

U M S N H

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

F I C

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE MORTEROS DE CEMENTO
ELABORADOS CON GENIZA DE ELABORACIÓN DE LADRILLO Y
PERLITA EXPANDIDA.**

P R E S E N T A:

JAZMÍN ALEJANDRA AGHA PALOMARES.

A S E S O R:

DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA.



MORELIA MICHOACÁN AGOSTO DE 2018

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.0 De acuerdo a la norma Americana ASTM C150 (ASTM C 150, 2016)....	6
Tabla 2. De acuerdo a la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)	7
Tabla 3. Clasificación del Cemento por su Resistencia. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	7
Tabla 4. Clasificación del Cemento por sus características especiales. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).	7
Tabla 5. Abreviaturas de los óxidos del cemento. (Instituto del Concreto, 1997). 10	
Tabla 6. Componentes principales del cemento. (Shetty, Concrete Technology Theory and Practice, 2005).....	10
Tabla 7. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997)	12
Tabla 8. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas. (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).....	20
Tabla 9. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas. (Instituto del Concreto, 1997).	21
Tabla 10. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos.	38
Tabla 11. Ejemplo de tabla para el registro de granulometrías.	54
Tabla 12. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.	55
Tabla 13. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).	64
Tabla 14. Tabla de registro para resistencia a compresión simple.....	84
Tabla 15. Criterios de evaluación. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).	92
Tabla 16. Criterio de evaluación en Velocidad de pulso ultrasónico. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).	94
Tabla 17. Resultados de consistencia normal.	95
Tabla 18. Resultados de los tiempos de fraguado.	95

Tabla 19. Resultado de porcentaje de absorción. 96

Tabla 20. Resultados de la masa volumétrica seca y suelta (MVSS). 96

Tabla 21. Resultados de la masa volumétrica seca y varillada (MVSV). 97

Tabla 22. Resultados de granulometría. 98

Tabla 23. Resultado de colorimetría. 98

Tabla 24. Porcentaje de material fino que contiene la arena. 99

Tabla 25. Resultados de la densidad de la arena. 100

Tabla 26. Resultados de fluidez. 100

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Muestra representativa de cemento..... 32

Ilustración 2. Mezcla en reposo. (J.Acha, 2017)..... 33

Ilustración 3. Penetración de la aguja. (J.Acha, 2017) 35

Ilustración 4. Penetración de la aguja final. (J.Acha, 2017)..... 37

Ilustración 5. División del material. (J.Acha, 2017) 41

Ilustración 6. Vaciado de la muestra en el divisor de muestras. (J.Acha, 2017).... 41

Ilustración 7. Saturado del material. (J.Acha, 2017) 44

Ilustración 8. Secado del material. (J.Acha, 2017) 44

Ilustración 9. Llenado del molde troncocónico. (J.Acha, 2017) 45

Ilustración 10. Secado de la muestra hasta peso constante. (J.Acha, 2017). 46

Ilustración 11. Llenado del recipiente. (J.Acha, 2017)..... 47

Ilustración 12. Peso el recipiente lleno con el material. (J.Acha, 2017)..... 48

Ilustración 13. Varillado de la primera capa. (J.Acha, 2017) 50

Ilustración 14. Pesado del material. (J.Acha, 2017). 51

Ilustración 15. Secado del material. (J.Acha, 2017) 52

Ilustración 16. Agitado del material por medio del Raf-tar. (J.Acha, 2017)..... 53

Ilustración 17. Colocacion del material de cada malla en las hojas. (J.Acha, 2017).
..... 53

Ilustración 18. Pesado del material al décimo de gramo. (J.Acha, 2017)..... 54

Ilustración 19. Llenado del biberón. (J.Acha, 2017). 57

Ilustración 20. Agitado del material. (J.Acha, 2017). 58

Ilustración 21. Comparación del agua con la tabla de colores. (J.Acha, 2017). 58

Ilustración 22. Llenado del frasco. (J.Acha, 2017)..... 60

Ilustración 23. Reposo de los frascos. (J.Acha, 2017). 60

Ilustración 24. Lavado del material. (J.Acha, 2017)..... 62

Ilustración 25. Regreso del material por medio del lavado. (J.Acha, 2017)..... 62

Ilustración 26. Secado del material. (J.Acha, 2017). 63

Ilustración 27. Secado superficial de la muestra. (J.Acha, 2017)..... 66

Ilustración 28. Colocando el volumen inicial en la probeta. (J.Acha, 2017)..... 66

Ilustración 29. Colocación del material en la probeta. (J.Acha, 2017)..... 67

Ilustración 30. Mesa de fluidez. (J.Acha, 2017)..... 71

Ilustración 31. Hidratación de la muestra. (J.Acha, 2017) 71

Ilustración 32. Compactación del mortero. (J.Acha, 2017)..... 72

Ilustración 33. Extendido de la mezcla. (J.Acha, 2017)..... 72

Ilustración 34. Toma de medidas. (J.Acha, 2017) 72

Ilustración 35. Llenado de la primer capa. (J.Acha, 2017) 74

Ilustración 36. Fraguado de los cubos. (J.Acha, 2017). 75

Ilustración 37. Cubos descimbrados. (J.Acha, 2017) 75

Ilustración 38. Nomenclatura de los cubos. (J.Acha, 2017). 76

Ilustración 39. Curado de los cubos. (J.Acha, 2017)..... 76

Ilustración 40. Engrasado de los moldes. (J.Acha, 2017) 77

Ilustración 41. Llenado de la primer capa de los prismas. (J.Acha, 2017) 77

Ilustración 42. Enrasado de los prismas. (J.Acha, 2017) 78

Ilustración 43. Desmolde de los prismas. (J.Acha, 2017)..... 78

Ilustración 44. Fraguado de las briquetas. (J.Acha, 2017) 80

Ilustración 45. Cubo colocado en el centro de la placa y sometido a una carga de compresión. (J.Acha, 2017)..... 82

Ilustración 46. Falla del cubo sometido a compresión. (J.Acha, 2017)..... 83

Ilustración 47. Especímenes sometidos a compresión. (J.Acha, 2017) 83

Ilustración 48. Muestra colocada en los apoyos para la muestra de flexión. (J.Acha, 2017)..... 85

Ilustración 49. Aplicación de la carga de flexión constante a la muestra. (J.Acha, 2017)..... 86

Ilustración 50. Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga. (J.Acha, 2017)..... 87

Ilustración 51. Muestra colocada para aplicarle tensión. (J.Acha, 2017)..... 88

Ilustración 52. Equipo utilizado en la medición de resistividad eléctrica. (J.Acha, 2017)..... 90

Ilustración 53. Lectura de la resistividad eléctrica. (J.Acha, 2017)..... 91

Ilustración 54. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico. (J.Acha, 2017) 93

Ilustración 55. Gráfica comparativa de esfuerzo a compresión. 101

Ilustración 56. Gráfica comparativa de esfuerzo a flexión. 102

Ilustración 57. Gráfica comparativa de esfuerzo a tensión simple..... 103

Ilustración 58. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica en cubos. 104

Ilustración 59. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica en cilindros. 105

Ilustración 60. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica en prismas. 106

Ilustración 61. Gráfica comparativa de velocidad de pulso ultrasónico en cubos. 107

Ilustración 62. Gráfica comparativa de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.
..... 108

Ilustración 63. Gráfica comparativa de velocidad de pulso ultrasónico en prismas.
..... 109

Ilustración 64. Esfuerzo/resistividad eléctrica..... 110

Ilustración 65. Esfuerzo/velocidad de pulso ultrasónico. 111

Ilustración 66. Esfuerzo a flexión / resistividad eléctrica. 112

Ilustración 67. Esfuerzo a flexión /velocidad de pulso ultrasónico..... 113

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS ii

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES iv

ÍNDICE DE CONTENIDO vii

AGRADECIMIENTOS..... xi

RESUMEN..... xii

JUSTIFICACIÓN.....xiv

OBJETIVOxvi

INTRODUCCIÓN..... 1

2. MARCO TEORICO 4

2.1 CEMENTO 4

 2.1.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO 4

 2.1.2 CLASIFICACIÓN 6

 2.1.3 PROPIEDADES DEL CEMENTO 8

 2.1.3.1. Propiedades Físicas 8

 2.1.3.2. Propiedades Químicas 10

 2.1.3.3. Propiedades Mecánicas 13

2.2 AGREGADOS..... 13

 2.2.1 ORIGEN DE LOS AGREGADOS..... 14

 2.2.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS..... 16

 2.2.2.1. Propiedades Físicas 16

 2.2.2.2. Propiedades Químicas 18

 2.2.2.3. Propiedades Mecánica 18

2.3 AGUA 19

 2.3.1 ESPECIFICACIONES..... 19

2.4 MORTEROS 22

 2.4.1 COMPOSICIÓN DE MORTEROS 22

2.4.2 CLASIFICACIÓN Y USOS 23

2.5 MATERIAL EN ESTUDIO COMO SUSTITUCIÓN AL MORTERO 24

2.5.1 CENIZA..... 24

2.5.1.1. Antecedentes..... 25

2.5.1.2. CLASIFICACIÓN 26

2.5.2 CENIZA MÁS PERLITA EXPANDIDA 27

2.6 ADITIVOS 28

2.6.1 TIPOS Y USOS..... 28

3. METODOLOGÍA 31

3.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES 31

3.1.1 CEMENTO 31

3.1.1.1. Consistencia 31

3.1.1.2. Fraguado por el método de Gillmore. 35

3.1.1.3. Cemento usado en la investigación..... 37

3.1.2 ARENA 38

3.1.2.1. CUARTEO..... 39

3.1.2.2. HUMEDAD SUPERFICIAL Y HUMEDAD DE ABSORCIÓN ARENAS..... 43

3.1.2.3. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SECA Y SUELTA DE UNA ARENA (MVSS). 46

3.1.2.4. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SECA Y VARILLADA DE UNA ARENA (MVSV) 49

3.1.2.5. GRANULOMETRÍA EN ARENAS. 51

3.1.2.6. COLORIMETRÍA EN ARENAS. 56

3.1.2.7. SEDIMENTACIÓN EN ARENAS..... 59

3.1.2.8. MATERIAL QUE PASA POR LA MALLA N° 200 EN ARENA 61

3.1.2.9. DENSIDAD DE LA ARENA. 64

3.1.2.10. AGREGADOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN 68

3.1.3 AGUA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN 68

3.1.4 ADITIVO UTILIZADO EN LA EXPERIMENTACIÓN. 69

- 3.1.5 CENIZA UTILIZADA EN LA EXPERIMENTACIÓN..... 69
- 3.2 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO FRESCO..... 69**
 - 3.2.1 FLUIDEZ..... 69
 - 3.2.2 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES..... 73
 - 3.2.2.1. Cubos..... 73
 - 3.2.2.2. Prismas..... 77
 - 3.2.2.3. Cilindros..... 79
 - 3.2.2.4. Elaboración de briquetas..... 79
 - 3.2.3 CURADO..... 80
- 3.3. PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO. 81**
 - 3.3.1 DESTRUCTIVAS..... 81
 - 3.3.1.1. Resistencia a compresión simple..... 81
 - 3.3.1.2. Resistencia a flexión..... 84**
 - 3.3.1.3. Resistencia a la tensión directa..... 87**
 - 3.3.2 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS..... 89
 - 3.3.2.1. Resistividad eléctrica..... 89
 - 3.3.2.2. Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU)..... 92
- 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES 95**
 - 4.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES 95**
 - 4.1.1 CEMENTO..... 95
 - 4.1.1.1. Consistencia..... 95
 - 4.1.1.2. Fraguado por el método de Gillmore..... 95
 - 4.1.2 ARENA 96
 - 4.1.2.1. Cuarteo..... 96
 - 4.1.2.2. Humedad superficial y humedad de absorción arenas..... 96
 - 4.1.2.3. Determinación de la masa volumétrica seca y suelto de una arena (mvss).....96
 - 4.1.2.4. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (mvsv).....97
 - 4.1.2.5. Granulometría en arenas..... 98

4.1.2.6. Colorimetría en arenas..... 98

4.1.2.7. Sedimentación en arenas..... 99

4.1.2.8. Material que pasa por la malla no 200 en arena. 99

4.1.2.9. DENSIDAD DE LA ARENA. 99

4.2 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO FRESCO..... 100

4.2.1 FLUIDEZ..... 100

4.2.2 ELABORACIÓN DE ESPÉCIMEN 100

4.2.3 CURADO 100

4.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO 101

4.3.1 DESTRUCTIVAS 101

4.3.1.1. Resistencia a compresión simple 101

4.3.1.2. Resistencia a flexión..... 102

4.3.1.3. Resistencia a tensión..... 103

4.3.2 NO DESTRUCTIVAS..... 104

4.3.2.1. Resistividad eléctrica 104

4.3.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico. 107

5. CONCLUSIONES 114

BIBLIOGRAFÍA 115

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Agustín y Herminia, a mi padre por ser uno de los pilares más importantes en mi vida, por ser mi ángel de la guarda y por ser mi mayor motivación, a mi madre por ser mi guardiana y guía en este camino. Gracias por ser los amores de mi vida.

A mis hermanos por estar al pendiente de mí, por darme todo el apoyo tanto emocional como económico, por todas las palabras de aliento, por ser parte de mis alegrías.

A mis sobrinitos por darme momentos de alegría y felicidad.

A Antonio por acompañarme en todo momento, por estar para mí en las buenas y en las malas, por darme ánimos y por permitirme compartir una parte de mi vida contigo .

A todos mis profesores que contribuyeron en esta formación, a cada uno de mis compañeros de la facultad y en especial a mi amigo jordani por todo el apoyo tanto en la escuela como en mi vida.

Debo de agradecer de manera especial y sincera al Doctor Hugo Luis Chávez, por saber guiarme en esta investigación, por tanto tiempo invertido, por los consejos y asesorías, por la motivación y los consejos, debo destacar la por encima de todo la disponibilidad y la paciencia, le agradezco también por haber facilitados los medios para que esta investigación fuera posible.

Al Maestro Mauricio Sánchez Arreola quiero agradecer sinceramente por todas esas asesorías, por aclarar todas esas dudas y aterrizar todas esas ideas que andaban volando, por su tiempo invertido y por la paciencia invertida.

Para todas las personas del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

RESUMEN

El presente trabajo es una investigación enfocada en la búsqueda del porcentaje de sustitución adecuado de ceniza de elaboración de ladrillo (CEL) y una mezcla de ceniza de elaboración de ladrillo y perlita expandida molida (PEM), en morteros base cemento Portland, con el objeto de mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad, además de reducir la cantidad de cemento utilizado en la elaboración del mismo para contaminar menos al medio ambiente.

La arena utilizada en dicha investigación fue proveniente del banco de materiales de materiales llamado “Joyitas” que está ubicado en la carretera Joyitas entrada a San Bernabé en el kilómetro 28 en Michoacán, mientras que la ceniza de elaboración de ladrillo fue proveniente de la ladrillera ubicada en la comunidad de Angahuan perteneciente al municipio de Uruapan, en la carretera Los Reyes-Charapan.

Se diseñaron 3 mezclas, un testigo y dos con sustituciones, la primera sustitución es de CELU con el 7%, con respecto a la masa del cemento Portland, la tercera sustitución fue una mezcla de CEL y PEM con porcentajes de 5% y 7%.

Se realizaron muestras de forma cúbica, prismática y cilíndrica, a las cuales se les practicaron pruebas por durabilidad como son resistividad eléctrica y velocidad de pulso ultrasónico. Así como resistencia a la compresión simple. Las edades de prueba fueron de 3, 7, 14, 28 y 120 días.

La caracterización de los materiales, el desarrollo de las pruebas no destructivas, de durabilidad se realizaron siguiendo las normativas ASTM y las normas mexicanas NMX.

Se obtuvieron resultados favorables en la mezcla con sustitución mayor, incluso mayores que la mezcla control. La mezcla de menor porcentaje de sustitución está dentro de los parámetros indicados en la norma correspondiente. Y ambas sustituciones nos arrojan resultados mejores que la mezcla control.

ABSTRACT

The present work is a investigation focused in the search of the percentage of substitution of ash of elaboration of brick (CEL) and a mixture of ash of elaboration of brick and ground expanded perlite (PEM), in mortars base Portland cement, with the object to improve the mechanical properties and durability, in addition to reducing the amount of cement used in the preparation of the same to pollute less to the environment.

The sand used in the research was from the material supply bank called "Joyitas" which is located on the Joyitas highway, entrance to San Bernabé at kilometer 28 in Michoacán, while the ash from brick processing was from the brick located in the community of Angahuan belonging to the municipality of Uruapan, on the Los Reyes-Charapan highway.

Three mixtures were designed, one control and two with substitutions, the first substitution was CELU with 7%, with respect to the mass of Portland cement, the third substitution was a mixture of CEL and PEM with percentages of 5% and 7% . Samples were made of cubic, prismatic and cylindrical shape, which were tested for durability such as electrical resistivity and ultrasonic pulse velocity. As well as simple compression resistance. The test ages were 3, 7, 14, 28 and 120 days. The characterization of the materials, the development of the non-destructive tests, of durability were carried out following the ASTM norms and the Mexican NMX norms.

Favorable results were obtained in the mixture with higher substitution, even greater than the control mixture. The mixture of lower percentage of substitution is within the parameters indicated in the corresponding standard. And both substitutions give us better results than the control mix.

PALABRAS CLAVE: Mortero, perlita, ceniza, resistencia, molienda.

JUSTIFICACIÓN

El 5% de toda la producción mundial de CO₂ se debe a la fabricación del cemento, y este es un porcentaje que, en años sucesivos, no solo se mantendrá, sino que se incrementará conforme se activen las economías emergentes asiáticas. Tengamos en cuenta que el cemento es el elemento fundamental del concreto y el mortero, y este es, junto con el acero y el aluminio, los productos más consumidos mundialmente en la construcción. Para cuantificar de una manera sencilla la aportación de cemento a la producción de CO₂ basta con echar un vistazo a los siguientes datos: Cada tonelada de cemento producida por el sistema convencional produce una tonelada de CO₂; si en vez de cemento convencional, producimos cementos especiales podemos llegar a reducir la cifra de emisiones de CO₂ a 0,4 toneladas por tonelada producida (Domoterra, 2013).

Es notable el incremento en el uso del cemento a través de los años en México, para el año 2013, se registraba un consumo de 32.7 millones de toneladas, y para el año 2014 se registra un consumo de 35.2 millones de toneladas de cemento en el país, esto quiere decir, un 7.65% de aumento en el consumo en tan solo un año.

El alto consumo de recursos naturales, energéticos y las emisiones de CO₂ y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de este material.

Para atenuar esta sustitución se trabaja en la disminución de su impacto ambiental, por dos vías; la de mejorar la eficiencia de los procesos de producción en planta y la de disminuir el consumo del cemento en obra, utilizando adiciones que sustituyan parcialmente este material por otros de menor impacto. (Soso, 2008).

Para mejorar las condiciones mecánicas de los concretos fabricados con cemento Portland, es necesario implementar la utilización de materiales suplementarios como es el empleo de materiales puzolánicos tanto de origen natural como procesados artificialmente. (Marquez-Montero, 2010)

Las puzolanas en general, sobre todo las de origen artificial, constituyen una de las experiencias más alentadoras en la búsqueda de sustitutos más sustentables, ecológica y económicamente, del cemento. (Soso, 2008).

OBJETIVO

El objetivo de esta investigación es diseñar, elaborar y evaluar una mezcla de mortero que contenga una sustitución parcial del cemento con materiales residuales productos de la elaboración de ladrillos, utilizada comúnmente en obras de infraestructura. Esto con el fin de lograr la elaboración de un mortero con un mejor desempeño ante agentes agresivos para el material y que originen un deterioro del mismo por la interacción con un medio ambiente abrasivo.

Se pretende obtener un producto final que resulte más económico debido a la sustitución del cemento portland y que mejore sus características mecánicas, en especial la resistencia a compresión.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar si es factible o no, el uso de dichos materiales puzolánicos en la elaboración de morteros, con el fin de incrementar sus propiedades mecánicas.
- Reducir el consumo de cemento en la construcción mediante la incorporación de sustituciones minerales.
- Determinar el porcentaje óptimo de sustitución para el mortero.

