducir su peso y buscar economía, además que controle el cambio volumétrico en el fraguado al pasar de un estado plástico ha endurecido (Buzón Ojeda, 2010).

### **1.2.3 Residuos Agroindustriales**

Los residuos agroindustriales son materiales en estado sólido o líquido que se generan a partir del consumo directo de productos primarios o de su industrialización, y que ya no son de utilidad para el proceso que los generó, pero que son susceptibles de aprovechamiento o transformación para generar otro producto con valor económico, de interés comercial y/o social. El problema al que se enfrentan los residuos agroindustriales es que no existe una clara conciencia ambiental para su manejo, además de que falta capacidad tecnológica y recursos económicos para darles un destino final, así como una legislación específica para promover la gestión de este tipo de residuos, que asegure un buen manejo desde su generación hasta su disposición final. Aún en nuestros días, esta problemática prevalece a nivel mundial. En general, las características de los residuos agroindustriales son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina “residuos orgánicos”, dentro de este rubro se incluyen otros residuos, como los lodos de plantas de tratamiento de aguas residuales, la hojarasca de parques y jardines, así como los residuos domésticos y residuos sólidos municipales.

Algunos datos que sirven para tener una idea del volumen de residuos que generan diferentes tipos de industrias son los siguientes: la industria de la cerveza solamente utiliza el 8% de los componentes del grano, el resto 92%, es un residuo; la industria del aceite de palma utiliza el 9%, el 91% restante es un residuo; la industria del café utiliza el 9.5%, el 90.5% restante es un residuo y la industria del papel utiliza menos del 30%, el resto es un residuo. Al buscar una oportunidad de aprovechamiento de los residuos, se hace necesaria su caracterización para conocer su composición, la calidad de sus componentes y la cantidad que se genera, con esto se pueden definir las tecnologías más apropiadas para su aprovechamiento y posterior tratamiento. Es de esperar que después del aprovechamiento de un residuo se genere un siguiente residuo más agotado que podría tener otra aplicación, o bien, convertirse en un desecho. En la búsqueda de oportunidades de aprovechamiento de residuos este aspecto deberá ser considerado, con un enfoque de responsabilidad ambiental. (Saval, 2012).

#### **1.2.4 Cenizas**

Las cenizas volantes se definen como un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión del carbón pulverizado, con o sin materiales de combustión, que tiene propiedades puzolánicas y que está compuesto fundamentalmente de Sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ); el contenido de  $\text{SiO}_2$  reactivo es al menos, el 25% en masa. (CedexMateriales, 2011).

##### **1.2.4.1 Propiedades físicas de las cenizas**

Las cenizas volantes secas suelen presentarse como una arena o polvo muy fino, suave al tacto y de un color gris más o menos claro, según la proporción de hierro y carbón sin quemar. Sus características físicas y propiedades dependen de múltiples factores entre los que cabe resaltar: la composición química de los componentes incombustibles del carbón, el grado de pulverización del mismo, el tipo de caldera, la temperatura de combustión, el tipo de extractor, el sistema por el cual las cenizas son retiradas de la central térmica. Así, se pueden distinguir básicamente tres grupos: las cenizas convencionales

procedentes de central térmica, las obtenidas en centrales de lecho fluido y las procedentes de centrales con planta de desulfuración. La finura media de las cenizas volantes brutas, es decir, sin moldear, es comparable a la del cemento Portland ordinario y su tamal de grano oscila entre 0,2 y 200 micras de diámetro, llegando en casos excepcionales a valores de hasta 500 micras. La densidad de conjunto es aproximadamente de  $0,89 \text{ g/cm}^3$  y el peso específico de las partículas oscila entre 2,0 y  $2,9 \text{ g/cm}^3$ .

El contenido de humedad depende de la forma en que éstas se depositen después de abandonar los filtros y precipitadores. Cuando se quieren aprovechar estas cenizas deben recogerse a la salida de los filtros, a fin de que su contenido de agua sea mínimo.

En cuanto a las cenizas procedentes de centrales de lecho fluido, también tienen forma pulverulenta, con partículas de tipo plano más bien lajosas, con una granulometría comprendida entre 0.5 y 315 micras. La superficie específica es alta,  $200 \text{ m}^2/\text{kg}$ , similar a la de los cementos.

La coloración generalmente grisácea, presentando también tonalidades marrones, debido a los óxidos de hierro, o negra. La presencia de carbón sin quemar de colores oscuros.

En cuanto a algunas de las propiedades geotécnicas de las cenizas volantes, obtenidas a partir de resultados de laboratorio serían:

- Su granulometría es semejante a la de un suelo limoso, entre un 80 y un 95% de las partículas tienen tamaño limo. El porcentaje de partículas tamaño arcilla es muy pequeño o inexistente.
- Carecen de plasticidad dada la ausencia de minerales arcillosos en su composición, lo que le confiere asimismo una sensibilidad al agua muy débil, más cercana a la de los suelos granulares que a los de grano fino.
- Con respecto a la compactación, en general, se observa que el abanico de valores de densidad y humedad óptima Proctor Normal (PN) en distintas cenizas es muy amplia, debido a la serie de factores que afectan a su granulometría y por tanto a los

parámetros de compactación. Asimismo, no hay relación clara entre la máxima densidad seca y el peso específico de las partículas.

- La permeabilidad de las cenizas volantes compactadas es semejante a las de un suelo limoso, variando también en función de sus características granulométricas. Valores típicos de permeabilidad son:  $2 \times 10^{-5}$  a  $3 \times 10^{-7}$  m/s.
- La mínima densidad seca, según distintos autores, suele estar comprendida entre 5 y  $10 \text{ kN/m}^3$ , y la máxima densidad seca (PN) varía entre 9 y  $16 \text{ kN/m}^3$ .
- Una vez compactadas, una característica geotécnica ventajosa de las cenizas volantes es su menor compresibilidad en relación a otros suelos, lo cual es importante para reducir los asentamientos diferenciales. (CedexMateriales, 2011)

#### 1.2.4.2 Propiedades químicas de las cenizas

La composición química de las cenizas volantes es muy variable dependiendo de la composición química de los componentes del carbón. Los porcentajes en los que se presentan los distintos componentes de las cenizas varían sustancialmente de unas a otras. En general poseen los siguientes componentes, en mayor proporción: Sílice ( $\text{SiO}_2$ ), Alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Cal ( $\text{CaO}$ ) y carbón sin quemar; en menor proporción, generalmente menor al 5% en peso: magnesia ( $\text{MgO}$ ), Óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), y, otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc.

Las cenizas volantes se clasifican en diferentes tipos, atendiendo principalmente a su contenido en cal, y según la norma ASTM C 618-08<sup>a</sup>, se definen:

- Clase F: producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso, contienen pequeñas cantidades de cal generalmente inferiores al 15%, y mayor combinación de sílice, aluminio y hierro. Estas cenizas presentan propiedades puzolánicas.
- Clase C: producidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, contienen una mayor cantidad de cal, generalmente entre 15% y 30%. Estas cenizas presentan propiedades pozolánicas y cementicias.

Según su composición química, y atendiendo a la procedencia del carbón de origen, las cenizas volantes pueden clasificarse en:

- Cenizas Silicoaluminosas, denominadas también puzolánicas o no activas con contenidos en CaO inferiores al 10%, clase F según norma ASTM C618-08a). Son las más importantes en cuanto a cantidades producidas y aprovechamiento. Tienen propiedades ligantes en presencia de activadores de su puzolanicidad (se utiliza cal o cemento); son también hidrofílicas y tienen propiedades puzolánicas. Los óxidos más importantes son la sílice ( $\text{SiO}_2$ ), la alúmina, ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). El pH es netamente básico y puede ser superior a 10. El contenido en cal libre es importante para saber si una vez compactadas, sin aditivos, experimentan endurecimiento o no con el tiempo.
- Cenizas Sulfocálcicas: con altos contenidos de CaO, por encima del 10%; clase C según norma ASTM C618-08a. Se llaman también hidráulicas o activas, y suelen presentar un comportamiento diferente al de las silicoaluminosas, comportándose como aglomerantes hidráulicos; es decir cuando son amasadas con agua sufren reacciones de hidratación, fraguado y endurecimiento semejantes a los que tiene lugar en los cementos.

Otra clasificación sería la basada en la concentración de los elementos, habitualmente utilizada según sus aplicaciones. Las cenizas se clasificarían como siálicas, ferrosiálicas, sulfocálcicas, calciosiálicas o ricas en fases de aluminosilicatos. Simplificándose esta clasificación en silíceas y calcáreas:

- Las cenizas volantes silíceas o V, según la instrucción para la recepción de los cementos (RC-08), son un polvo fino de partículas esféricas que tienen propiedades puzolánicas y que consta principalmente de dióxido de silicio reactivo ( $\text{SiO}_2$ ) y óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). El resto contiene óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y otros compuestos.
- Las cenizas volantes calcáreas o W, según la RC-08, son un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas o puzolánicas, que consta esencialmente de óxido de calcio

reactivo (CaO), dióxido de silicio reactivo (SiO<sub>2</sub>) y óxido de aluminio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). El resto contiene óxido de hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) y otros compuestos.

Las cenizas resultantes de la combustión en lecho fluido suelen ser más finas que las cenizas de central térmica, lo que, unido a su porcentaje de cal, superior al de las silicoaluminosas convencionales, hace que puedan tener propiedades conglomerantes (actividad hidráulica).

En cuanto a la solubilidad, el porcentaje de materia soluble es pequeño, de un 2 a un 4% como máximo, dependiendo de la composición química, principalmente del contenido de CaO libre y de sulfatos. (CedexMateriales, 2011).

### **1.2.5 Cemento**

Es un material pulverizado que además de óxido de calcio contiene: sílice, alúmina y óxido de hierro y que forma, por adición de una cantidad apropiada de agua, una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto en el agua como en el aire. Se excluyen las cales hidráulicas, cales aéreas y yesos. (Rivera L., 2013).

En el sentido más amplio, la palabra cemento indica un material aglomerante que tiene propiedades de adherencia y cohesión, las cuales le permiten unir fragmentos minerales entre sí, para formar un todo compacto con resistencia y durabilidad adecuadas. Esta definición no sólo abarca los cementos propiamente dichos, sino una gran variedad de materiales de cementación tales como las cales, los asfaltos y los alquitranes.

En el medio de la construcción, y más específicamente en el de la fabricación de concreto para estructuras, es reconocido que al mencionar la palabra cemento, implícitamente ésta se refiere a cemento Portland, o cemento a base de Portland, el cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua ya que con ella experimenta una reacción química. Este proceso se llama hidratación, por lo cual son también llamados cementos hidráulicos. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.5.1 Cemento Portland

Producto que se obtiene por la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de Sulfato de Calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el Clinker. (Rivera L., 2013).

- ***Fabricación Del Cemento Portland***

El cemento Portland está compuesto principalmente por materiales calcáreos tales como caliza, alúmina y sílice que se encuentran como arcilla o pizarra; también se utiliza marga, que es un material calcáreo-arcilloso, por yeso y en los últimos años la adición de material puzolánico, que puede ser en estado natural como tierra de diatomeas, rocas opalinas, esquistos, cenizas volcánicas, o material calcinado (los nombrados anteriormente y algunos como las arcillas y esquistos más comunes), o de material artificial (óxido de silicio precipitado y cenizas volantes).

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en una cierta proporción y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión, a una temperatura de 1300 a 1400 °C, a la cual el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como Clinker. El Clinker se enfría y a continuación, se adiciona un poco de yeso y en los últimos tiempos, material puzolánico, que se tritura hasta obtener un polvo fino; el producto comercial resultante es el cemento Portland, utilizado a gran escala en todo el mundo.

La mezcla y la trituración de materias primas pueden efectuarse tanto en húmedo como en seco, de donde provienen los nombres de proceso "húmedo" o "seco". El método de fabricación a seguir depende, de la naturaleza de las materias primas usadas y principalmente de factores económicos.

Estos dos procesos son los más usados a nivel comercial, pero existen otros métodos empleados en la fabricación del cemento a pequeña escala, que son, entre otros, el

semiseco, la fabricación con horno vertical y fabricación con horno de parrilla de preparación (Lepol). (Rivera L., 2013).

#### 1.2.5.2 Propiedades físicas y mecánicas del cemento

- ***Fraguado del cemento***

Este término se usa para describir el cambio del estado plástico al estado endurecido de una pasta de cemento. Cuando una muestra de cemento se mezcla con cierta cantidad de agua, se forma una pasta plástica; ésta se va perdiendo a medida que pasa el tiempo, hasta llegar un momento en que la pasta pierde su viscosidad y se eleva su temperatura; el tiempo transcurrido desde la adición del agua se llama "tiempo de fraguado inicial", e indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado y la pasta semidura.

Posteriormente, la pasta sigue fraguando hasta que deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega al máximo de temperatura; el tiempo así transcurrido desde la mezcla con agua se denomina "tiempo de fraguado final", el cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado (aunque no totalmente) y la pasta ya está dura. A partir de este momento empieza el proceso de endurecimiento de la pasta y la estructura del cemento fraguado va adquiriendo resistencia mecánica.

La medida de estos tiempos de fraguado se hace de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma NTC - 118 mediante la aguja de Vicat, o en la norma NTC - 109 mediante las agujas de Gillmore. En nuestro medio el método más generalizado es el de la aguja de Vicat, el cual consiste en medir la penetración producida por una aguja de 1 mm de diámetro y 300 g de peso, sobre una pasta de consistencia normal a diferentes tiempos. Cuando la penetración de la aguja es de 25 mm, se considera que se ha presentado el fraguado inicial y cuando la aguja deja una ligera huella sobre la superficie de la pasta, sin penetrarla, se considera que se ha presentado el fraguado final. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Resistencia mecánica***

La resistencia mecánica del cemento endurecido es la propiedad del material que posiblemente resulta más obvia en cuanto a los requisitos para usos estructurales. Por lo tanto, no es sorprendente que las pruebas de resistencia estén indicadas en todas las especificaciones del cemento. La manera más lógica de medir la resistencia mecánica de los cementos es, aparentemente, sobre probetas hechas con pasta, ya que así se limita la dispersión que aparece en los resultados cuando se usan probetas de mortero o concreto; sin embargo se ha demostrado en múltiples investigaciones que el comportamiento mecánico de distintos cementos varía al ensayarlos en probetas con agregados (mortero o concreto) y por tanto, desde el punto de vista de las aplicaciones del cemento, la determinación de resistencia mecánica sobre probetas de pasta no tiene mayor utilidad.

Estas consideraciones hacen pensar que la resistencia mecánica se debería medir sobre probetas de concreto, ya que es esta la aplicación más importante del cemento, pero el tamaño relativamente grande de las muestras y la dificultad de obtener agregados gruesos normalizados han hecho que prácticamente ningún país del mundo utilice ensayos sobre muestras de concreto con miras a calificar los cementos. Existe entonces en el mundo una unanimidad casi completa en el uso de morteros para estos ensayos, como solución intermedia entre la pasta y el concreto. (Sánchez De Guzmán, 2001).

## **1.2.6 Agua**

El agua se puede definir como aquel componente del concreto en virtud del cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados. Para ello, se clasifica en agua de mezclado y agua de curado. (Sánchez De Guzmán, 2001).

### **1.2.6.1 Agua de hidratación**

El agua de hidratación es aquella parte del agua original de mezclado que reacciona químicamente con el cemento para pasar a formar parte de la fase sólida del gel. Es también

llamada no evaporable porque en una porción de pasta hidratada se conserva a 0% de humedad del ambiente y 110°C de temperatura. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.6.2 Agua evaporable

El agua restante que existe en la pasta, es agua que puede evaporarse a 0% de humedad relativa del ambiente y 110°C de temperatura, pero no se encuentra libre en su totalidad. El gel de cemento cuya característica sobresaliente es un enorme desarrollo superficial interno, ejerce atracción molecular sobre una parte del agua evaporable y la mantiene atraída. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.6.3 Agua de adsorción

Es una capa molecular de agua que se halla fuertemente adherida a las superficies del gel por fuerzas intermoleculares de atracción. El agua adsorbida, cuyas distancias con respecto a la superficie del gel están en el intervalo de 0 a 30 Å (un Angstrom Å = 0,0000001 mm), es llamada también "agua activa" por su influencia en el comportamiento del concreto bajo carga. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.6.4 Agua capilar

Es el agua que ocupa los poros capilares de la pasta, a distancias que suelen estar comprendidas en el intervalo de 30 a  $10^7$  Å, de manera que parte de ella está sujeta (aunque débilmente) a la influencia de las fuerzas de superficie del gel. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.6.5 Agua libre

Es la que se encuentra fuera de la influencia de las fuerzas de superficie, de tal modo que tiene completa movilidad y puede evaporarse con facilidad. Con cierta aproximación, la porción de agua no vaporable que existe en la pasta puede ser una medida de grado de hidratación que ha alcanzado. Durante el proceso de hidratación de los granos de cemento produce una especie de desplazamiento de agua del exterior al interior de éstos. Ya que lo primero que se hidrata es la superficie, se forma así en la periferia de cada grano una

estructura hidratada o gel. Para que la hidratación continúe hacia el núcleo de los granos es necesaria la aportación de agua que se obtiene de los poros capilares y que a su vez es repuesta por una parte del agua libre. Mientras permanece vigente este suministro de agua, la hidratación del grano puede continuar hasta el final, suspendiéndose en el momento que dicho suministro se interrumpe. El agua que el cemento necesita para su completa hidratación representa, como término medio aproximado. Aunque las relaciones agua/cemento que suelen emplearse en las mezclas de concreto exceden este valor por mucho, esta situación no representa por sí misma una garantía de suministro permanente de agua para la total hidratación del cemento, sin tener que recurrir a una fuente de suministro adicional del exterior. Esto es lo que se conoce como agua de curado. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.6.6 Agua de curado

El curado puede definirse como el conjunto de condiciones necesarias para que la hidratación de la pasta evolucione sin interrupción hasta que todo el cemento se hidrate y el concreto alcance sus propiedades potenciales. Estas condiciones se refieren básicamente a la humedad y la temperatura. Por lo tanto, el agua de curado constituye el suministro adicional de agua para hidratar eficientemente el cemento. En primer lugar, este suministro adicional depende de la humedad del ambiente, ya que la evaporación del agua libre de la pasta ocurre con tanta mayor rapidez cuanto menor es la humedad relativa del ambiente. En segundo lugar, el agua y el cemento al mezclarse ocupan un espacio inicial que permanece constante y que tiende a ser llenado gradualmente por los productos de hidratación (gel). Como éstos desarrollan un volumen que es dos veces mayor que el del cemento original, resulta que con relaciones agua-cemento demasiado bajas puede no haber espacio suficiente en la pasta para acomodar todo el gel potencialmente desarrollable y la completa hidratación del cemento no llega a producirse por esta limitación. En tercer lugar, el agua químicamente combinada con el cemento (agua no evaporable) tiene una densidad mayor que el agua capilar. Esto significa que, en un momento dado, puede ser mayor el espacio que ha dejado libre en los poros capilares, que aquel con el que ha contribuido a formar el

gel. Si no existe aportación de agua exterior para suplir este déficit, la hidratación se vuelve más lenta, e incluso se detiene. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.6.7 Agua de mezclado

Casi cualquier agua natural que sea potable y que no tenga un sabor u olor pronunciado, se puede utilizar para producir concreto. Sin embargo, algunas aguas no potables pueden ser adecuadas para el concreto. (Polanco Rodríguez, 2012).

- ***Propiedades físicas y químicas del agua de mezclado***

Las impurezas excesivas en el agua no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también pueden ser causa de eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad volumétrica y una menor durabilidad.

El agua que contiene menos de 2,000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales generalmente puede ser utilizada de manera satisfactoria para elaborar concreto.

Los carbonatos y bicarbonatos de sodio y potasio tienen diferentes efectos en los tiempos de fraguado de cementos distintos. El carbonato de sodio puede causar fraguados muy rápidos, en tanto que los bicarbonatos pueden acelerar o retardar el fraguado. En concentraciones fuertes estas sales pueden reducir de manera significativa la resistencia del concreto. Cuando la suma de sales disueltas exceda 1,000 ppm, se deberán realizar pruebas para analizar su efecto sobre el tiempo de fraguado y sobre la resistencia a los 28 días. También se deberá considerar la posibilidad que se presenten reacciones álcali-agregado graves.

La inquietud respecto a un elevado contenido de cloruros en el agua de mezclado, se debe principalmente al posible efecto adverso que los iones de cloruro pudieran tener en la corrosión del acero de refuerzo, o de los torones de pre-esfuerzo. Los iones cloruro atacan la capa de óxido protectora formada en el acero por el medio químico altamente alcalino (pH 12.5) presente en el concreto. El nivel de iones cloruro solubles en el agua en el cual la corrosión del acero de refuerzo comienza en el concreto es de aproximadamente 0.15% del

peso del cemento. Del contenido total de ión cloruro en el concreto, sólo es soluble en el agua aproximadamente del 50 % al 85 %: el resto se combina químicamente en reacciones del cemento.

El Reglamento de construcción del American Concrete Institute, ACI 318, limita el contenido de ión cloruro soluble al agua en el concreto, a los siguientes porcentajes en peso del cemento:

- Concreto pre-esforzado. 0.06 %
- Concreto reforzado expuesto a cloruros 0.15 % durante su servicio.
- Concreto reforzado que vaya a estar seco 1.00% protegido contra la humedad durante su servicio.
- Otras construcciones de concreto reforzado 0.30 %

El interés respecto a un elevado contenido de sulfatos en el agua, se debe a las posibles reacciones expansivas y al deterioro por ataque de sulfatos, especialmente en aquellos lugares donde el concreto vaya a quedar expuesto a suelos o agua con contenidos elevados de sulfatos. Aunque se han empleado satisfactoriamente aguas que contenían 10,000 ppm de sulfato de sodio, el límite del producto químico sulfato, como  $\text{SO}_4$ , de 3,000 ppm, se deberá respetar a menos que se tomen precauciones especiales. (Polanco Rodríguez, 2012).

