



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**Comportamiento Mecánico del Carbón Mineral y de la  
Escoria de Alto Horno en Morteros como sustituto parcial  
del cemento.**

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el título de

**INGENIERO CIVIL**

PRESENTA

**LUIS CRUZ JIMÉNEZ**

ASESOR

M. A. ING. Wilfrido Martínez Molina.

COASESORES

Ing. Mauricio Arreola Sánchez

NOVIEMBRE DEL 2012





## RESUMEN.

El material para construcción que más se produce en todo el mundo es el cemento portland. El avance de un país se mide por su infraestructura, y la infraestructura mayormente se construye de concreto reforzado, concreto, morteros y más productos donde se emplea principalmente el cemento. Debido a que la utilización del cemento en la construcción va en incremento, lamentablemente también se aumentan las emisiones de dióxido de carbono al medio ambiente a causa de la producción del cemento, causando así un incremento en la contaminación. Existe una tendencia en la búsqueda de materiales que sean subproductos para su empleo en la construcción ya que cumplen con varios propósitos como aumentar la durabilidad, disminuir las emisiones, reducir la cantidad de residuos sólidos. Este trabajo de investigación busca estudiar y caracterizar las propiedades físicas y mecánicas de morteros elaborados con sustituciones parciales de cemento por ceniza de alto horno (EAH) y carbón mineral (CM), ambos subproductos de la fabricación de acero de refuerzo. Para tal investigación se utilizaron mezclas de mortero hechas con cemento portland CPC 30R RS, Tipo IV ASTM que es el que se expende localmente, arena y agua; teniendo una relación de agua cemento, A/C, en peso de 1.01 y manteniendo una fluidez de  $110\% \pm 5\%$ . Para las sustituciones se utiliza el Carbón Mineral (CM) y la Escoria de Alto Horno (EAH) provenientes de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, México, con sustituciones de 5%, 10%, 15% 20% y 30% comparados contra morteros testigos sin sustitución. Para la investigación se elaboraron especímenes de mortero cúbicos, prismáticos y briquetas (en forma de maní), a los que se les aplican pruebas destructivas (compresión simple, flexión y tensión) y pruebas no destructivas (velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica, densidad y gravedad específica), para conocer su comportamiento físico-mecánico, las pruebas fueron realizadas a las edades de 14, 28 y 45 días. Al término de la experimentación, se obtuvieron resultados no tan favorables, sobre todo en las sustituciones del carbón mineral. En ambas sustituciones la resistencia a la compresión simple dieron por debajo de la resistencia de los testigos, para el caso de las pruebas de flexión, tensión y adherencia el comportamiento tuvo una mejoría, para los cuales las sustituciones que mejor se comportaron, para el caso de la sustitución del CM, fue el 15% y para el caso de la EAH el 5 y 10%.

Palabras claves: Mortero, Carbón Mineral (CM) y Escoria de Alto Horno (EAH)



## DEDICATORIA

A mi madre **Isabel Jiménez Crisóstomo**,  
que fue madre y padre, mujer valiente y  
dedicada que jamás se dejó vencer  
y que es mi inspiración.

*Noma Jaratiengari no huakaúni,  
Janguarintakahuakariúni...*

*(No hay nada que no puedas hacer, Esfuérzate y lo harás...)*



## AGRADECIMIENTOS

A Dios por prestarme la vida y llegar hasta el día de hoy con salud para hacer realidad mis sueños.

A mi familia, en especial a mi madre por creer en mí y apoyarme incondicionalmente en todas mis locuras, a **Griselda** hermana querida que me alienta a seguir adelante.

A la UMSNH, por darme la oportunidad de hacer posible mis estudios con todos los apoyos que se me han otorgado.

A mi asesor **M.A. Wilfrido Martínez Molina**, a la **Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**, al **M.C. Hugo Luis Chávez García** y a la **M.I. Cindy Lara Gómez**, quienes me dieron todo su apoyo en la realización de esta tesis y me brindaron sus valiosos conocimientos.

A **Cecilia Corona García** persona muy especial en mi vida, que me ha brindado su cariño, apoyo y comprensión. Te quiero mucho.