1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años se han buscado materiales que colaboren con la resistencia y la durabilidad, capaces de resistir ataques agresivos del medio ambiente.

Un punto débil de los cementos normales es su deficiente durabilidad, por falta de resistencia química en ambientes agresivos, debiendo extenderse en el futuro el uso de cementos mixtos, binarios o ternarios, con este fin. (VERDU, 2016).

Existen varios mecanismos que disminuyen la durabilidad de los elementos elaborados con cemento, y con ello disminuye la vida útil de una estructura, como son, entre muchos otros (contaminantes, aceites, algas, materia orgánica, arcillas, limos, etc.) las reacciones álcali-sílice, reacciones álcali-carbonato y ataques por sulfatos y por cloruros.

Una manera de prevenir la acción de estos mecanismos en el cemento, es la utilización de puzolanas como sustitutas parciales del cemento. Las puzolanas son materiales que al ser agregados al concreto y mortero tienden a mejorar sus características físico-mecánicas y de durabilidad.

Las puzolanas fueron ampliamente usadas en la antigüedad, antes de la invención del cemento, y ahora se ha demostrado, en varias investigaciones realizadas, que las puzolanas de origen orgánico pueden lograr un mejor desempeño del concreto.

Las adiciones minerales de uso más frecuente pueden clasificarse en tres grupos dependiendo de su actividad y de su contribución al desarrollo de la resistencia del cemento.

- **Las escorias:** Las escorias de alto horno tienen un lugar preponderante en el contexto de las adiciones, ya que poseen hidraulicidad propia. Así, la escoria finamente molida puede reaccionar en cierto nivel al ser mezclada con agua y endurecer sin necesidad de presencia de cal, hidróxido de

calcio o cemento. Las escorias de alto horno provienen de la fabricación del acero en la industria siderúrgica como un subproducto y contiene compuestos adecuados para una adición como los silicoaluminatos cálcicos. Para servir como adición, las escorias deben cumplir con un índice de hidraulicidad y ser de constitución vítrea, para lo cual el enfriamiento de la escoria al salir del horno debe ser brusco y no permitir un enfriamiento lento que produzca cristalización.

- **Las puzolanas:** Son materiales inorgánicos de origen natural o artificial; dentro de estas segundas, muchas constituyen subproductos de uso nulo en otros rubros, pero adecuados como adición al cemento, ya que son capaces de reaccionar con el hidróxido de calcio que se libera en la hidratación de los silicatos de calcio.

Dentro de las adiciones puzolanicas los materiales más comunes son:

Puzolanas naturales. Representadas por rocas volcánicas de diversa naturaleza o rocas de origen orgánico como las tierras de diatomeas. Se debe considerar que no todo material volcánico es puzolana y deben realizarse pruebas de actividad puzolánica para su verificación.

Puzolanas artificiales. Dentro de este grupo, se consideran algunos subproductos; dos de ellos sobresalen por su performance y uso. Las cenizas volantes (fly-ash), procedentes de los humos del carbón de las centrales termoeléctricas, ampliamente usados a nivel mundial, existen de varios tipos más o menos eficientes, pero no necesitan molienda, lo cual las hace muy apreciadas.

- **Los fillers:** Son adiciones que, en proporciones relativamente bajas, se añaden al clinker para incrementar la producción de cemento, lo que contribuye con el ahorro energético y el cuidado del ambiente. Contrariamente a algunas opiniones, no se considera a los fillers del todo inertes, pues producen un efecto dispersante del cemento que favorece su

hidratación; en cuanto a otro tipo de acción como la epitáctica, se está investigando al encontrar resultados alentadores en algunos tipos de filler calizo (Shaw, 2000).

En esta investigación se hicieron tres mezclas, un testigo y dos sustituciones, la primera sustitución es de CELU con un porcentaje del 7% y la segunda sustitución es de CELU y PEM con el 7% y 5% respectivamente, a las cuales se les hicieron pruebas destructivas y no destructivas.

2. MARCO TEORICO

2.1 CEMENTO

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina Cemento Portland, debido a que es el más común. El cemento portland es la mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación. El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua. (Instituto del Concreto, 1997).

El cemento es el material de construcción más utilizado en el mundo. Aporta propiedades útiles y deseables, tales como resistencia a la compresión, durabilidad para una diversidad de aplicaciones de construcción.

2.1.1 PROCESOS DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO

El proceso de fabricación empleado en determinada planta productora de cemento varía de acuerdo con sus circunstancias particulares, pero en general todas realizan las siguientes 6 etapas:

1. **Explotación de materias primas:** este procedimiento se hace de acuerdo a las normas y parámetros convencionales. Dependiendo de la dureza de los materiales se usan explosivos y trituración posterior, en otros casos el simple arrastre es suficiente. Una vez extraídos los

materiales de las respectivas canteras, se lleva a un proceso de trituración primaria para obtener tamaños máximos de 1". Los materiales que no requieran trituración se llevan a un lugar de almacenamiento (Instituto del Concreto, 1997).

2. **Dosificación, molienda y homogenización de materias primas:** las materias primas seleccionadas se trituran, muelen y dosifican de tal manera que la mezcla resultante tenga la composición química deseada. Se puede utilizar un proceso seco o húmedo. En el proceso seco, la molienda y el mezclado se realizan con materiales secos. En el proceso húmedo, las operaciones de molienda y de mezclado se efectúan con los materiales en forma de lechada (Kosmatha & Panarese, 1992).
3. **Clinkerización:** Luego del mezclado, la materia prima molida se alimenta por el extremo superior de un horno, pasa a una velocidad que se controla por medio de la pendiente y la velocidad rotacional del horno. En el extremo inferior del horno el combustible para calcinar es inyectado; donde las temperaturas de 1 420°C a 1 650°C que transforman químicamente a la materia prima en clínker de cemento, que tiene la forma de pelotillas negro-grisáceas de 12 mm de diámetro (Kosmatha & Panarese, 1992).
4. **Enfriamiento:** el material transformado en clínker debe ser enfriado rápidamente a 70°C para garantizar que el cemento fabricado, después de fraguado, no presente cambio de volumen.
5. **Molienda de Clínker, adiciones de yeso:** en este proceso se transforma el clínker en polvo y se agregan las adiciones (puzolanas o escoria de alto horno). Luego se introduce el yeso, se muele tan finamente que casi en su totalidad logra pasar la malla No. 200 y así se obtiene el cemento portland propiamente dicho. El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez

entra en contacto con el agua, porque cuando su cantidad es muy baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea.

6. **Empaque y distribución:** el cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento y posteriormente se empaca en bultos. También se puede descargar directamente en carros cisternas para su distribución a granel (Instituto del Concreto, 1997).

2.1.2 CLASIFICACIÓN

Debido a las necesidades particulares de cada construcción existen diversos tipos de cemento que deberán cumplir ciertas características físico-químicas por lo que se clasifican de la siguiente manera.

- De acuerdo a la norma Americana ASTM C 150

Tabla 1.0 De acuerdo a la norma Americana ASTM C150 (ASTM C 150, 2016).

NORMA ASTM C-150	Uso
Tipo I (Portland normal)	Cemento de uso general.
Tipo II (Portland moderada Resistencia a los sulfatos)	Se emplea donde sea necesario tomar precauciones contra el ataque moderado de sulfatos además que genera menos calor.
Tipo III (Portland fraguado rápido, alta resistencia inicial)	Proporciona resistencias elevadas a edades tempranas normalmente a una semana o menos.
Tipo IV (Portland bajo calor de hidratación)	De menor cantidad y velocidad de generación de calor provocada por la hidratación.
Tipo V (Portland alta resistencia a los sulfatos)	De alta resistencia a los sulfato.
Blanco	
Especial, bajo álcali; todos los tipos	

- De acuerdo a la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014. (Tablas 2,3,4)

Tabla 2. De acuerdo a la norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2014. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

Tipo	Denominación
CPO	Cemento Portland Ordinario
CPP	Cemento Portland Puzolánico
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
CPC	Cemento Portland Compuesto
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

Tabla 3. Clasificación del Cemento por su Resistencia. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

Clase resistente	Resistencia a la compresión N/mm²		
	3 Días Mínimo	28 Días	
		Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

Tabla 4. Clasificación del Cemento por sus características especiales. (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).

Nomenclatura	Descripción
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reacción Alcali-Agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

2.1.3 PROPIEDADES DEL CEMENTO

Conocer las propiedades del cemento es importante para tener en cuenta algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter físico, químico y mecánico; las cuales dependen del estado en el cual se encuentren. Estudiar el cemento a fondo ayudara a saber su comportamiento al mezclarse con otros elementos y materias primas.

2.1.3.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas más importantes del cemento son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión.

1. **Densidad:** es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Portland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm^3 . En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de clínker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 g/cm^3 , dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.
2. **Finura:** el proceso de molienda de clínker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.
3. **Consistencia normal:** es la propiedad que indica el grado de fluidez o dificultad con que la pasta puede ser manejada. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los

cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% (Instituto del Concreto, 1997).

4. Tiempos de fraguado:

1. **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
2. **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya esta dura.
3. **Fraguado rápido o relámpago:** es una reacción violenta que lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, se caracteriza por su velocidad de desarrollo de calor.
4. **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. No despiden calor en forma apreciable y si la pasta se remezcla sin adicionar agua, se restablece su plasticidad sin afectar el fraguado y la resistencia.
5. **Expansión:** Se refiere a la habilidad de la pasta de cemento en mantener su volumen. La falta de sanidad o la expansión destructiva retardada se puede causar por la cantidad excesiva de cal libre o magnesita supercalcinadas. La mayoría de las especificaciones para cemento portland limitan el contenido de magnesita (periclase) y la expansión máxima (ASTM-C-151-00, 2014).

2.1.3.2. Propiedades Químicas

El proceso de Clinkerización del cemento involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes, indicados en la tabla 5. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Abreviaturas de los óxidos del cemento. (Instituto del Concreto, 1997).

Fórmula	Nombre	Abreviatura
CaO	Óxido de Calcio "Cal"	C
SiO ₂	Dióxido de Sílice "Silicato"	S
Al ₂ O ₃	Óxido de Aluminio "Aluminato"	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de Hierro "Hierro"	F

Tabla 6. Componentes principales del cemento. (Shetty, *Concrete Technology Theory and Practice*, 2005)

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato Tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S
Silicato Dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S
Aluminato Tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A
Aluminoferrito Tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF

De esta forma se habla de las fases:

- **Halita, con alto contenido de C₃S:** es la fase principal de la mayoría de los clíners portland, y de ella dependen en buena parte las características de desarrollo de resistencia mecánica. Reacciona rápidamente con el agua, endurece en corto tiempo y tiene alto calor de hidratación, de tal manera, que afecta el tiempo de fraguado y la resistencia inicial (Instituto del Concreto, 1997)

- **Belita, a base de C_2S :** es usualmente la segunda fase en importancia del clínker. Su componente principal (C_2S) reacciona lentamente con el agua, con un consecuente bajo calor de hidratación y una contribución al desarrollo de la resistencia a partir de siete días. La fase belita y halita, determinan decisivamente el desarrollo de la resistencia y difieren entre sí en su tasa de endurecimiento y de liberación de calor de hidratación. El contenido de estas dos suman aproximadamente de 70 a 80% del cemento. Se supone que de manera aproximada, el C_3S aporta una resistencia a corto y mediano plazo (contribución al desarrollo de la resistencia durante las primeras cuatro semanas) y el C_2S a mediano y largo plazo (contribución al desarrollo de la resistencia de la cuarta semana en adelante).
- **Aluminato, rica en C_3A :** este compuesto no es puro, sino más bien una solución sólida de C_3A con algo de impurezas de SiO_2 y MgO que reacciona de manera rápida con agua, contribuye con calor alto de hidratación y a una alta resistencia inicial. Además, confiere al concreto, propiedades indeseables, como cambios volumétricos y poca resistencia a la acción de los sulfatos, razón por la cual su contenido se limita entre 5 y 15% según el tipo de cemento (Instituto del Concreto, 1997).
- **Ferrito C_4AF , solución sólida compuesta por ferritos y aluminatos de calcio:** este componente está presente en pequeñas cantidades en el cemento y en comparación con los otros tres componentes, no influye en forma significativa en su comportamiento, colaborando escasamente a la resistencia del concreto, siendo relativamente inactivo, pero es útil al facilitar la fusión durante el calcinamiento del clínker (Neville A. , 1998).

Las cantidades efectivas de los diferentes tipos de compuestos varían considerablemente de un cemento a otro y realmente es posible obtener distintas clases de él, agregando en forma proporcional los materiales correspondientes.

En la tabla 7 se enumeran algunos valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cemento.

Tabla 7. Valores típicos de los compuestos de los diferentes tipos del cemento (Instituto del Concreto, 1997)

Cemento	Composición Química en %			
Portland	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Tipo I	48	27	12	8
Tipo II	40	35	5	13
Tipo III	62	13	9	8
Tipo IV	25	50	5	12
Tipo V	38	37	4	9

Todos y cada uno de los componentes del cemento contribuyen de una u otra forma a la resistencia, pues es claro que todos los productos de hidratación llenan espacios, reduciendo con ellos la porosidad en el cemento (Neville A. , 1998).

Hidratación del cemento: la reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.

Calor de hidratación: durante el proceso de hidratación, se efectúan reacciones químicas exotérmicas, es decir reacciones que liberan calor, haciendo que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura. Este incremento es importante en estructuras de concreto, ya que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso de la temperatura, se origina contracción del material, que puede conducir a la formación de grietas y fisuras. El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. Depende de la

composición del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los compuestos individuales. El C_3A y el C_3S son los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor (Instituto del Concreto, 1997).

2.1.3.3. Propiedades Mecánicas

Las propiedades mecánicas que más impactan en el comportamiento de las mezclas de concreto son: resistencia a la compresión y resistencia a flexión.

Resistencia a la compresión: Es aquella obtenida por la prueba de cubos o cilindros de mortero de acuerdo con las normas (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), (ASTM-C-109-M, 2002) y (AASHTO-T-106, 2002) (Kosmatka S. H., Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Resistencia a la flexión: Prueba en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) cuando es sometido a esfuerzos de flexión en prismas de 40x40x160 mm, siguiendo el procedimiento establecido en la norma (ASTM-C-348, 1997).

2.2 AGREGADOS

Los agregados finos y gruesos constituyen entre el 60 y el 75% de una mezcla de concreto. Debido a que los agregados ocupan un porcentaje tan alto del volumen de una mezcla de concreto y pueden afectar de gran manera las propiedades del concreto en estado fresco como endurecido, es importante que los agregados sean muestreados y ensayados adecuadamente para garantizar que sean idóneos para usarse en la mezcla diseñada (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A,C, 2015).

Los agregados no solo pueden limitar la resistencia del hormigón, pues sus propiedades pueden afectar en gran medida la durabilidad y el rendimiento estructural del concreto.

En un principio, al agregado se le considero como material inerte, no costoso, disperso en la pasta de cemento para producir un gran volumen de concreto. En realidad, el agregado no es inerte, pues sus propiedades físicas, térmicas y en ocasiones, químicas, pueden influir en el desempeño del concreto, por ejemplo, mejorando su durabilidad y estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento (Neville & Brooks, 2010).

2.2.1 ORIGEN DE LOS AGREGADOS

El 100% de los concretos y morteros que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, bancos etc.) y como productos de trituración de la roca.

Casi todos los materiales áridos naturales provienen de rocas madre. De esta forma, existen tres tipos de rocas: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Estas clasificaciones se basan en el modo de formación de las rocas.

Cabe recordar que las rocas ígneas se forman por el enfriamiento de la lava en la superficie de la cresta (basalto) o muy por debajo de la cresta (granito). Las rocas sedimentarias se forman inicialmente debajo del mar y posteriormente emergen o las aguas modifican su cauce. Las rocas metamórficas son originadas por rocas ígneas o sedimentarias que posteriormente se transforman debido al calor extremo y la presión, flora y fauna (Shetty, Concrete Technology Theory and Practice, 2005).

Rocas Ígneas. Constituyen la mayor parte de la porción sólida de la tierra, de ellas se derivan los otros grupos de rocas y la mayor parte de los agregados del concreto en América. Estas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma y tienen una estructura masiva, totalmente cristalina o vítrea o una combinación entre ellas, dependiendo de la velocidad a la que se enfriaron durante su formación. Dependiendo del porcentaje de sílice que contienen se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se

clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie (Instituto del Concreto, 1997).

La mayoría de las rocas ígneas son idóneas para producir concreto, ya que normalmente son duras, resistentes y densas. Son los agregados del concreto más químicamente activos y muestran una tendencia a reaccionar con los álcalis en el cemento (Shetty, Concrete Technology Theory and Practice, 2005).

Rocas Sedimentarias. Las rocas ígneas o rocas metamórficas son sometidas a los agentes de la intemperie como el sol, la lluvia y el viento. Estos agentes descomponen, fragmentan, transportan y depositan las partículas de roca, muy por debajo del lecho marino donde se cementan entre sí por algún material cementante. Los materiales de cementación pueden ser carbonosos, silíceos o arcillosos encontrados en la naturaleza. Al mismo tiempo, el depósito y el material cementante son sometidos a presión estática del agua y se convierten en la capa compacta de roca sedimentaria. La deposición, cementación y consolidación toman lugar capa por capa debajo del lecho marino.

Estas formaciones de rocas sedimentarias subsecuentemente son levantadas y se convierten en continentes. Las rocas sedimentarias de la estructura estratificada se extraen y los agregados de concreto se derivan de ellas. La calidad de los agregados derivados de las rocas sedimentarias variará en calidad dependiendo del material de cementación y la presión bajo la cual estas rocas fueron originalmente compactadas.

Las rocas sedimentarias pueden variar de suaves a duras, de porosas a densas y de ligeras a pesadas. El grado de consolidación, el tipo de cementación, el espesor de las capas y la contaminación, son factores importantes para determinar la conveniencia de las rocas sedimentarias para producir concreto (Shetty, Concrete Technology Theory and Practice, 2005).

Rocas Metamórficas. Tanto las rocas ígneas como las rocas sedimentarias pueden ser sometidas a altas temperaturas y presiones que causan metamorfismo produciendo un cambio en la estructura y textura de las rocas.

Muchas de las propiedades de los agregados, como composiciones químicas y mineralógicas, descripción petrográfica, peso específico, dureza, resistencia, estabilidad física y química, y estructura de poros entre otros, dependen principalmente de la calidad de la roca madre. Sin embargo, algunas propiedades poseídas por los agregados que son importantes, en lo que se refiera a la elaboración del concreto, no tienen ninguna relación con la roca madre, en particular, la forma y tamaño.

Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena roca madre producen un concreto de calidad, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores, a las sugeridas en reglamentos, obtenidos a partir de rocas madre no tan buenas. Estos agregados, que no son tan buenos, pueden ser utilizados para elaborar concreto satisfactorio debido al hecho de que una capa de pasta de cemento en los agregados, logra mejoras respecto a las características de durabilidad y resistencia. La selección de los agregados debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico. En general, aquel agregado que proporcionará la calidad deseada en el concreto con el menor gasto, debe ser seleccionado. (Shetty, Concrete Technology Theory and Practice, 2005).

2.2.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS

2.2.2.1. Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los agregados que más impactan en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría.** Es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas).

Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que las arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad (Kosmatka S. H., Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

- **Porosidad.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad. Se requieren agregados que cumplan con esta propiedad física y así garantizar una buena resistencia mecánica.
- **Densidad suelta.** Es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen unitario es el ocupado por los agregados y los vacíos que se generan entre las partículas de los agregados (NMX-C-083-ONNCCE, 2014) .
- **Forma y Textura.** Influye en las propiedades del concreto fresco más que en las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o alargadas requieren más cantidad de agua para producir concreto trabajable que los agregados lisos, redondeados y compactos. Además requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.