### **1.2.7 Agregados o áridos**

Los agregados también llamados áridos son aquellos materiales inertes, de forma granular, naturales o artificiales, que aglomerados por el cemento Portland en presencia de agua forman un todo compacto (piedra artificial), conocido como mortero o concreto.

Como agregados de las mezclas de mortero o concreto se pueden considerar, todos aquellos materiales que teniendo una resistencia propia suficiente (resistencia de la partícula), no perturben ni afecten desfavorablemente las propiedades y características de las mezclas y garanticen una adherencia suficiente con la pasta endurecida del cemento Portland. En general, la mayoría son materiales inertes, es decir, que no desarrollan ningún tipo de

reacciones con los demás componentes de las mezclas, especialmente con el cemento; sin embargo, existen algunos agregados cuya fracción más fina presenta actividad en virtud de sus propiedades hidráulicas colaborando con el desarrollo de la resistencia mecánica, tales como: las escorias de alto horno de las siderúrgicas, los materiales de origen volcánico en donde hay sílice activa, entre otros.

Pero hay algunos otros agregados, que presentan elementos nocivos o eventualmente inconvenientes que reaccionan afectando la estructura interna del concreto y su durabilidad, como, por ejemplo, los que presentan elementos sulfurados, los que contienen partículas pulverulentas más finas o aquellas que se encuentran en descomposición latente como algunas pizarras. (Polanco Rodríguez, 2012).

#### 1.2.7.1 Clasificación según su procedencia

De acuerdo con el origen de los agregados, según provengan de fuentes naturales o sean fabricados a partir de productos industriales, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- ***Agregados naturales***

Son todos aquellos que provienen de la explotación de fuentes naturales tales como depósitos de arrastres fluviales (arenas y gravas de río) o de glaciares (cantos rodados) y de canteras de diversas rocas y piedras naturales. Se pueden aprovechar en su granulación natural o triturándolos mecánicamente, según sea el caso, de acuerdo con las especificaciones requeridas. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Agregados artificiales***

Estos agregados se obtienen a partir de productos y procesos industriales tales como: arcillas expandidas, escorias de alto horno, Clinker, limaduras de hierro y otros. Por lo general estos agregados son más ligeros o pesados que los ordinarios. (Sánchez De Guzmán, 2001).

### 1.2.7.2 Propiedades físicas

- ***Granulometría***

La granulometría está definida como la distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Tamaño máximo***

El tamaño máximo del agregado se deriva del análisis granulométrico y está definido como la abertura del menor tamiz de la serie que permite el paso del 100% del material. En la práctica, lo que indica el tamaño máximo de un agregado es el tamaño de la partícula más grande que hay dentro de la masa de agregados, el cual debe ser compatible con las dimensiones y especificaciones de la estructura. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Tamaño máximo nominal***

Está definido como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más. En la práctica, lo que indica el tamaño máximo nominal es el tamaño promedio de partículas más grandes que hay dentro de la masa de agregado. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Textura***

Otra propiedad que corresponde intrínsecamente al agregado, pero que se deriva indirectamente de la roca madre, es la textura superficial, que también incide notablemente en las propiedades del concreto, especialmente en la adherencia entre las partículas del agregado y la pasta de cemento fraguado, y gobierna las condiciones de fluidez mientras la mezcla se encuentra en estado plástico. La clasificación de la textura superficial se basa en las características de la superficie de una partícula en términos de si es pulida, mate, suave o áspera, lo cual está ligado a la dureza, tamaño, forma y estructura de la roca original. En términos generales, se puede decir que es lisa (agregados redondeados) o áspera (agregados triturados). (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Porosidad y absorción***

La porosidad es muy importante en el comportamiento de los agregados dentro del concreto porque una partícula porosa es mucho menos dura que una partícula compacta o maciza, lo

cual afecta no sólo las propiedades mecánicas como la adherencia y la resistencia a compresión y flexión sino también propiedades de durabilidad como la resistencia al congelamiento y deshielo, estabilidad química, resistencia a la abrasión. La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, su continuidad (permeabilidad) y su volumen total. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.7.3 Gradación de los agregados

La distribución granulométrica de los agregados incide en la manejabilidad de una mezcla de concreto, debido a que un mal gradado de concreto presenta exceso de vacíos que deben ser llenados con pasta en el caso de la arena y con mortero en el caso del agregado grueso, para que la mezcla sea manejable y no quede porosa. Debe evitarse la utilización de arenas muy finas o muy gruesas, ya que con las primeras el requerimiento de agua es muy alto y fácilmente se segregan y con las segundas se obtienen mezclas muy ásperas y poco cohesivas.

Por lo general, para que las arenas proporcionen una adecuada manejabilidad, el valor del módulo de finura debe tener un límite inferior de 2.2 en arenas finas y un límite superior de 3.0 en arenas gruesas y, cumplir con la granulometría de la norma Icontec-174. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.7.4 Propiedades mecánicas

- ***Resistencia de las partículas de agregado***

La falla de un concreto está regida por las resistencias relativas del agregado, la pasta y de lo que se conoce como la interfase de adherencia. Por lo general, en los agregados naturales de peso normal (baja porosidad) sucede que las partículas tienen una resistencia superior a la de la pasta de cemento endurecida, por lo cual la resistencia a la compresión del concreto no se ve muy afectada por la resistencia del agregado a la compresión. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Tenacidad***

La tenacidad o resistencia a la falla por impacto, la cual tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, ya que si éstos son débiles ante las cargas de impacto se puede alterar su granulometría, aparte de indicar una baja calidad para ser utilizados en concreto. Depende del tipo de roca. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Adherencia***

Durante los procesos de fraguado y endurecimiento del concreto, los agregados se encuentran aglutinados por la pasta de cemento (cuya resistencia y rigidez varía con el tiempo y las condiciones ambientales) y se genera una interacción en la zona de contacto agregado-pasta, conocida con el nombre de adherencia. Esta adherencia se debe a fuerzas de origen físico-químico que ligan las partículas del agregado con la pasta. La adherencia juega un papel muy importante dentro de la masa de concreto, debido a que cuando esta interacción es lograda a través de una buena traba entre los agregados y la pasta, la resistencia del concreto es mayor.

La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y, en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a la flexión. Hoy en día no se conoce ningún método para medir la buena o mala adherencia de un agregado, pero es claro que ésta aumenta con la rugosidad superficial de las partículas. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Dureza***

Cuando el concreto va a estar sometido a desgaste por abrasión (pisos y carreteras), los agregados que se utilicen en su fabricación deben ser duros. La dureza es una propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia de los agregados. (Sánchez De Guzmán, 2001).

### **1.2.8 Pasta o pegante**

El término Pasta se refiere a la mezcla de cemento, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incluido) y aditivos (cuando son añadidos). (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.8.1 Formación de la pasta de cemento

En términos generales, puede decirse que la pasta de cemento se forma como consecuencia de las reacciones químicas del cemento con el agua. Dependiendo de la composición del cemento y de las condiciones de hidratación (temperatura, humedad, etc.), lo cual hace que la pasta sea un sistema dinámico que cambia con el tiempo, se forma un conjunto complejo de productos de hidratación. Los compuestos anhidros del cemento Portland reaccionan con agua dando origen a compuestos de dos categorías: compuestos cristalinos hidratados y gel.

En forma resumida, un grano de cemento, que tiene un diámetro medio cercano a 50 micras, después de cierto tiempo de estar en contacto con el agua, empieza a dar señales de actividad química en su superficie, ya que aparecen cristales que van creciendo lentamente y se forma una sustancia gelatinosa que los envuelve, llamada gel; este gel que se forma inicialmente se llama gel inestable por poseer un porcentaje muy elevado de agua, tanto que al cabo de poco tiempo la totalidad del agua disponible está transformada en gel. Los compuestos cristalinos necesitan agua para desarrollarse y por lo tanto la retiran del gel, el cual él medida que va perdiendo agua se transforma en gel estable, que en gran medida es responsable de las propiedades mecánicas de las pastas endurecidas. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.9 Mortero

Se refiere a la mezcla de pasta y agregado fino (arena), la cual es muy utilizada en la pega de ladrillos para hacer muros de mampostería o en el recubrimiento de éstos últimos, caso en el cual se le conoce como pañete, repello o revoque. (Sánchez De Guzmán, 2001).

##### 1.2.9.1 Tipos de morteros

Dentro de los morteros se pueden distinguir dos familias: los aéreos y los hidráulicos. Los primeros endurecen bajo la influencia del aire al perder agua por secado al aire y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación. Los hidráulicos, también llamados acuáticos, endurecen bajo agua, ya que, al igual que los cementos naturales, poseen en su composición constituyentes que se obtienen por calcinación de calizas impurificadas con sílice y alúmina

que le permiten desarrollar resistencias iniciales relativamente altas. Pero en general, de acuerdo con los materiales que compongan el mortero. (Sánchez De Guzmán, 2001). Se pueden encontrar los siguientes tipos:

- ***Morteros calcáreos***

La cal es un plastificante y ligador conocido desde la antigüedad, por lo que estas características hacen del mortero de cal el más manejable de los conocidos. Sin embargo, no pueden esperarse de él altas resistencias, debido a su baja velocidad de endurecimiento. Las cales aéreas más conocidas son la cal blanca y la cal dolomítica (cal gris). La arena en este caso en realidad constituye un material inerte cuyo objetivo principal es evitar el agrietamiento y contracción del mortero, para lo cual se recomienda que tenga partículas angulosas y esté libre de materia orgánica, piedras grandes, polvo y arcilla. Las proporciones cal-arena más usadas en morteros aéreos son 1:2 para pañetes (revoques) y 1:3 o 1:4 para mampostería simple; Si la proporción aumenta, el mortero es más magro y pierde ductilidad y trabajabilidad; y si el mortero es más graso, pueden ocurrir contracciones y agrietamientos no deseables, especialmente en pañetes. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Morteros de cal y cemento Portland***

Cuando se busca una gran trabajabilidad, buena retención de agua y altas resistencias iniciales, este tipo de mortero es aconsejable. Utilizando como base un mortero 1:3 se puede ir sustituyendo parte del cemento por cal. Estos morteros reciben el nombre de "Morteros de Cemento Rebajados" cuando el contenido de cemento es escaso. Las relaciones de mezclas más -usadas varían de 1:2:6 a 1:2: 10 (cemento: cal: arena). La cantidad de agua se encuentra dentro de amplios límites, de acuerdo con la composición del mortero y la consistencia deseada. Si el contenido de cemento es alto, las características serán alta resistencia y poco tiempo entre amasado y colocación; será más o menos trabajable y habrá contracción (3%) si está muy seco. Si el contenido de cal es alto, tendrá menos resistencia, será mayor el tiempo entre amasado y colocación, será más plástico y permeable, pero mostrará más retracción (9%). Si el contenido de arena es alto, la resistencia disminuirá considerablemente y será poco trabajable pero el mortero tendrá poca retracción. Para lograr las condiciones deseadas debe buscarse una combinación adecuada.

Los morteros hechos de cemento Portland y cal deben combinarse de tal manera que se aprovechen las propiedades adhesivas de la cal y las propiedades cohesivas del cemento Portland, siendo importante tener en cuenta que cada adición de cal incrementa la cantidad de agua de mezclado necesaria. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Morteros de cemento***

Cuando se requieren altas resistencias iniciales o resistencias elevadas, una vez el mortero ha endurecido, se pueden usar como aglomerantes los cementos naturales o los cementos Portland. Sus condiciones de trabajabilidad son variables de acuerdo con la proporción cemento: arena usada. La confección de este mortero, que es hidráulico, ha de efectuarse de un modo continuo, organizando un abastecimiento con arreglo al consumo de cada momento, de manera tal que entre el amasado y la colocación en obra haya el menor tiempo posible debido a lo rápido del fraguado del cemento. Por ello se acostumbra a mezclar en obra, primero el cemento y la arena y luego se añade el agua. El mortero de cemento está constituido por un esqueleto de granos de arena, tangentes entre sí. Con el cemento se pretende darle una soldadura perfecta de manera tal, que cada grano quede cubierto por una fina película de cemento. Como además el mortero deberá formar una masa homogénea y compacta, las características de la arena, tales como: la granulometría, módulo de finura, forma y textura de las partículas, deben ser las adecuadas para lograr un acomodamiento de partículas que permiten la mayor compacidad y el menor consumo de cemento. (Sánchez De Guzmán, 2001).

### **1.2.10 Concreto**

El concreto es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesto de cemento Portland y agua, une a los agregados (arena y grava o piedra triturada), para formar una masa semejante a una roca ya que la pasta endurece debido a la reacción química entre el cemento y el agua. (Polanco Rodríguez, 2012).

#### **1.2.10.1 Usos del Concreto**

Se utiliza para construir muchos tipos de estructuras, como autopistas, calles, puentes, túneles, presas, grandes edificios, pistas de aterrizaje, sistemas de riego y canalización,

rompeolas, embarcaderos y muelles, aceras, silos o bodegas, factorías, casas e incluso barcos. En la albañilería el concreto es utilizado también en forma de ladrillos o bloques.

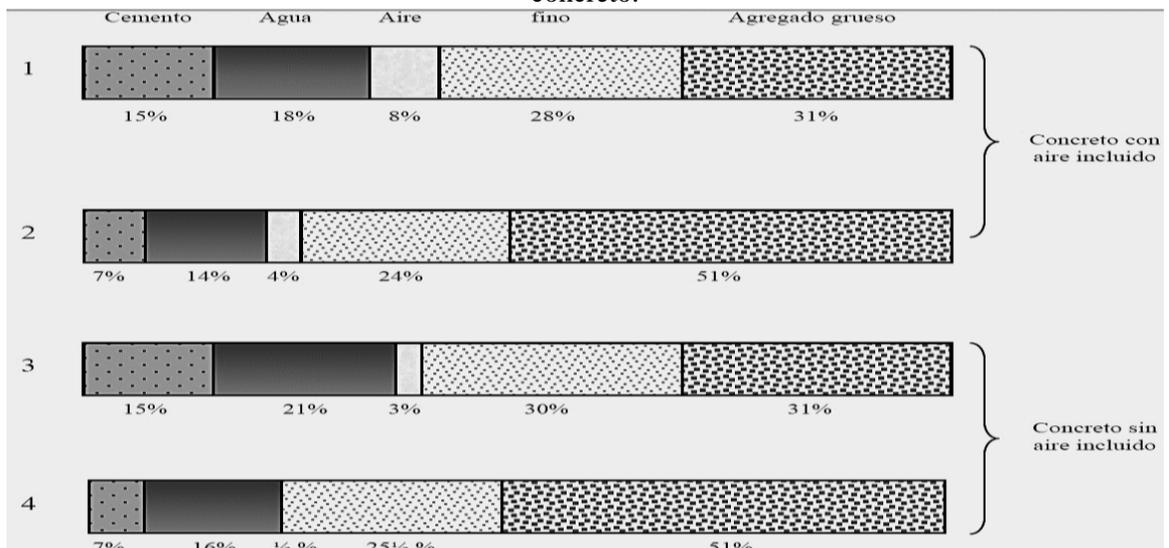
### 1.2.10.2 Ventajas del Concreto

- Resistencia a fuerzas de compresión elevadas.
- Bajo costo.
- Larga duración (En condiciones normales, el concreto se fortalece con el paso del tiempo).
- Puede moldearse de muchas formas.
- Presenta amplia variedad de texturas y colores.

### 1.2.10.3 Componentes básicos del concreto

Ordinariamente, la pasta constituye del 25 al 40 por ciento del volumen total del concreto. La ilustración 1 muestra que el volumen absoluto del cemento está comprendido usualmente entre el 7% y el 15% y el agua entre el 14% y el 21%. El contenido de aire en concretos con aire incluido puede llegar hasta el 8% del volumen del concreto, dependiendo del tamaño máximo del agregado grueso.

Ilustración 1: Variación de las proporciones en volumen absoluto de los materiales usados en el concreto.



Fuente: (Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto, 2012).

Las barras 1 y 3 representan mezclas ricas con agregados pequeños. Las barras 2 y 4 representan mezclas pobres con agregados grandes.

Como los agregados constituyen aproximadamente del 60% al 75% del volumen total del concreto, su selección es importante. Los agregados deben consistir en partículas con resistencia adecuada, así como resistencia a condiciones de exposición a la intemperie y no deben contener materiales que pudieran causar deterioro del concreto. Para tener un uso eficiente de la pasta de cemento y agua, es deseable contar con una granulometría continua de tamaños de partículas.

La calidad del concreto depende en gran medida de la calidad de la pasta. En un concreto elaborado adecuadamente, cada partícula de agregado está completamente cubierta con pasta, así como también todos los espacios entre partículas de agregado.

Para cualquier conjunto específico de materiales y de condiciones de curado, la cantidad de concreto endurecido está determinada por la cantidad de agua utilizada en relación con la cantidad de cemento. A continuación, se presenta algunas ventajas que se obtienen al reducir el contenido de agua:

- Se incrementa la resistencia a la compresión y a la flexión.
- Se tiene menor permeabilidad, y por ende mayor hermeticidad y menor absorción.
- Se incrementa la resistencia al intemperismo.
- Se logra una mejor unión entre capas sucesivas y entre el concreto y el esfuerzo.
- Se reducen las tendencias de agrietamientos por contracción.

Entre menos agua se utilice, se tendrá una mejor calidad de concreto, a condición que se pueda consolidar adecuadamente. Menores cantidades de agua de mezclado resultan en mezclas más rígidas; pero con vibración, aún las mezclas más rígidas pueden ser empleadas. Para una calidad dada de concreto, las mezclas más rígidas son las más económicas. Por lo tanto, la consolidación del concreto por vibración permite una mejora en la calidad del concreto y en la economía.

Las propiedades del concreto en estado fresco (plástico) y endurecido, se pueden modificar agregando aditivos al concreto, usualmente en forma líquida durante su dosificación. Los aditivos se usan comúnmente para (1) ajustar el tiempo de fraguado o endurecimiento, (2) reducir la demanda de agua, (3) aumentar la trabajabilidad, (4) incluir intencionalmente aire, y (5) ajustar otras propiedades del concreto.

Después de un proporcionamiento adecuado, así como, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado, el concreto endurecido se transforma en un material de construcción resistente, no combustible, durable, con resistencia al desgaste y prácticamente impermeable que requiere poco o nulo mantenimiento. El concreto también es un excelente material de construcción porque puede moldearse en una gran variedad de formas, colores y texturizados para ser usado en un número ilimitado de aplicaciones. (Polanco Rodríguez, 2012).

#### 1.2.10.4 Manejabilidad

Según el comité 211 de ACI, la manejabilidad, conocida también como trabajabilidad, se considera como aquella propiedad del concreto mediante la cual se determina su capacidad para ser colocado y consolidado apropiadamente y para ser terminado sin segregación dañina alguna. Sin embargo, algunos autores sostienen que establecer que la manejabilidad determina la facilidad de colocación y la resistencia a la segregación es dar una descripción muy vaga de esta importante propiedad del concreto. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.10.5 Consistencia

Es un término utilizado para caracterizar el estado plástico del concreto, que aunque está relacionada con el concepto de manejabilidad, no es su sinónimo. En términos generales, la consistencia se refiere a su estado de fluidez, es decir, qué tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla de concreto cuando se encuentra en estado plástico, por lo cual se dice que es el grado de humedad de la mezcla. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.10.6 Plasticidad

Se denomina como "plasticidad" a una consistencia del concreto tal que pueda ser fácilmente moldeado, pero que le permita al concreto fresco cambiar de forma lentamente si se saca el molde. Por tal razón, no pueden considerarse como mezclas de consistencia plástica ni las muy secas ni las muy fluidas. Para aclarar un poco estos conceptos, debe tenerse en cuenta que dentro de ciertos límites, las mezclas húmedas son más manejables que las mezclas secas, pero dos mezclas que tengan la misma consistencia no son igualmente manejables. Para que ello sea así, deben tener el mismo grado de plasticidad. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.10.7 Resistencia del concreto

- **Relación agua – cemento**

En términos generales, la resistencia del concreto se determina por la cantidad neta de agua utilizada por cantidad unitaria de cemento', para un conjunto dado de materiales y de condiciones. Esto es lo que se conoce hoy en día como la relación "agua-cemento", la cual está dada en peso. La resistencia de un concreto completamente compactado, a una edad dada, es inversa mente proporcional a la relación agua – cemento (la cual originalmente se expresaba en volumen). Para cuantificar esto, Abrams propuso la siguiente expresión de tipo exponencial:

$$\bar{R} = \frac{A}{B^{\alpha}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Dónde:

$\bar{R}$  es la resistencia media a la compresión en  $kg/cm^2$ , A y B son constantes empíricas que dependen de la calidad y tipo de cemento, las propiedades de los agregados, los aditivos, y las condiciones de ensayo.  $\alpha$  Es la relación agua-cemento en peso. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- **Fraguado del concreto**

La velocidad de endurecimiento es un factor que influye en la resistencia del concreto, se presenta al pasar del estado plástico al estado endurecido, bajo ciertas y determinadas condiciones de tiempo y temperatura (proceso de fraguado). Por tal motivo, la

determinación del tiempo de fraguado es importante para saber si es necesario utilizar aditivos que controlen la velocidad del fraguado (retardantes o acelerantes), con el fin de regular los tiempos de mezclado y transporte, de manera que no se vaya a ver afectada ni la manejabilidad ni la resistencia de la mezcla. El tiempo de fraguado es un valor arbitrario tomado durante el proceso de endurecimiento. El método más utilizado (ASTM C403) consiste en medir la resistencia a la penetración que ofrece una muestra de mortero (concreto tamizado por la malla No. 4) colocada en un recipiente, al hacer presión con una aguja circular de extremo plano, hasta que ésta se haya hundido 1 pulgada. Se utilizan unas seis agujas, con áreas variables entre 1 y 1/40 pulgadas cuadradas. Se dibuja una curva, de la cual es tomado el tiempo de "fraguado inicial" a una resistencia a la penetración de 35  $kg/cm^2$  (500 psi) y el tiempo de "fraguado final" a una resistencia a la penetración de 280  $kg/cm^2$  (4.000 psi). La temperatura, desde luego afecta notablemente el tiempo de fraguado, dependiendo de si la mezcla pierde o no calor de hidratación, por lo cual el proceso de adquisición de resistencia será más lento o no. (Sánchez De Guzmán, 2001).