A los compañeros y amigos **Mauricio Arreola Sánchez**, **Sandra Carmen Arguello Hernández** quienes me ayudaron en todo momento en la realización de esta tesis, que brindaron sus conocimientos, amistad y alegría durante mi estancia en el laboratorio de materiales y fuera de ella.

A todos aquellos compañeros y compañeras que me ayudaron en sus ratos libres a hacer mis experimentaciones, muchas gracias.



## CONTENIDO

RESUMEN.....	II
DEDICATORIA .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
OBJETIVO.....	XI
1.-Introducción.....	2
2.- Cemento.....	5
2.1.- Historia del cemento.....	5
2.2- Historia del Cemento en México.....	6
2.3- Producción del Cemento.....	7
2.4- Tipos de Cemento.....	11
2.5- El Cemento en los Últimos Años.....	12
3.- Puzolanas.....	16
3.1.- Uso de las puzolanas como aditivo del cemento.....	16
4.- Morteros.....	19
4.1.- Fundamentos generales del mortero.....	19
4.2.- Aglutinantes.....	20
4.3.- Material inerte.....	20
4.4.- Clasificación de los morteros.....	21
4.5.- Tipos de mezclados.....	22
4.5.1.- Mezclado con mezcladoras de concreto.....	22
4.5.2.- Mezclado a mano.....	23
5.- Pruebas no destructivas.....	25
5.1.- Gravedad específica o peso específico.....	26
5.2.- Densidad.....	26
5.3.-Pruebas de velocidad de pulso ultrasónico.....	27
5.3.1.- Teoría de propagación de onda.....	27
5.3.2.-Instrumentos de prueba.....	29
5.3.3.- Método de velocidad de pulso.....	30
5.4.Prueba de resistividad eléctrica.....	32



6.- Técnica de caracterización.....	34
6.1.- Caracterización de materiales.....	35
6.2.- Prueba de Fluorescencia de Rayos X.....	35
7.- Desarrollo experimental.....	37
7.1.- Cenizas en estudio.....	37
7.1.1.- Carbón mineral.....	38
7.1.2.- Escoria de alto horno.....	39
7.2.- Cemento.....	42
7.3.- Material inerte.....	43
7.3.1.- Caracterización de la arena.....	44
7.3.1.1.- Humedad actual.....	44
7.3.1.2.- Humedad de absorción.....	45
7.3.1.3.- Peso volumétrico seco y suelto de una arena (PVSS).....	46
7.3.1.4.- Peso volumétrico seco y varillado (PVSV).....	47
7.3.1.5.- Colorimetría.....	47
7.3.1.6.- Sedimentación.....	48
7.3.1.7.- Prueba de terrones de arcilla en arena.....	49
7.3.1.8.- Equivalente de arena.....	50
7.4.- Agua.....	50
7.5.- Elaboración de la mezcla.....	51
7.6.- Elaboración de cubos.....	54
7.7.- Elaboración de prismas.....	57
7.8.- Elaboración de briquetas.....	58
7.9 Elaboración de las losas para adherencia.....	60
7.9.1.- Losa de concreto.....	60
7.9.2.-Revestimiento de las losas.....	61
7.10.- Pruebas no destructivas.....	61
7.10.1.-Gravedad específica o peso específico.....	61
7.10.2.- Densidad.....	62
7.10.3.- Velocidad de pulso ultrasónico.....	63
7.10.4.- Resistividad eléctrica.....	65
7.11.- Pruebas destructivas.....	67



## COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CARBÓN MINERAL Y DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO EN MORTEROS COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO



7.11.1.- Resistencia a la compresión simple en cubos de mortero.....	67
7.11.2.- Resistencia a la flexión en prismas de mortero. ....	68
7.11.3.- Resistencia a la tensión en briquetas de mortero. ....	70
7.11.4.- Prueba de adherencia en morteros. ....	71
8.- Resultados.....	75
8.1.- Caracterización de arena. ....	75
8.1.1.- Humedad actual.....	75
8.1.2.- Humedad de absorción.....	75
8.1.3.- Peso volumétrico seco y suelto de una arena (PVSS). ....	76
8.1.4.- Peso volumétrico seco y varillado (PVSV).....	76
8.1.5.- Colorimetría. ....	76
8.1.6.- Sedimentación. ....	77
8.1.7.- Prueba de terrones de arcilla en arena.....	77
8.1.8.- Equivalente de arena. ....	78
8.2.- Masa de los cubos de mortero. ....	79
8.3.-Gravedad específica o peso específico. ....	81
8.4.- Densidad en cubos. ....	83
8.5.- Compresión simple en cubos de mortero.....	85
8.6.- Flexión en prismas de mortero. ....	87
8.7.- Tensión en briquetas de mortero. ....	89
8.8.- Velocidad de pulso.....	91
8.9.- Resistividad eléctrica.....	95
8.10.- Adherencia. ....	98
9. Conclusiones.....	101
10. -Bibliografía .....	103



## ÍNDICE DE IMÁGENES.

FIGURA 2.1. PRODUCCIÓN TRADICIONAL DEL CEMENTO (STEVEN H. KOSMATKA, 2004).	9
FIGURA 2.2. PRODUCCIÓN DEL CEMENTO EN EL MUNDO.	12
FIGURA 2.3. PRODUCCIÓN Y CONSUMO DEL CEMENTO EN MÉXICO (CANACEM, 2010).	14
FIGURA 5.1. ODAS P, ONDAS S Y ONDAS R	28
FIGURA 5.2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO DE PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO (MALHOTRA & CARINO, 2004).	29
FIGURA 5.3. A) TRANSMISIÓN DIRECTA; B) TRANSMISIÓN SEMIDIRECTA; C) TRANSMISIÓN INDIRECTA.	31
FIGURA 7.1. SIDERÚRGICA DE LÁZARO CÁRDENAS, MICHOACÁN.	37
FIGURA 7.2. LOCALIZACIÓN DE LÁZARO CÁRDENAS, TOMADA DE GOOGLE EARTH.	37
FIGURA 7.3. CLASIFICACIÓN DEL CARBÓN MINERAL Y SUS USOS (INSTITUTO MUNDIAL DEL CARBÓN, 2005).	38
FIGURA 7.4. A) CARBÓN MINERAL EN FORMA GRANULAR; B) MOLIENDA DEL CARBÓN MINERAL.	39
FIGURA 7.5. PRODUCCIÓN DEL ACERO (ARCELORMITTAL).	41
FIGURA 7.6. A) EAH GRANULAR SIN MOLER; B) MOLIENDA DE LA EAH.	41
FIGURA 7.7. CEMENTO TOLTECA CPC 30R RS, UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE MORTERO.	42
FIGURA 7.8. ARENA DE RIO LERMA SIN CRIBAR Y ARENA CRIBADA.	44
FIGURA 7.9. SECADO DE ARENA DE RIO PARA LA OBTENCIÓN DE HUMEDAD ACTUAL.	44
FIGURA 7.10. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD ACTUAL.	45
FIGURA 7.11. DETERMINACIÓN DEL PVSS.	46
FIGURA 7.12. DETERMINACIÓN DEL PVSU.	47
FIGURA 7.13. DETERMINACIÓN DE LA COLORIMETRÍA. PROPIAS DEL AUTOR.	48
FIGURA 7.14. DETERMINACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ARENA.	48
FIGURA 7.15. PRUEBA DE TERRONES DE ARCILLA EN ARENA.	49
FIGURA 7.16. OBTENCIÓN DE LA EQUIVALENCIA DE ARENA.	50
FIGURA 7.17. AGUA UTILIZADA EN LA ELABORACIÓN DE LA MEZCLA	51
FIGURA 7.18. A) MESA DE FLUIDEZ; B) APISONAMIENTO DE LA MEZCLA.	52
FIGURA 7.19. MEDICIÓN DE LA FLUIDEZ.	53
FIGURA 7.20. A) TALADRO ELÉCTRICO CON ASPA; B) ELABORACIÓN DE LA MEZCLA.	53
FIGURA 7.21. MOLDES PARA CUBOS.	54
FIGURA 7.22. APISONAMIENTO DE CUBOS.	55
FIGURA 7.23. CURADO DE LOS ESPECÍMENES.	56
FIGURA 7.24. MOLDES DE PRISMAS CON 10 CAVIDADES.	57
FIGURA 7.25. LLENADO DE LOS MOLDES PRISMÁTICOS.	58
FIGURA 7.26. LLENADO FINAL DE LOS PRISMAS.	58
FIGURA 6.27. MOLDE DE BRONCE PARA BRIQUETAS.	59
FIGURA 7.28. CREACIÓN DE LAS BRIQUETAS DE MORTERO.	59
FIGURA 7. 29. REVOLVEDORA AUTOMÁTICA CON MOTOR ELÉCTRICO.	60
FIGURA 7.30. PREPARACIÓN DE LAS LOSAS PARA LA PRUEBA DE ADHERENCIA.	61
FIGURA 7.31. DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA.	62
FIGURA 7.32. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD DE ESPECÍMENES CÚBICOS.	63
FIGURA 7.33. EQUIPO PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE PULSO.	64
FIGURA 7.34. ESPECÍMENES CÚBICOS Y PRIMAS ETIQUETADOS Y MEDIDOS.	64
FIGURA 7.35. ESPÉCIMEN PRISMÁTICO EN PRUEBA DE VELOCIDAD DE PULSO.	65
FIGURA 7.36. RESISTÓMETRO MARCA NILSSON.	65
FIGURA 7.37. ESPÉCIMEN PRISMÁTICO COLOCADO ENTRE LAS DOS PLACAS DE COBRE LISTA PARA TOMAR LA RESISTENCIA ELÉCTRICA.	66