2.2.2.2. Propiedades Químicas

Lo más importante en las propiedades químicas es revisar que los agregados no presenten sustancias y componentes geológicos agresivos que puedan afectar la reacción entre la masa del concreto y así afectar su comportamiento mecánico en estado endurecido.

- **Epitaxia:** esta es la única reacción química favorable de los agregados conocidos hasta el momento. Da mejor adherencia entre ciertos agregados calizos y la pasta de cemento, a medida que transcurre el tiempo.
- **Reacción álcali-agregado:** La sílice activa, presente en algunos agregados, reacciona con los álcalis del cemento produciendo expansiones, destrucción de la masa y pérdida de características resistentes (Instituto del Concreto, 1997).

2.2.2.3. Propiedades Mecánica

Las propiedades mecánicas de los agregados que más impactan en el comportamiento de las mezclas de concreto son: resistencia, adherencia y dureza.

- **Resistencia.** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se le han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración.

- **Adherencia.** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. 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 flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas.
- **Dureza.** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales (Neville & Brooks, 2010).

2.3 AGUA

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se puede usar como agua de mezcla para la preparación del concreto. Sin embargo también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables.

2.3.1 ESPECIFICACIONES

Las aguas a las que se refiere la norma NMX-C-122-2004-ONNCCE, que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en ella. El agua de mar cuando sea imprescindible su empleo, se debe usar únicamente para la elaboración y curado de concretos sin acero de refuerzo. El agua cuyo análisis muestre que excede alguno o algunos de los límites de la, se puede utilizar si se demuestra que en concretos de características

semejantes elaborados con esta agua han aportado un comportamiento satisfactorio a través del tiempo en condiciones similares de exposición.

Tabla 8. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas. (NMX-C-122-ONNCCE, 2004)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en p.p.m.	Cementos sulfioresistentes Límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de preesfuerzo y piezas de Puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como SO₄= (a)	3000	3500
Magnesio como Mg⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO₂	5	3
Álcalis totales como Na⁺	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5
(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada		

de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.

(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.

(c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl_2 como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar límites para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla o se pueden realizar ensayos adecuados para la determinación del efecto de las impurezas, ya que algunas impurezas pueden tener efecto sobre la resistencia de fraguado y aún afectar la durabilidad y otras propiedades (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). Se da a conocer los efectos de las impurezas sobre las propiedades del concreto.

Tabla 9. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas. (*Instituto del Concreto, 1997*).

Impurezas	Fraguado	Endurecimiento	Eflorescencias	Corrosión	Adherencia	Expansión	Aire incluido	Hidratación
Ph	x	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias solubles	x	x	X	x	X	---	---	---
Sulfatos	x	x	X	x	X	x	---	---
Cloruros	x	x	X	x	---	---	---	---
Hidratos de carbon	x	x	---	---	---	---	---	---
Sustancias orgánicas solubles	X	x	---	---	---	---	x	X

en éter								
x Causa efecto negativo ---- No causa efecto negativo								

2.4 MORTEROS

El mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto. (Sánchez de Guzmán, 2006).

2.4.1 COMPOSICIÓN DE MORTEROS

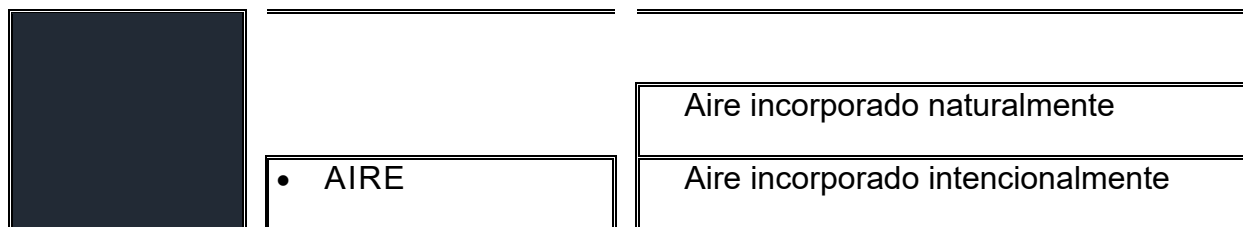
La composición general de los morteros es básicamente la misma, ya que todos los morteros satisfacen las siguientes propiedades:

MORTERO = AGLUTINANTE + MATERIAL ÁRIDO + LÍQUIDO DE AMASADO O SOLVENTE

Más generalmente se puede describir de la siguiente manera Tabla 10 (Artigas, 2002):

Tabla 10. Resumen de la composición de un mortero.

	FASES	COMPONENTES
MORTERO	PASTA	AGLUTINANTE
		AGUA
		ADITIVOS y ADICIONES ACTIVAS
	AGREGADO FINO	ARENA



En lo que varían los morteros es en las propiedades de cada material componente del mortero, el uso al que se ha destinado, los materiales utilizados y disponibles, el presupuesto económico y otros factores presentes en obra, la dosificación aglutinante-agregado, las características y granulometría del material inerte y de la calidad y cantidad del líquido de amasado. (G.R.C, 2005).

2.4.2 CLASIFICACIÓN Y USOS

- Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición:

Mortero físico. El paso del estado pastoso o semilíquido a un sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.

Mortero químico. El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero se cuenta con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.

Mortero aéreo. Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.

Mortero bituminoso. Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.

Mortero hidráulico. Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento (Mendoza Anaya, Brito Benitez, & Arenas Alatorre, 2004).

Los morteros de cemento Portland se elaboran con arena, agua y cemento Portland. Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar tabiques y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeños resquicios ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos. Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia (Constructor Civil, s.f.).

2.5 MATERIAL EN ESTUDIO COMO SUSTITUCIÓN AL MORTERO

Se buscan sustituciones al mortero para mejorar sus propiedades químicas, físicas y mecánicas, las sustituciones son con material residual con el fin de evitar una mayor contaminación debido a la producción del cemento portland ordinario y así generar que el costo económico baje considerablemente ya que los morteros con adiciones serán más durables que los morteros convencionales.

2.5.1 CENIZA

Un polvo fino con partículas principalmente esféricas, cristalinas, originadas por la combustión de carbón, con o sin materiales de combustión, que tiene propiedades puzolánicas. (UNE-EN 450-1, 2013) (ASTM-C-618, 2015).

2.5.1.1. Antecedentes

Estos morteros en base a ceniza volante activada alcalinamente vinieron siendo desarrollados por Joseph Davidovits, como uno de los pioneros de la polimerización, quien empezó a hablar en los 70 de geopolímeros también conocidos como aluminosilicatos inorgánicos para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la química conocida como geopolimerización, donde se forma un material compacto caracterizado por sus excelentes propiedades ligantes y el buen desarrollo de propiedades mecánicas. (A.F-J, 2004)

Entre 1940 y 1970, científicos e inventores alternativos dieron pasos en la implementación de alumino-silicatos y residuos (escoria) para la invención de materiales alternativos, descubrieron que la adición de álcali produce una nueva forma de endurecimiento rápido ligante, propuso que el mecanismo de endurecimiento de una escoria (basada en un 41% de CaO, 30% de SiO₂ y 20.5% de Al₂O₃) activada alcalinamente con NaOH (del 5.5% al 7.5%) involucrando la disolución de Si y Al y precipitación de silicato cálcico hidratado o aluminatos hidratados, se obtendrían resistencias de 27 MPa a un día y de 72 MPa a 5 años. Cementos de escoria activada alcalinamente (llamados cementos Trief) se utilizaron en la construcción a gran escala en la década de 1950.

Al igual que el científico Victor Glukhovsky (poner referencia), quien estudio los efectos de la activación álcali en las escorias aglomeradas y dio su mayor contribución al sentar las bases de cementos alcalinos con alto contenido de Calcio (Escorias de Alto Horno), este noto que las rocas y la arcilla reaccionaba durante el proceso alcalino formando Zeolitas (Sodio Silico-aluminato Hidratado), llamándolo “Concretos de Suelo Silicato” y a los aglutinantes “Suelo Cementos”.

Una de las primeras aplicaciones constructivas se desarrollaron por el científico Davidovits en 1972-1976, donde utilizó geopolímeros para paneles de virutas de madera resistentes al fuego, constituido por un núcleo de madera y dos

revestimientos de geopolímeros, durante la fabricación de estos paneles se observó una característica inusual, el endurecimiento del material orgánico, se produjo simultáneamente con el ajuste del mineral silico-aluminato, al aplicar los mismos parámetros termo-endurecibles, de 150-180 ° C de temperatura. (Davidovits, 1993), este desarrolló sistemas de activación alcalina de materiales basados en caolín y Metacaolín, la mezcla de este aluminosilicato sólido con una solución cáustica altamente alcalina constituida con hidróxidos y/o silicatos produce un material sintético, identificando que las propiedades ligantes de los geopolímeros son atribuidas a que las especies disueltas tras la activación alcalina son polimerizadas, de manera que se produce una red tridimensional amorfa de los aluminosilicatos, que endurece rápidamente y presenta buenas propiedades mecánicas.

En este sentido, el aprovechamiento de cenizas en la elaboración de materiales alternativos de construcción se ha venido contemplando como una de las alternativas de sustitución del cemento convencional, se han llevado a cabo estudios e investigaciones para la evaluación de las distintas propiedades de los materiales.

Empezando con la sustitución parcial del cemento hidráulico hasta llegar a la geopolimerización, con sustitución total del cemento hidráulico.

2.5.1.2. CLASIFICACIÓN

Actualmente, la normativa americana (ASTM-C-618, 2015) clasifica la ceniza volante de acuerdo a su composición química:

Clase N: Pozolanas naturales crudas o calcinadas que cumplan con los requisitos aplicables para la clase, como algunas tierras de diatomeas; lutitas, tobas y cenizas volcánicas y materiales diversos que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y lutitas.

Clase F: Este tipo de Ceniza posee propiedades puzolanica, son Cenizas con bajo contenido de cal y obtenidas a partir de la quema de antracita¹, carbón bituminoso², a partir de carbón sub-bituminoso y lignito³.

Clase C: Esta clase de Ceniza además de tener propiedades puzolanicas, posee propiedades cementantes, Cenizas con alto contenido de carbón proveniente de la quema de carbón sub-bituminoso⁴ o lignito y que a su vez puede presentar propiedades hidráulicas.

2.5.2 CENIZA MÀS PERLITA EXPANDIDA

Los materiales de construcción incorporados con materiales porosos tales como perlita expandida, de espuma de plástico y cenizas volantes expandida se han utilizado durante mucho tiempo. Estos materiales porosos tienen una estructura de poros interconectados y son estables químicamente. Además, son baratos y son recursos abundantes (Cabeza LF, Casellon C, Nogues M, Medrano M, Leppers R, Zubillaga O., 2007).

La adición de perlita expandida, agregado liviano, se sabe que reduce significativamente la densidad de los morteros a base de cemento y mejorar sus propiedades térmicas (Demirbog̃a R, Gũl R , 2003), resistencia a la congelación-descongelación (Demirbog̃a R, Gũl R , 2004) y las propiedades acústicas (Yilmazer S, 2005). La perlita es una forma amorfa de magma riolítica o dacítico que contiene 2-5% de agua (Mladenovic A, 2004). Su uso en los elementos estructurales se ha promovido en los miembros de carga dinámica, donde en el consiguiente descenso en el peso del concreto se espera para limitar los daños durante los terremotos (Topcu IB, 2008), sobre todo después de refuerzo adecuado con fibras. En la mayoría de los estudios, la perlita se ha utilizado como un reemplazo para el cemento Portland, como un relleno microscópico ligero o para reemplazar una porción de la arena. Si bien se reconoce su actividad puzolánica, su papel en morteros ligeros es en gran parte la de un agregado inerte (Torres ML, 2009).

En la mezcla se le adiciono el 7% de CELU mas el 5% de PEM, dando un total del 12% de adición total con respecto al peso del cemento.

2.6 ADITIVOS

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento portland, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. Se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto.

2.6.1 TIPOS Y USOS

Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue:

1. Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire).

Se usan para introducir y estabilizar de propósito, burbujas microscópicas de aire en el concreto. El aire incorporado mejora la resistencia del concreto contra el descascaramiento de la superficie causado por los productos químicos deshelantes. El concreto con aire incluido, contiene diminutas burbujas de aire distribuidas uniformemente en toda la pasta de cemento. La inclusión de aire en el concreto, se puede producir usando un cemento incluso de aire, o con la introducción de un aditivo incluso de aire, o combinación de ambos.

2. Aditivos reductores de agua.

Se usan para disminuir la cantidad de agua de mezcla necesaria para la producción de un concreto con un revenimiento específico, para reducir la relación agua-cemento, para disminuir el contenido de cemento y para aumentar el revenimiento. Los reductores de agua típicos disminuyen el contenido de agua aproximadamente del 5% al 10%. Con los aditivos reductores de agua normalmente se obtiene un aumento de la resistencia porque se disminuye la relación agua-cemento.

3. Plastificantes (fluidificantes).

Estos aditivos se adicionan al concreto de revenimientos y relación agua-cemento de bajo a normal para producir un concreto fluido, con alto revenimiento. El concreto fluido o plástico es un concreto con consistencia bien fluida, pero trabajable, y que se puede colocar con poca o ninguna vibración o compactación. Algunas aplicaciones para el concreto fluido son: colado de concreto en secciones muy delgadas, áreas con poco espaciamiento del acero de refuerzo, colado bajo el agua, concreto bombeado, para reducir la presión del bombeo, áreas donde no se pueden usar los métodos convencionales de consolidación y para la reducción de los costos de manejo.

4. Aditivos aceleradores (acelerantes).

Se usan para acelerar la tasa de hidratación (fraguado) y el desarrollo de la resistencia del concreto en edades tempranas. El desarrollo de la resistencia del concreto se puede acelerar por otros métodos, usando el cemento de alta resistencia inicial, bajando la relación agua cemento, usando un reductor de agua o curando el concreto a altas temperaturas.

5. Aditivos retardadores (retardantes).

Los aditivos retardantes se usan para retrasar la tasa de fraguado del concreto. Son muy útiles para extender el tiempo de fraguado del concreto, pero también se usan para disminuir la pérdida de revenimiento y extender la trabajabilidad, especialmente antes de la colocación del concreto en ambientes con altas temperaturas.

Además de los aditivos mencionados existen una gran variedad a continuación se mencionan algunos de los aditivos:

6. Aditivos de control de la hidratación.
7. Inhibidores de corrosión.
8. Reductores de retracción.

9. Inhibidores de reacción álcali-agregado.
10. Aditivos colorantes.
11. Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, fuerte, durable, estando y resistente al desgaste. Estas calidades se les puede obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados preferiblemente al uso de aditivos.

Las razones principales para el uso de aditivos son:

1. Reducción del costo de la construcción del concreto.
2. Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
3. Manutención de la calidad del concreto durante las etapas del mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.
4. Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción.

La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad de material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura del concreto (Kosmatka S. , Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

3. METODOLOGÍA

3.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Las pruebas realizadas en esta investigación se realizaron para tres pruebas, la primera un testigo, la segunda mezcla con una sustitución del 7% de CELU y la tercera mezcla con sustitución de CELU 7% + PEM 5% dando un total de sustitución del 12% con respecto del peso unitario del cemento.

3.1.1 CEMENTO

3.1.1.1. Consistencia

OBJETIVO.

Es conocer la cantidad de agua necesaria para combinarla con un determinado peso de cemento para que sirva como referencia para efectuar pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado.

Es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1 centímetro de diámetro del aparato de Vicat, penetre dentro de la pasta de cemento elaborada con dicha agua, 10 mm $\pm$ 1 mm bajo la superficie libre, durante 30 segundos después de haber iniciado la prueba.

EQUIPO.

Muestra representativa del cemento.

Agua destilada o limpia.

Balanza con aproximación al décimo de gramo.

Recipiente para realizar la mezcla del cemento con el agua.

Pesas con las variaciones permitidas en la tabla A.S.T.M C187-55.

Probeta graduada de 100 y 200 mililitros con aproximación a 1 y 2 mililitros respectivamente.

Aparato de Vicat.

Crisol liso.

PROCEDIMIENTO.

Debido a lo laborioso de la explicación del desarrollo, lo desplegaremos en los siguientes incisos.

- a) Obtención de la muestra representativa del cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.
 1. Se pesa 650 gramos de cemento y se vierte sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudado de una pequeña espátula.



Ilustración 1. Muestra representativa de cemento.

2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje. Respecto al peso del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar el cronometro al caer al agua sobre el cemento).

3. Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar en la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador para colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).



Ilustración 2. Mezcla en reposo. (J.Acha, 2017)

5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contando a partir de los anteriores.
 - a) En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.
 - b) En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximadamente 15 centímetros, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe repetir 6 veces terminando lo anterior.
 - c) En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansa la bola en la palma de tu mano, se introduce a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de Vicat el cual se

sostiene con la otra mano llenado completamente el anillo con pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal).

El exceso de esta que permanezca en la boca grande se remueve con un movimiento simple de la mano. A continuación se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa la boca superior con una pasa de boca de albañil o una espátula que se mantendrá formando un pequeño ángulo en el borde de la cuchara durante las operaciones de enrasado y enlisado, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.

6. Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un embolo se pone en contacto con la superficie de la pasta y se aprieta el anillo sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial(todo lo anterior se puede hacer previo al realiza de la mezcla para ya no entretenerse ya que esto se debe hacer dentro de los 30 segundos).
7. Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30 segundos y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, se toma esta cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento (si la lectura no es de $10\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$, se repite el procedimiento antes visto hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento).



Ilustración 3. Penetración de la aguja. (J.Acha, 2017)

Referencia.

(ASTM-C-187-04, 2004)

Se siguió el mismo procedimiento para las diferentes mezclas, agregando la sustitución correspondiente para cada una.

3.1.1.2. Fraguado por el método de Gillmore.

OBJETIVO.

Es determinar el tiempo de fraguado inicial y final del cemento hidráulico mediante las agujas de Gillmore.

EQUIPO.

Aparato de Gillmore.

Balanzas.

Pesas.

Probetas graduadas.

Temperatura y humedad.

La temperatura del laboratorio, material y equipo debe mantenerse entre 20° y 27° C. La del agua de mezcla y la cámara de humedad no varía de 23° C en más de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ la humedad relativa de laboratorio no será inferior a 50.

Preparación de la pasta del cemento.

Con la pasta de cemento preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia de aproximadamente 4" por lado, se hace una pastilla de poco más o menos de 7.5 centímetros de diámetro y de 1.3 centímetros de espesor en la parte central, disminuyendo hacia los bordes. Para moldearla, se aplanar primero la pasta de cemento sobre el vidrio y forme después moviendo la cuchara desde los bordes hacia el centro, aplanando a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo y se deja ahí, salvo cuando valla efectuándose determinaciones del tiempo de fraguado.

Determinación de los tiempos de fraguado.

Al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se pone en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporte a las agujas de Gillmore inicial (la de menos peso), sin que marque huella apreciable. Se considera que el cemento ha alcanzado su fraguado final cuando soporte la aguja de Gillmore final (la más pesada), sin que marque huella apreciable (ASTM C 266, 2015).



Ilustración 4. Penetración de la aguja final. (J.Acha, 2017)

Recomendaciones.

El tiempo de fraguado se efectúa no solo por el porcentaje y temperatura del agua empleada, y cantidad de amasado que haya recibido la pasta, sino también por la temperatura y humedad, entonces su determinación es aproximada.

3.1.1.3. Cemento usado en la investigación.

El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 28 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

El Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico (C_3A) la norma inglesa para este cemento, (BS-4027:1980, 2000), estipula un contenido de C_3A , del 3.5%. La finura mínima es $250 \text{ m}^2/\text{kg}$.

Ha sido diseñado para estructuras que necesiten moderada resistencia a los sulfatos o bajo calor de hidratación. Se recomienda en edificios y construcciones industriales, puentes, estructuras expuestas a suelos, al agua con concentración moderada de sulfatos o al agua de mar o estructuras con gran volumen de

concreto, en estos cementos el contenido de C_3A se limita a 8% (Kosmatka S. H., Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

El cemento CPC 30R RS, genera moderado calor de hidratación ya que el C_3S y el C_3A , que son los que producen alto de hidratación, disminuyen notablemente.