- ***Medida de la resistencia a la compresión***

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado. La forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en  $kg/cm^2$  y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (p.s.i.). La equivalencia que hay entre los dos es que 1 p.s.i. es igual a 0.07  $kg/cm^2$ . Aunque hoy en día se ha acogido expresarla en Mega-Pascales (MPa), de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades. La forma de evaluar la resistencia del concreto es mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, para lo cual se toman muestras y se hacen especímenes para fallar, o no destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo. Para las primeras, se utilizan tres tipos de muestras: cilindros, cubos y prismas. Para las segundas hay diferentes sistemas. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.10.8 Diseño de mezclas

El proporcionamiento de mezclas de concreto o "Diseño de mezclas", es un proceso que consiste en la selección de los ingredientes disponibles (cemento, agregados, agua y aditivos) y la determinación de sus cantidades relativas para producir, tan económicamente como sea posible, concreto con el grado requerido de manejabilidad, que al endurecer a la velocidad apropiada adquiera las propiedades de resistencia, durabilidad, peso unitario, estabilidad de volumen y apariencia adecuadas. Estas proporciones dependen de las propiedades y características de los ingredientes usados, de las propiedades particulares del concreto especificado, y de las condiciones particulares bajo las cuales el concreto será producido y colocado. (Sánchez De Guzmán, 2001).

### 1.2.11 Ensayos

#### 1.2.11.1 Ensayo de asentamiento del concreto

El ensayo más ampliamente usado en todo el mundo, por su simplicidad y rapidez, es el ensayo de asentamiento, el cual mide la consistencia o fluidez de una mezcla fresca de concreto cuyo tamaño máximo de agregado grueso puede ser hasta de 50,8 mm (2"). Para hacer esta medición se usa un molde hecho en lámina metálica en forma de tronco de cono, fue desarrollado por Abrams, razón por la cual se le conoce con el nombre de cono de Abrams.

Este ensayo se encuentra especificado en la norma NTC 396 y se describe brevemente a continuación. Una vez que la muestra de concreto fresco ha sido correctamente seleccionada de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma NTC 454 (Hormigón Fresco - Toma de muestras), de manera que sea representativa de toda la masa, se procede de la siguiente manera. El molde se humedece y se coloca sobre una superficie plana, húmeda y no absorbente, con la abertura más pequeña hacia arriba. La superficie ideal es una placa metálica rígida, que haya sido colocada en el suelo y nivelada con un nivel de mano. Posteriormente el molde se presiona hacia abajo, cogiendo las agarraderas, con el objeto de que, al colocar la mezcla, ésta no salga por la parte inferior de molde. El cono se

llena en tres capas, cada una con aproximadamente una tercera parte del "volumen" total del molde, es decir, que la primera capa tendrá una altura aproximada de 6.5 cm, la segunda llegará hasta 15,5 cm y en la tercera se apilará concreto sobre el molde: Cada capa se apisona 25 veces con una varilla lisa de 16 mm (5/8") de diámetro y más o menos 60 cm de longitud, con uno de sus extremos redondeado. La introducción de la varilla se debe hacer en diferentes sitios de la superficie con el fin de que la compactación se distribuya uniformemente sobre la sección transversal. La primera capa se compacta a través de todo su espesor, en tanto que la segunda y la tercera se compactan de manera que la varilla penetre ligeramente (como máximo 2.5 cm) (1") en la capa inmediatamente inferior.

En algunas ocasiones al compactar la tercera capa, el concreto se asienta por debajo del borde superior, debido al acomodamiento y consolidación de las partículas, por tal motivo es necesario completar con más mezcla para que en todo momento haya concreto sobre el molde. Al término de esta operación debe alisarse a ras de la superficie con la varilla, un palustre o cualquier otro instrumento apropiado. A continuación, se quita la mezcla que cayó al suelo alrededor de la base del molde, dejando limpia la zona que lo rodea. Inmediatamente después se retira el molde, alzándolo cuidadosamente en dirección vertical, en un lapso de 5 a 10 segundos, sin movimientos circulares o laterales y sin tocar la mezcla con el molde cuando éste se haya separado del concreto fresco. Al faltarle apoyo, el concreto se asentará, de ahí el nombre del ensayo.

El tiempo es un factor importante en la prueba. Este ensayo debe iniciarse dentro de los 5 minutos siguientes al muestreo y debe ser completado a los 2 minutos y 30 segundos de haberse iniciado. La diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro original de la base superior del concreto abatido se llama asentamiento y se mide con una aproximación de 5 mm. Si el concreto se desmorona o se desprende hacia un lado, el ensayo se debe rechazar y repetir con otra porción de la muestra. Si esta segunda muestra también se desploma o se parte, es probable que el concreto no tenga la plasticidad o la cohesión adecuada, y que no sea aplicable el ensayo de asentamiento, ya que esta prueba es sensible únicamente a las mezclas plásticas y trabajables cuyos valores de "asentamiento

están aproximadamente entre 2.5 cm (1 ") Y 17.5 cm (7"). Por lo tanto, para mezclas muy ásperas, como las que tienen exceso de agregado grueso, o con agregados muy angulares, o con excesos de lajas, no se debe emplear.

El ensayo de asentamiento debe considerarse como un medio para determinar si están bien proporcionadas las cantidades de agua y de otros materiales empleados en la mezcla, debido a que este ensayo puede reflejar cambios en la granulometría de los agregados, en las propiedades del cemento o de los aditivos, en la cantidad de aire incluido y en la temperatura. Así pues, el resultado del ensayo es un indicativo de las variaciones que puede sufrir la mezcla durante el tiempo de su producción. Finalmente, la consistencia o capacidad de fluidez de una mezcla fresca de concreto, medida a través del asentamiento, está relacionada con la manejabilidad, es decir, con la facilidad para colocar, consolidar y terminar dentro de una estructura, pero se debe tener en cuenta que no es una medida directa de ésta. (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.11.2 Ensayo a compresión de cilindros de concreto

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en  $\text{kg/cm}^2$  y con alguna frecuencia  $\text{lb/pulg}^2$ (psi). La equivalencia que hay entre los dos es que 1 psi es igual a  $0,07\text{kg/cm}^2$ . Aunque hoy en día se ha acogido expresarla en MPa de acuerdo con el sistema internacional de unidades. La forma de evaluar la resistencia del concreto es mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo. Para las primeras se utilizan tres tipos de muestras: cilindros, cubos y prismas. Para las segundas hay diferentes sistemas. (Blanco Urruchurtu, 2008).

### 1.2.11.3 Como realizar la prueba de resistencia del concreto.

Los cilindros para pruebas de aceptación deben tener un tamaño de (15x30cm), las probetas más pequeñas tienden a ser más fáciles de elaborar y manipular en campo y en laboratorio. El diámetro del cilindro utilizado debe ser como mínimo tres veces el tamaño máximo nominal del agregado grueso que se emplee en el concreto.

Con el fin de conseguir una distribución uniforme de la carga, generalmente los cilindros se cabecean con mortero azufre (ASTM C617) o con almohadillas (ASTM C1231). El cabeceo de azufre se debe aplicar como mínimo dos horas antes y preferiblemente un día antes de la prueba.

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

Los extremos de las probetas no deben presentar desviación con respecto a la perpendicularidad del eje del cilindro en más de 0.5% y en los extremos deben hallarse planos dentro de un margen de 0.002 pulgadas. (Blanco Urruchurtu, 2008).

### 1.2.11.4 Ensayo de flexión

La resistencia a flexión del concreto se determina ensayando vigas de sección cuadrada de 500 mm de longitud por 150 mm de lado, elaboradas y curadas de acuerdo con las normas ASTM C-192 y C-31. El ensayo descrito en la norma ASTM C-78 consiste en apoyar las vigas a 2.5 cm como mínimo de sus extremos, con una luz de 45 cm y cargarlas en dos puntos situados en los tercios medios de la luz. El esfuerzo máximo de flexión se denomina módulo de rotura ( $MR$ ) y se calcula según la ecuación 3, cuando la falla ocurre dentro del tercio medio de la luz libre de la viga.

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad \text{Ec.(3)}$$

Donde

$MR$  = módulo de rotura del concreto, en  $kg/cm^2$

$P$  = carga máxima aplicada en  $kg$

$L$  = luz libre entre apoyos en  $cm$

$b$  = ancho de la viga en  $cm$

$d$  = altura de la viga en  $cm$

Si la falla ocurre por fuera del tercio medio de la viga, pero no está separada de él por más de una longitud equivalente al 5% de la luz-libre, el módulo de rotura debe ser calculado de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{3Pa}{bd^2} \quad \text{Ec.(4)}$$

Donde  $a$  = distancia entre línea de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo del eje longitudinal de la cara inferior de la viga, en  $cm$ .

Si la falla ocurre por fuera del tercio medio de la viga y a una distancia de él mayor del 5% de la luz libre de la viga, el ensayo se debe descartar. El módulo de rotura debe ser calculado con una precisión de  $0,35 \text{ kgJcm}^2$  (5 p.s.i.). Por otra parte, el ensayo descrito por la norma ASTM C-293 consiste en apoyar las vigas de igual forma que en la norma ASTM C-78, pero con aplicación de carga en el centro de la luz. En este caso, el módulo de rotura se calcula según la siguiente expresión:

$$MR = \frac{3PL}{2bd^2} \quad \text{Ec.(5)}$$

El valor obtenido por medio de estas fórmulas no coincide con la resistencia real a la tracción del concreto, principalmente porque al aplicarla se supone un comportamiento elástico del concreto hasta la falla por tracción, lo cual no es cierto. A pesar de lo anterior, el módulo de rotura del concreto es una medida útil para el diseño de pavimentos de concreto, puesto que las placas del pavimento trabajan principalmente a flexión; de ahí que, en estos casos, la calidad del concreto se especifique indicando su módulo de rotura.

#### 1.2.11.5 Ensayo de resistencia

Los cilindros se deben centrar en la máquina de ensayo de compresión y cargados hasta completar la ruptura. El régimen de carga con máquina hidráulica se debe mantener en un

rango de 0.15 a 0.35MPa/s durante la última mitad de la fase de carga. Se debe anotar el tipo de ruptura. La fractura cónica es un patrón común de ruptura.

La resistencia del concreto se calcula dividiendo la máxima carga soportada por la probeta para producir la fractura entre el área promedio de la sección. ASTM C 39 presenta los factores de corrección en caso de que la razón longitud diámetro del cilindro se halle entre 1.75 y 1.00, lo cual es poco común. Se someten a prueba por lo menos dos cilindros de la misma edad y se reporta la resistencia promedio como el resultado de la prueba, al intervalo más próximo de 0.1 MPa.

El técnico que efectúe la prueba debe anotar la fecha en que se recibieron las probetas en el laboratorio, la fecha de la prueba, la identificación de la probeta, el diámetro del cilindro, la edad de los cilindros de prueba, la máxima carga aplicada, el tipo de fractura y todo defecto que presenten los cilindros o su cabeceo. Si se mide, la masa de los cilindros también deberá quedar registrada.

La mayoría de las desviaciones con respecto a los procedimientos estándar para elaborar, curar y realizar el ensayo de las probetas de concreto resultan en una menor resistencia medida.

El rango entre los cilindros compañeros del mismo conjunto, y probados a la misma edad deberá ser en promedio de aproximadamente 2 a 3% de la resistencia promedio. Si la diferencia entre los dos cilindros compañeros sobrepasa con demasiada frecuencia 8%, o 9.5% para tres cilindros compañeros, se deberán evaluar y rectificar los procedimientos de ensayo en el laboratorio.

Los informes o reportes sobre las pruebas de resistencia a la compresión son una fuente valiosa de información para el equipo del proyecto para el proyecto actual. (Blanco Urruchurtu, 2008).

#### 1.2.11.6 Ensayo de cubos

El ensayo de cubos es menos generalizado que el de cilindros, pero muy utilizado en Europa, principalmente en Gran Bretaña y Alemania. En nuestro medio no son utilizados, pero a continuación se describe brevemente la norma BS- 1881, a manera de información.

Las muestras cúbicas se elaboran de manera similar a los cilindros, en moldes de 150 mm de arista, en tres capas que se compactan con no menos de 35 golpes y con una barra cuadrada de acero, de 26 mm de arista. Después de dar acabado a la superficie superior del cubo por medio de llana, el cubo se almacena y se deja en reposo durante 24 horas, a una temperatura de 18 a 22°C y con una humedad relativa del 90%; al final de este período se retira el molde y se procede al curado en agua a una temperatura de 19 a 21°C. En la prueba de compresión, la posición del cubo es perpendicular a la que tiene durante su preparación, con lo cual se evita el cabeceo del espécimen debido a que la cara de aplicación de carga sí es plana por la pared del molde. En este caso, el nivel de precisión es de  $5 \text{ kg/cm}^2$ . (Sánchez De Guzmán, 2001).

#### 1.2.11.7 Consistencia normal

Los cementos Portland pueden diferir entre sí en cuanto al requerimiento de agua y la diferencia es aún mayor en cementos Portland con adiciones, los cuales tienen requerimientos de agua más altos que los cementos normales, por su mayor superficie específica.

La cantidad de agua que se le agrega al cemento le comunica una determinada fluidez, la cual aumenta al incrementarse el contenido de agua. Existe una determinada fluidez para la cual debe agregarse cierta cantidad de agua. Esta fluidez es lo que se llama consistencia normal. Originalmente se pensaba que el contenido de agua necesaria para obtener una pasta de consistencia normal, representaba no sólo el requerimiento de agua para una pasta de cemento determinada sino también para un concreto que estuviera hecho de ese cemento. Sin embargo, esto no es así, debido a que por ejemplo el contenido de agua de una pasta de consistencia normal es mayor en cemento fino, pero, por el contrario, un aumento

en la finura del cemento mejorará la trabajabilidad de una mezcla de concreto. La razón de esta paradoja es que los resultados de las pruebas de consistencia de la pasta de cemento y de la trabajabilidad en el concreto establecen propiedades diferentes de la pasta fresca. En la primera, se mide viscosidad y en la segunda capacidad de lubricación.

Adicionalmente, el aire que se encuentra en forma accidental afecta la trabajabilidad de la pasta de cemento y los cementos de diferente finura pueden contener distintas cantidades de aire. De tal manera que los valores encontrados en un ensayo de consistencia normal no se utilizan para el control de calidad del cemento y, por eso las normas no indican valores mínimos o máximos. El contenido de agua de una pasta normal se expresa como porcentaje en peso del cemento seco y suele variar entre 23 % y 33 %, dependiendo de las características del cemento. La consistencia normal es una característica que se puede considerar complementaria de otros ensayos que sí tienen relación directa con la calidad del cemento, como son la determinación de los tiempos de fraguado y la estabilidad de volumen, los cuales se estudiarán más adelante. La consistencia de una pasta de cemento se mide por medio del aparato de Vicat, el procedimiento de ensayo se encuentra descrito en la norma NTC – 110. El ensayo consiste en agregar un volumen conocido de agua a 500 g de cemento, que se amasan y colocan en un molde troncocónico. Enseguida, se pone la aguja de 10 mm de diámetro en contacto con la superficie superior de la pasta y se suelta. Por la acción de su propio peso (300 g), la aguja penetra en la pasta y la profundidad de penetración depende de la consistencia de la pasta. Si la penetración es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , después de 30 segundos de haber soltado la aguja, se considera que la pasta tiene consistencia normal. (Sánchez De Guzmán, 2001).

## 2 JUSTIFICACIÓN

En la industria de la construcción a nivel mundial el concreto ocupa una parte muy importante, dadas sus características de resistencia en cuanto a una mejor estabilidad estructural, versatilidad a la hora de moldearse en distintas formas de acuerdo a las necesidades de construcción, durabilidad para asegurar un buen comportamiento a largo plazo y su economía que es un aspecto de vital importancia. Al plantear su importancia a nivel mundial, inmediatamente se genera un interés por mejorar las características que lo renombran, de cierto modo que se obtengan resultados óptimos que superen las características presentes en la mezcla convencional de cemento, agua y agregados finos y gruesos, que puedan ser aplicados a la construcción.

La propuesta de un nuevo concreto partiendo del residuo agroindustrial de la palma africana, cuyas propiedades principales sean provechosas en la industria de la construcción, podría disminuir los costos de fabricación del concreto, lo que provocaría un aumento del uso del concreto tanto para la clase media como para las grandes empresas constructoras, también se podría ver afectada positivamente la disposición inicial del residuo proveniente de las industrias aceiteras al convertirse en un material de construcción.

En Colombia se han desarrollado investigaciones y estudios relacionados con el aprovechamiento de residuos agroindustriales, más específicamente un estudio realizado en la Universidad Corporativa de Colombia conocido con el nombre de “*APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE LA PALMA AFRICANA*” por Msc, Sandra Patricia Reyes Ortiz y el estudiante Julio Alberto Ortiz, donde se utilizaron materiales presentes en el departamento del Meta, y las cenizas fueron extraídas de las calderas de la industria Aceites Morichal S.A. Estas fueron utilizadas, por una parte, como sustituto del cemento y por otra como sustituto de la arena, teniendo en cuenta las normas técnicas vigentes de la época. (Reyes Ortiz & Ortiz, 2009).

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente estudio utilizó materiales presentes en el departamento de Bolívar, como la arena lavada extraída en el municipio de Bayunca y cemento Portland obtenido en Cartagena Bolívar, esto tratando de que el estudio sea propio a las condiciones del departamento y para prevenir futuras consecuencias en el mismo, como contaminación de fuentes hídricas, suelos y aire, así como la deforestación y el aumento de la pobreza en poblaciones vulnerables, con el fin de disminuir las afectaciones por el mal manejo y el depósito del residuo agroindustrial, por lo tanto, se usaron cenizas provenientes de la calcinación del residuo agroindustrial conseguido en las industrias aceiteras ubicadas en el municipio de María la Baja.

Los ensayos fueron realizados en los laboratorios instalados en la Universidad de Cartagena, también se logró que el procedimiento experimental fuera la utilización de la ceniza como adición a la mezcla de mortero y hormigón más no como sustitución de alguno de sus compuestos. Al tener diferencias como las nombradas anteriormente y agregando las condiciones geográficas, se tiene que el estudio planteado es diferente a los pocos realizados en Colombia, por lo que existió la motivación de conocer si los resultados esperados serían provechosos para la industria de la construcción, teniendo así un margen más amplio en cuanto a la utilización de éstos residuos provenientes de las industrias aceiteras del municipio de María la Baja.

Estos ensayos se llevaron a cabo de una forma cómoda, ya que el material se pudo conseguir fácilmente en las instalaciones industriales de la empresa Oleoflores S.A.S. por ser un residuo, por lo tanto, se tuvo acceso a todos y cada uno de los materiales a emplear en la ejecución de los ensayos, así como también se contó con los equipos de realización de los mismos. Esto conllevó a que, a la hora de realizar el estudio, los ensayos, la toma de muestras y resultados, el aspecto económico no fuese cuantioso, resaltando igual que no se generó un producto con valor agregado, sino que se generaron acciones de protección ambiental, los costos fueron mínimos obteniendo así un bajo costo de realización general.

Este proyecto trajo consigo consecuencias positivas para la Universidad de Cartagena, puesto que atestigua que la institución cuenta con una planta docente y estudiantil capaz de realizar estudios que contribuyan al campo investigativo correspondiente a la ingeniería civil innovando cada día más en los procesos o temáticas investigadas, estando así a la vanguardia en temas de actualidad.

### **3 OBJETIVOS**

#### **3.1 OBJETIVO GENERAL**

Estudiar la influencia de la adición del cuesco desmineralizado de la palma africana en el mortero y el hormigón realizando un análisis comparativo de las propiedades mecánicas con y sin la adición del material desmineralizado, con el fin de evaluar su uso en el sector de la construcción y resolver en cierta medida la disposición final de este residuo agroindustrial.

#### **3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Elaborar especímenes a ensayar para mortero y hormigón con sus respectivas adiciones y especificaciones
- Realizar los ensayos correspondientes a especímenes de mortero y hormigón.
- Identificar el comportamiento que proporciona la adición de ceniza a las mezclas de mortero y hormigón en sus propiedades mecánicas.

## **4 ALCANCE**

### **4.1 ESPACIAL**

Este proyecto se realizó en Colombia en el departamento de Bolívar, en la jurisdicción del municipio de Cartagena, cuyas coordenadas geográficas son 10°23'17.08" Latitud Norte, 75°31'8.26" Longitud Oeste. Este municipio posee una superficie de 709.1 Km<sup>2</sup>, con una población de 978.600 habitantes, su temperatura media es de 28°C y tiene una altitud de 2 msnm. Los ensayos de laboratorio se realizaron en la Universidad de Cartagena sede Piedra de Bolívar, en el laboratorio de Geotecnia y materiales y en un laboratorio por fuera de las instalaciones universitarias, en el barrio Los Tamarindos.