FIGURA 7.38. A) MAQUINA UNIVERSAL TINIUS OLSEN, B) ESPÉCIMEN COLOCADO EN LA PLATINA. .... 67

FIGURA 7.39. PRISMAS MARCADOS A 1IN DE LOS EXTREMOS Y A ½ DE LA LONGITUD..... 68

FIGURA 7.40. A) COLOCACIÓN DE LOS APOYOS Y DEL PRISMA, B) RUPTURA DEL PRISMA..... 69

FIGURA 7.41. MÁQUINA DE PRUEBAS CON MORDAZAS ESPECIALES PARA BRIQUETAS DE MORTERO..... 71

FIGURA 7.42. PERFORACIONES CIRCULARES SOBRE LA SUPERFICIE Y DOLLYS COLOCADOS..... 71

FIGURA 7.43. INSTRUMENTO DE PRUEBA DE ADHERENCIA Y APLICACIÓN DE LA PRUEBA. .... 72

FIGURA 7.44. TIPOS DE FALLA (INSTRUMENTS, 2007). .... 73

FIGURA 7.45. FACTURAS DEL EAH, A) FALLA DEL CONCRETO; C) FALLA POR INTERFACE; FALLA DEL MORTERO.  
..... 73

FIGURA 8.1. DETERMINACIÓN DE SEDIMENTOS EN LA ARENA..... 77

FIGURA 8.2. DETERMINACIÓN DE EQUIVALENTE DE ARENA. .... 78

FIGURA 8.3. COMPORTAMIENTO DE CUBOS DE MORTERO AL PESO CON SUSTITUCIÓN DE CM..... 79

FIGURA 8.4. COMPORTAMIENTO DE CUBOS DE MORTERO AL PESO CON SUSTITUCIÓN DE EAH. .... 80

FIGURA 8.5. COMPORTAMIENTO DE CUBOS DE MORTERO A LA GRAVEDAD ESPECIFICA CON DISTINTAS  
SUSTITUCIONES DE CM..... 81

FIGURA 8.6. COMPORTAMIENTO DE CUBOS DE MORTERO A LA G.E. CON SUSTITUCIONES DE EAH. .... 82

FIGURA 8.7. COMPORTAMIENTO DE CUBOS DE MORTERO A LA DENSIDAD CON SUSTITUCIONES DE CM. ... 83

FIGURA 8.8. COMPORTAMIENTO DE CUBOS DE MORTERO A LA DENSIDAD CON SUSTITUCIONES DE CM. ... 84

FIGURA 8.9. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN SIMPLE EN CUBOS CON CM..... 85