El ataque de los sulfatos ocurre porque el Aluminato tricálcico (C_3A), reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cual por ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla.

Es por ello que el cemento CPC 30R RS hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para que cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, se evite que la sustancia que se forma cuando esta endurecido, produzca su destrucción (Instituto del Concreto, 1997).

3.1.2 ARENA

En la tabla 10 se pueden observar las normas, tanto las mexicanas como las internacionales, que rigen a cada prueba que se les realiza a los materiales pétreos, en este caso, a la arena.

Tabla 11. Equivalencia de normas para la caracterización de los materiales pétreos.

PRUEBA	NORMA MEXICANA	NORMA ASTM
Práctica estándar para el muestreo de agregados.	NMX-C-030-ONNCCE	ASTM-D-75-03
Práctica estándar para reducir muestras de agregados a tamaños de prueba.	NMX-C-170-ONNCCE	ASTM-C-702-03
Método de prueba estándar para el contenido total de humedad	NMX-C-166-ONNCCE	ASTM-C-566-97

evaporado por secado.		
Método de prueba estándar para la masa unitaria en agregados.	NMX-C-073-ONNCCE	ASTM-C-29-97
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado fino.	NMX-C-165-ONNCCE	ASTM-C-128-04
Método de prueba estándar para la densidad relativa y absorción del agregado grueso.	NMX-C-164-ONNCCE	ASTM-C-127-04
Método de prueba estándar para materiales finos que pasan la malla No. 200 en agregados por lavado.	NMX-C-084-ONNCCE	ASTM-C-117
Método de prueba estándar para terrones de arcilla en agregados.	NMX-C-071-ONNCCE	ASTM-C-142-97
Método de prueba estándar para las impurezas orgánicas en agregado fino para concretos.	NMX-C-088-ONNCCE	ASTM-C-40-99
Método de prueba estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.	NMX-C-077-ONNCCE	ASTM-C-136-04
Método de prueba estándar para el valor de equivalente de arena de suelos y agregado fino.	NMX-C-416-ONNCCE-2003	ASTM-D-2419-02

3.1.2.1. CUARTEO

OBJETIVO.

Obtener una muestra representativa y del tamaño adecuado, para la prueba de que se trate, de la muestra obtenida en el campo.

EQUIPO

Charolas grandes de lámina.

Palas de boca recta.

Brocha o cepillo de pelo.

Balanza o báscula.

Divisor de muestra

Traza de plástico flexible de 40 por 40 centímetros.

PROCEDIMIENTO

Existen tres procedimientos usuales para efectuar el cuarteo de las muestras.

Procedimiento por cuarteo con palas.

1. Se vacía la muestra del material en uno de los extremos de la charola grande.
2. Se cambia el material al extremo opuesto, este cambio deberá hacerse por medio del paleado, tratando de revolver todo el material, además se procurara apilar todo el material en forma cónica. Este procedimiento se repite tres veces.
3. Una vez terminado el paso anterior el material apilado en forma cónica se aplana la parte superior por medio de la parte posterior de la pala y después se divide el material trazando dos líneas perpendiculares sobre la superficie horizontal plana del material, eliminando las dos porciones opuestas, el material sobrante nos servirá para realizar las pruebas correspondientes. Si se desea disminuir el tamaño de la muestra se repite el procedimiento anterior señalado.



Ilustración 5. División del material.

Procedimiento para divisor de muestras.

1. Se toma la muestra previamente puesta en la charola ancha y se vacía sobre la parte superior del divisor, procurando repartirla en toda la longitud del divisor.



Ilustración 6. Vaciado de la muestra en el divisor de muestras.

2. El material recibido en uno de los recipientes se elimina o se reintegra en la bolsa de donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, entonces el material que ha quedado en uno de los recipientes se vierte en una charola, para posteriormente vaciar la charola sobre el divisor, este proceso de división y eliminación se hace hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.

Procedimiento con el trazo de plástico. Para muestras pequeñas.

1. Se coloca el trazo de plástico sobre la superficie de una mesa, posteriormente se coloca el material en la parte central del plástico.
2. Se levantas los dos extremos opuestos del plástico y se unen a continuación, se regresa a la posición original del trazo de plástico. Enseguida se levantas los otros dos extremos opuestos y se unen, posteriormente se regresa a su posición original. Este proceso se repite varias veces hasta obtener una muestra homogénea.
3. Se elimina la mitad del material ya revuelto, para lo cual se lleva el trazo de plástico con el material. Hasta el bordo de la mesa, de tal manera que la mitad del plástico quede sobre la muestra y la otra mitad en el aire sujeta con una de las manos, cogiendo el extremo que esta sobre la mesa, se suelta el extremo que está en el aire con lo cual se elimina la mitad del material. Este deberá ser recibido en un recipiente.

Especificaciones.

Las muestras de campo de agregado fino se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método de cuarte con palas. Las muestras de campo que se reduzcan por el procedimiento para divisor de muestras deben encontrarse húmedas superficialmente de no ser así se deben humedecer y después deben ser remezcladas.

Referencia

(NMX-C-170-ONNCCE, 1997), (ASTM-C-70, 2003)

3.1.2.2. HUMEDAD SUPERFICIAL Y HUMEDAD DE ABSORCIÓN ARENAS.

OBJETIVO.

Determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje.

EQUIPO.

Una muestra representativa de aproximadamente 2 kilogramos.

Una balanza con aproximación al décimo de gramo.

Una parrilla eléctrica.

Charolas metálicas.

Un cono metálico (truncocónico).

Un pizón.

Una espátula.

PROCEDIMIENTO

1. La muestra de 2 Kg se satura durante 24 horas, como mínimo.



Ilustración 7. Saturado del material.

2. Al terminas este tiempo se seca superficialmente, la arena por medio del molde troncocónico como se describe a continuación:
 - Se coloca la arena en la charola en la parrilla eléctrica para realizar la eliminación de agua que tienen en exceso, esto es, hacer el secado de la arena en forma superficial.



Ilustración 8. Secado del material. (J.Acha, 2017)

- Para saber cuándo la arena esta seca superficialmente se coloca el molde troncocónico dentro de la charola con el diámetro mayor hacia abajo, se llena el molde con la arena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados

con el pizón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente y si la arena mantiene la forma del cono significa que todavía tiene agua en exceso por lo tanto hay que seguir secando el material hasta que se obtenga el secado superficial. Conforme vaya perdiendo la humedad la muestra hay que realizar más continuamente el procedimiento con el cono para evitar que se seque en exceso.



Ilustración 9. Llenado del molde troncocónico. (J.Acha, 2017)

3. Cuando la arena esta seca superficialmente hay que pesar una muestra de 300 gramos, registrando este peso como peso saturado y superficialmente seco (Ph).
4. La muestra de 300 gramos, se coloca en una charola para secarla hasta peso contante, o sea, hasta eliminar completamente el agua.
5. Para saber cuándo el material está seco se coloca un cristal sobre el material, si no lo empaña retiramos el material y lo dejamos enfriar un poco, procediendo a pesarlo y registrar el peso como peso seco del material(Ps),si todavía se empaña el cristal hay que seguir secando el material para secarlo completamente.



Ilustración 10. Secado de la muestra hasta peso constante. (J.Acha, 2017).

CÁLCULOS

$$\% \text{ HUMEDAD DE ABSORCIÓN} = \frac{M_h - M_s}{M_s} 100$$

Donde:

M_h = Masa saturada y superficialmente seco (gramos).

M_s = Masa seca del material (gramos).

Referencia.

(NMX-C-165-ONNCCE, 2014). (ASTM C 128, 2004).

3.1.2.3. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SECA Y SUELTA DE UNA ARENA (MVSS).

OBJETIVO.

Determinar la masa por unidad de volumen de una arena cuando al acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

EQUIPO.

Una muestra de arena completamente seca.

Un recipiente de peso y volumen conocido.

Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.

Un cucharon y una pala.

Una balanza o báscula.

PROCEDIMIENTO.

Se vacía arena dentro del recipiente dejándose caer de una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros, llenando completamente el recipiente hasta colmarlo formando un cono.



Ilustración 11. Llenado del recipiente. (J.Acha, 2017)

Enseguida se enrasa el recipiente con la varilla y se limpia el recipiente de las partículas adheridas en las paredes exteriores procediendo a pesar.

Al peso obtenido anteriormente se le resta el peso del recipiente para obtener el peso de la arena.



Ilustración 12. Peso el recipiente lleno con el material. (J.Acha, 2017)

CÁLCULOS.

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V}$$

Donde:

M.V.S.S. = Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm³)

M = Masa de la arena (gramos)

V = Volumen del recipiente (cm³)

REFERENCIA.

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004)

3.1.2.4. DETERMINACIÓN DE LA MASA VOLUMÉTRICA SECA Y VARILLADA DE UNA ARENA (MVSV)

OBJETIVO.

Obtener el peso por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación.

EQUIPO.

Una muestra de arena completamente seca.

Un recipiente de peso y volumen conocido.

Una varilla lisa punta de bala de 5/8 de diámetro.

Un cucharón y una pala.

Una balanza o báscula.

PROCEDIMIENTO.

Se procede a llenar el recipiente con arena a volteo dejándola caer a una altura aproximada de 5 centímetros, el llenado del recipiente debe hacerse en tres capas dando a cada capa 25 golpes con la varilla punta de bala distribuyéndolas en toda la superficie del material.



Ilustración 13. Varillado de la primera capa. (J.Acha, 2017)

Debe cuidarse que la varilla no penetre en la capa anterior al dar los golpes.

Se enrasa el recipiente con la varilla punta de bala y se limpian todas las partículas que hayan quedado adheridas a las paredes exteriores.

Después de haberse realizado los pasos anteriores se pesa el recipiente con el material y se resta el peso del recipiente para así obtener el peso neto del material.



Ilustración 14. Pesado del material. (J.Acha, 2017).

CÁLCULOS.

$$M.V.S.V.=\frac{M}{V}$$

Donde:

M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm³)

M= Masa de la arena (gramos)

V= Volumen del recipiente (cm³)

Referencia.

(NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

3.1.2.5. GRANULOMETRÍA EN ARENAS.

OBJETIVO.

Es pasar por una serie de mallas o tamices la muestra representativa de arena, para conocer la distribución de los diámetros de las partículas y el módulo de finura.

EQUIPO.

Un juego de mallas con aberturas rectangulares del No 4, 8, 16, 30, 50,100 y charola con su respectiva tapa.

Una balanza con capacidad de 2160 gramos y aproximación al décimo de gramo.

Charolas, espátulas y parilla eléctrica.

Cepillos de cerdas y alambre.

Hojas de papel.

PROCEDIMIENTO.

1. Se toma la muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura no mayor de 110 °C.
3. Cuando el material este seco y frio, se toman 500 gramos, pesados al décimo de gramo.
4. Se colocan las mallas en orden decreciente (4, 8, 16, 30, 50, 100 y charola), se coloca la muestra de 500 gramos y se tapa.
5. Se agita el juego de mallas durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser a mano o mecánicamente (Raf-tap).



Ilustración 15. Secado del material. (J.Acha, 2017)



Ilustración 16. Agitado del material por medio del Raf-tar. (J.Acha, 2017).

6. En una superficie horizontal y limpia se colocan siete hojas de papel y sobre ella se coloca el materia retenido en cada una de las mallas, para lo cual se invertirá la malla con todo cuidado limpiando con un cepillo de alambre las mallas 4, 8, 16, 30, para desalojar el material que se encuentra entre los espacios de las mallas, las mallas 50 y 100 se limpiaran con cepillos de cerdas.

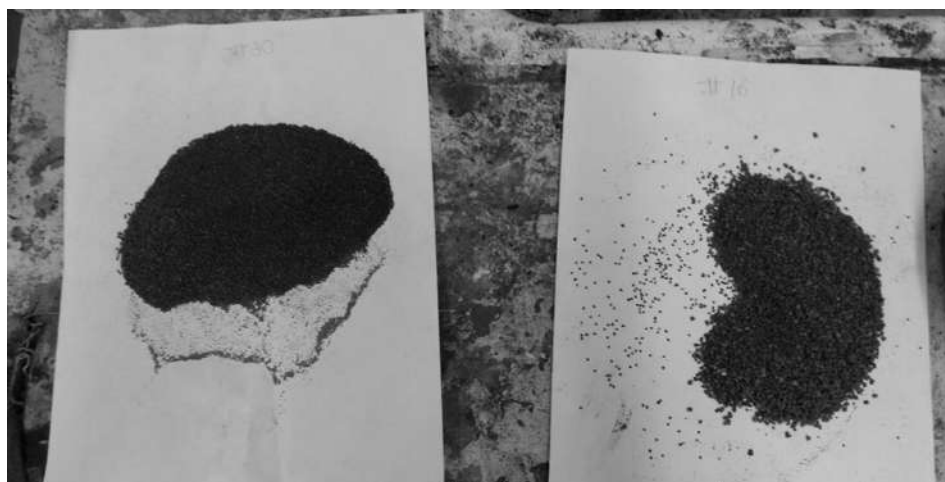


Ilustración 17. Colocación del material de cada malla en las hojas. (J.Acha, 2017).

- Se procede a pesar cada uno de los materiales retenidos en las mallas hasta el décimo de gramo anotando los pesos en el registro correspondientes.



Ilustración 18. Pesado del material al décimo de gramo. (J.Acha, 2017).

Tabla 12. Ejemplo de tabla para el registro de granulometrías.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
MALLA	MASA RETENIDO	% RETENIDO	% ACUMULATIVO	% QUE PASA
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
CHAROLA				
SUMA				

CÁLCULO.

1. Se anotan los pesos retenidos en las respectivas mallas en la columna uno.
2. El retenido de la columna dos se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido malla } 4 = \frac{\text{peso retenido}}{\text{suma peso retenido}} \cdot 100$$

3. El porcentaje acumulado se calcula a partir de los datos de la columna tres como sigue:

$$\% \text{ acumulativo malla } 1 = \% \text{ retenido malla } + \% \text{ acumulativo malla anterior.}$$

4. El porcentaje que pasa se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ que pasa la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo malla.}$$

5. Módulo de finura.

$$M.F. = \frac{\text{suma del porcentaje acumulativo de todas mas mallas sin incluir la charola}}{100}$$

Recomendaciones y especificaciones.

Para fines de calidad se recomienda que el Modulo de finura este entre 2.5 y 3.0, de acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) puede quedar entre 2.3 y 3.2.

Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.

Tabla 13. Especificaciones de granulometrías según Bureau Of Reclamation A.S.T.M.

MALLA	% QUE PASA
3/8	100
4	95-100

8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10

El porcentaje referido de dos mallas no debe ser mayor a 45 %.

3.1.2.6. COLORIMETRÍA EN ARENAS.

OBJETIVO.

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

EQUIPO.

Dos botellas iguales de vidrio incoloras de 250 a 350 cm³ con marcas a cada 25 cm³ (frasco de biberón).

Charolas, parilla de secado, espátula, balanza, vaso de precipitado.

Material para las soluciones y vidrio color normal.

Solución de sosa cáustica 30 gramos por litro de solución de normal en agua destilada.

PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA.

Cuando no se tiene el vidrio de color normal hay que preparar la solución de color normal como sigue:

- Solución de ácido tánico 2 gramos en 10 cm³ de alcohol, posteriormente se añade 90 cm³ de agua destilada, se hace en un vaso de precipitado.
- Solución de sosa caustica 30 gramos por litro de agua destilada.
- Se toman 2.5 cm³ de la primera solución (ácido tánico) y se reúne con 97.5 cm³ de solución de sosa cáustica.

Esta solución es de color normal se hará simultáneamente con la prueba que se hace con la arena y se colocara en una botella de las indicadas anteriormente (frasco de biberón).

Cabo de 24 horas se compararán los colores.

- Se toma una muestra representativa de la arena de 500 gramos aproximadamente.
- Se seca hasta peso constante a una temperatura no mayor a 110°C .
- Se coloca la arena seca y fría en una botella (frasco de biberón) hasta 133 cm^3 adicionándole solución de sosa caustica hasta los 206 cm^3 .



Ilustración 19. Llenado del biberón. (J.Acha, 2017).

- Se tapa la botella y se agita fuertemente dos minutos como mínimo posteriormente se deja reposar 24 horas.



Ilustración 20. Agitado del material. (J.Acha, 2017).

- Al cabo de este tiempo se compara el color de este líquido de la botella con el vidrio de color normal. Si no se tiene este, se compara con el color de la solución normal que se halla hecho en la otra botella idéntica.



Ilustración 21. Comparación del agua con la tabla de colores. (J.Acha, 2017).

RECOMENDACIONES.

Si el color obtenido es más oscuro que el color normal, podemos sospechar de un exceso de materia orgánica en la arena.

Para comprobar debemos hacer otra prueba de colorimetría con la misma arena pero lavada ya que ocasionalmente se presentan materiales de origen inorgánico que reaccionan con la solución de sosa caustica dando un color oscuro sin existir materia orgánica. Esta es la razón por la cual debe repetirse la prueba y si esta vuelve a dar un color oscuro debemos completar la prueba de colorimetría con un análisis químico.

3.1.2.7. SEDIMENTACIÓN EN ARENAS.

OBJETIVO.

Determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para definir si se acepta o no para elaboración de concreto.

EQUIPO.

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

Una muestra de arena seca de 2 kilogramos aproximadamente.

Un litro de agua de preferencia destilada.

PROCEDIMIENTO.

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca el agua hasta la marca de 828 ml.



Ilustración 22. Llenado del frasco. (J.Acha, 2017).

2. Se tapa el frasco que contiene el material con el agua con la palma de la mano y se procede a agitar hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.



Ilustración 23. Reposo de los frascos. (J.Acha, 2017).

3. Se deja reposar el frasco durante 4 horas para determinar el nivel de material fino, esto es que durante el tiempo de reposo el material se va sedimentando y hay que observar si el material fino rebasa o no el nivel 444 ml.

REPORTE.

- Si el material fino rebasa la marca de los 444 ml se reporta el material con exceso de finos.
- Si el material no rebasa la marca de los 444 ml, se reportará que el contenido de material fino es aceptable.

3.1.2.8. MATERIAL QUE PASA POR LA MALLA N° 200 EN ARENA**OBJETIVO.**

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

EQUIPO.

Malla N° 200.

Malla N° 16.

Charola de dimensiones adecuadas para contener el material con agua.

Una balanza con aproximación el décimo de gramo.

Espátula y parrilla eléctrica.

PROCEDIMIENTO.

1. Se toma una muestra representativa de 600 gramos, se seca hasta un peso constante a una temperatura no mayor de 110 °C.
2. La muestra seca se coloca en un recipiente y se pesan, previamente se pesara el recipiente vacío.
3. Al material en el recipiente se le agrega agua hasta cubrir la muestra.
4. Agítese energéticamente la muestra con el agua y viértase inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).

5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua salga completamente clara.



Ilustración 24. Lavado del material. (J.Acha, 2017).

6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.



Ilustración 25. Regreso del material por medio del lavado. (J.Acha, 2017).

7. Se seca el material hasta peso constante, se deja enfriar y se pesa.



Ilustración 26. Secado del material. (J.Acha, 2017).

CÁLCULO.

$$A = \frac{P_i - P_f}{P_f} 100$$

Donde:

A= Porcentaje del material que pasa la malla N° 200.

Pi= Peso seco inicial.

Pf= Peso seco después del lavado final.

Recomendaciones y especificaciones a seguir.

Cuando la arena se va a emplear en la elaboración de concreto hidráulico y esta contiene exceso de partículas finas que pasan la malla N° 200, la cantidad de cemento necesario aumenta considerablemente, existiendo la posibilidad de que aparezcan grietas en las estructuras de concreto.

Cuando la arena cae fuera de las especificaciones, si económicamente es posible se recomienda lavarla o adoptar una solución que permita quitarle el material fino o desecharla totalmente.

Tabla 14. Materiales finos que pasan por la criba 0.075mm (No. 200).