### **4.2 TEMPORAL**

Este proyecto se realizó entre los meses de octubre de 2015 y abril de 2016 teniendo así una duración de 6 meses. Para definir las fechas en las cuales se realizaron los estudios, se implementó el uso de un cronograma de actividades.

### **4.3 CONCEPTUAL**

La presente investigación tuvo énfasis en la problemática ambiental ocasionada por la disposición inadecuada de los residuos provenientes de la producción de aceite de palma africana en el municipio de María la Baja y cómo puede afectar el manejo de éste residuo las propiedades mecánicas del mortero y el hormigón. A lo largo de la investigación se presentaron distintas variables como la resistencia, consistencia, el tiempo, entre otros, cuyo uso conllevó a resultados y posteriormente a conclusiones investigativas.

#### **4.4 RESULTADOS**

Los resultados de la presente investigación ofrecen solución a la disposición del residuo agroindustrial proveniente de la palma africana, así como su aplicación en la industria de la construcción, demostrando por medio de los análisis de resultados que la utilización de este residuo en la industria constructiva colaboró con la solución a la actual problemática ambiental.

#### **4.5 PRODUCTO FINAL A ENTREGAR**

El producto final a entregar es un documento en el que se consignan los resultados y análisis realizados que se obtuvieron en los distintos ensayos de laboratorio, con los cuales se puede comprobar el comportamiento negativo o positivo que le genera el uso de este tipo de residuo agroindustrial como aditivos al mortero y hormigón en cuanto a niveles de resistencia y reducción de contaminantes.

#### **4.6 PRODUCTOS COMPLEMENTARIOS**

El producto complementario son las recomendaciones que servirán como fuente de información para investigaciones futuras.

#### **4.7 LIMITACIONES**

- ✓ No se realizó análisis de costos.
- ✓ No se tuvieron en cuenta aspectos ambientales como temperatura y humedad.
- ✓ Las cenizas no se usaron como sustitutos de los materiales de preparación de las mezclas sino como adiciones.
- ✓ No se realizaron ensayos ajenos a los descritos en el documento de investigación.
- ✓ Se realizaron únicamente ensayos de 5 % y 10 % de adición de ceniza.

## **5 METODOLOGIA**

### **5.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN**

Cuando se va a resolver un problema en forma científica, es muy conveniente tener un conocimiento detallado de los posibles tipos de investigación que se pueden seguir. Este conocimiento hace posible evitar equivocaciones en la elección del método adecuado para un procedimiento específico. Conviene anotar que los tipos de investigación difícilmente se presentan puros; generalmente se combinan entre sí y obedecen sistemáticamente a la aplicación de la investigación. (Tamayo y Tamayo, 2003)

La investigación realizada es de tipo experimental, ya que se evaluó el modo en que se ven afectadas las propiedades mecánicas del mortero y el hormigón, al adicionarse cenizas en ciertas proporciones, por medio de ensayos de laboratorio, toma de muestras, análisis de resultados y conclusiones. Todo esto con el fin de visualizar su uso en el sector de la construcción y resolver en cierta medida la disposición final de este residuo agroindustrial.

### **5.2 TECNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE DATOS**

La técnica para la recolección de datos es el procedimiento o forma particular de obtener datos o información, estos datos pueden ser recuperados, procesados, analizados e interpretados posteriormente, a lo que se le denomina instrumento; para esta investigación la información teórica fue obtenida en bases de datos como Science Direct, revistas científicas, trabajos de grado y libros, entre otros. Para la parte experimental la información se obtuvo a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio tales como: ensayo de consistencia normal, fraguado, resistencia a la compresión y flexión por parte del mortero y los ensayos de SLUMP, resistencia a la compresión y flexión por parte del hormigón, también se tomó información encontrada en las normas de ensayo de materiales INVIAS-AASHTO.

### **5.2.1 Fuentes primarias**

La información fue tomada de los datos arrojados en los distintos ensayos de laboratorio realizados, los cuales reflejaron las posibles variaciones que se presentaron en las mezclas durante y posteriormente a su tiempo de producción.

### **5.2.2 Fuentes secundarias**

La revisión bibliográfica realizada previamente a la ejecución del proyecto fue sin lugar a dudas de colosal importancia, funcionó como base teórica para analizar los datos y resultados que fueron obtenidos, así como el procedimiento seleccionado y las conclusiones que se dieron, funcionando como guía para el desarrollo de los ensayos, bien sea artículos, las normas de ensayo de materiales, tesis de pregrado, maestría y doctorados, así como documentos de páginas webs, blogs y libros. Por este motivo la recolección de información fue muy importante en la investigación, puesto que fue provechoso relacionar con resultados de distintos estudios obtenidos anteriormente y conocer valores y rangos aproximados de los datos a manipular.

## **5.3 TECNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS DATOS**

### **5.3.1 Variables**

#### **5.3.1.1 Variables independientes**

El periodo de resistencia y el porcentaje en peso del residuo desmineralizado de la palma africana como adición, fueron definidas como variables independientes. En la tabla 1 se muestra su identificación, como también su indicador. Los niveles considerados fueron 7 y 28 días para el periodo de resistencia; y los porcentajes de adición en peso del residuo desmineralizado de la palma africana fueron considerados en 3 niveles 0% 5% y 10%.

Tabla 1: Variables independientes

Tipo de variable	Variable	Definición	Indicador	Nomenclatura
Variable independiente	Periodo de tiempo	Tiempo en el que se mide la resistencia del concreto	Días	Días
	Dosificaciones	Relación de componentes de mortero y hormigón	-	-
	Adición en porcentaje	Cantidad de residuo que se adiciona	Kilogramos	Kg

Fuente: Autor, 2015

### 5.3.1.2 Variables dependientes

Las variables dependientes, las cuales son mostradas en la tabla 2, son la resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción indirecta, ya que estas dependen del periodo de resistencia y del porcentaje de sustitución.

Tabla 2: Variables dependientes

Tipo de variable	Variable	Definición	Indicador	Nomenclatura
Variable dependiente	Resistencia a la compresión	Máximo esfuerzo que puede soportar un material bajo una carga de deformación	<i>Pounds per square inch</i> (libra por pulgada cuadrada)	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
	Resistencia a la flexión	Máximo esfuerzo que puede soportar un material bajo una carga de deformación	Pounds per square inch (libra por pulgada cuadrada)	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
	Resistencia a la tracción indirecta	Máximo esfuerzo que intenta estirar un cuerpo antes de romperse	Pounds per square inch (libra por pulgada cuadrada)	psi (lbf/in <sup>2</sup> )
	Consistencia normal	Cantidad de agua necesaria para que la pasta de cemento alcance una fluidez óptima y una plasticidad ideal	Porcentaje	%

	Tiempo de fraguado	Tiempo de endurecimiento de la pasta de mortero	Minutos	Min
	Fluidez	medida de la consistencia de la pasta de cemento	Porcentaje	%
	Asentamiento	Facilidad de trabajo o consistencia del hormigón	Centímetros	Cm

Fuente: Autor, 2015.

Por ser un estudio que puede ser abordado desde distintos puntos, cabe resaltar que en la presente investigación el procedimiento experimental partió de la última parte del proceso de desmineralización que consiste en la pulverización del residuo proveniente de la producción de aceite de la industria Oleoflores S.A.S del Municipio de María la Baja, posteriormente fue dividido en dos partes: una que utilizó las cenizas como adición a la mezcla en la elaboración del mortero y una segunda parte que utilizó las cenizas como adición a la mezcla para la elaboración del hormigón. La metodología depende totalmente de los tipos de ensayos realizados al mortero y al hormigón, teniendo en cuenta las normativas vigentes y las orientaciones o indicaciones respectivas de cada ensayo.

### **5.3.2 Desmineralización del residuo agroindustrial de la palma africana**

El residuo agroindustrial de la palma africana, fue entregado por parte de la industria Oleoflores S.A.S. calcinado, por lo tanto, se pulverizó en una máquina de los ángeles y posteriormente se realizó un proceso granulométrico donde la ceniza a utilizar fue la que pasó por el tamiz número 100.

### **5.3.3 Cenizas de residuo agroindustrial proveniente de la palma africana como adición a la mezcla de mortero**

A continuación, se presentan los procedimientos realizados y los ensayos correspondientes al mortero.

#### 5.3.3.1 Consistencia normal del cemento

El ensayo correspondiente a la consistencia normal del cemento se realizó basado en las especificaciones dictadas en la norma I.N.V. E – 305 – 07 (ver Anexo A). Las cenizas fueron adicionadas en porcentajes de 0% 5% y 10% en la preparación de la pasta, se tomaron los datos arrojados por los ensayos para posteriormente realizar un análisis comparativo de las mezclas con los distintos porcentajes de adición.

#### 5.3.3.2 Tiempo de fraguado del cemento por el método del aparato de Vicat

Posteriormente al ensayo de consistencia normal, se realizó el ensayo correspondiente al tiempo de fraguado del cemento teniendo como guía la norma I.N.V. E – 305 – 07 (ver Anexo A).

#### 5.3.3.3 Ensayo de resistencia a la compresión de morteros

El procedimiento experimental correspondiente al ensayo de compresión de morteros se realizó teniendo como guía la norma I.N.V. E – 323 – 07 (ver Anexo A).

Para los distintos ensayos de resistencia en el mortero se elaboraron cubos, en el procedimiento de preparación de la mezcla se adicionó la ceniza teniendo en cuenta los porcentajes de 0% 5% y 10% con respecto al peso del cemento. En la tabla 3 se muestra la cantidad de especímenes a elaborar para la realización de los ensayos de laboratorio.

Tabla 3. Número de cubos a elaborar para ensayar a compresión en el mortero.

Porcentajes	Compresión (cubos)	
	14 días	28 días
0%	3	3
5%	3	3
10%	3	3
<b>Total cubos</b>		<b>18</b>

Fuente: Autor, 2015

### 5.3.4 Cenizas de residuo agroindustrial proveniente de la palma africana como adición a la mezcla de hormigón

A continuación, se presentan los procedimientos utilizados para realizar los ensayos correspondientes al hormigón con sus respectivas normas:

#### 5.3.4.1 Asentamiento del concreto (SLUMP)

El ensayo correspondiente al asentamiento del concreto se ejecutó teniendo en cuenta las especificaciones encontradas en la norma I.N.V. E – 404 – 07 (ver Anexo B). La ceniza fue adicionada en la preparación de la mezcla en porcentajes de 0% 5% y 10% con relación al peso del cemento.

Para los distintos ensayos de resistencia en el hormigón se elaboraron cilindros y viguetas, en el procedimiento de preparación de la mezcla fue adicionada la ceniza teniendo en cuenta los porcentajes de 0% 5% y 10% con respecto al peso del cemento. En la tabla 4 se muestra la cantidad de especímenes elaborados para la realización de los ensayos de laboratorio.

Tabla 4. Número de cilindros y viguetas a elaborar para ensayar a compresión, tracción y flexión en el hormigón

Porcentajes	Compresión y tracción (cilindros)			Flexión (viguetas)			Tracción (cilindros)
	7 días	14 días	28 días	7 días	14 días	28 días	28 días
0%	3	3	3	3	3	3	3
5%	3	3	3	3	3	3	3
10%	3	3	3	3	3	3	3
<b>Total cilindros</b>							<b>36</b>
<b>Total viguetas</b>							<b>27</b>

Fuente: Autor, 2015

#### 5.3.4.2 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto

El procedimiento experimental para determinar la resistencia a la compresión se llevó a cabo teniendo en cuenta las especificaciones dictadas en la norma I.N.V. E – 410 – 07 (ver Anexo B).

#### 5.3.4.3 Ensayo de resistencia a la flexión

El procedimiento experimental para determinar la resistencia a la flexión se llevó a cabo teniendo en cuenta las especificaciones dictadas en la norma I.N.V. E – 410 – 07 (ver Anexo B).

#### 5.3.4.4 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta de cilindros de concreto

El procedimiento experimental para determinar la resistencia a la tracción indirecta se llevó a cabo teniendo en cuenta las especificaciones dictadas en la norma I.N.V.E. – 411 – 07 (ver Anexo B).

## **6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **6.1 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES ENSAYADOS PARA MORTEROS Y HORMIGONES**

Para la elaboración de los especímenes de morteros y hormigones se adicionaron porcentajes de ceniza de 0 % 5 % y 10 % de acuerdo al peso del cemento.

### **6.2 ENSAYOS CORRESPONDIENTES A ESPECÍMENES DE MORTERO Y HORMIGÓN**

#### **6.2.1 Ensayos para Mortero**

##### **6.2.1.1 Ensayo de consistencia normal**

Se tomaron 500 gr de cemento Portland y de acuerdo a la norma I.N.V. E – 305 – 07 (ver Anexo A), se adicionaron diferentes cantidades de agua con el fin de que el émbolo penetrara 10 mm. Para cada uno de los porcentajes de ceniza se realizó el mismo procedimiento, adicionando la cantidad respectiva de ceniza 0 %, 5 % o 10% de 500 gr de cemento Portland, respectivamente. El volumen de agua inicial fue de 125 ml para cada una, al no cumplir con la consistencia normal se le fueron incrementando 5 ml al volumen de agua inicial. Se conoce que la consistencia normal óptima está entre 23 % y 33 %. En la ilustración 2 se muestra el aparato de Vicat con una de las muestras que se ensayaron y en la tabla 5 se pueden observar los datos obtenidos en el presente ensayo para cada adición y el respectivo volumen de agua adicionada.

Ilustración 2. Aparato de Vicat en ensayo de consistencia normal



Fuente: Autor, 2015

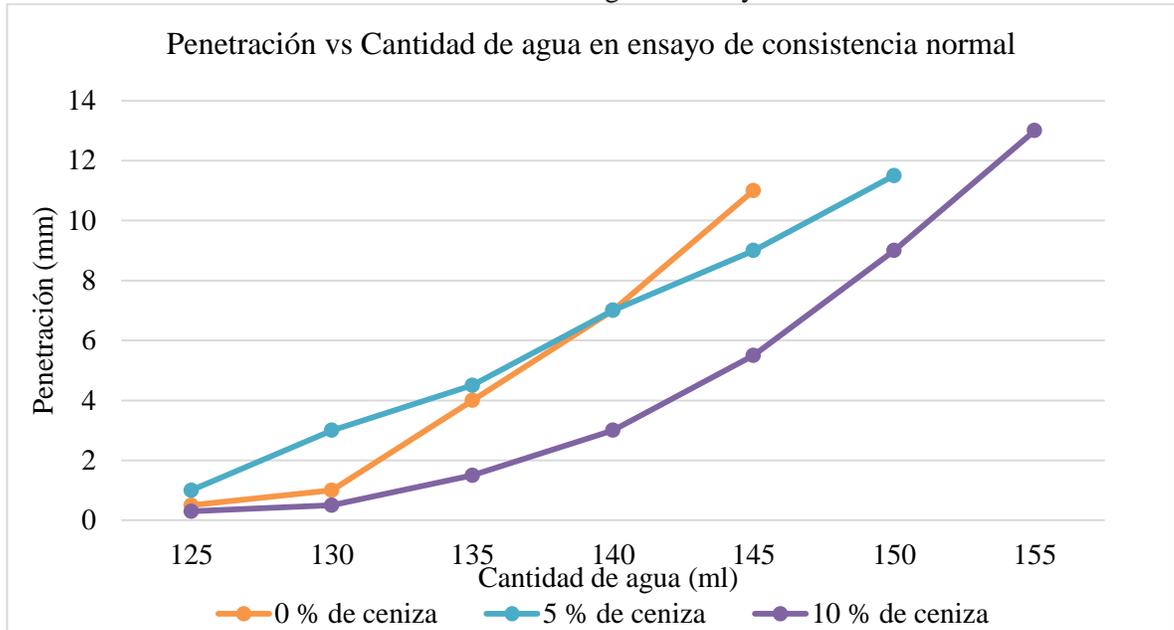
Tabla 5. Datos obtenidos del ensayo de consistencia normal

<b>Porcentaje de ceniza</b>	<b>Cantidad de agua (ml)</b>	<b>Penetración (mm)</b>
0 %	125	0,5
	130	1
	135	4
	140	7
	145	11
5 %	125	1
	130	3
	135	4.5
	140	7
	145	9
	150	11.5
10%	125	0.3
	130	0.5
	135	1.5
	140	3
	145	5.5
	150	9
	155	13

Fuente: Autor, 2015

A partir de los datos en la tabla 5 se construyó la gráfica 1 que muestra los datos de penetración y cantidad de agua de cada porcentaje al cumplir con el objetivo del ensayo, para su análisis y argumentación.

Gráfica 1. Penetración vs Cantidad de agua en ensayo de consistencia normal



Fuente: Autor, 2015

De acuerdo a la gráfica 1 se puede observar que la consistencia normal para 500 gr de cemento Portland fue de 29 % para la mezcla con 0 % de adición de ceniza, permitiendo una penetración de 11 mm y empleando 145 ml de agua, 30 % para la mezcla con 5 % de adición de ceniza, permitiendo una penetración de 11,5 mm y empleando 150 ml de agua y 31 % para la mezcla con 10 % de adición de ceniza, permitiendo una penetración de 13 mm y empleando 155 ml de agua.

#### 6.2.1.2 Tiempo de fraguado (método del aparato de Vicat)

A partir de la mezcla realizada en el ensayo de consistencia normal de acuerdo a la norma I.N.V. E – 305 – 07 (ver Anexo A), se colocó la muestra en el aparato de Vicat y a los 30 minutos se tomó la primera medida. Las siguientes medidas fueron tomadas cada 15 minutos. La tabla 6 muestra los datos obtenidos en el presente ensayo.

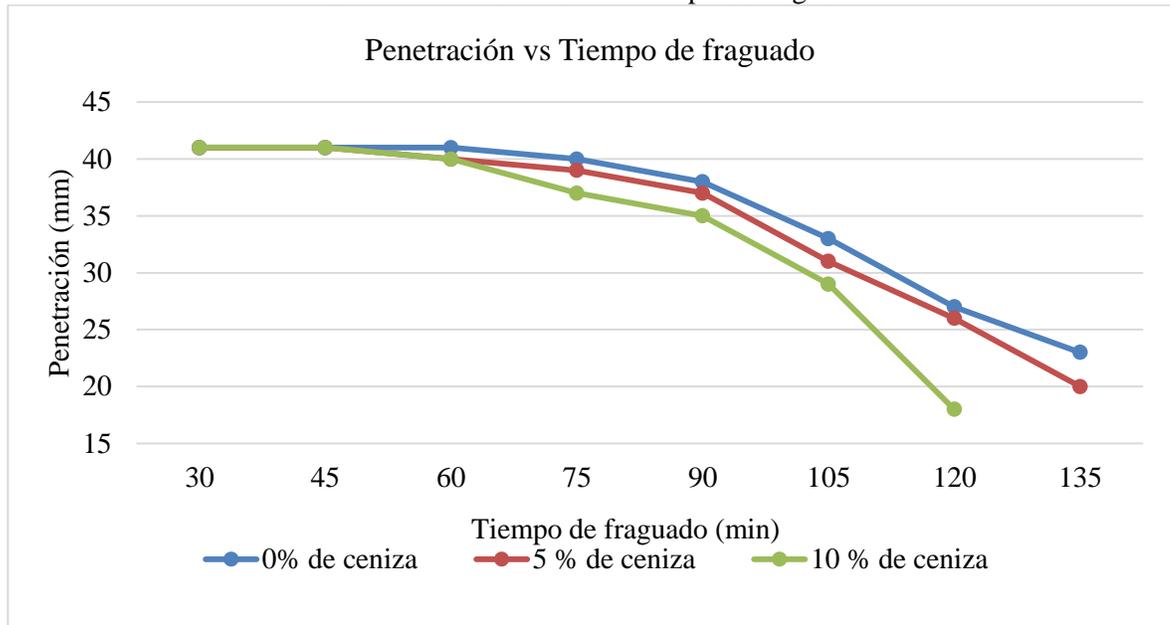
Tabla 6. Datos obtenidos del Tiempo de fraguado

Porcentaje de operaciones	Tiempo de fraguado (min)	Penetración (mm)
0 %	30	41
	45	41
	60	41
	75	40
	90	38
	105	33
	120	27
	135	23
5 %	30	41
	45	41
	60	40
	75	39
	90	37
	105	31
	120	26
	135	20
10 %	30	41
	45	41
	60	40
	75	37
	90	35
	105	29
	120	18

Fuente: Autor, 2015

A partir de los datos en la tabla anterior se construyó la gráfica 2 que muestra los datos de penetración y tiempo de fraguado de cada porcentaje al cumplir con el objetivo del ensayo, para su análisis y argumentación.

Gráfica 2. Penetración vs Tiempo de fraguado



Fuente: Autor, 2015

De acuerdo a la gráfica 2 se puede observar que el tiempo de fraguado para 500 gr de cemento Portland fue de 135 minutos para un 0 % de cenizas y se obtuvo una penetración de 23 mm, 135 minutos para 5 % de adición de cenizas y se obtuvo una penetración de 20 mm; por último, 120 minutos para 10 % de adición de cenizas y se obtuvo una penetración de 18 mm. De igual forma se observa que el mortero con mayor adición de ceniza fragua en menor tiempo, tomando 120 minutos para lograr que la aguja penetre 25 mm o menos.

### 6.2.1.3 Ensayo de resistencia a la compresión de morteros

Teniendo en cuenta las especificaciones dadas en la norma I.N.V. E – 323 – 07 (ver Anexo A) en condiciones normales, se elaboraron las muestras de mortero con el fin de realizar 18 cubos, 6 con 0% de adición de ceniza, 6 con 5% de adición de ceniza, y 6 con 10% de adición de ceniza.