Concepto	Material Máximo permisible en	
	Masa de la muestra total en %	
	NMX-111-ONNCCE-2014	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 ⁽¹⁾	3.00 ^(A)
En concretos presforzados	8.00 ⁽¹⁾	-
En otros concretos	15.00	5.00 ^(A)
⁽¹⁾ En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 6 % y 10 %, respectivamente. ^(A) En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 5 % y 7 %, respectivamente.		

3.1.2.9. DENSIDAD DE LA ARENA.

OBJETIVO.

Esta prueba tiene como finalidad obtener el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo incluyendo los vacíos efectivos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan unas sobre la otra.

EQUIPO.

Muestra representativa de arena de aproximación de 1000 gramos.

Charolas.

Espátulas.

Parilla eléctrica

Molde tronco cónico.

Pizón.

Probeta

Frasco.

Vidrio.

Balanza con aproximación al décimo de gramo.

PROCEDIMIENTO.

Utilizando la báscula.

1. Se pone a saturar la arena en una charola durante 24 horas al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.



Ilustración 27. Secado superficial de la muestra. (J.Acha, 2017).

2. En la probeta se coloca un volumen de agua, registrándolo como volumen inicial V_i en cm^3 .



Ilustración 28. Colocando el volumen inicial en la probeta. (J.Acha, 2017)

3. Enseguida se pesa la muestra de arena superficialmente seca anotando este valor como peso de la arena (Pa) que aproximadamente sea entre 200 y 300 gramos.
4. Posteriormente se coloca la arena dentro de la probeta, procurado que no salpique agua para que esto no provoque un error en la prueba, agitando un poco la probeta para expulsar el aire atrapado, esta operación va a provocar un aumento en el volumen del agua y vamos a registrar este valor como volumen final Vf.



Ilustración 29. Colocación del material en la probeta. (J.Acha, 2017)

CÁLCULOS.

La densidad de la arena se calcula de la siguiente manera:

$$DA = \frac{Ma}{V_f - V_i}$$

Donde:

DA= Densidad de la arena en gr/cm^3

Ma= Masa de la arena saturada y superficialmente seca en gramos.

$V_f - V_i$ = Volumen colocado dentro de la probeta en cm^3 .

UTILIZANDO UN FRASCO.

1. Se procede a pesar el frasco lleno de agua colocando el vidrio en la parte superior registrando esta masa como M_i en gramos.
2. Enseguida se coloca una muestra de arena saturada y superficialmente seca dentro del frasco, llenando el resto del volumen con agua, se coloca el crisol y se pesa, esta masa la llamaremos M_2 , a la masa de la muestra de arena la llamaremos M_h y será entre 200 y 300 gramos.

CÁLCULOS.

$$DA = \frac{M_h}{M_i + M_h - M_2}$$

3.1.2.10. AGREGADOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

Los agregados que se utilizaron fueron obtenidos del banco de materiales llamado “Joyitas” que está ubicado en la carretera Joyitas entrada a San Bernabé en el kilómetro 28 en Michoacán, el tipo de propiedad es particular, el material obtenido es volcánico y el tratamiento que se le da a dicho material es trituración parcial y cribado; no requiere explosivos para la obtención del material y económicamente hablando el material es aceptable.

3.1.3 AGUA UTILIZADA EN LA INVESTIGACIÓN

El agua utilizada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El agua se utilizó tal y como llega al laboratorio sin ninguna modificación, esto con el fin de usarla lo más apegado a la realidad.

3.1.4 ADITIVO UTILIZADO EN LA EXPERIMENTACIÓN.

El aditivo utilizado en esta investigación fue un supe fluidificante de la marca CEMEX.

3.1.5 CENIZA UTILIZADA EN LA EXPERIMENTACIÓN.

Ceniza de elaboración de ladrillo se consiguió en el municipio de Uruapan en la tenencia de Angahuan, que se encuentra en la carretera Los Reyes de Salgado-Charapan.

El porcentaje que se utilizó como sustitución del cemento fue del 7% la cual se tamizo por la malla N° 200.

3.2 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO FRESCO.

3.2.1 FLUIDEZ

OBJETIVO.

Es determinar el contenido de agua necesaria para que el mortero sea manejable, plástico y dúctil.

EQUIPO.

Mesa de fluidez puede ser eléctrica o manual.

Aceite SAE-10 o cualquier otro lubricante con la misma densidad.

Moldes.

Calibrador.

Varilla para compactar 5/8".

PROCEDIMIENTO.

1. Lubricación de la mesa. El eje vertical se mantiene limpio y se lubrica con aceite SAE-10. No debe haber aceite entre las caras de apoyo de la saliente del eje u el soporte. El aceite sobre la cara de la leva disminuye el desgaste y facilita la uniformidad del funcionamiento, se recomienda levantar la mesa y dejarla caer dos veces.
2. El molde para colocar el espécimen para el ensayo es de bronce o latón con diámetro de la boca superior de 70 mm, las superficies definidas por la base y el borde superior serán perpendiculares entre si y al eje del cono vertical.
3. El calibrador se usa para medir el diámetro del molde después de que haya sido extendido, tiene una exactitud tal que la distancia entre las quijadas debe ser de 103 mm cuando el indicador se encuentre en cero.
4. Se debe de humedecer la parte superior de la mesa, se limpia del material arenoso, y se elimina el exceso de agua con un franela húmeda, todo para poder realizar el ensaye, se centra el molde en la mesa, después se ajusta y se llena, en dos capas que en total den el volumen del molde, se compacta cada una de las capas con 20 golpes, las cuales se distribuyen en la superficie, teniendo cuidado de no penetrar la capa anterior, al finalizar se enrasa con un llana el exceso de mortero se retira, limpiando el área de la mesa que se encuentra alrededor del molde, el molde se remueve con un tirón fuerte hacia arriba. La mesa se eleva y se deja caer 1.3 centímetros, 25 veces durante 15 segundos, haciendo girar la leva a una velocidad uniforme. El diámetro del mortero extendido es el promedio de seis medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas al 0.5 centímetro.



Ilustración 30. Mesa de fluidez. (J.Acha, 2017)



Ilustración 31. Hidratación de la muestra. (J.Acha, 2017)



Ilustración 32. Compactación del mortero. (J.Acha, 2017)



Ilustración 33. Extendido de la mezcla. (J.Acha, 2017)



Ilustración 34. Toma de medidas. (J.Acha, 2017)

CÁLCULO.

Se registra como el porcentaje en que se incrementa el diámetro del mortero con respecto al diámetro original de la base del mortero moldeado ósea;

$$Fluidez (\%) = \frac{Diámetro\ extendido - 25\ cm}{25\ cm} * 100$$

Referencia.

(NMX-C-061-ONNCCE, 2015)

3.2.2 ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES.

Según la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) los moldes para la elaboración de los especímenes deben cumplir ciertas características, entre ellas están que los moldes deben ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material que no sea absorbente y que no sea reactivo con el cemento portland, dichos moldes deben tener las dimensiones que la misma norma nos cita y deben mantenerlas bajo condiciones severas de trabajo, deben ser no permeables durante su empleo y si es necesario se les puede agregar algún material de sello por la parte externa, tales como grasa, plastilina o parafina. Deben tener los elementos necesarios para la fijación correcta a la base. Si el molde es de uso repetitivo, se le puede agregar algún desmoldante que facilite la extracción del espécimen del molde.

3.2.2.1. Cubos.

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para la fabricación de cubos.

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes con un desmoldante, esto con la finalidad de que al día siguiente cuando se descimbraran, el mortero no se adhiriera a las paredes del molde y fuera sencillo el retirarlos del mismo sin que se desmoronaran, para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diésel en una parte más pequeña que el aceite para la mezcla no fuera tan líquida pero tampoco muy viscosa.

Después de que los moldes se engrasaron y que estaba preparada la mezcla para la elaboración de los cubos, es decir una vez que se determinó la fluidez y se verificó que estuviese dentro del rango, se procedió al llenado de los mismos.

El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109 M, I., 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se le dieron 8 golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, el pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5 cm x 1.25 cm, después del llenado de la última capa, se tenía el cuidado de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula o similar.



Ilustración 35. Llenado de la primer capa. (J.Acha, 2017)

Una vez fabricados el número de cubos correspondientes a las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se dejaban fraguar en sus moldes, al transcurso de 24 horas aproximadamente, los cubos se desmoldaban.

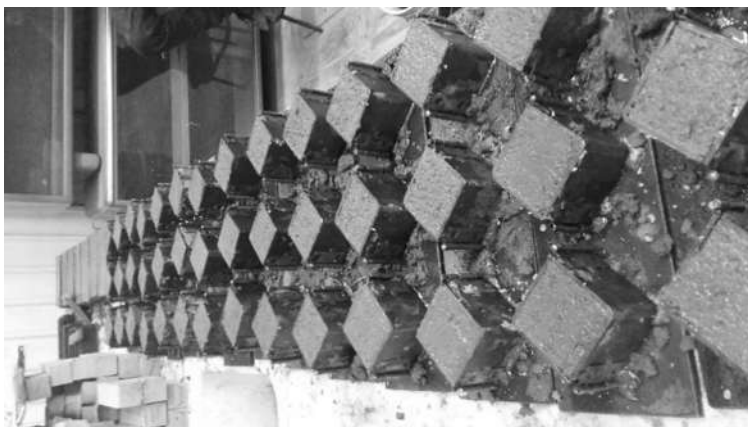


Ilustración 36. Fraguado de los cubos. (J.Acha, 2017).



Ilustración 37. Cubos descimbrados. (J.Acha, 2017)

En la superficie de cada cubo se les puso con ayuda de un marcador indeleble su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura que se le puso a todos los especímenes como son: cubos, cilindros y prismas fue la misma), en dicha nomenclatura llevaba la fecha de elaboración del cubo, la sustitución, el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró y el material de dicha sustitución.



Ilustración 38. Nomenclatura de los cubos. (J.Acha, 2017).

Una vez realizado lo anterior, se procedió a curar los cubos de mortero (el curado para todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue el mismo) el curado que se dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 515, 2003).



Ilustración 39. Curado de los cubos. (J.Acha, 2017)

Después de hacer lo anterior se limpiaron cada uno de los moldes para la fabricación de cubos, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar especímenes de la correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el

total de especímenes cúbicos requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente.

3.2.2.2. Prismas.

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 4cm x 4cm x 16cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable. El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (2cm), cada capa se compactó con 12 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos.



Ilustración 40. Engrasado de los moldes. (J.Acha, 2017)



Ilustración 41. Llenado de la primer capa de los prismas. (J.Acha, 2017)



Ilustración 42. Enrasado de los prismas. (J.Acha, 2017)



Ilustración 43. Desmolde de los prismas. (J.Acha, 2017)

Transcurridas 24 horas de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes para iniciar el proceso de curado por inmersión.

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 6cm x 6cm x 26cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable. El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (3cm), cada capa se compactó con 48 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos.

Transcurrida 1 semana de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes para iniciar el proceso de curado por inmersión. Cuidando siempre que las muestras tuvieran la hidratación adecuada.

3.2.2.3. Cilindros.

Una vez que ya se tiene la mezcla, es necesario aceitar el interior de los moldes que se van a utilizar para evitar que el concreto se adhiera al metal.

El cilindro se llena en dos capas de igual altura (10cm) y cada capa se apisona con una varilla lisa de 5/8 de diámetro con uno de sus extremos redondeados, la cual se introduce 25 veces por capa tratando de abarcar la totalidad de la superficie del concreto, teniendo en cuenta de que la varilla solo atraviese la capa que se está compactando, sin pasar a la capa siguiente. Una vez que ya se realizó la compactación con la varilla punta de bala, se dan 15 golpes con un martillo de caucho a las paredes de este, hasta que la superficie del concreto cambie de mate a brillante, con el objeto de eliminar considerablemente las burbujas de aire que se queda atrapado en el concreto. (Jacobo, 2014)

Al final de la compactación se completa el llenado del molde con más mezcla y se alisa la superficie con la ayuda de la varilla punta de bala.

Los cilindros recién colados deben quedar en reposo, en un sitio cubierto y protegidos de cualquier golpe o vibración, después de 24 horas se desmoldan cuidadosamente y se procede a marcarlos y someterlos a curado en una pila con agua cuidando que queden totalmente sumergidos.

3.2.2.4. Elaboración de briquetas.

Para la elaboración de briquetas se utilizaron moldes de bronce y se siguió el mismo procedimiento que para los demás especímenes, es decir, se limpiaron los moldes, se engrasaron para evitar que el material se adhiera a las paredes y se procedió a llenarlos.

La elaboración de briquetas no tiene una reglamentación por norma, para su elaboración se procedió conforme el manual del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011), el cual consiste en llenar los moldes con mezcla y comprimirla con el dedo índice para después de eso, enrasar con una espátula y retirar el molde para continuar con la elaboración de las briquetas, esto debido a que el molde solo tiene capacidad para tres especímenes.

Como los moldes no tienen una base en la cual quede la mezcla, las briquetas se colocaron sobre una superficie de vidrio, la cual, estaba previamente engrasada para evitar que la mezcla se adhiriera a esta.



Ilustración 44. Fraguado de las briquetas. (J.Acha, 2017)

3.2.3 CURADO.

De acuerdo la norma (NMX-C-148-ONNCCE, 2010); (ASTM C 515, 2003), el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el mortero con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el espécimen fresco.

La remoción de los moldes debe efectuarse en no menos de 20 horas, ni después de 48, luego de elaborado el elemento, procediendo a el almacenaje en un medio

que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ desde el momento del desmolde hasta el día en que se le realizaran las pruebas correspondientes.

Todos los especímenes fueron curados sumergiéndolos en agua dentro de botes de plástico, a la cual se le monitoreo la temperatura para poder cumplir con la normatividad (NMX-C-148-ONNCCE, 2010).

3.3. PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO.

Las pruebas realizadas al mortero se pueden clasificar en:

❖ Físico-Mecánicas

- Destructivas
- No destructivas

3.3.1 DESTRUCTIVAS.

Las pruebas destructivas son aquellas que evalúan la resistencia mecánica del concreto, se refiere básicamente a la capacidad de soportar toda clase de esfuerzos, esta capacidad depende de la resistencia de los agregados y la pasta del cemento hidratado así como de la integración que se genere entre ellos.

Los especímenes elaborados son sometidos a varias pruebas, las cuales definirán la resistencia que el mortero tiene ante ciertos esfuerzos, para asemejar a lo que pasa en la vida real.

3.3.1.1. Resistencia a compresión simple.

La prueba se le realiza a especímenes cúbicos de 5 cm por lado utilizando una prensa hidráulica. Se le realizo a 5 especímenes de cada mezcla a diferentes edades, las edades fueron 3, 7, 14, 28 y 120 días. Se tomó un promedio de los resultados de los 5 cubos el cual se tomó como resistencia a la compresión simple

de dicha mezcla, la prueba se le realizó a 5 especímenes de cada mezcla es decir a 5 cubos de ceniza, 5 cubos de ceniza más perlita expandida y 5 cubos testigo.

Procedimiento de prueba

- 1) Una vez que las muestras hayan cumplido la edad correspondiente, se sacan del lugar en donde han llevado el proceso de curado.
- 2) Se seca cada espécimen hasta que su superficie quede superficialmente seca.
- 3) Se miden las dimensiones de cada cubo para así calcular su área que servirá para el cálculo de esfuerzo (cabe mencionar que a todos los especímenes, previo a realizar esta prueba, se les realizó todas las pruebas no destructivas, por lo que los cubos ya estaban marcados en la cara por la cual serían probados).
- 4) Se llevan las muestras a la prensa hidráulica, se coloca el cubo sobre la base y al centro de la platina con la finalidad de que la carga se distribuya sobre toda el área del cubo.



Ilustración 45. Cubo colocado en el centro de la placa y sometido a una carga de compresión. (J.Acha, 2017).

- 5) Se comienza a aplicar la carga a una velocidad constante esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del cubo registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen.



Ilustración 46. Falla del cubo sometido a compresión. (J.Acha, 2017)

- 6) La carga máxima que soporta el espécimen cubico se sabe cuándo la carga registrada en la pantalla es la misma o empieza a bajar y el cubo presenta falla consideradas en sus caras.
- 7) La prueba se realiza a 5 especímenes para obtener un promedio y un mejor resultado del comportamiento físico-mecánico de los especímenes.



Ilustración 47. Especímenes sometidos a compresión. (J.Acha, 2017)

Cálculos.

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

Donde:

R = Resistencia a la compresión, en kgf/cm².

W = Carga de ruptura de la muestra, en kg.

A = Área de la muestra, en cm².

Tabla 15. Tabla de registro para resistencia a compresión simple

No. de espécimen	Lado 1 cm	Lado 2 cm	Área cm ²	Carga kg	Resistencia Kgf/cm ²

Referencia.

(NMX-C-083-ONNCCE, 2014)

3.3.1.2. Resistencia a flexión

Los especímenes deben cumplir con lo establecido en la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

De acuerdo a lo establecido en la norma mexicana (NMX-C-191-ONNCCE, 2015) la longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de $\pm 2 \%$. Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la

viga antes del ensaye. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes hendiduras, etc.

Procedimiento de prueba

- 1) Se mide y marcó el prisma a 2 centímetros de cada extremo, también se marcó con una línea el centro del claro del prisma el cual fue donde se le aplicó la carga.
- 2) Se colocaron en los soportes adecuados para esta prueba y se colocan los apoyos con cinta para evitar que se muevan durante la prueba.



Ilustración 48. Muestra colocada en los apoyos para la muestra de flexión.

(J.Acha, 2017)

- 3) Se aplicó carga sin impacto y a una velocidad constante hasta que el espécimen falle.



Ilustración 49. Aplicación de la carga de flexión constante a la muestra. (J.Acha, 2017).

4) Se registra la carga obtenida, se realizó la prueba a 5 especímenes.

Cálculos.

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Donde:

R = Módulo de ruptura, en kPa (kgf/cm²).

P = Carga máxima aplicada, en N (kgf).

L = Distancia entre apoyos, en cm.

b = Ancho promedio del espécimen, en cm.

d = Peralte promedio del espécimen, en cm.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en liornas del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará:

$$R = \frac{Pa}{bd^2}$$

Dónde:

R = Módulo de ruptura en kg/cm².

P = Carga de ruptura en kg.

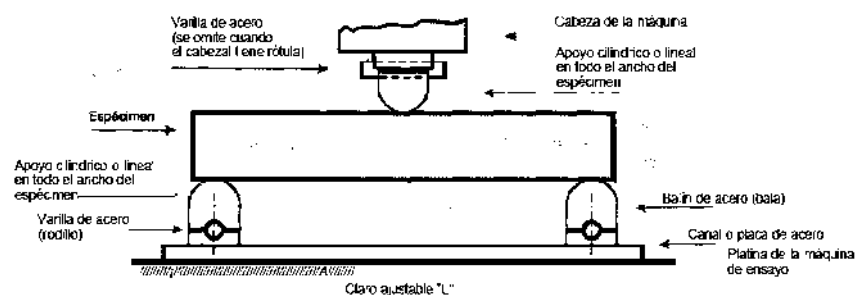
L = Claro en cm.

b = Ancho promedio en cm.

d = Peralte promedio en cm.

A = Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5 % del claro, los resultados deben de descartarse.



La presente figura es ilustrativa

Ilustración 50. Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.

3.3.1.3. Resistencia a la tensión directa

El objetivo es determinar la resistencia a la tensión en un mortero.

Para la determinación de la resistencia a tensión en briquetas se utilizó la máquina de prueba para tensión directa en morteros tipo Michaelis (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011).

Procedimiento de la prueba.

- 1) En la fecha señalada se sacan las muestras y se seca superficialmente.
- 2) Se toman las medidas de la sección media (S_m) de la briketa y se anotan para calcular el área de la briketa.
- 3) Se lleva a la máquina la cual se nivela previamente.

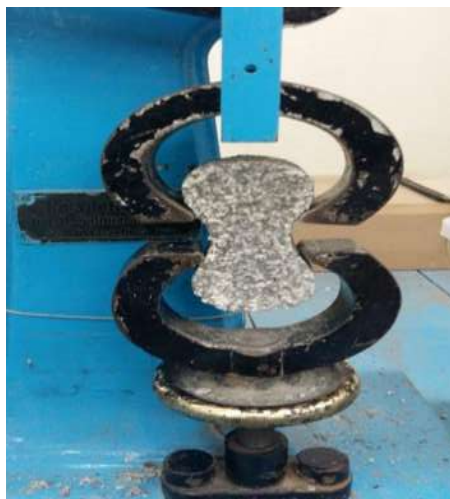


Ilustración 51. Muestra colocada para aplicarle tensión. (J.Acha, 2017)

- 4) Después de la falla de la muestra se retiran las municiones pesándolas al décimo de gramo. La masa de las municiones (M_m) es considerado como la carga que soportó la sección media de la briketa.

Nota: Como las municiones no fueron suficientes para que las briquetas fallaran, se colocaron dolis, estos fueron previamente pesados y colocados uno a uno de forma uniforme sobre la tolva de la máquina para después continuar colocando municiones hasta la falla de la briketa.

Cálculos a realizar.

$$R = \frac{Mm * 50}{Sm} \quad (1)$$

Dónde:

R = resistencia a la tensión en kgf/cm².

Mm = Masa de las municiones o carga de ruptura en Kg.

Sm = Sección media de la briqueta en cm².

50 constante de la máquina.

3.3.2 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.

Una definición general de prueba no destructiva es una revisión, prueba, o evaluación realizada en algún tipo de objeto sin cambiar o alterar dicho objeto en alguna forma, para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener un efecto en la utilidad del objeto, el cual pueda ser dañino. Las pruebas no destructivas también pueden realizarse para medir otras características de prueba del objeto como tamaño, dimensión, configuración, estructura, incluyendo contenido de aleación, dureza, tamaño de grano, etc. (Charles, 2001).

3.3.2.1. Resistividad eléctrica.

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

el ohm-cm u ohm-m. En cuanto a materiales y equipos puede efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, Celis Martínez, Maartínez Molina, & Lomelí González, 2010).

Procedimiento de la prueba.

1. Se toman las dimensiones de la muestra.
2. Se garantiza la conexión del amperímetro y voltímetro.
3. Se monta la muestra en el equipo correspondiente.
4. Los cubos se colocan de acuerdo al lado que tenga más plano, nunca por la cara donde fueron colados.
5. Se corrobora el contacto de los pines con las placas metálicas que se colocan sobre el espécimen.



Ilustración 52. Equipo utilizado en la medición de resistividad eléctrica. (J.Acha, 2017)

6. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete éste a una corriente dada.

7. Se registra el voltaje (E) obtenido del aparato lo más preciso posible.

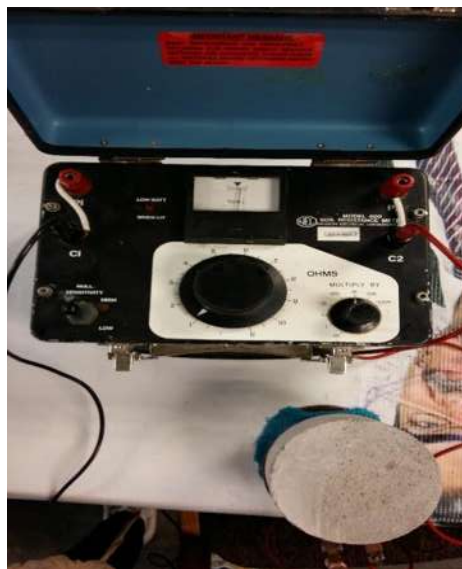


Ilustración 53. Lectura de la resistividad eléctrica. (J.Acha, 2017).

Cálculos a realizar.

La Resistencia eléctrica, R_e , se calcula como E/I y se expresa en ohm. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

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

Donde:

ρ = resistividad eléctrica, en ohm-cm.

R_e = resistencia eléctrica, en Volts.

A = área transversal del espécimen, en cm^2 .

L = longitud del espécimen, en cm.

Especificaciones.

Tabla 16. Criterios de evaluación. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

Resistividad Eléctrica (kΩ-cm)	Riesgo de Corrosión
< 10	Alto riesgo
10 a 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo

3.3.2.2. Velocidad de pulso Ultrasónico (VPU).

OBJETIVOS:

- Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) en este caso del mortero.
- Detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones.
- Monitorear las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

La velocidad de pulso ultrasónico se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar por lo cual se empleó un medio conductor, en este caso un gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel comercial para el cabello, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, por lo que se decidió aceptar el empleo del gel para el cabello para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones que se iban a llevar a cabo, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.



Ilustración 54. Prueba de velocidad de pulso ultrasónico. (J.Acha, 2017)

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas ya que el grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo.

Además, la velocidad de pulso en el espécimen saturado es menos sensible a los cambios en su calidad relativa.

Tabla 17. Criterio de evaluación en Velocidad de pulso ultrasónico. (RED DURAR (Durabilidad de la Armadura), 2000).

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

Los especímenes empleados para determinar lecturas de resistividad eléctrica eran pasados en seguida a una mesa contigua en donde se determinaba el tiempo de tránsito de pulso ultrasónico (ASTM-C-597, 2009).

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 CARACTERÍSTICAS Y PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

4.1.1 CEMENTO

4.1.1.1. Consistencia

Los resultados de consistencia normal de las diferentes mezclas se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 18. Resultados de consistencia normal.

Material		Consistencia Normal %
Testigo		32 %
CELU	7%	33.65 %
C+PEM	7% + 5%	36.5%

4.1.1.2. Fraguado por el método de Gillmore.

Los tiempos de fraguado de cada mezcla se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 19. Resultados de los tiempos de fraguado.

Materiales		Tiempos de fraguado	
		Inicial (min)	Final (min)
TESTIGO		240	420
CEL	7 %	200	380
CEL+PEM	7%+5%	250	470

4.1.2 ARENA

4.1.2.1. Cuarteo.

El cuarteo se realizó mediante la combinación del método de paleo y el de divisor de muestras, con el primero se homogenizo el material y se hizo la división del mismo, y con el divisor de muestras se obtuvo la muestra representativa.

4.1.2.2. Humedad superficial y humedad de absorción arenas.

Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 20.

Tabla 20. Resultado de porcentaje de absorción.

% de Absorción			
Muestra	Mh (g)	Ms (g)	% de Absorción
1	300	291.7	2.85
2	300	291.5	2.92
3	300	291.3	2.99
		Promedio	2.92

Por lo tanto el porcentaje de humedad de absorción de la arena utilizada es de 2.92 %.

4.1.2.3. Determinación de la masa volumétrica seca y suelto de una arena (mvss).

Esta prueba fue realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 21.

Tabla 21. Resultados de la masa volumétrica seca y suelta (MVSS).

Determinación de la masa volumétrica seca y suelta					
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSS (g/cm ³)
1	1945	5670	3725	2750	1.35
2	1945	5710	3765	2750	1.37
3	1945	5710	3765	2750	1.37
				Promedio	1.36

La masa volumétrica seca y varillada (MVSS) de la arena es de 1.36 g/cm³

4.1.2.4. Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (mvsv).

Esta prueba fue realizada de acuerdo a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004). Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Resultados de la masa volumétrica seca y varillada (MVSV).

Determinación de la masa volumétrica seca y varillada.					
Muestra	Masa del recipiente (g)	Masa Total (g)	Masa de la arena (g)	Volumen del recipiente (cm ³)	MVSV (g/cm ³)
1	1945	6045	4100	2750	1.49
2	1945	6070	4125	2750	1.50
3	1945	6000	4055	2750	1.47
				Promedio	1.49

La masa volumétrica seca y varillada (MVSV) de la arena es de 1.49 g/cm³.

4.1.2.5. Granulometría en arenas.

Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. El módulo de finura, que en este caso dio de, que queda dentro de los límites de la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) que nos dice que debe de estar dentro de 2.5 y 3. Los resultados se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Resultados de granulometría.

Granulometría				
Malla	Peso Retenido	% Retenido	% Acumulativo	% Que Pasa
4	0	0	0	100
8	30.23	6.05	6.05	93.95
16	133.33	26.66	32.71	67.29
30	198.10	39.62	72.33	27.67
50	65.47	13.09	85.42	14.58
100	20.87	4.17	89.59	10.41
200	19.10	3.82	93.41	6.59
Charola	32.93	6.59	100	0
Suma	500.03	100	479.51	220.49
Módulo de Finura (MF)	3.80			

4.1.2.6. Colorimetría en arenas.

Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 24.

Tabla 24. Resultado de colorimetría.

Muestra	Colorimetría
1	Escala 2
2	Escala 2

3	Escala 2
---	----------

El color obtenido en las tres muestras es similar al color número 2 de la tabla de colorimetría, por lo que podemos decir que el material, cumple con las especificaciones de esta prueba y por lo tanto es aceptable, debido a que no contiene excesos de materia orgánica.

4.1.2.7. Sedimentación en arenas.

Para esta prueba se realizaron tres muestras representativas de la arena, por lo que las tres de ellas cumplieron con las especificaciones del manual de prácticas de materiales, por lo que se concluye que el material es aceptable.

4.1.2.8. Material que pasa por la malla no 200 en arena.

Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 25.

Tabla 25. Porcentaje de material fino que contiene la arena.

Material que pasa la malla No. 200			
Muestra	Masa Inicial	Masa Final	A
1	300	276.5	7.83
2	300	284.0	5.33
3	300	275.8	8.07
		Promedio	7.08

De acuerdo a la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2014), está dentro del límite para concretos presforzados, en nuestro caso, un mortero sometido a compresión, este límite es de 8%.

4.1.2.9. DENSIDAD DE LA ARENA.

Para esta prueba se analizaron tres muestras representativas para obtener un promedio. Los resultados se muestran en la tabla 26.

Tabla 26. Resultados de la densidad de la arena.

Muestra	Densidad (kg/m ³)
1	2.31
2	2.34
3	2.31
Promedio	2.32

El promedio indica que la densidad del material es alta, es decir, es de buena calidad (NMX-C-111-ONNCCE, 2014).

4.2 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO FRESCO.

4.2.1 FLUIDEZ.

En la siguiente tabla se muestra los resultados de la prueba de fluidez.

Tabla 27. Resultados de fluidez.

MEZCLA	Cemento (g)	CELU (g)	PEM (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluidez (%)
Testigo	163.6	0	0	450	94.9	0.635	4.00	111
CELU 7%	152.1	11.5	0	450	94.9	0.635	6.5	108
CELU 7% + PEM 5%	143.92	11.5	8.18	450	94.9	0.635	8.00	113

4.2.2 ELABORACIÓN DE ESPÉCIMEN

Todos los especímenes se realizaron de acuerdo a las normas que los rigen a cada uno, en el caso de los cubos, se siguió el procedimiento de la norma (NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

4.2.3 CURADO

Los especímenes fueron curados en recipientes de plástico, donde se colocaron para ser sumergidos en agua, fueron colocados inmediatamente

después de ser desmoldados, permaneciendo hay hasta el día que alcanzaron la edad de prueba.

4.3 PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO ENDURECIDO

4.3.1 DESTRUCTIVAS

4.3.1.1. Resistencia a compresión simple

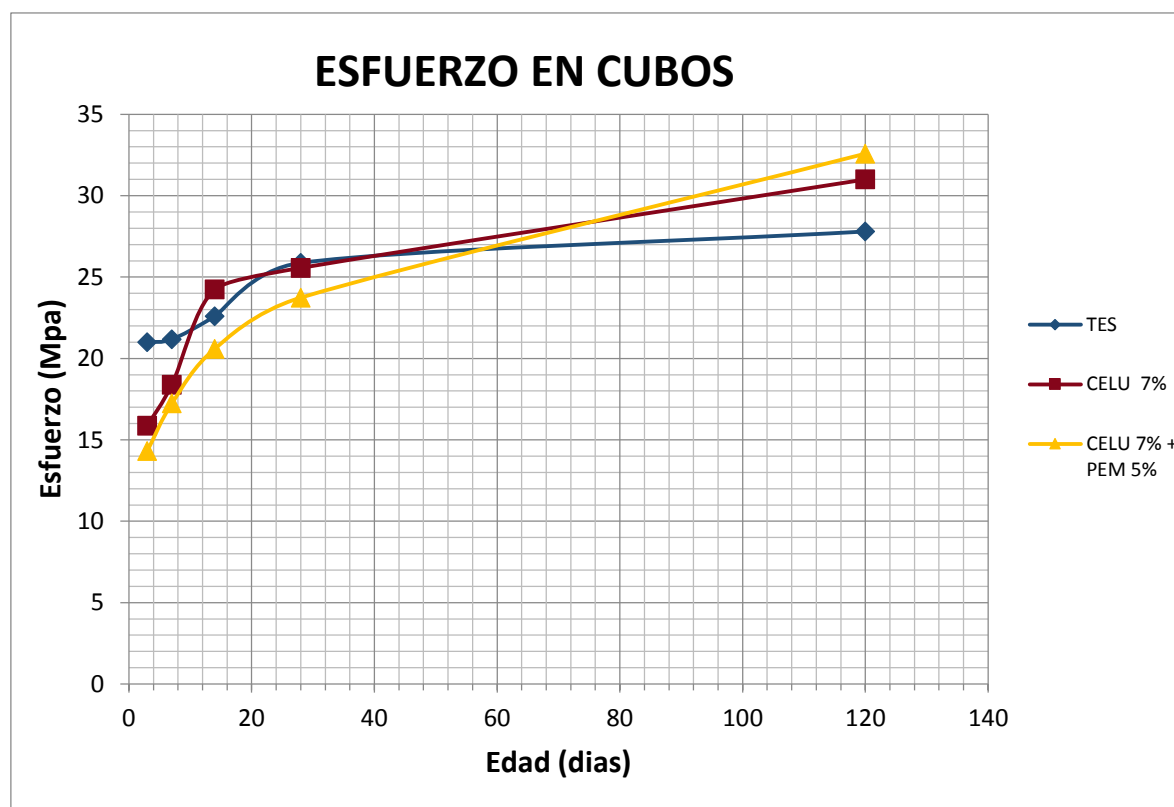


Ilustración 55. Gráfica comparativa de esfuerzo a compresión.

En la ilustración 55 se puede observar que la mejor mezcla fue la de la CELU+PEM, existe una tendencia ascendente con respecto al tiempo en todas las mezclas, sin embargo sobresale la ya mencionada, esto posiblemente debido a que tiene más material fino que llena los espacios que no alcanza a ocupar el agregado y el cemento.

4.3.1.2. Resistencia a flexión.

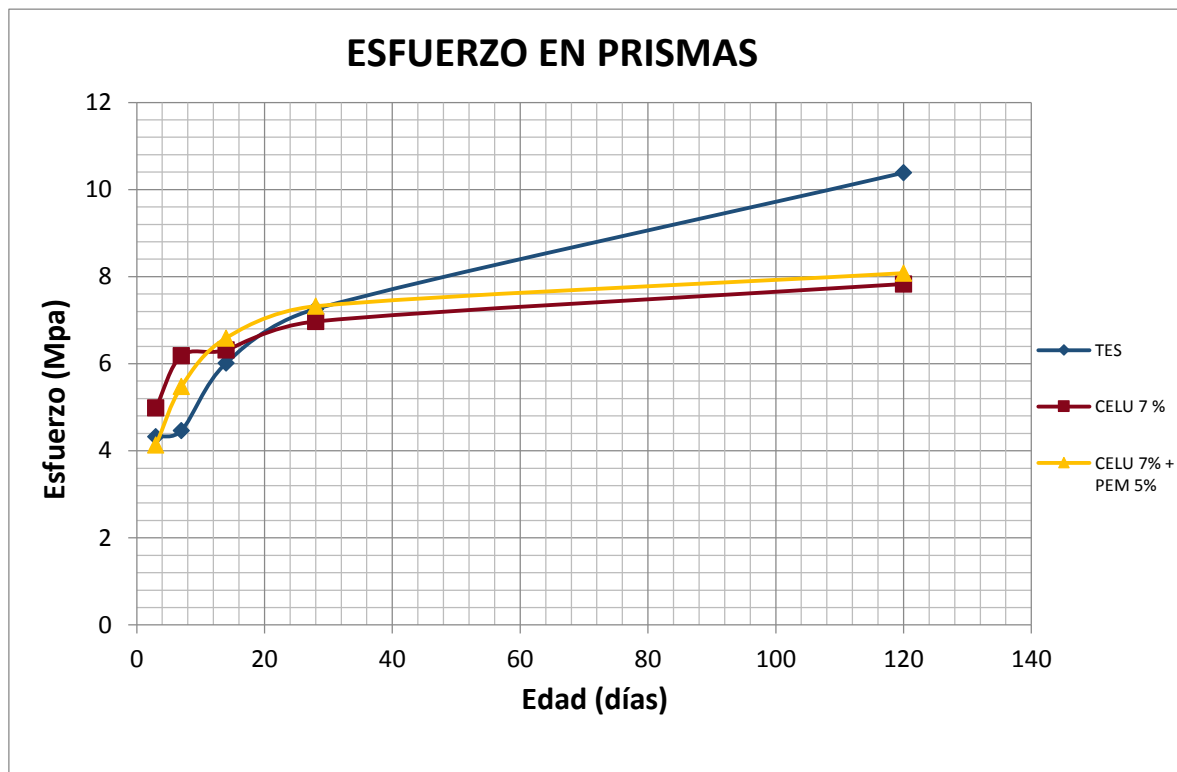


Ilustración 56. Gráfica comparativa de esfuerzo a flexión.

En la ilustración 56, a diferencia con la figura 55, podemos observar que la mezcla testigo presenta un mejor comportamiento bajo flexión que las mezclas elaboradas con adiciones.

4.3.1.3. Resistencia a tensión.

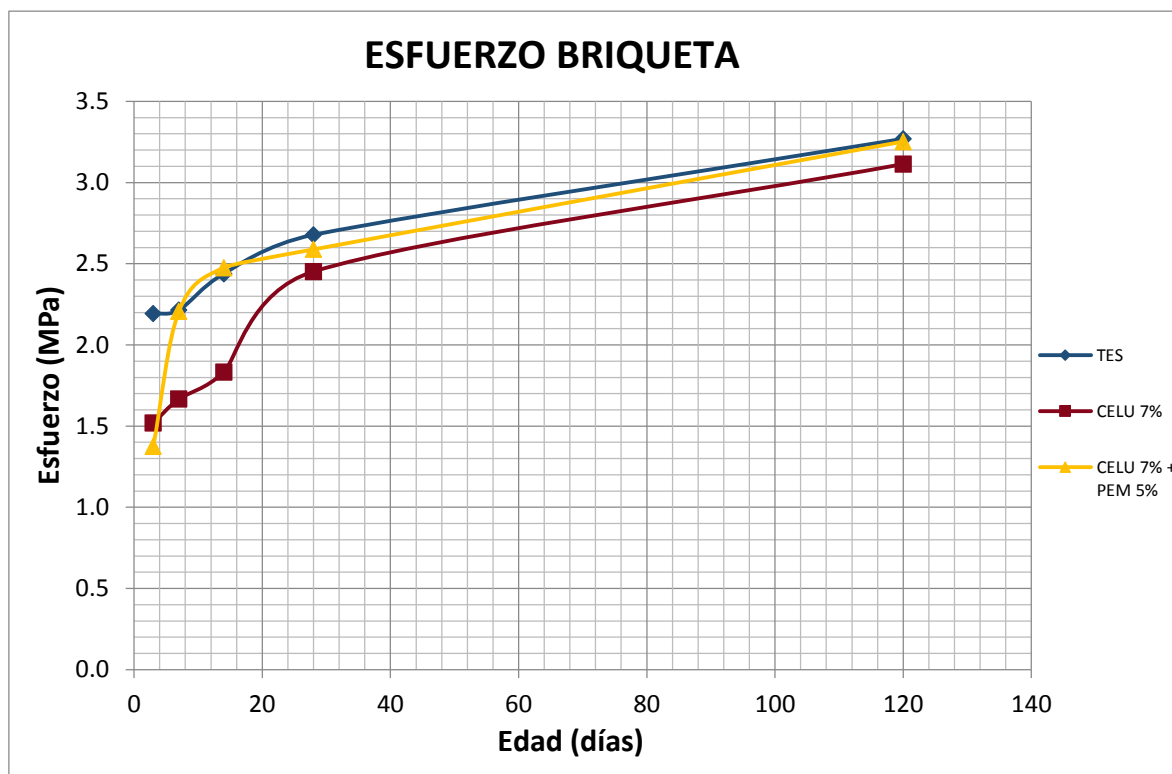


Ilustración 57. Gráfica comparativa de esfuerzo a tensión simple.