Se realizaron 6 cubos, 2 en la mañana con 0% de ceniza, 2 en la tarde con 5% de ceniza y 2 en la noche con 10% de ceniza con una diferencia de 7 horas aproximadamente. Después de transcurridos 14 días se realizó el mismo procedimiento, esto con el fin de ensayar todos los

cubos el mismo día, donde desde su preparación hasta la fecha de ensayo estuvieron hidratados; los datos que se obtuvieron pueden verse en la tabla 7.

Para obtener la fuerza aplicada a un cilindro hasta su punto de falla se requirió tomar 3 pruebas donde el promedio de estas arroja un dato más preciso de la misma.

Los cubos realizados se pueden ver en la ilustración 3.

Ilustración 3. Cubos de mortero



Fuente: Autor, 2016

Para calcular la resistencia a compresión en cubos y cilindros (hormigón) se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento (se hará el ejemplo con un solo dato de carga máxima):

$$R_c = P/A \text{ [kN/m}^2\text{]} \quad \text{Ec. (6)}$$

Siendo P, la carga máxima aplicada en unidades de esfuerzo, y A, el área de sección transversal del cubo y del cilindro, en el caso del cubo se usa la siguiente ecuación:

$$A = L * L \quad \text{Ec.(7)}$$

Para los cilindros:

$$A = \pi * r^2 \quad \text{Ec.(8)}$$

A partir de la ecuación 7, se halla el área del cubo, así:

$$A = (5,06 * 5,06) \text{cm}^2$$

$$A = 25,6 \text{ cm}^2 \cong 0,00256 \text{ m}^2$$

Siendo la carga máxima aplicada igual a  $P = 66,7 \text{ kN} \approx 66700 \text{ N}$

Se reemplazan los valores de carga y área en la ecuación 6, así:

$$R_c = \frac{66700 \frac{kg \cdot m}{s^2}}{0,00256 m^2}$$

$$R_c = 26054687,5 \text{ kg/ms}^2 \approx Pa$$

Para obtener la resistencia en psi, se convierte el valor anterior por medio de la siguiente conversión 1 Pa = 0,000145 psi.

$$26054687,5 Pa * \frac{0,000145 psi}{1 Pa} = \mathbf{3778 psi}$$

De la misma manera se calculan los datos de resistencia para cubos y cilindros.

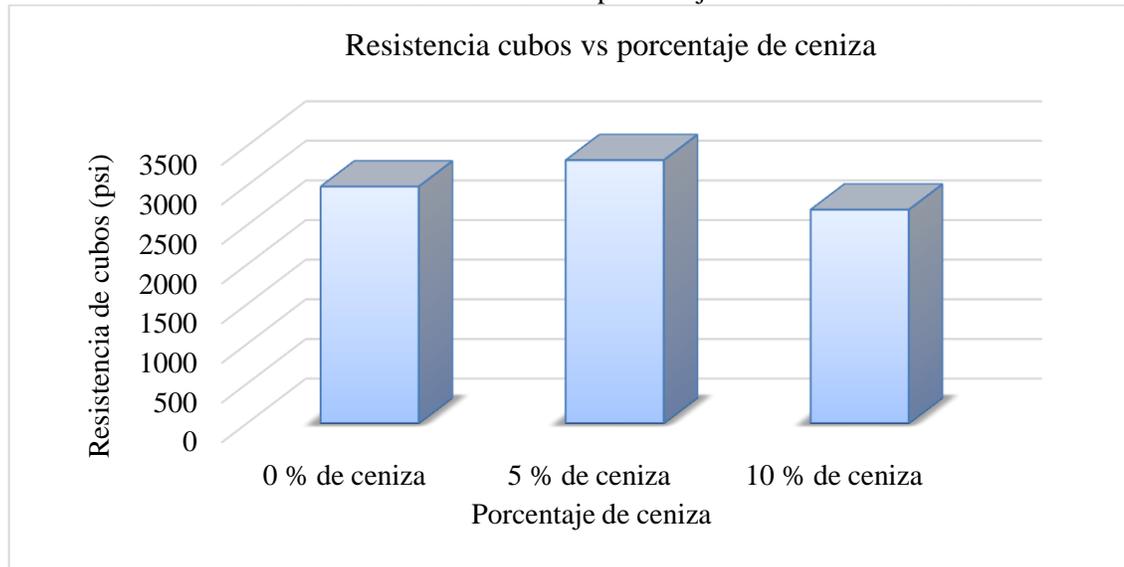
Tabla 7. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en mortero a los 14 días

<b>Ensayo a los 14 días</b>						
<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Prueba 1 (kN)</b>	<b>Prueba 2 (kN)</b>	<b>Prueba 3 (kN)</b>	<b>Valor promedio (kN)</b>	<b>Resistencia (Pa)</b>	<b>Resistencia (psi)</b>
0	52,00	55,50	50,50	52,67	20572916,67	2983,85
5	61,50	59,80	54,30	58,53	22864583,33	3316,23
10	47,20	41,80	53,50	47,50	18554687,50	2691,13

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 7 se construyó la gráfica 3 que muestra los datos de la resistencia de los cubos de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 3. Resistencia de los cubos vs porcentaje de ceniza a los 14 días



Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 3, se observa que la resistencia en cubos con 5 % de cenizas es mayor a la resistencia de los cubos con 0 % y 10 % de ceniza.

A los 28 días después de fundidos los cubos se realizó nuevamente el ensayo de compresión a 6 cubos (2 con 0 % de cenizas, 2 con 5 % de cenizas y 2 con 10 % de cenizas), y se obtuvieron los datos de la tabla 8.

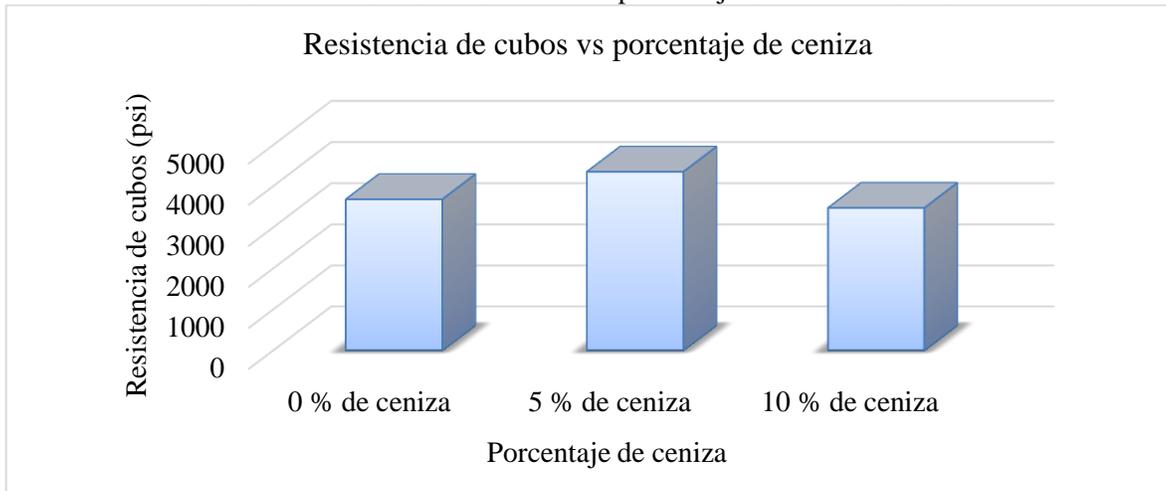
Tabla 8. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en mortero a los 28 días

Ensayo a los 28 días						
Porcentaje (%)	Prueba 1 (kN)	Prueba 2 (kN)	Prueba 3 (kN)	Valor promedio (kN)	Resistencia (Pa)	Resistencia (psi)
0	63,20	66,70	64,70	64,87	25338541,67	3675,05
5	82,00	80,60	67,40	76,67	29947916,67	4343,59
10	65,10	60,80	57,60	61,17	23893229,17	3465,43

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 8 se construyó la gráfica 4 que muestra los datos de la resistencia de los cubos de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 4. Resistencia de los cubos vs porcentaje de ceniza a los 28 días

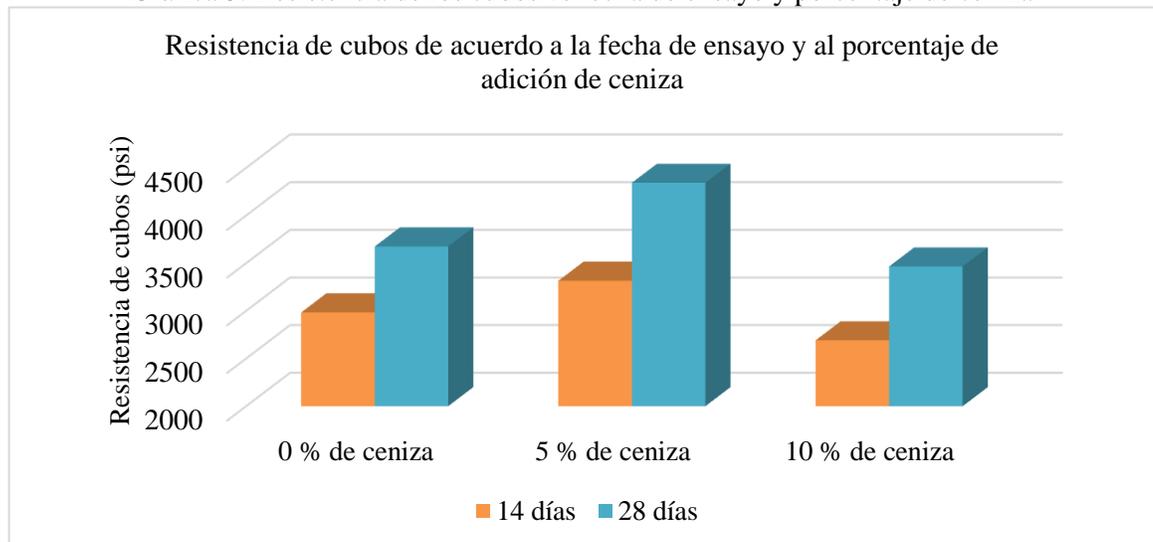


Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 4, se observa que la resistencia en cubos con 5 % de cenizas es mayor a la resistencia de los cubos con 0 % y 10 % de ceniza.

La información resumida de este ensayo se encuentra en la gráfica 5, de acuerdo a esta se observa que los cubos con la adición de 5 % de ceniza a la mezcla de mortero, tienen mayor resistencia a la compresión.

Gráfica 5. Resistencia de los cubos vs fecha de ensayo y porcentaje de ceniza



Fuente: Autor, 2016

Finalmente, en las ilustraciones 4 y 5 se evidencian los especímenes de mortero fracturados usados en esta prueba.

Ilustración 4. Cubo fracturado después de la presión aplicada



Fuente: Autor, 2016

Ilustración 5. Cubo sin ceniza (izquierda) y cubo con ceniza (derecha) fracturados



Fuente: Autor, 2016

## 6.2.2 Ensayos para hormigón

### 6.2.2.1 Asentamiento del concreto (SLUMP)

Este ensayo se ejecutó teniendo en cuenta las especificaciones encontradas en la norma I.N.V. E – 404 – 07 (ver Anexo B). La ceniza fue adicionada en la preparación de la mezcla en porcentajes de 0% 5% y 10% con relación al peso del cemento.

En la tabla 9 se muestran los datos obtenidos en la elaboración del ensayo, y en las ilustraciones 6 y 7 se puede evidenciar una parte del procedimiento.

Ilustración 6. Realización del ensayo de asentamiento



Fuente: Autor, 2016

Ilustración 7. Medición de asentamiento en el ensayo de Slump



Fuente: Autor, 2016

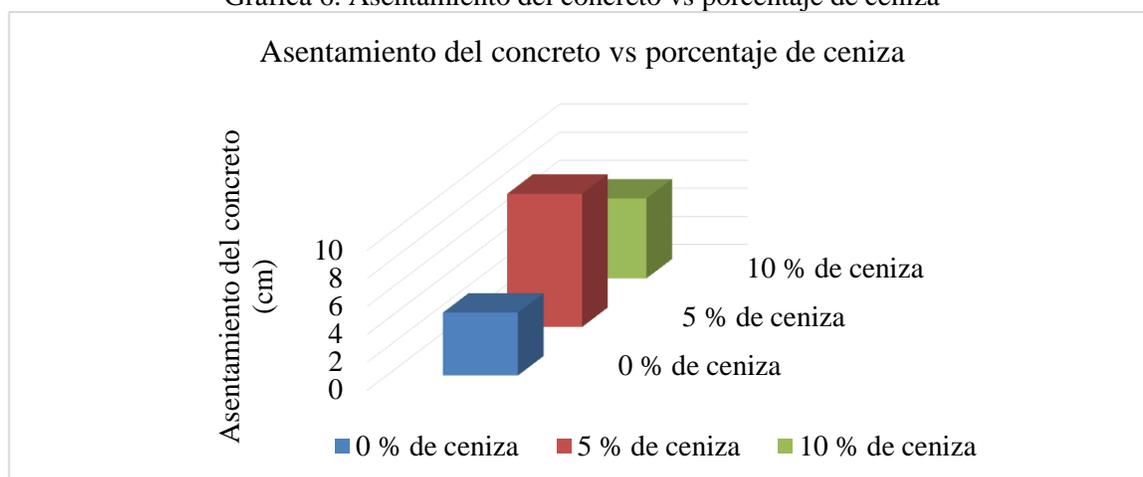
Tabla 9. Datos obtenidos del ensayo de Slump

Porcentaje de adición	Asentamiento del concreto (mm)
0 %	45
5 %	95
10 %	57

Fuente: Autor, 2016

En la gráfica 6 se pueden observar y analizar los datos del presente ensayo, para su análisis y argumentación.

Gráfica 6. Asentamiento del concreto vs porcentaje de ceniza



Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 6, el concreto con 0 % de adición de ceniza tiene mayor asentamiento que el concreto con 5 y 10 % de ceniza.

Para la elaboración de las muestras de hormigón se trabajó con una proporción de 1:2:3 que equivale a 0,01651 m<sup>3</sup> de cemento, 0,0330 m<sup>3</sup> de arena, 0,0660 m<sup>3</sup> de canto rodado fracturado y 0,013 m<sup>3</sup> de agua, con el fin de realizar 9 cilindros con 0 % de cenizas, de igual forma para el 5 % y 10 %, obteniendo un total de 27 cilindros. Estos especímenes fueron hechos de acuerdo a la norma I.N.V. E – 410 – 07 (ver Anexo B)., en condiciones normales y para cumplir con una resistencia entre los 2520 psi y 3360 psi.

### 6.2.2.2 Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto

Con las mezclas realizadas, se procedió a hacer los cilindros en sus respectivos moldes como se puede ver en la ilustración 8.

Ilustración 8. Moldes de cilindros de hormigón



Fuente: Autor, 2016

Después de transcurridas 24 y 48 horas se realizó el mismo procedimiento para las mezclas con 5 % y 10 % de cenizas, respectivamente.

Todos los cilindros permanecieron hidratados hasta su fecha de ensayo como se puede ver en la ilustración 9, a los 7 días de fundidos los cilindros se realizó ensayo de compresión a 9 de ellos (3 con 0 % de cenizas, 3 con 5 % de cenizas y 3 con 10 % de cenizas), y se obtuvieron los datos de la tabla 10.

Para obtener la fuerza aplicada a un cilindro hasta su punto de falla se requirió tomar 3 pruebas donde el promedio de estas arroja un dato más preciso de la misma, los cálculos fueron realizados teniendo en cuenta las ecuaciones utilizadas en el cálculo de la resistencia en cubos.

Ilustración 9. Cilindros sumergidos completamente en agua



Fuente: Autor, 2016

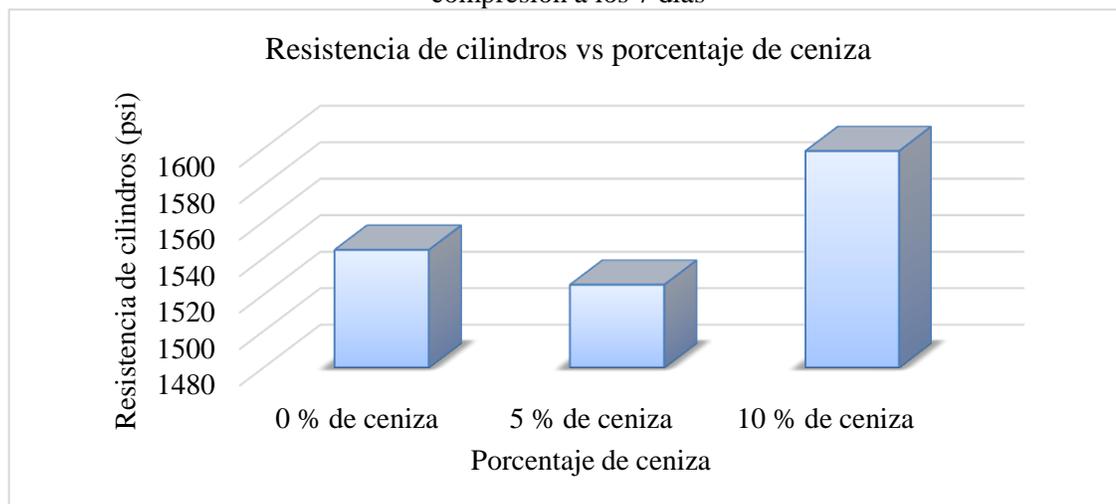
Tabla 10. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros a los 7 días

<b>Ensayo a los 7 días</b>						
<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Prueba 1 (kN)</b>	<b>Prueba 2 (kN)</b>	<b>Prueba 3 (kN)</b>	<b>Valor promedio (kN)</b>	<b>Resistencia (Pa)</b>	<b>Resistencia (psi)</b>
0	172,90	215,30	176,30	188,16	10647954,28	1544,36
5	170,50	199,20	187,80	185,83	10516099,82	1525,23
10	177,20	209,30	197,80	194,76	11021447,57	1598,53

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 10 se construyó la gráfica 7 que muestra los datos de la resistencia del cilindro de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 7. Resistencia de cilindros vs porcentaje de ceniza para el ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días



Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 7, se observa que la resistencia en cilindros con 0 % de cenizas es mayor a la resistencia de los cilindros con 5 % de ceniza, además los cilindros con 10 % de ceniza alcanzan una mayor resistencia antes de sufrir una fractura.

A los 14 días después de fundidos los cilindros se realizó nuevamente el ensayo de compresión a 9 cilindros (3 con 0 % de cenizas, 3 con 5 % de cenizas y 3 con 10 % de cenizas), y se obtuvieron los datos de la tabla 11.

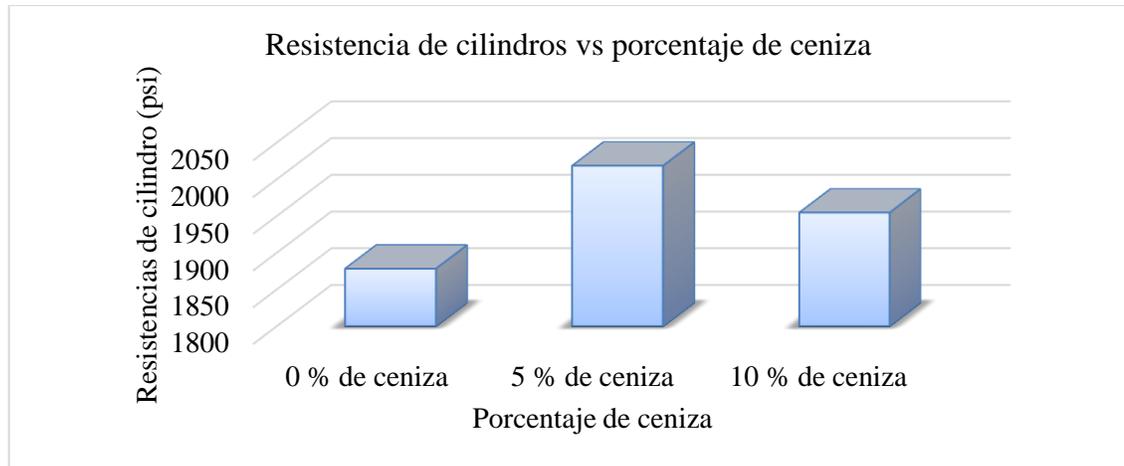
Tabla 11. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros a los 14 días

Ensayo a los 14 días						
Porcentaje (%)	Prueba 1 (kN)	Prueba 2 (kN)	Prueba 3 (kN)	Valor promedio (kN)	Resistencia (Pa)	Resistencia (psi)
0	194,50	219,30	272,70	228,83	12949465,23	1878,16
5	227,90	245,70	264,30	245,90	13915454,70	2018,27
10	245,00	230,90	238,50	238,13	13475751,23	1954,50

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 11 se construyó la gráfica 8 que muestra los datos de la resistencia de cilindros de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 8. Resistencia del cilindro vs porcentaje de ceniza para el ensayo de resistencia a la compresión a los 14 días



Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 8, se observa que la resistencia en cilindros con 10 % de cenizas es mayor a la resistencia de los cilindros con 0 % de ceniza, además los cilindros con 5 % de ceniza alcanzan una mayor resistencia con respecto a los demás antes de sufrir una fractura.

Posteriormente a los 28 días después de fundidos los cilindros se realizó nuevamente el ensayo de compresión a 9 cilindros (3 con 0 % de cenizas, 3 con 5 % de cenizas y 3 con 10 % de cenizas), y se obtuvieron los datos de la tabla 12.