En la ilustración 57 se observa que las sustituciones no mejoran el comportamiento a tensión directa en edades tempranas, sin embargo, la tendencia es ascendente respecto al tiempo y a los 120 días la mezcla de CELU+PEM ya igualó a la testigo por lo que seguramente a edades posteriores la supere, la mezcla de CELU+PEM tuvo un buen desarrollo de resistencia inicial.

4.3.2 NO DESTRUCTIVAS

4.3.2.1. Resistividad eléctrica

Los resultados se muestran a continuación en las siguientes gráficas:

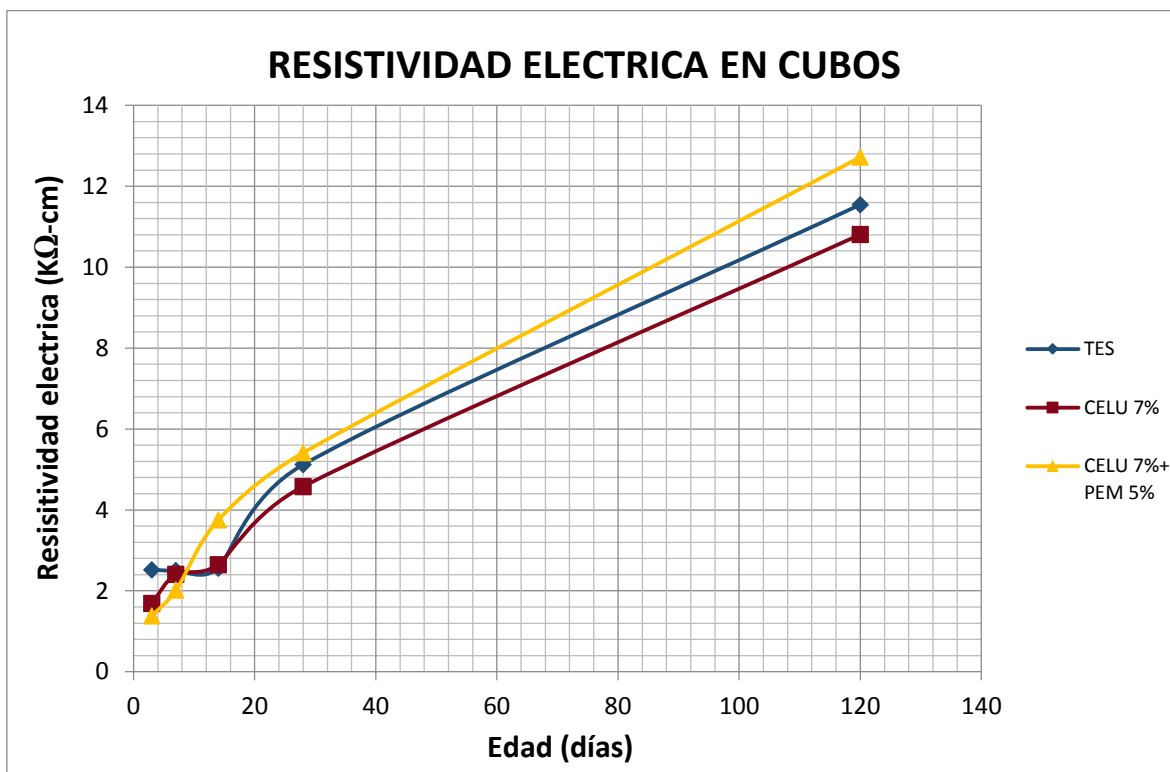


Ilustración 58. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica en cubos.

En la ilustración 58 se observa que la mezcla de CELU+PEM tiene mejores resultados desde los 7 días, este comportamiento es lo esperado ya que la PEM funciona como un llenador por lo tanto reduce la porosidad y aumenta la resistividad eléctrica, por lo que resulta ser la mezcla más densa.

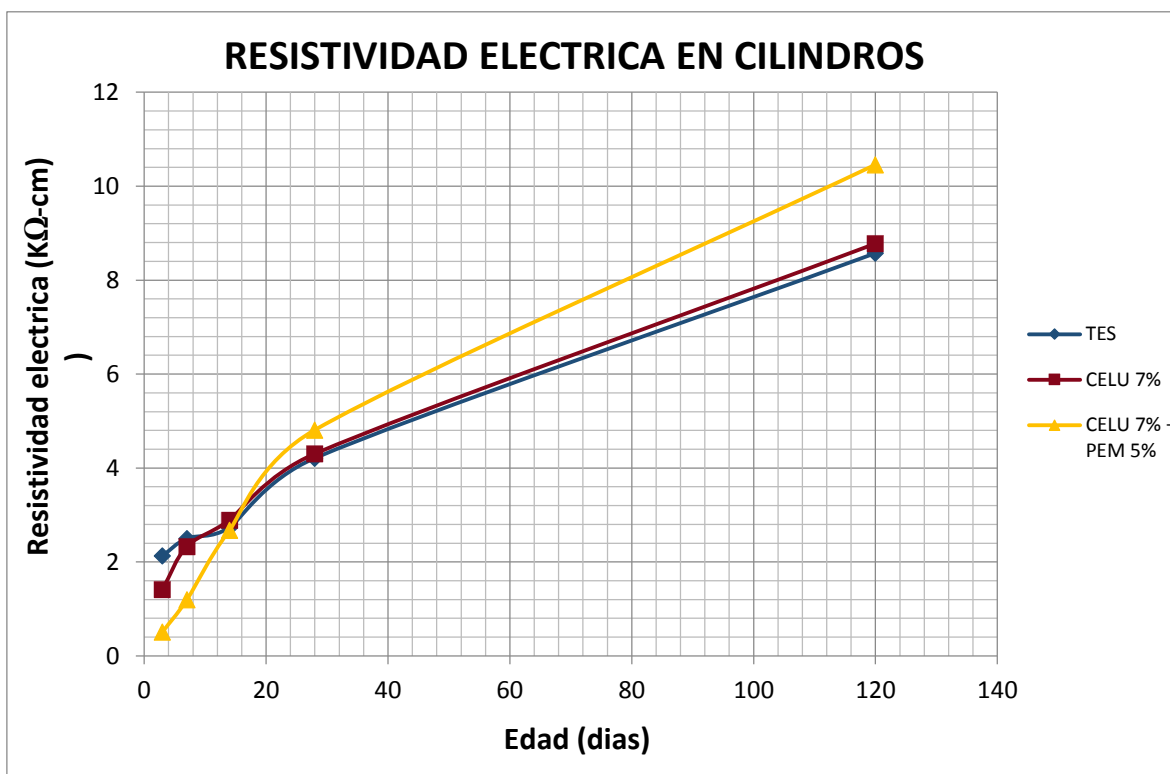


Ilustración 59. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica en cilindros.

En la ilustración 59 se presenta un comportamiento muy similar al de la ilustración 58, se muestra que la mezcla de CELU+PEM tiene mejores resultados ya que es más densa que las otras mezclas.

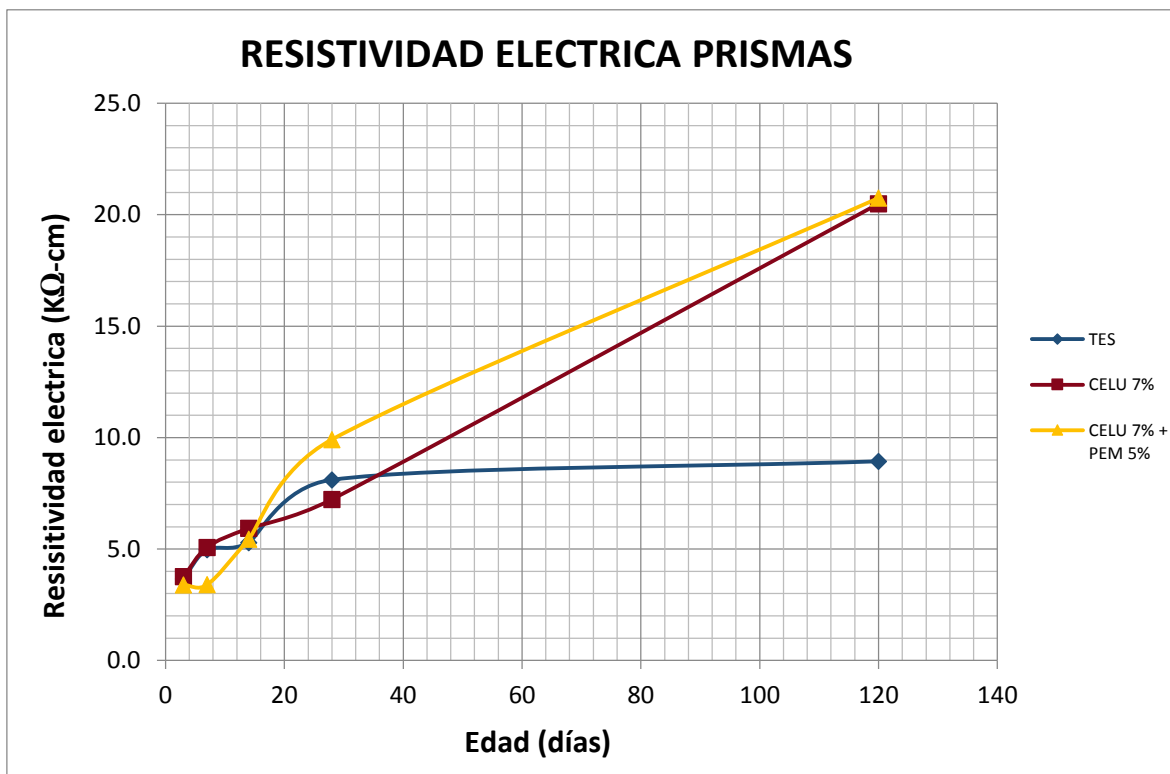


Ilustración 60. Gráfica comparativa de resistividad eléctrica en prismas.

En la ilustración 60 se observa que las dos mezclas con sustitución superan a la testigo desde edades tempranas, sin embargo lo esperado sería un comportamiento similar a las ilustración 58 y 59 ya que se mide la misma propiedad en las mismas mezclas pero en muestras de diferente forma.

4.3.2.2. Velocidad de pulso ultrasónico.

Los resultados se muestran a continuación en las siguientes graficas:

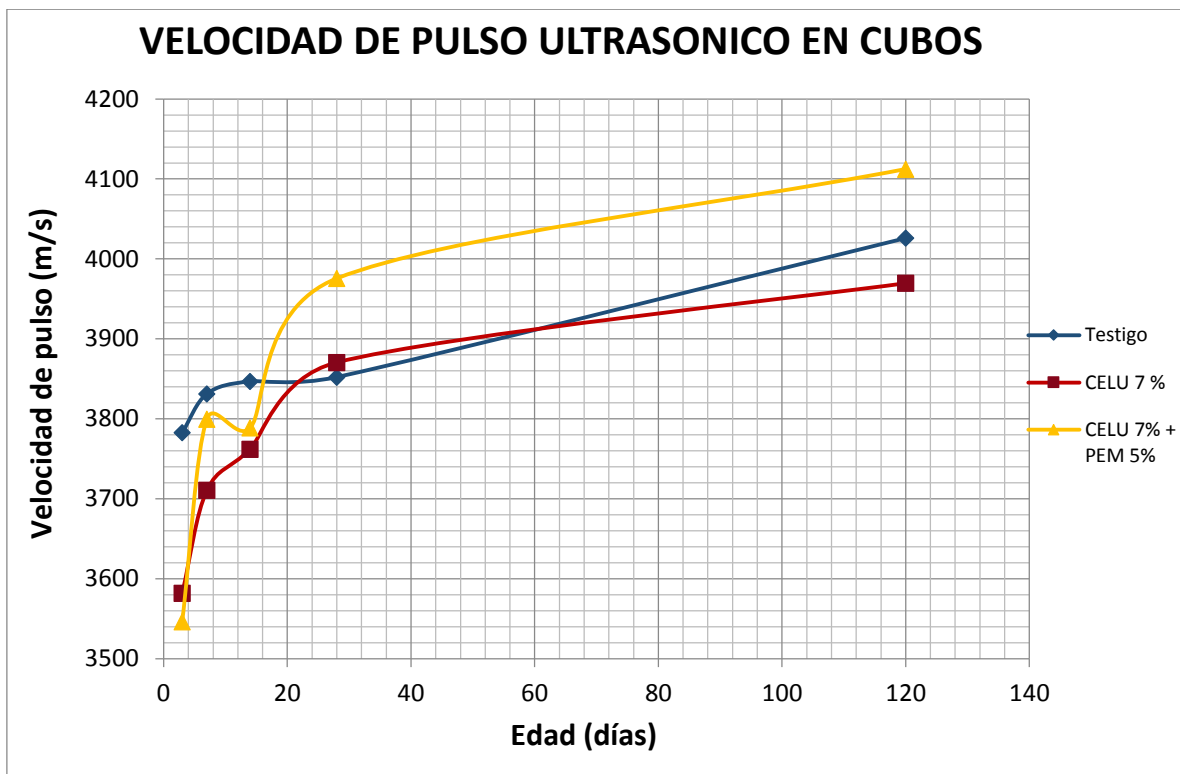


Ilustración 61. Gráfica comparativa de velocidad de pulso ultrasónico en cubos.

En la ilustración 61 se puede observar un comportamiento similar al descrito en las gráficas de resistividad eléctrica, esto debido a que la resistividad eléctrica y la velocidad de pulso están relacionadas con la porosidad del material, en este caso podemos indicar que la mezcla menos porosa es la de CELU+PEM.

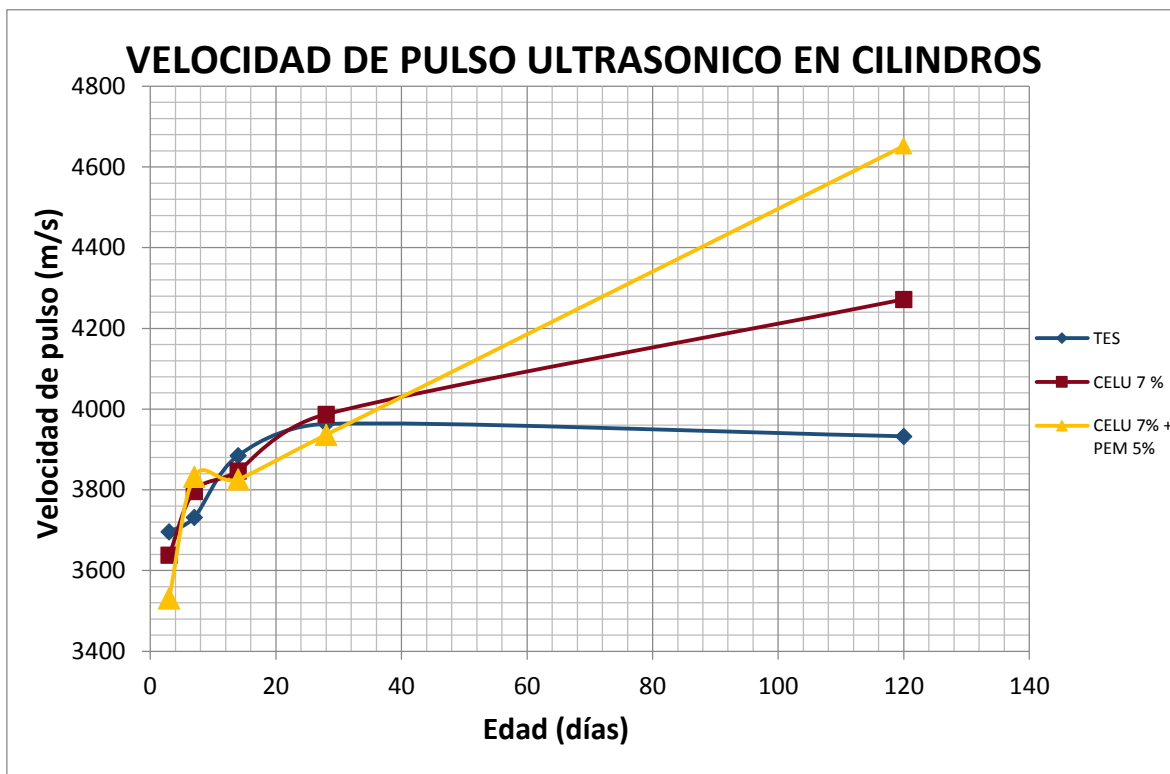


Ilustración 62. Gráfica comparativa de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros.

En la ilustración 62 tenemos los resultados de velocidad de pulso ultrasónico en cilindros y el comportamiento es ascendente respecto al tiempo, esto es debido a que a transcurrir el tiempo el cemento se va hidratando y la porosidad se reduce, pero en nuestras mezclas la porosidad se reduce desde el inicio debido al efecto llenador de las cenizas empleadas, dejando por debajo a la mezcla testigo.

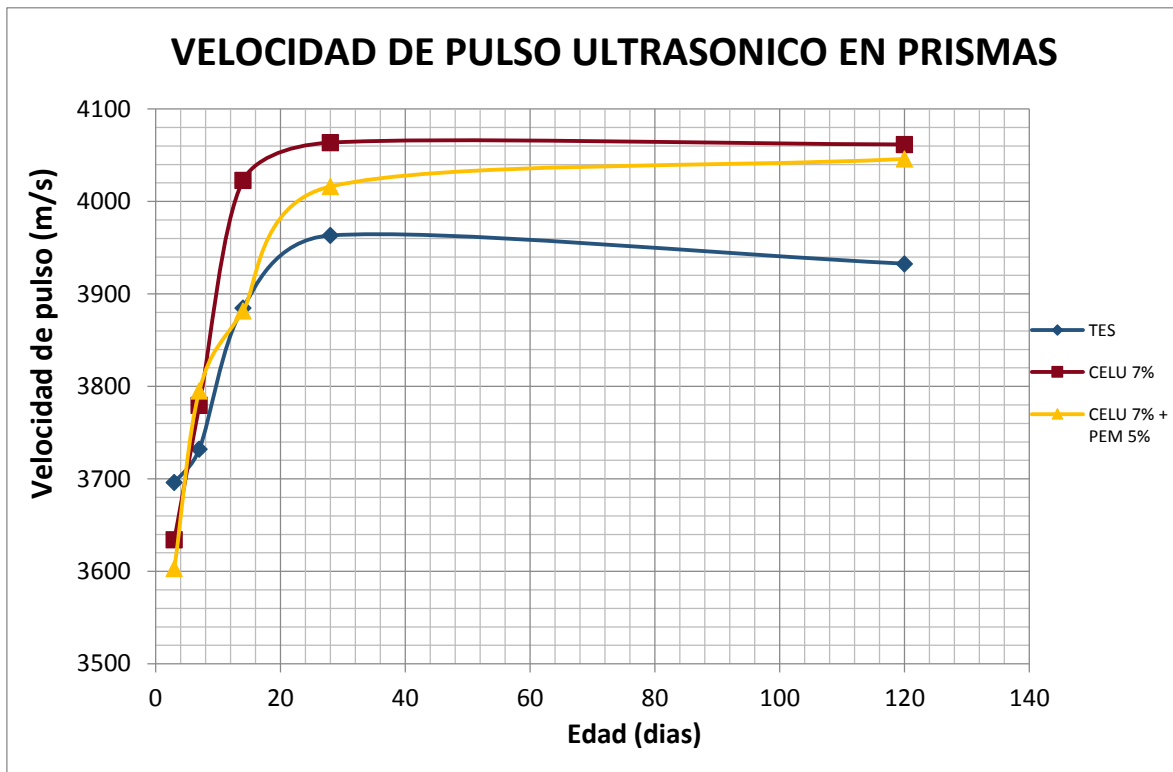


Ilustración 63. Gráfica comparativa de velocidad de pulso ultrasónico en prismas.