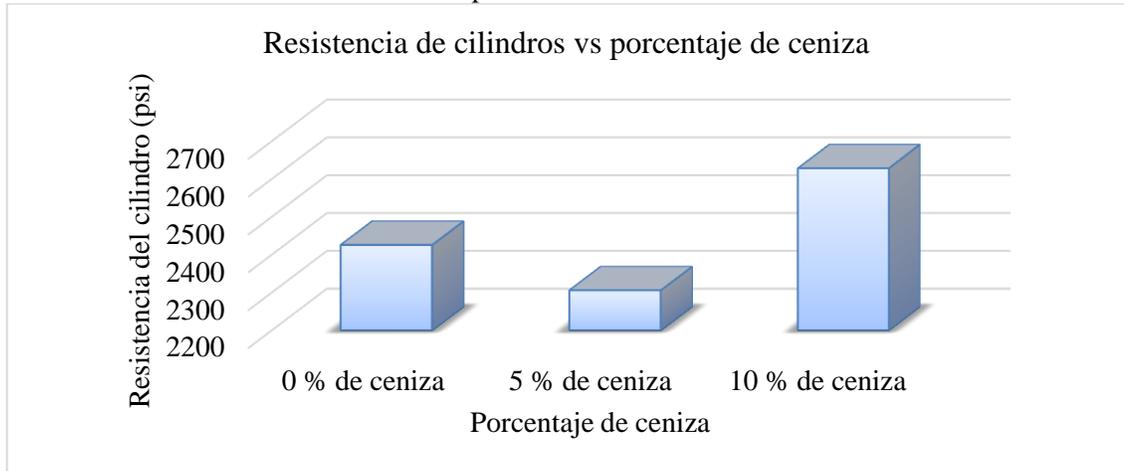
Tabla 12. Datos obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión en cilindros a los 28 días

Ensayo a los 28 días						
Porcentaje (%)	Prueba 1 (kN)	Prueba 2 (kN)	Prueba 3 (kN)	Valor promedio (kN)	Resistencia (Pa)	Resistencia (psi)
0	317,40	274,00	295,00	295,46	16720049,80	2425,04
5	295,40	266,00	281,10	280,83	15892139,66	2304,96
10	265,00	375,60	319,80	320,13	18116122,46	2627,53

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 12 se construyó la gráfica 9 que muestra los datos de la resistencia de cilindros de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 9. Resistencia de cilindros vs porcentaje de ceniza para el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días

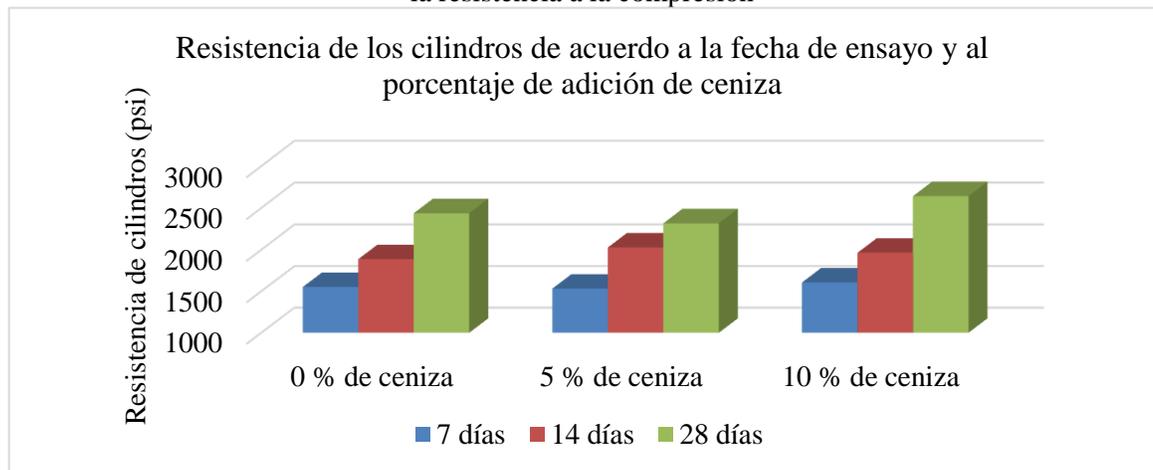


Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 9, se observa que la resistencia en cilindros con 0 % de cenizas es mayor a la resistencia de los cilindros con 5 % de ceniza, también los cilindros con 10 % de ceniza alcanzan una mayor resistencia con respecto a los demás antes de sufrir una fractura.

La información resumida de este ensayo se encuentra en la gráfica 10, de acuerdo a esta se observa que los cilindros con la adición de 10 % de ceniza a la mezcla de hormigón, tienen mayor resistencia a la compresión.

Gráfica 10. Resistencia de los cilindros vs fecha de ensayo y porcentaje de ceniza para el ensayo de la resistencia a la compresión



Fuente: Autor, 2016

Finalmente, en las ilustraciones 10 y 11 se evidencian los especímenes de concreto fracturados usados en esta prueba.

Ilustración 10. Cilindro fracturado después de la presión aplicada



Fuente: Autor, 2016

Ilustración 11. Cilindro fracturado después de la presión aplicada



Fuente: Autor, 2016

### 6.2.2.3 Ensayo de resistencia a la flexión del concreto

Para el ensayo de resistencia a la flexión del concreto se realizaron viguetas con las mismas proporciones de mezclas que se usaron para hacer los cilindros, la prueba fue realizada a los 7 días después de fundidas, se tomaron 27 de ellos (9 con 0 % de cenizas, 9 con 5 % de cenizas y 9 con 10 % de cenizas).

Para calcular la resistencia a flexión en viguetas se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento (se hará el ejemplo con un solo dato de carga máxima):

$$MR = PL/bd^2 [kg_f/cm^2] \quad \text{Ec. (9)}$$

Siendo MR, el módulo de rotura, P la carga máxima aplicada en unidades de  $kg_f$ , L la luz libre entre apoyos en cm, b ancho de la viga en cm y d altura de la viga en cm.

Con un valor de carga máxima de  $10,47 \text{ kN}$  arrojado por el ensayo practicado, se procede a convertir este valor a  $kg_f$ , por medio de la siguiente conversión:  $1 \text{ kN} = 101,1 \text{ kg}_f$ , así:

$$10,47 \text{ kN} * \frac{101,1 \text{ kg}_f}{1 \text{ kN}} = 1058,51 \text{ kg}_f$$

$$L = 40 \text{ cm}$$

$$b = 15 \text{ cm}$$

$$d = 15 \text{ cm}$$

Se reemplazan los valores en la ecuación 9, así:

$$MR = \frac{1058,51 \text{ kg}_f * 40 \text{ cm}}{15 \text{ cm} * (15 \text{ cm})^2} = 12,54 \text{ kg/cm}^2$$

Y para obtener el valor en psi, se usa la siguiente conversión:  $1 \text{ psi} = 0,07 \text{ kg/cm}^2$

$$12,54 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} * \frac{1 \text{ psi}}{0,07 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 179,16 \text{ psi}$$

Los datos obtenidos se pueden ver en la tabla 13.

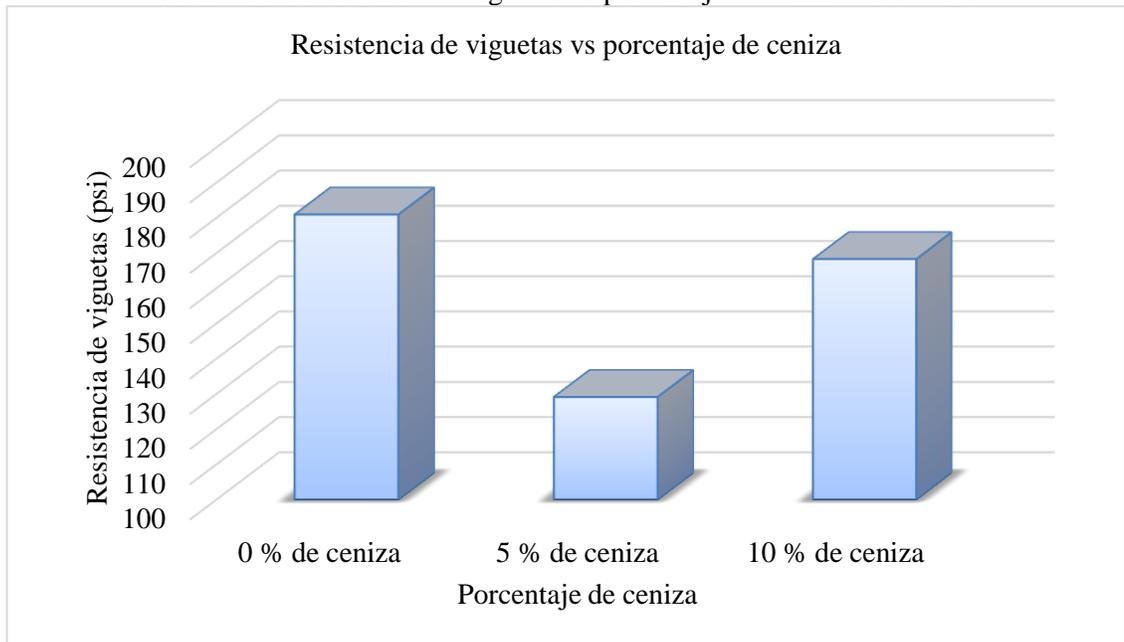
Tabla 13. Datos del ensayo de resistencia a la flexión del concreto a los 7 días

Ensayo a los 7 días						
Porcentaje (%)	Prueba 1 (kN)	Prueba 2 (kN)	Prueba 3 (kN)	Valor promedio (kN)	Módulo de rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de rotura (psi)
0	10,70	11,20	9,50	10,7	12,54	179,16
5	6,90	8,20	7,30	7,47	8,95	127,81
10	9,50	9,50	10,20	9,73	11,66	166,61

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 13 se construyó la gráfica 11 que muestra los datos de la resistencia de las viguetas de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 11. Resistencia de viguetas vs porcentaje de ceniza a los 7 días



Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 11 se puede decir que el concreto sin porcentaje de adición de ceniza tiene mayor resistencia a la flexión que el concreto con 5 % y 10 % de adición.

A los 14 días después de fundidos las viguetas se realizó nuevamente el ensayo de compresión a 9 viguetas (3 con 0 % de cenizas, 3 con 5 % de cenizas y 3 con 10 % de cenizas), y se obtuvieron los datos de la tabla 14.

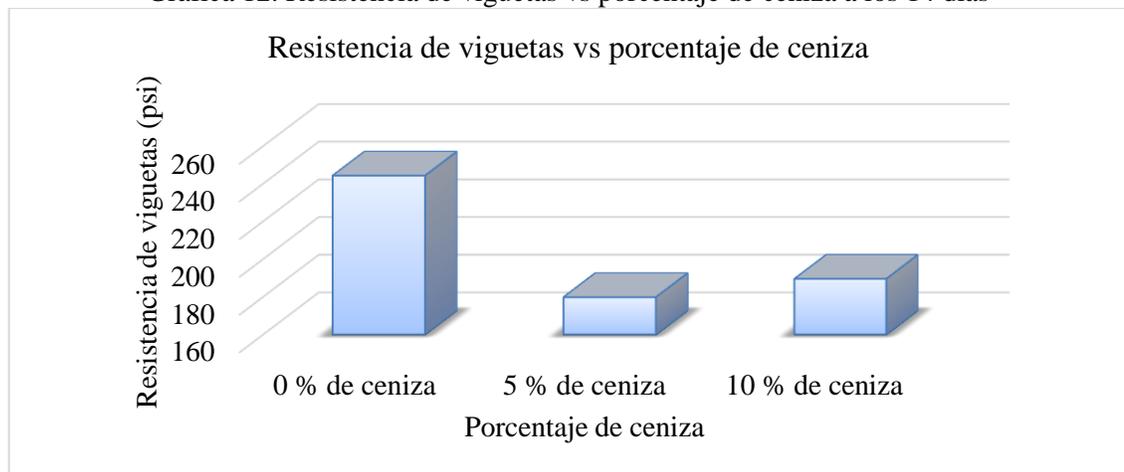
Tabla 14. Datos del ensayo de resistencia a la flexión del concreto a los 14 días

<b>Ensayo a los 14 días</b>						
<b>Porcentaje (%)</b>	<b>Prueba 1 (kN)</b>	<b>Prueba 2 (kN)</b>	<b>Prueba 3 (kN)</b>	<b>Valor promedio (kN)</b>	<b>Módulo de rotura (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Módulo de rotura (psi)</b>
0	15,30	15,00	12,50	14,27	17,09	244,21
5	9,70	11,50	10,30	10,50	12,58	179,73
10	9,50	11,60	12,10	11,07	13,26	189,43

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 14 se construyó la gráfica 12 que muestra los datos de la resistencia de las viguetas de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 12. Resistencia de viguetas vs porcentaje de ceniza a los 14 días



Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 12 se puede decir que el concreto sin porcentaje de adición de ceniza tiene mayor resistencia a la flexión que el concreto con 5 % y 10 % de adición.

Posteriormente a los 28 días después de fundidos los cilindros se realizó nuevamente el ensayo de compresión a 9 cilindros (3 con 0 % de cenizas, 3 con 5 % de cenizas y 3 con 10 % de cenizas), y se obtuvieron los datos de la tabla 15.

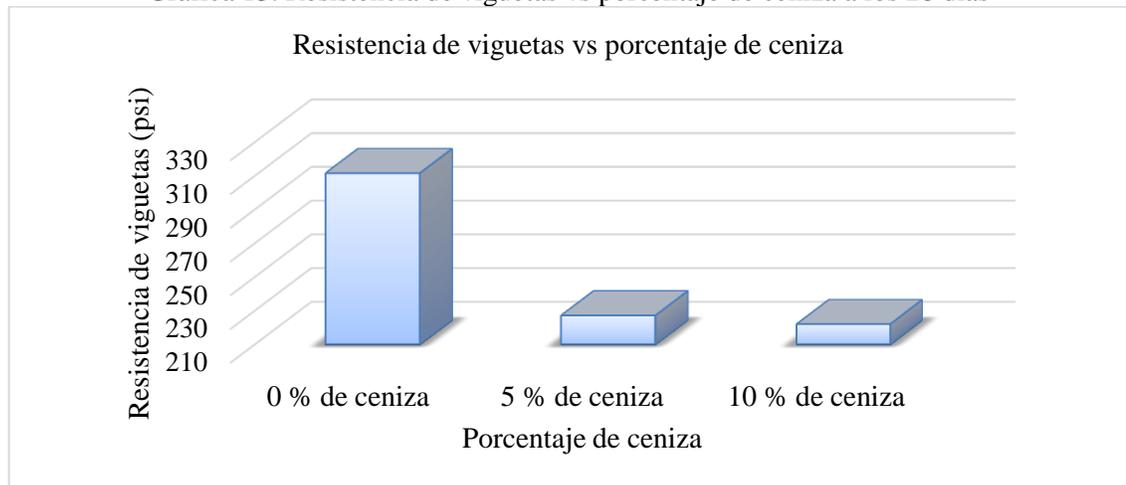
Tabla 15. Datos del ensayo de resistencia a la flexión del concreto a los 28 días

Ensayo a los 28 días						
Porcentaje (%)	Prueba 1 (kN)	Prueba 2 (kN)	Prueba 3 (kN)	Valor promedio (kN)	Módulo de rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de rotura (psi)
0	16,50	19,70	18,40	18,20	21,81	311,54
5	14,20	12,70	12,90	13,27	15,90	227,09
10	11,60	12,30	15,00	12,97	15,54	221,96

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla anterior se construyó la gráfica 13 que muestra los datos de la resistencia de las viguetas de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza.

Gráfica 13. Resistencia de viguetas vs porcentaje de ceniza a los 28 días

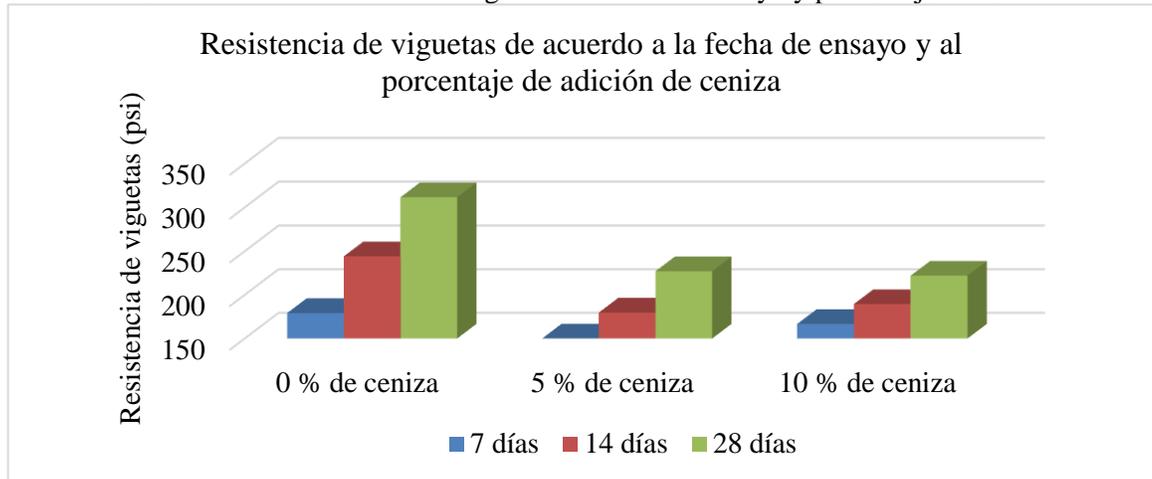


Fuente: Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 13 se puede decir que el concreto sin porcentaje de adición de ceniza tiene mayor resistencia a la flexión que el concreto con 5 % y 10 % de adición.

La información resumida de este ensayo se encuentra en la gráfica 14, de acuerdo a esta se observa que los cilindros con la adición de 10 % de ceniza a la mezcla de hormigón, tienen mayor resistencia a la compresión.

Gráfica 14. Resistencia de las viguetas vs fecha de ensayo y porcentaje de ceniza



Fuente: Autor, 2016

Finalmente, en las ilustraciones 12 y 13 se evidencian los especímenes de concreto fracturados usados en esta prueba.

Ilustración 12. Vigueta 1 fracturada después de la presión aplicada



Fuente: Autor, 2016

Ilustración 13. Vigueta 2 fracturada después de la presión aplicada



Fuente: Autor, 2016

#### 6.2.2.4 Ensayo de tracción indirecta de cilindros de concreto

Los cilindros destinados a esta prueba fueron realizados con el mismo procedimiento de los destinados al ensayo de compresión, estuvieron sumergidos durante 28 días en agua, se tomaron 9 de ellos (3 con 0 % de cenizas, 3 con 5 % de cenizas y 3 con 10 % de cenizas).

Para calcular la resistencia a tracción en cilindros se tuvo en cuenta el siguiente procedimiento (se hará el ejemplo con un solo dato de carga máxima):

$$RT = 2P/\pi DL \text{ [psi]} \quad \text{Ec. (10)}$$

Siendo P, la carga máxima aplicada en unidades de esfuerzo en kgf, D, el diámetro del cilindro en cm, y L la longitud del mismo en cm.

Con un valor de carga máxima de 161,40 kN arrojado por el ensayo practicado, se procede a convertir este valor a kgf, por medio de la siguiente conversión: 1 kN = 101,1 kgf, así:

$$161,40 \text{ kN} * \frac{101,1 \text{ kgf}}{1 \text{ kN}} = 16317,54 \text{ kgf}$$

$$L = 30 \text{ cm}$$

$$d = 15 \text{ cm}$$

Se reemplazan los valores en la ecuación 10, así:

$$RT = \frac{2 * 16317,54 \text{ kg}_f}{\pi * 15 \text{ cm} * 30 \text{ cm}} = 23,15 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$$

Y para obtener el valor en psi, se usa la siguiente conversión:  $1 \text{ psi} = 0,07 \text{ kg}/\text{cm}^2$

$$23,15 \frac{\text{kg}_f}{\text{cm}^2} * \frac{1 \text{ psi}}{0,07 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 330,76 \text{ psi}$$

Los datos obtenidos se pueden observar en la tabla 16.

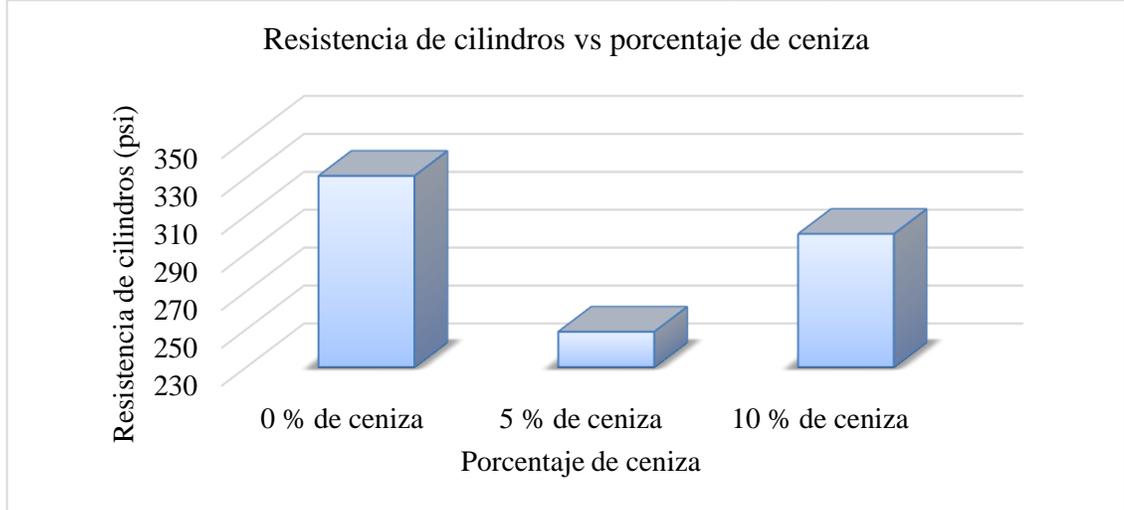
Tabla 16. Datos del ensayo de tracción indirecta de cilindros a los 28 días

<b>Ensayo a los 28 días</b>						
<b>Porcentaje de ceniza (%)</b>	<b>Prueba 1 (kN)</b>	<b>Prueba 2 (kN)</b>	<b>Prueba 3 (kN)</b>	<b>Carga máxima aplicada (kN)</b>	<b>Carga máxima aplicada (kgf)</b>	<b>Resistencia (psi)</b>
0	168,00	161,50	154,70	161,40	23,15	330,76
5	121,20	113,60	129,10	121,30	17,40	248,58
10	152,30	140,50	146,60	146,47	21,01	300,15

Fuente: Autor, 2016

A partir de los datos en la tabla 16 se construyó la gráfica 15 que muestra los datos de la resistencia a tracción indirecta de los cilindros de acuerdo a su respectivo porcentaje de ceniza, para su análisis y argumentación.