En la ilustración 63 se observa un comportamiento similar a de la ilustración 61 y 62, sin embargo se presentan pendientes negativas a edades tardías en todas las mezclas. Se puede observar que la velocidad de pulso ultrasónico tiene su mayor desarrollo a edades tempranas.

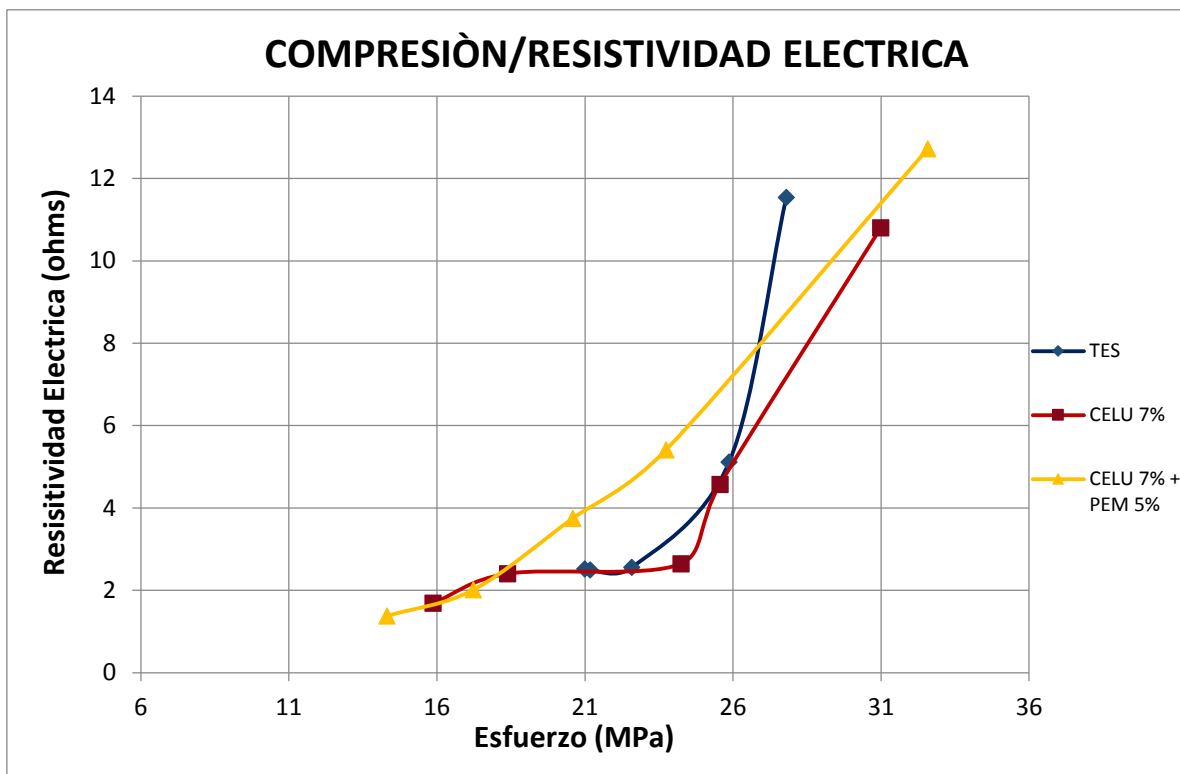


Ilustración 64. Esfuerzo/resistividad eléctrica.

En la ilustración 64 se puede observar una tendencia ascendente, es decir, hay una correlación entre la resistividad eléctrica y la resistencia a compresión del material. La mezcla que presentó mejores resultados es la de sustitución de CELU+PEM desde edades tempranas.

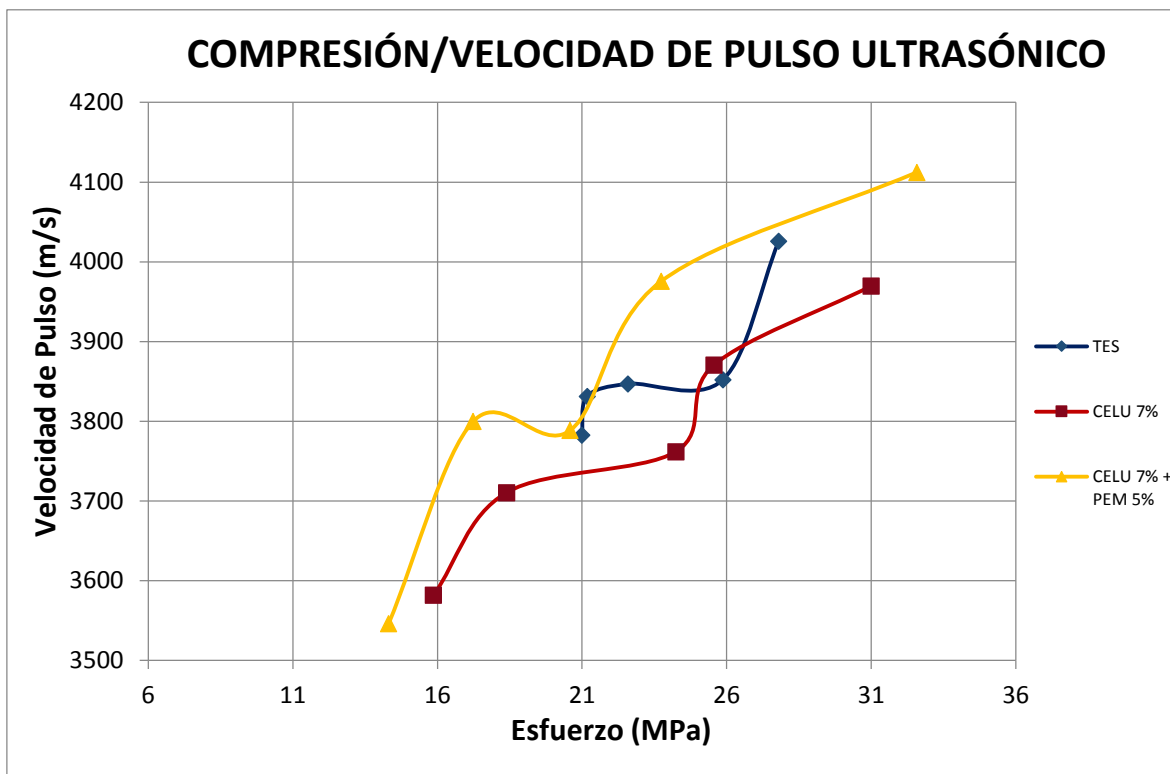


Ilustración 65. Esfuerzo/velocidad de pulso ultrasónico.

En la ilustración 65 se puede observar una correlación entre las dos propiedades medidas, ya que al ir aumentando la velocidad de pulso ultrasónico el esfuerzo va aumentando.

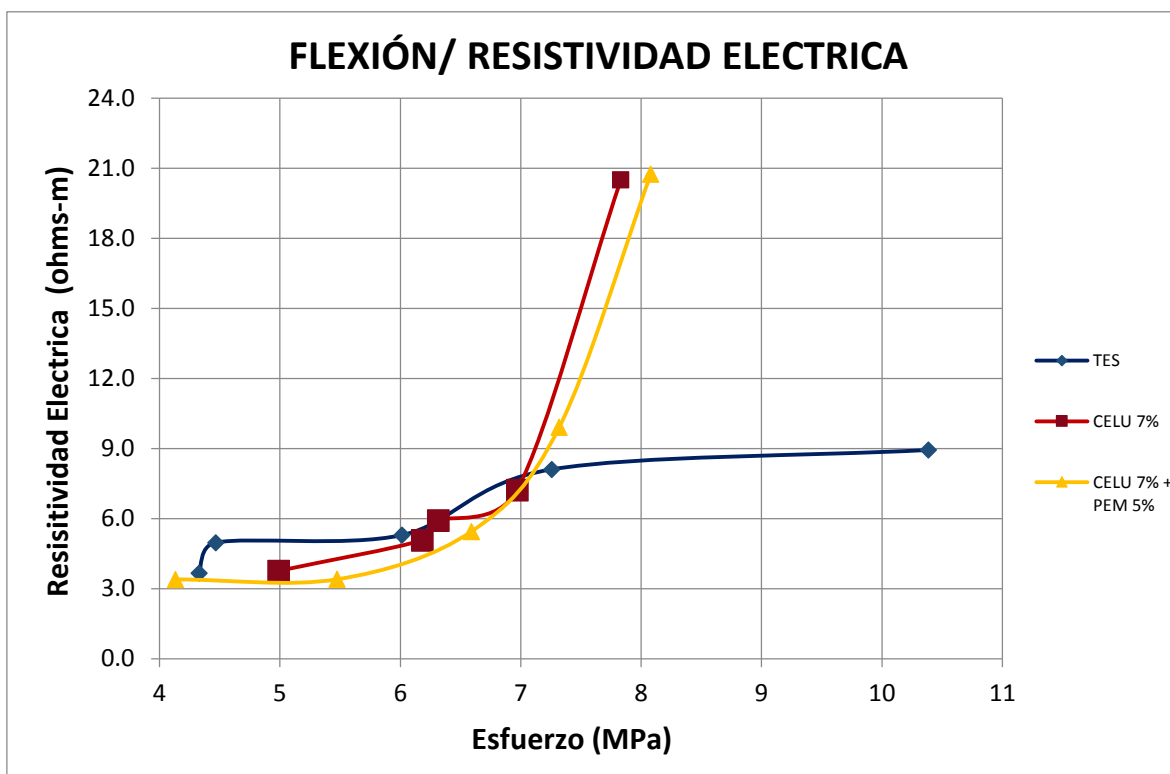


Ilustración 66. Esfuerzo a flexión / resistividad eléctrica.

En el caso de la resistividad eléctrica medida en prismas se presentó cierta dispersión que también se ve reflejada en la ilustración 66. Se puede observar que hay correlación entre la resistencia a la flexión y la resistividad eléctrica ya que al ir aumentando resistividad eléctrica el esfuerzo a flexión va aumentando.

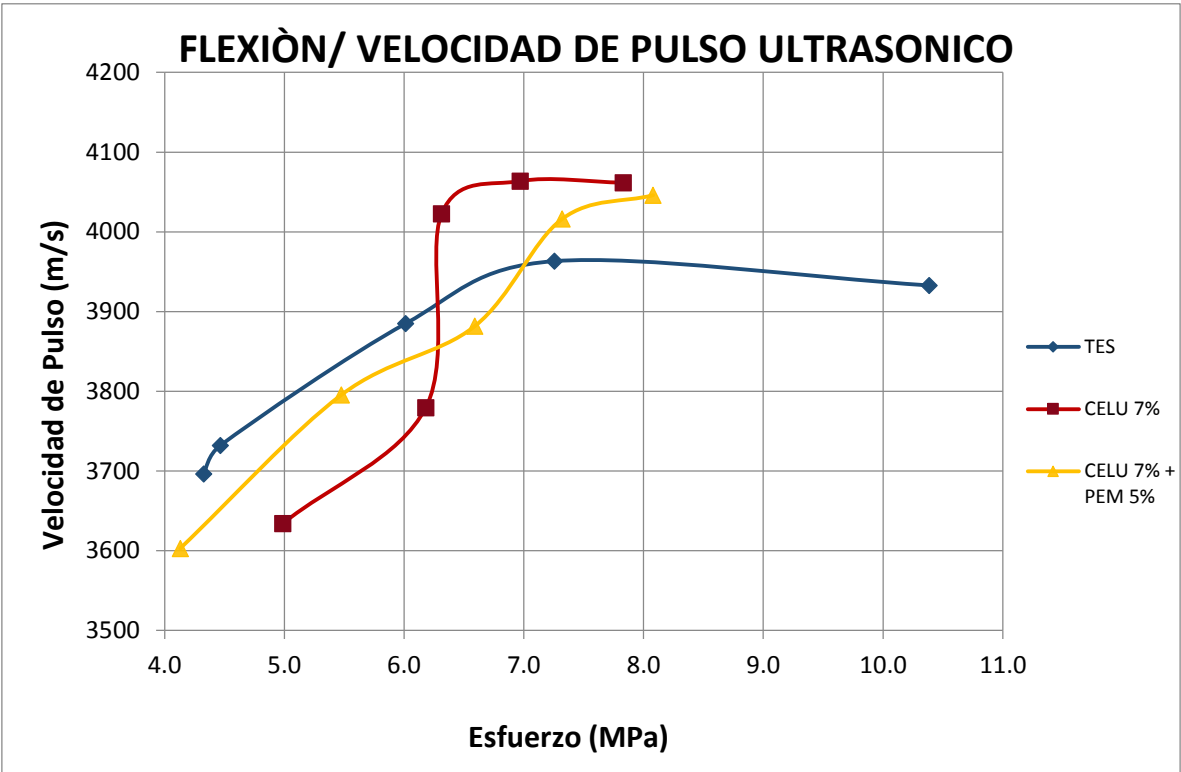


Ilustración 67. Esfuerzo a flexión /velocidad de pulso ultrasónico.

En la ilustración 67 se puede observar el reflejo de la variación de la velocidad de pulso ultrasónico medida en prismas, se tienen tendencias negativas al aumentar el esfuerzo a flexión.

5. CONCLUSIONES

Se trabajó con morteros base cemento sustituyendo porcentajes 7% de CELU y 7%+5% por CELU+PEM, respectivamente.

La mezcla que presentó mejor resistencia a compresión simple fue CELU 7%+ PEM 5%, superando a la mezcla testigo.

De acuerdo a la red DURAR la mezcla más durable fue la de CELU 7%+ PEM 5%, teniendo como resultado riesgo moderado a la corrosión.

Es interesante ver que los resultados de resistividad eléctrica medida en los prismas presentan variaciones en comparación con los medidos en cilindros y cubos, lo mismo sucede en el caso de la velocidad de pulso ultrasónico.

De las gráficas 64-67, que son comparativas entre dos pruebas, es posible ver que existe una correlación lineal entre: la resistencia a la compresión y la resistividad eléctrica de las muestras; la resistencia a la compresión y la velocidad de pulso medido en las diferentes mezclas; la resistencia a la flexión y la velocidad de pulso medido.

Es posible concluir que las mezclas con PEM presentan mejores propiedades ya que la PEM trabaja como un microfíler reduciendo la porosidad de la mezcla y la CELU aporta resistencia mecánica por ser una puzolana natural.

BIBLIOGRAFÍA

- A.F-J, P. (2004). "Geopolimeros": una única base química y diferentes micro estructuras. *Materiales de Construcción*, 54(275), 77-91.
- AASHTO-T-106. (2002). Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in,or [50 mm] Cube Specimens). EE.UU.
- Artigas. (2002). Departamento de enseñanzas de las tecnologías de la construcción, 2002, Morteros, Facultad de Arquitectura. Montevideo, Uruguay: 5.
- ASTM C 109 M, I. (2002). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). EE. UU.
- ASTM C 128. (2004). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.
- ASTM C 142. (1997). Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates.
- ASTM C 150. (2016). Standard Specification for Portland Cement.
- ASTM C 266. (2015). Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles.
- ASTM C 515. (2003). Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. EE. UU.
- ASTM-C-109-M. (2002). Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in,or [50 mm] Cube Specimens). EE.UU.
- ASTM-C-151-00. (2014). Método estandar de ensayo para expansión en autoclave del cemento portland. EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C-187-04. (2004). Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement.
- ASTM-C-348. (1997). Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars. EE.UU.
- ASTM-C-597. (2009). Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.

- ASTM-C-618. (2015). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM-C-70. (2003). Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate.
- BS-4027:1980. (2000). Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos. Inglaterra: British Standards Institution.
- Cabeza LF, Casellon C, Nogues M, Medrano M, Leppers R, Zubillaga O. (2007). "Use of microencapsulated PCM in concrete". walls for energy savings 39.
- Charles, J. H. (2001). Handbook of Nondestructive Evaluation. Estados Unidos: McGrae-Hill.
- Constructor Civil. (s.f.). Constructor Civil. Recuperado el 13 de Agosto de 2016, de <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/morteros-de-cemento-portland.html>
- Davidovits, J. (1993). Carbon-Dioxide Greenhouse-Warming: What Future for Portland Cement. Proceedings, Emerging Technologies Symposium on Cement and Concretes in the Global Environment, 21.
- Demirbog̃a R, Gũ I R . (2004). "Durability of mineral admixture lightweight aggregate concrete". Indian J Eng Mater Sci 11(3).
- Demirbog̃a R, Gũ I R . (2003). "Thermal conductivity and compressive strength of expanded perlite aggregate concrete with mineral admixtures". Energy Build 35(11).
- Domoterra. (2013). Domoterra. Recuperado el 16 de Agosto de 2016, de <http://www.domoterra.es/blog/2013/04/02/el-cemento-y-la-produccion-de-co2/>
- E, R. F. (2002). Tesis Profesional "Morteros de Albañilería para Restauración, como Aditivo Miel de Abeja" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- G.R.C, A. (2005). Tesis Profesional "El Efecto Puzolánico de la Ceniza Volcánica" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México. .
- Instituto del Concreto. (1997). Manual Tecnología y Propiedades. Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2015). Pruebas de Agregados. México: IMCyC.

- J.Acha. (2017). Tesis . Morelia.
- Jacobo, S. J. (2014). Tesis de Licenciatura: Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón. Morelia.
- Kosmatha, S. H., & Panarese, W. C. (1992). Diseño y Control de Mezclas de Concreto. México: Instituto del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Skokie, Illinois, EE.UU.: Portland Cement Association.
- M., C. d. (1993). "Conservación y Restauración de Monumentos". Vanguard Grafic.
- Marquez-Montero, S. (2010). Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBCA en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos. Xalapa, Veracruz, México.: ALCOMPAT.
- Martínez Molina, W., Navarro Sánchez, L. M., & Espinoza Mandujano, A. (2011). Tiempos de fraguado utilizando las agujas de Gillmore. En Análisis de Materiales. Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil.
- Mendoza Anaya, D., Brito Benitez, E. L., & Arenas Alatorre, J. (2004). La Ciencia de Materiales y su Impacto en la Arqueología. Academia Mexicana de Ciencia de Materiales.
- Mladenovic A, S. J. (2004). "Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates". Cem Concr Res 34.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. A. (2011). Análisis de Materiales. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil.
- Neville, A. (1998). Tecnología del Concreto. México: Trillas; Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (IMCYC).
- Neville, A. M., & Brooks, J. (2010). Concrete Technology. England: ISBN 978-0-273-73219-8.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2015). Industria de la Construcción - Cemento Hidráulico - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.

- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción-Determinación de la resistencia a compresión. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción -Agua para Concreto-Especificaciones. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-148-ONNCCE. (2010). Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo, al Tamaño Requerido para las Pruebas. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2015). Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S.C.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). Industria de la construcción -cementos hidráulicos-Especificaciones y métodos de prueba. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

- RED DURAR (Durabilidad de la Armadura). (2000). Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado. México: CYTED.
- Sánchez de Guzmán, D. (2006). Concretos y morteros. Colombia: Instituto del Concreto.
- Shaw, I. B. (2000). Tecnología del cemento, Asocem.
- Shetty, M. (2005). Concrete Technology Theory and Practice. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand and Companu LTD.
- Soso, I. Á. (2008). Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos.
- Topcu IB, I. B. (2008). "Effect of expanded perlite aggregate on the properties of lightweight concrete". J Mater Process Technol 204.
- Torres Acosta, A. A., Celis Martínez, C. E., Maartínez Molina, W., & Lomelí González, M. G. (2010). Mejora de la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cetáceas. Querétaro: Publicación Técnica #326, Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano del Transporte.
- Torres ML, G.-R. P. (2009). "Lightweight pozzolanic materials used in mortars: evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption". Cem Concr Compos 31.
- UNE-EN 450-1. (2013). Cenizas volantes para hormigón. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad. (AEN/CTN 83 - HORMIGÓN ed.).
- VERDU, D. F. (2016). materconstrucc. Recuperado el 14 de 11 de 2016, de <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/File/1167/1300>
- Yilmazer S, O. M. (2005). "The effect of moisture content on sound absorption of expanded perlite plates". (B. Environ, Ed.)