Gráfica 15. Resistencia a tracción indirecta de cilindros vs porcentaje de ceniza a los 28 días



Fuente Autor, 2016

De acuerdo a la gráfica 15 se puede decir que el concreto sin porcentaje de adición de ceniza tiene mayor resistencia a la tracción indirecta que el concreto con 5 % y 10 % de adición.

En las ilustraciones 14 y 15 se evidencian los especímenes de concreto fracturados usados en esta prueba.

Ilustración 14. Cilindro 1 fracturado después de la fuerza aplicada para la tracción



Fuente: Autor, 2016

Ilustración 15. Cilindro 2 fracturado después de la fuerza aplicada para la tracción



Fuente: Autor, 2016

### 6.3 IDENTIFICACIÓN DE VARIACIONES CAUSADAS POR LA ADICIÓN DE CENIZA A LAS MEZCLAS DE MORTERO Y HORMIGÓN EN SUS PROPIEDADES MECÁNICAS

La ceniza proveniente de la calcinación del cuesco de la palma africana, le aporta ciertas variaciones a las propiedades mecánicas del mortero y hormigón, las cuales fueron determinadas mediante ensayos de laboratorio como la consistencia normal del cemento donde no se aprecian variaciones significativas entre las mezclas sin adición y con adición, cuyos porcentajes se encuentran dentro del rango óptimo de consistencia. Para el ensayo de tiempo de fraguado, la mezcla sin adición y la mezcla de 5 % no presentan cambios en los tiempos de fraguado, al contrario de la mezcla con 10 % de adición que al contener mayor cantidad de material sólido absorbente obtuvo un tiempo de fraguado menor.

Para el ensayo de compresión de cubos de mortero, se tiene que la mezcla sin adición supera en resistencia a la mezcla con 10 % de adición, mientras que la mezcla con 5 % de adición supera las anteriores. En el ensayo de asentamiento del concreto se presentaron distintas mediciones desde la parte superior del cono hasta el centro de la mezcla asentada,

donde la mezcla con mayor asentamiento fue la de 5 % de adición de ceniza, de igual forma la de 10 % tiene un valor mayor que la mezcla sin adición.

Para el ensayo de compresión del concreto, la resistencia de los cilindros ensayados con 10 % de adición de ceniza, fue mayor a los ensayados con 0 % y este a su vez a la de 5 % de ceniza. En el ensayo de resistencia a la flexión se presenta que la resistencia en las vigas ensayadas de la muestra patrón fue superior a las de 5 % de adición y esta a su vez a la de 10 % de adición. Finalmente, para el ensayo de resistencia a la tracción, la resistencia de los cilindros ensayados sin adición fue mayor a los ensayados con 10 % y este a su vez a los de 5 %.

Los resultados de la presente investigación dan respuesta a cada uno de los objetivos específicos planteados al principio de la misma y ayuda al fortalecimiento e innovación del campo investigativo referente al mortero, hormigón y a los diferentes materiales que se le pueden adicionar para mejorar su consistencia, uso y duración; integrándose así a investigaciones anteriores que al igual que esta han evaluado el uso de diferentes residuos al concreto y hormigón para mejorar sus propiedades mecánicas; cabe resaltar que aunque las investigaciones están encaminadas hacia el mismo objetivo varían los resultados de acuerdo a los porcentaje de adición y a cada ensayo.

## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se realizaron distintos tipos de ensayos con el fin de determinar las características mecánicas del mortero y el hormigón que se pueden ver afectadas por medio de la adición en pequeñas proporciones de cenizas provenientes de las calderas ubicadas en las instalaciones de la industria Oleoflores S.A.S. en el municipio de María La Baja; en este caso 5 % y 10 %. La forma para determinar estas características fue mediante diferentes tipos de ensayos, como lo son la consistencia normal, el tiempo de fraguado, compresión en cubos de mortero, compresión y tracción indirecta en cilindros de concreto y flexión en vigas de concreto, por medio del diseño de especímenes que fueron usados para dichos ensayos.

Partiendo de los resultados obtenidos en los ensayos, se concluye que para una adición de 5 % de ceniza en la pasta, no se presentan variaciones apreciables en cuanto a la consistencia normal y tiempo de fraguado, por otra parte, en el ensayo de compresión, los cubos ensayados con 5 % de adición presentan un aumento en la resistencia de 18 % en comparación con la muestra patrón. Para la adición de 10 % de ceniza en la pasta, en cuanto a la consistencia no presenta variaciones apreciables con respecto a la muestra patrón, al contrario, el tiempo de fraguado disminuye de lo que se puede afirmar que la ceniza puede ser usada como reductor del tiempo de fraguado en morteros, puesto que, al ser un componente sólido absorbente, la pasta tarda menos tiempo en fraguar y en obtener su estado óptimo. En el ensayo de compresión, los cubos ensayados con 10 % disminuyen la resistencia un 6 % con respecto a la mezcla patrón y un 20 % con respecto a la mezcla con 5% de adición de ceniza, de lo que se puede afirmar que la ceniza aumenta la resistencia del mortero si es adicionada en bajas proporciones hasta un 5 %.

En las mezclas elaboradas con concreto para el ensayo de asentamiento se concluye que las mezclas con porcentajes menores o iguales al 10 % aumentan el nivel de asentamiento con respecto a la muestra patrón, por lo que se obtienen concretos más fluidos. En los ensayos realizados a compresión, se obtuvo que la resistencia para la mezcla con 5 % de adición

disminuye un 5 % y la mezcla con 10 % de adición aumenta un 8% con respecto a la muestra patrón, de lo que se puede concluir que las mezclas preparadas con un porcentaje menor a un 10 % de adición de ceniza disminuye la resistencia mientras que en un porcentaje igual al 10 % aumenta la misma. Para el ensayo de resistencia a la flexión, las vigas ensayadas con porcentajes de 5 % y 10 % disminuyen un 27 % y 29 %, respectivamente, de lo que se concluye que la adición de ceniza afecta negativamente la flexión en el concreto. Por último, para el ensayo de tracción indirecta en cilindros se obtuvo que para las mezclas con 5 % y 10 % de adición disminuyen un 25 % y 9 % respectivamente, donde se concluye que la adición de ceniza afecta negativamente a la tracción en el concreto.

El uso de las cenizas provenientes de la calcinación del cuesco de la palma africana en mezclas de mortero, mantiene a la mezcla con una consistencia normal dentro del rango óptimo, afecta positivamente a la compresión de la mezcla siempre y cuando se use en proporciones menores a 10 %, ya que, si se usa un porcentaje de 10 %, la resistencia y el tiempo de fraguado disminuyen, permitiendo obtener un mortero que fragua rápidamente y con menor resistencia, ideal para trabajos específicos en la industria de la construcción donde se requiera esta característica.

En el caso del concreto, la adición de las cenizas nos permite obtener un concreto con un mayor nivel de asentamiento, ideal para cumplir especificaciones en la industria de la construcción, donde se requiera esta característica. En cuanto a la compresión, se afecta positivamente siempre y cuando se usen porcentajes aproximados al 10 % ya que con porcentajes menores a 10 % se ve afectada de forma negativa. De igual forma el uso de las cenizas no es factible si se desean concretos altamente resistentes a la flexión y tracción, puesto que el uso de esta afecta considerablemente dichas propiedades del concreto.

Los resultados obtenidos en esta investigación concuerdan con investigaciones previas en las cuales se deduce que las cenizas pueden ser usadas como adición en porcentajes con respecto al peso del cemento para posibles aplicaciones en la industria de la construcción,

resolviendo así en cierta medida problemas medioambientales relacionados a la mala disposición de este residuo en las plantas aceiteras, evitando afectar fuentes susceptibles a contaminación por parte de este residuo.

Dentro de los resultados inesperados se encuentra la variación de resistencia a la compresión de cubos de mortero, ya que se presenta un aumento de resistencia adicionando ceniza en porcentaje de 5% y disminuye con adición de 10%. Con respecto a la resistencia a la compresión de cilindros de concreto se presentaron resultados inesperados, ya que al adicionar 5% de ceniza en la mezcla a los 28 días disminuye la resistencia, mientras que con un 10% aumenta. De igual forma se presentaron resultados inesperados en los ensayos de resistencia a la tracción indirecta, ya que con una adición de ceniza de 5% disminuye la resistencia, al igual que una adición de 10%, pero esta a su vez en menor porcentaje.

A manera de recomendaciones para investigaciones futuras se debe tener en cuenta que para este proyecto se utilizaron bajos porcentajes de adición de ceniza con relación al peso del cemento, lo que conlleva a despertar un interés por cómo se vería afectada la resistencia a la compresión del concreto con porcentajes superiores, de igual forma la realización de un análisis de costo para determinar la factibilidad del uso de las adiciones.

## 9 BIBLIOGRAFÍA

- Berndt, M. L. (9 de Marzo de 2009). *Properties of sustainable concrete containing fly ash, slag and recycled concrete aggregate*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de ScienceDirect: <http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2120/science/article/pii/S0950061809000415>
- Blanco Urruchurtu, J. M. (7 de Octubre de 2008). *Ensayo a compresión de cilindros de concreto*. Recuperado el 23 de Febrero de 2015, de Ingeniería Civil: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/ensayo-compresin-de-cilindros-de.html>
- Buzón Ojeda, J. E. (2009). Uso del Cuesco de la Palma Africana en la fabricación de Adoquines y Bloques de Mampostería. *Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2009)*. San Cristóbal, Venezuela.
- Buzón Ojeda, J. E. (2010). FABRICACIÓN DE ADOQUINES PARA USO EN VÍAS. *Revista Inge-CUC*, 67-78.
- CedexMateriales. (Diciembre de 2011). *Cedex Materiales*. Recuperado el 23 de Febrero de 2015, de CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS : <http://www.cedexmateriales.vsf.es/view/ficha.aspx?idresiduo=305&idmenu=304>
- Giraldo Escandón, C. E., Vidal Velasco, D. V., Martínez Lopez, C., Torres Ágredo, J., & González Salcedo, L. O. (2012). Ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción. *Acta Agronómica*, 77-78.
- Hameed, B. H., & Foo, K. Y. (30 de Julio de 2009). *Value-added utilization of oil palm ash: A superior recycling of the industrial agricultural waste*. Recuperado el 3 de Marzo de 2015, de ScienceDirect: <http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2120/science/article/pii/S030438940901228X>

- INVIAS. (Abril de 2015). *Instituto Nacional de Vías*. Obtenido de INVIAS - Colombia: <http://www.invias.gov.co/index.php/documentos-tecnicos-izq>
- Justicia y Paz. (8 de Febrero de 2007). *Projet Accompagnement Solidarité Colmbie*. Recuperado el 23 de Febrero de 2015, de Agronegocios de palma y banano en el Bajo Atrato: <http://pasc.aegir.koumbit.net/es/article/agronegocios-de-palma-y-banano-en-el-bajo-atrato-impactos-ambientales-y-socioecon%C3%B3micos>
- Olanipekun, E. A., Olusola, K. O., & Ata, O. (Marzo de 2006). *A comparative study of concrete properties using coconut shell and palm kernel shell as coarse aggregates*. Recuperado el 14 de 02 de 2015, de Science Direct: <http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2120/science/article/pii/S0360132305000429>
- Polanco Rodríguez, A. (26 de Enero de 2012). *Manual de Prácticas de Laboratorio de Concreto*. Recuperado el 25 de Febrero de 2015, de Civilgeeks.com Ingeniería y Construcción: <http://civilgeeks.com/2014/09/05/manual-de-practicas-de-laboratorio-de-concreto-2/>
- Ramírez Brewer, D. E., & Vergara Alvis, M. F. (2013). *Biblioteca Virtual*. Obtenido de EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO MODIFICADO CON RESIDUO DE GRANALLA DE SILICATO DE ALUMINIO.: <http://190.25.234.130:8080/jspui/bitstream/11227/65/1/Evaluacion%20de%20la%20resistencia%20mecanica%20del%20concreto%20modificado%20con%20residuo%20de%20granalla%20de%20silicato.pdf>
- Reyes Ortiz, S. P., & Ortiz, J. A. (2009). *Materiales-Sam*. Recuperado el 15 de Febrero de 2015, de <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMET-SAM2008/pdfs/a9.pdf>
- Rivera L., G. A. (2013). Concreto Simple. En CivilGeeks.com Ingeniería y Construcción, *Concreto Simple*.

- Sánchez De Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Bogotá: Bhandar Editores TLDA.
- Saval, S. (Febrero de 2012). *Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales*:. Recuperado el 11 de Marzo de 2015, de Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería : [http://www.smbb.com.mx/revista/Revista\\_2012\\_2/Saval\\_Residuosagroindustriales.pdf](http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2012_2/Saval_Residuosagroindustriales.pdf)
- Shafigh, P., Johnson Alengaram, U., Zamin Jumaat, M., & Bin Mahmud, H. (2012). *Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash*. Recuperado el 14 de Febrero de 2015, de ScienceDirect: <http://ezproxy.unicartagena.edu.co:2120/science/article/pii/S0261306913001003>
- Silva, Y., & Delvasto, S. (2014). CONCRETO AUTOCOMPACTANTE CON DIFERENTES NIVELES DE CENIZA VOLANTE Y ESCORIA DE COMBUSTIÓN DE CARBÓN. *Revista Colombiana de Materiales* , 1-9.
- Tamayo y Tamayo, M. (2003). El proceso de la investigación científica. En M. Tamayo y Tamayo, *El proceso de la investigación científica* (págs. 43 - 44). Limusa Noriega Editores.
- Universidad de la Frontera. (18 de Mayo de 2015). *Universidad de la Frontera*. Obtenido de Departamento de Ingeniería de Obras civiles: [http://ctt.ufro.cl/nuevoportal/?page\\_id=464](http://ctt.ufro.cl/nuevoportal/?page_id=464)

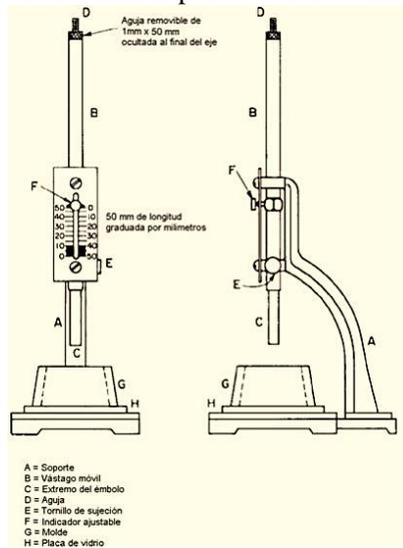
## 10 ANEXOS

### ANEXO A

- Consistencia normal del cemento
1. Preparación de la pasta de cemento – Se mezclan 650 g de cemento con una cantidad medida de agua destilada. La paleta y el recipiente de mezclado deben estar secos y en posición de mezclado, seguidamente se introducen los materiales para una cochada de la siguiente manera:
  2. Se coloca toda el agua en el recipiente de mezclado.
  3. Se agrega el cemento al agua y se permite la absorción de agua durante 30 segundos
  4. Se enciende la mezcladora y se mezcla a velocidad lenta ( $140 \pm 5$  rpm), durante 30 segundos
  5. Se detiene la mezcladora durante 15 segundos, en este tiempo se raspa la pasta que pueda haber quedado adherida a las paredes del recipiente y se incorpora al resto de la pasta.
  6. Se enciende la mezcladora, nuevamente, a velocidad media ( $285 \pm 10$  rpm) y se mezcla durante 1 minuto.
  7. Llenado de moldes – La pasta de cemento preparada se moldea con las manos cubiertas con guantes dándole forma esférica y se lanza 6 veces de una mano a otra a través de una distancia de unos 150 mm (6"), para producir una masa que se pueda introducir con facilidad dentro del molde Vicat con un mínimo de manipulación adicional. Con la muestra, que permanece en una mano, se llena completamente por la base mayor el molde (G), Figura 1, sostenido en la otra. El exceso de pasta en esta base se remueve con un solo movimiento de la palma de la mano. Se coloca la placa (H) sobre la base mayor, se voltea el conjunto y se quita el exceso en la base menor con una pasada oblicua de un palustre, haciendo un ángulo pequeño con la base superior del molde. Si es necesario, se alisa la parte superior de la pasta con unos toques ligeros con la punta del palustre. Durante estas operaciones se debe tener cuidado de no comprimir la pasta.

8. Determinación de la consistencia normal –El conjunto constituido por la placa, el molde y la pasta confinada dentro de él se lleva al aparato y se centra debajo del vástago (B), Figura 1. Se hace descender el vástago hasta que el extremo del émbolo (C) haga contacto con la superficie de la pasta y se fija en esta posición por medio del tornillo (E). Se lee la posición inicial del indicador (F) en la escala o se desplaza el indicador hasta que coincida con el cero superior y se libera el vástago inmediatamente. El tiempo transcurrido hasta este instante no debe exceder de 30 segundos después de terminada la mezcla. Se debe cuidar que el aparato no esté sometido a ninguna vibración durante el ensayo. Se considera que la pasta tiene consistencia normal cuando el émbolo penetra  $10 \pm 1$  mm, bajo la superficie original, 30 segundos después de haber sido soltado. Si no se obtiene la consistencia normal en el primer tanteo, se debe repetir toda la operación, variando la cantidad de agua, hasta obtenerla. Cada vez se debe emplear cemento nuevo. (INVIAS, 2015).

Ilustración A 1. Aparato de Vicat.



Fuente: I.N.V. E – 310 – 07 (modificada en la presente investigación abril 23 del 2015).

- Tiempo de fraguado (método del aparato de Vicat)

1. Moldeado de la muestra de ensayo – Una vez preparada la pasta, como se describe en la Sección 4, debe dársele rápidamente forma esférica con las manos

enguantadas, y lanzarla de una mano a la otra por seis veces estando éstas a una distancia de 15 cm aproximadamente. Se toma el molde en una mano y con la otra se presiona la bola hasta llenar el molde completamente por la base mayor. Se quita el exceso en esta base con un solo movimiento de la palma de la mano. El molde se debe colocar con su base mayor sobre la placa de vidrio y el exceso de pasta que aparezca en la base menor se debe retirar pasando el palustre oblicuamente, de modo que forme un ángulo pequeño con el borde superior del molde. La parte superior de la muestra se debe alisar, si es necesario, con una o dos pasadas del borde del palustre. Durante las operaciones, para retirar el exceso de pasta y alisarla, se debe tener cuidado de no ejercer presión alguna sobre ésta. Inmediatamente después de terminado el moldeado, se debe colocar la muestra en el cuarto húmedo, de donde se debe sacar únicamente para las determinaciones del tiempo de fraguado. La muestra debe permanecer en el molde, soportada por la placa de vidrio, durante todo el período de ensayo.

2. Determinación del tiempo de fraguado – La muestra usada para determinar el tiempo de fraguado, se debe mantener dentro del cuarto húmedo durante 30 minutos después del moldeado sin que sufra ninguna alteración. Se determina la penetración de la aguja de 1 mm de diámetro en ese tiempo. A continuación, se hacen mediciones cada 15 minutos (para cementos tipo 3 se deben hacer cada 10 minutos), hasta que se obtenga una penetración de 25 mm o menos. Para el ensayo de penetración se debe hacer descender la aguja D del vástago B, hasta que el extremo haga contacto con la superficie de la pasta de cemento. Se debe apretar el tornillo de sujeción E y ajustar el índice F, en el extremo superior de la escala o registrar una lectura inicial. Se suelta el vástago rápidamente aflojando el tornillo de sujeción E dejando que la aguja penetre durante 30 segundos, momento en el cual se debe tomar la lectura para determinar la penetración. (Si durante las primeras lecturas la pasta se mantiene blanda, el descenso del vástago, se puede hacer lentamente para evitar la deformación de la aguja de 1 mm de diámetro, pero las determinaciones de penetración para el tiempo de fraguado se deben hacer aflojando el tornillo). Las penetraciones deben estar separadas por lo menos 6 mm entre sí y 10 mm del borde

interior del molde. Se anotan los resultados de todas las penetraciones y por interpolación se debe determinar el tiempo obtenido para una penetración de 25 mm, el cual indica el Tiempo de Fraguado.

3. Precauciones – El aparato no debe estar sometido a vibraciones durante la penetración. La aguja de 1 mm de diámetro debe ser recta y estar limpia, pues la acumulación de pasta en su periferia puede retardar la penetración, así como la pasta en la punta puede aumentar la misma. Esta determinación es sólo aproximada, puesto que no sólo la temperatura y la cantidad de agua de amasado influyen en el resultado, sino también la temperatura y humedad del aire. (INVIAS, 2015).

- Resistencia a la compresión de morteros

1. Preparación de los moldes – A los moldes se les aplicará en sus caras interiores una capa delgada de aceite mineral ligero. Las superficies de contacto de los elementos separables se revestirán de una capa de aceite mineral pesado, luego se unen estos elementos y se elimina el exceso de aceite en cada uno de los compartimentos. Luego se coloca el molde sobre una placa plana, no absorbente, cubierta con una delgada capa de aceite. En la parte exterior de las juntas de las partes que componen el molde, o de éstos con la placa, se aplicará una mezcla de 3 partes en peso de parafina y 5 partes de resina o cera calentada a 110° -120° C, para impermeabilizar.
2. Composición del mortero – Las proporciones en peso de materiales para el mortero normal serán de una (1) parte de cemento y 2.75 partes de arena gradada, usando una relación agua-cemento de 0.485 para los cementos Pórtland y 0.460 para los Pórtland con incorporadores de aire. La cantidad de agua de mezcla para otros cementos diferentes del Pórtland y Pórtland con incorporadores de aire será tal que produzca un flujo de  $110 \pm 5$ , expresada en porcentaje de la masa del cemento. Las cantidades que deben ser mezcladas para formar la bachada para seis (6) y nueve (9) cubos de ensayo, serán las contenidas en la siguiente tabla:

Tabla A 1. Tolerancias de edad de ensayo de los especímenes

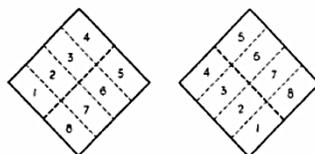
<b>Materiales</b>	<b>6 cubos</b>	<b>9 cubos</b>
Cemento (g)	500	740
Arena (g)	1375	2035
Agua(ml)		
Pórtland (0.485)	242	359
Agua (ml)		
Pórtland con incorporadores de aire (0.46)	230	340

Fuente: Autor, 2015

3. Preparación del mortero – La mezcla mecánica se debe realizar de acuerdo a la norma INV E – 321.
4. Determinación de flujo – Se limpia y se seca la plataforma de la mesa de flujo, se coloca el molde en el centro, se vierte en el molde una capa del mortero que se requiere ensayar, de unos 25 mm (1") de espesor, y se apisona con 20 golpes del compactador, uniformemente distribuidos. Con una segunda capa de mortero, se llena totalmente el molde y se apisona como la primera capa. La presión del compactador será la suficiente que asegure el llenado uniforme del molde. Se retira el exceso de mortero de la capa superior y se alisa la superficie por medio de un palustre. Una vez el molde se encuentra lleno, se limpia y se seca la plataforma de la mesa, teniendo cuidado de secar el agua que está alrededor de la base del molde. Después de un (1) minuto de terminada la operación de mezclado, se retira el molde, levantándolo e inmediatamente se deja caer la mesa de flujo desde una altura de 13 mm (1/2") 25 veces en 15 segundos. Luego se mide el diámetro de la base de la muestra, por lo menos en cuatro puntos equidistantes y se calcula el diámetro promedio. En el caso de otros cementos o cemento Pórtland con aire incluido, se deben hacer varios morteros de prueba con variantes en el porcentaje de adición del agua hasta obtener el flujo especificado. Cada prueba se hará con mortero nuevo. (norma INV E – 325).
5. Moldeo de Especímenes – Después de preparado el mortero, hay que dejarlo quieto en la mezcladora por 90 segundos, sin cubrirla. Durante los últimos 15 segundos de este intervalo, rápidamente se debe raspar el mortero pegado en las paredes y luego remezclar por 15 segundos a velocidad lenta. Dentro de un tiempo transcurrido no

mayor de 2 minutos y 30 segundos después de completar la mezcla original de la bachada, se inicia el llenado de los compartimentos, colocando una capa de más o menos 25 mm (1") de espesor (aproximadamente la mitad del molde), en cada uno de los compartimentos, y se apisonan con 32 golpes en 10 segundos, que se aplicarán sobre la superficie, en 4 etapas de 8 golpes adyacentes cada una, como se ilustra en el siguiente esquema.

Ilustración A 2: Esquema para el moldeo de especímenes



Fuente: I.N.V. E – 323 – 07 (modificada en la presente investigación, 2015).

Los golpes de cada etapa se darán siguiendo una dirección perpendicular a los de la anterior; la presión del compactador será tal, que asegure el llenado de los compartimentos. Se deben completar las cuatro (4) etapas de compactación, en cada compartimiento, antes de seguir con el siguiente. Una vez terminada la etapa de la primera capa en todos los compartimentos, se llenan con una segunda capa y se procede como en la primera. Durante la compactación de la segunda capa, al completar cada etapa y antes de iniciar la siguiente, se introduce en el compartimiento el mortero que se ha depositado en los bordes del molde. A lo largo de estas operaciones, el operario usará guantes de caucho. Al finalizar la compactación, las caras superiores de los cubos, deben quedar un poco más altas que el borde superior de los moldes. La superficie de los cubos debe ser alisada con la parte plana del palustre, retirando el mortero sobrante, con un movimiento de vaivén.

6. Almacenamiento de los especímenes – Terminada la operación de llenado, el conjunto de molde y placa, se colocará en la cámara húmeda durante 20 a 72 horas, con la cara superior expuesta al aire húmedo, pero protegidos contra la caída de gotas. Si los cubos se retiran del molde antes de las 24 horas, se dejarán en la cámara húmeda hasta completar este tiempo. Los cubos que no se van a ensayar a

las 24 horas, se sumergen en agua -cal saturada dentro del tanque de almacenamiento, construido con material no corrosivo; el agua del tanque se renovará frecuentemente para que permanezca limpia.

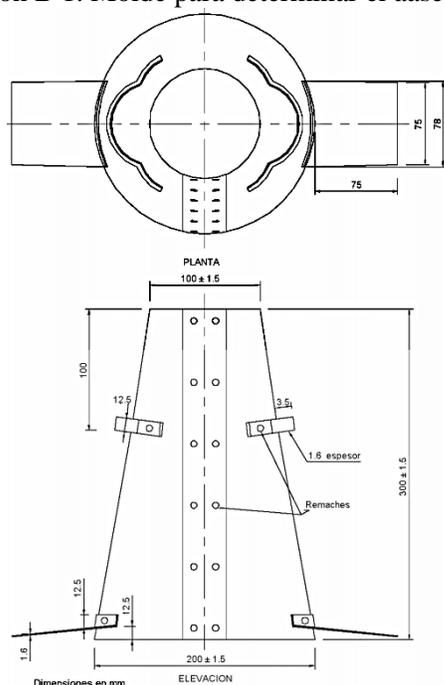
7. Determinación de la resistencia a la compresión – Los cubos que van a ser ensayados a las 24 horas, se sacan de la cámara húmeda cubriéndolos con un paño húmedo, mientras se van pasando a la máquina. Para los otros cubos, se deben sacar del tanque de almacenamiento uno a uno y probarse inmediatamente. Todos los cubos se ensayarán dentro de las siguientes tolerancias de tiempo: a las 24 horas  $\pm$  1/2 hora; a los 3 días  $\pm$  1 hora; a los 7 días  $\pm$  3 horas, a los 28 días  $\pm$  12 horas y a los 56 días  $\pm$  24 horas. Los cubos se deberán secar y dejarse limpios de arena suelta o incrustaciones en las caras que van a estar en contacto con los bloques de la máquina de ensayo. Se debe comprobar por medio de una regla, que las caras están perfectamente planas, si hay una curvatura apreciable se pueden limar las caras o desechar el espécimen. Se coloca cuidadosamente el espécimen en la máquina de ensayo, debajo del centro de la parte superior de la máquina, comprobándose antes de ensayar cada cubo, que la rótula gira libremente en cualquier dirección. No se usarán amortiguadores entre el cubo y los bloques de carga. Se aplica una proporción de carga a una proporción relativa de movimiento entre el plato superior y el inferior que corresponda a una carga aplicada al cubo en el rango de 900 N/segundo a 1800 N/segundo, la proporción del movimiento se obtiene durante la primera mitad de la carga máxima, no se hará ningún ajuste a la proporción de movimiento del plato en la siguiente mitad del ensayo. (INVIAS, 2015)

## ANEXO B

- Asentamiento del concreto (SLUMP)
  1. Se humedece el molde y se coloca sobre una superficie horizontal rígida, plana, húmeda y no absorbente. Se sujeta firmemente con los pies y se llena con la muestra de concreto en tres capas, cada una de ellas de un tercio del volumen del molde, aproximadamente. Un tercio del volumen del molde corresponde, aproximadamente, a una altura de 67 mm; dos tercios del volumen corresponden a una altura de 155 mm.
  2. Cada capa debe compactarse con 25 golpes de la varilla, distribuidos uniformemente sobre su sección transversal. Para la capa del fondo es necesario inclinar ligeramente la varilla dando aproximadamente la mitad de los golpes cerca del perímetro y avanzando con golpes verticales en forma de espiral, hacia el centro. La capa del fondo se debe compactar en todo su espesor; las capas intermedia y superior en su espesor respectivo, de modo que la varilla penetre ligeramente en la capa inmediatamente inferior.
  3. Al llenar la capa superior se debe apilar concreto sobre el molde antes de compactar. Si al hacerlo se asienta por debajo del borde superior, se debe agregar concreto adicional para que en todo momento haya concreto sobre el molde. Después que la última capa ha sido compactada se debe alisar a ras la superficie del concreto. Inmediatamente el molde es retirado, alzándolo cuidadosamente en dirección vertical. El concreto del área que rodea la base del cono debe ser removido para prevenir interferencia con el proceso de asentamiento. El alzado del molde debe hacerse en un tiempo aproximado de  $5 \pm 2$  segundos, mediante un movimiento uniforme hacia arriba, sin que se imparta movimiento lateral o de torsión al concreto. La operación completa, desde que se comienza a llenar el molde hasta que se retira, se debe hacer sin interrupción en un tiempo máximo de 2 minutos 30 segundos. El ensayo de asentamiento se debe comenzar a más tardar 5 minutos después de tomada la muestra.

4. Inmediatamente después, se mide el asentamiento, determinando la diferencia entre la altura del molde y la altura medida sobre el centro original de la base superior del espécimen. Si ocurre un derrumbamiento pronunciado o desprendimiento del concreto hacia un lado del espécimen, se debe repetir el ensayo sobre otra porción de la muestra. Si dos ensayos consecutivos sobre una muestra de concreto dan este resultado, el concreto carece probablemente de la plasticidad y cohesión necesarias para que el ensayo de asentamiento sea aplicable. (INVIAS, 2015)

Ilustración B 1. Molde para determinar el asentamiento.



Fuente: I.N.V. E – 404 – 07 (modificada en la presente investigación, 2015).

- Resistencia a la compresión de cilindros de concreto
  1. El ensayo de compresión de muestras curadas en agua se debe hacer inmediatamente después de que éstas han sido removidas del lugar de curado.
  2. Las muestras se deben mantener húmedas utilizando cualquier método conveniente, durante el período transcurrido desde su remoción del lugar de curado hasta cuando son ensayadas. Se deberán ensayar en condición húmeda.

3. Todos los especímenes de una edad determinada, se deben romper dentro de las tolerancias indicadas a continuación:

Tabla B 1. Tolerancias de edad de ensayo de los especímenes.

Edad del Ensayo	Tolerancia Permisible
12 horas	0.25 horas ó 2.1%
24 horas	$\pm 6.5$ horas ó 2.1%
3 días	2 horas ó 2.8%
7 días	6 horas ó 3.6%
28 días	20 horas ó 3.0%
56 días	40 horas ó 3.0%
90 días	2 días ó 2.2%

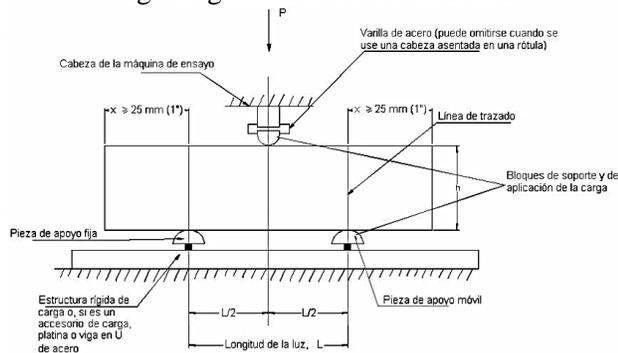
Fuente: I.N.V. E – 404 – 07

1. Colocación de la Muestra – Se coloca el bloque de carga inferior sobre la plataforma de la máquina de ensayo, directamente debajo del bloque superior. Se limpian con un paño las superficies de los bloques superior e inferior y se coloca el espécimen sobre el bloque inferior. Se alinea cuidadosamente el eje del espécimen con el centro de presión del bloque superior. El bloque con rótula se debe rotar inmediatamente antes de proceder al ensayo, de igual forma se debe verificar que el indicador de carga esté ajustado en cero.
2. Velocidad de Carga – Se aplica la carga continuamente sin golpes bruscos. La carga se deberá aplicar a una velocidad correspondiente a una tasa de aplicación de carga comprendida en el rango de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s ( $35 \pm 7$  psi/s). La velocidad escogida se debe mantener, al menos, durante la segunda mitad del ciclo de ensayo, para la fase de carga prevista. Sin embargo, no se deberá ajustar la velocidad de movimiento a medida que se está alcanzando la carga última y la tasa de aplicación de carga decrece debido al agrietamiento del cilindro. Durante la aplicación de la primera mitad de la fase de carga prevista, se permite una velocidad de carga mayor, siempre que ésta se controle para evitar cargas por impacto.
3. Se aplica la carga hasta que el indicador señale que ella comienza a decrecer de manera continua y el cilindro muestra un patrón de falla bien definido. Si se usa una máquina equipada con un detector de rotura del espécimen no se permitirá su

reconexión hasta que la carga haya caído a un valor menor de 95% de la máxima. Cuando se ensayan cilindros sin refrentar, puede ocurrir una fractura de esquina antes de alcanzar la carga última; en tal caso se debe continuar la compresión hasta que se tenga la certeza de haber alcanzado la carga última. Se registra la carga máxima soportada por el cilindro durante el ensayo y se anota el patrón de falla de acuerdo con los modelos de la Figura “, si se ajusta a alguno de ellos. En caso contrario se harán un dibujo y una descripción del tipo de falla producido. Si la resistencia medida es muy inferior a la esperada, se examina el cilindro para detectar zonas con vacíos o con evidencias de segregación o si la fractura atraviesa partículas del agregado grueso y se verifican, también, las condiciones del refrentado. (INVIAS, 2015).

- Ensayo de resistencia a la flexión del concreto

Ilustración B 2. Esquema de un equipo adecuado para el ensayo de flexión del concreto usando una viga cargada en el centro de la luz.



Fuente: I.N.V. E – 415 – 07 (modificado en la presente investigación, 2015).

1. Se gira la muestra sobre un lado con respecto a su posición de moldeo y se centra sobre los bloques de carga. Se centra el sistema de carga con relación a la fuerza aplicada. Se ponen los bloques de aplicación de carga en contacto con la superficie del espécimen en los puntos tercios, entre los soportes y se aplica una carga entre el 3% y el 6% de la carga última estimada. Utilizando calibradores de lámina normalizados de 0.1 mm (0.004") y de 0.38mm (0.015"), se determina si en una longitud de 25 mm (1") o más larga, se presenta un vacío entre la muestra y la superficie del bloque, mayor o menor al espesor de los calibradores. Se pulen o

refrentan las superficies de contacto de la muestra, o se rellenan con láminas de cuero para eliminar cualquier vacío o separación mayor a 0.1 mm (0.004"). Las láminas de cuero deben tener un espesor uniforme de 6.4 mm (0.25") y un ancho de 25 a 50 mm (1 a 2"), y se deben extender al ancho total de la muestra. Las separaciones mayores de 0.38 mm (0.015") deberán ser eliminadas solo por refrentado o limado de la superficie. Se recomienda minimizar el pulimento de las superficies laterales de la muestra, ya que esto puede variar las características físicas de ésta y afectar los resultados del ensayo.

2. La carga se debe aplicar de manera continua sin sobresaltos, a una rata que incremente constantemente el esfuerzo de la fibra extrema entre (0.9 Mpa/min y 1.2 Mpa/min), hasta que ocurra la rotura. La rata de incremento de la carga se calcula usando la siguiente ecuación: (INVIAS, 2015).

$$r = \frac{2 S b d^2}{3 L} \quad Ec(B 1).$$

Dónde:

r = rata de carga Mn/min (lb/min),

S = rata de incremento de la tensión en la fibra extrema Mpa/min (psi/min),

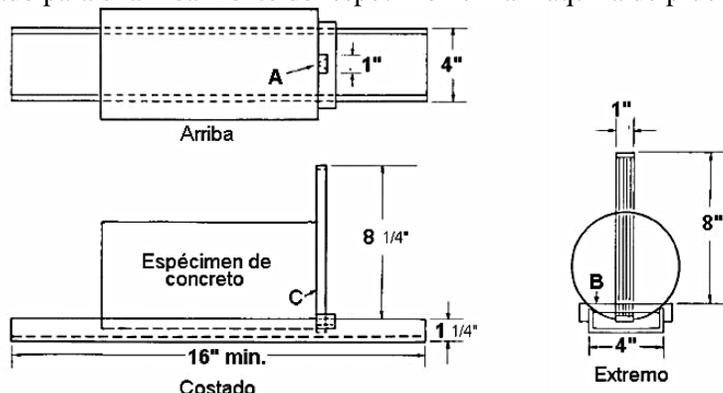
b = ancho promedio de la muestra (mm), (pulg),

d = altura promedio de la muestra (mm), (pulg), y

L = longitud de la muestra (mm), (pulg).

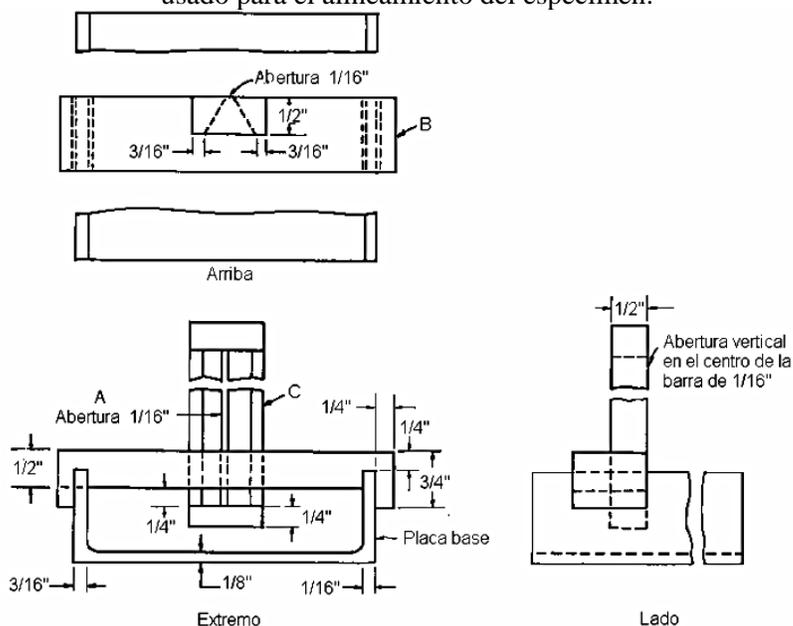
- Ensayo de tracción indirecta de cilindros de concreto
  1. Marcas – Se dibujan diámetros sobre cada extremo del espécimen, utilizando un aparato adecuado, que permita asegurar que se encuentran en el mismo plano axial (Figuras B 2 y B 3).
  2. Medida de Diámetro y Longitud – El diámetro se determina con aproximación de 0.25 mm (0.1") mediante el promedio de tres medidas realizadas una cerca a cada extremo y una en el centro del cilindro. La longitud se determina con aproximación de 0.25 mm (0.1"), mediante el promedio de por lo menos dos medidas.

Ilustración B 3. Vistas generales del equipo adecuado para la determinación del diámetro final usado para el alineamiento del espécimen en la máquina de prueba.



Fuente: I.N.V. E – 415 – 07 (Modificado en la presente investigación, 2015).

Ilustración B 4. Detalle en planta del equipo adecuado para la determinación del diámetro final usado para el alineamiento del espécimen.



Fuente: I.N.V. E – 415 – 07 (Modificado en la presente investigación, 2015).

3. Colocación de los listones de apoyo (Figura B 4) – Se coloca un listón de apoyo a lo largo del centro de la placa inferior. Se pone el cilindro sobre el listón, de tal manera que el punto de tangencia de las dos bases esté concentrado sobre la lámina de apoyo. Se coloca el segundo listón longitudinalmente sobre el cilindro, centrándolo

en forma similar al anterior. También se puede centrar el espécimen utilizando las marcas dibujadas así: colocado el listón inferior, se alinea el cilindro de forma que una de las líneas marcadas, quede centrada y vertical. El otro listón se coloca de forma que el punto de tangencia coincida con el otro extremo del diámetro vertical.

4. Velocidad de carga – Se aplica carga al cilindro en forma continua evitando impacto, a velocidad constante comprendida entre 689 kPa/min (100 lb/pulg<sup>2</sup>/min) y 1380 kPa/min (200 lb/pulg<sup>2</sup>/min) mientras se rompe el cilindro. Por lo tanto, la velocidad de aplicación de carga para cilindros normales de 152 mm por 305 mm (6” por 12”) está comprendida entre 50 y 100 kN/min (11300 y 22600 lbf). Se anota la carga de la máquina en el momento de rotura, lo mismo que el tipo de rotura y la apariencia del concreto.

Ilustración B 5. Cilindro colocado para ensayo de tensión indirecta



Fuente: I.N.V. E – 415 – 07 (Modificado en la presente investigación, 2015).