FIGURA 8.10. COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN SIMPLE EN CUBOS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. .... 86

FIGURA 8.11. COMPORTAMIENTO DE PRISMAS, DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CM, A LA FLEXIÓN... 87

FIGURA 8.12. COMPORTAMIENTO DE PRISMAS, DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE EAH, A LA FLEXIÓN... 88

FIGURA 8.13. COMPORTAMIENTO DE BRIQUETAS, DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CM, A LA TENSIÓN.  
..... 89

FIGURA 8.14. COMPORTAMIENTO DE BRIQUETAS DE MORTERO A LA RESISTENCIA A TENSIÓN CON  
SUSTITUCIÓN DE EAH ..... 90

FIGURA 8.15. COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CUBOS DE MORTERO CON  
SUSTITUCIÓN DE CM. .... 91

FIGURA 8.16. COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN CUBOS DE MORTERO CON  
SUSTITUCIÓN DE EAH. .... 92

FIGURA 8.17. COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN PRISMAS DE MORTERO  
CON SUSTITUCIÓN DE CM. .... 93

FIGURA 8.18. COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE PULSO ULTRASÓNICO EN PRISMAS DE MORTERO  
CON SUSTITUCIÓN DE EAH ..... 94

FIGURA 8.19. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS CUBOS CON SUSTITUCIÓN DE CM.  
..... 95

FIGURA 8.20. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE CUBOS DE MORTERO CON  
SUSTITUCIÓN DE EAH. .... 96

FIGURA 8.21. COMPORTAMIENTO DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS PRISMAS DE MORTERO CON  
SUSTITUCIÓN DE EAH. .... 97

FIGURA 8.22. COMPORTAMIENTO DE LA ADHERENCIA EN MORTEROS CON SUSTITUCIÓN DE CM. .... 98

FIGURA 8.23. COMPORTAMIENTO DE LA ADHERENCIA EN MORTEROS CON SUSTITUCIÓN DE EAH..... 99



## ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 2.1. ABREVIATURAS DE LOS ÓXIDOS DEL CEMENTO (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997). .....	10
TABLA 2.2 COMPONENTES PRINCIPALES DEL CEMENTO (SHETTY, 2005). .....	10
TABLA 2.3. VALORES TÍPICOS DE LOS COMPUESTOS DE LOS TIPOS DE CEMENTOS (INSTITUTO DEL CONCRETO, 1997). .....	10
TABLA 2.4. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS DE ACUERDO A LA NORMA NMX-C-414-ONNCE-2004. ....	11
TABLA 2.5. TIPOS DE CEMENTOS DE ACUERDO A LA ASTM C 150/C150M-12. ....	12
TABLA 2.6. DIEZ PAÍSES PRINCIPALES PRODUCTORES DE CEMENTO EN EL MUNDO: 1994 Y 2003 (MILLONES DE TONELADAS (BABU KUMARAN & MARTÍNEZ GONZÁLEZ, 2008, PÁG. 169). .....	13
TABLA 2.7. PRODUCCIÓN DEL CEMENTO (CONCRETONLINE, 2011). .....	13
TABLA 7.1. COMPONENTES EN % DE LA EAH. ....	42
TABLA 7.2. COMPONENTES EN % DEL CEMENTO TOLTECA CPC 30R RS. ....	43
TABLA 7.4. PROPORCIONES DEL TESTIGO. ....	54
TABLA 7.5. TIEMPOS TRANSCURRIDOS PARA UNA FLUIDEZ DE 110±5CM. ....	56
TABLA 8.1. PROMEDIO DE HUMEDAD ACTUAL. ....	75
TABLA 8.2. DETERMINACIÓN DE LA HUMEDAD DE ABSORCIÓN. ....	75
TABLA 8.3. DETERMINACIÓN DE MVSS. ....	76
TABLA 8.4. DETERMINACIÓN DEL MVSV. ....	76
TABLA 8.5. DETERMINACIÓN DE LA COLORIMETRÍA. ....	76
TABLA 8.6. PORCENTAJE DE TERRONES EN ARENA. ....	77
TABLA 8.7. PORCENTAJE DE LA EQUIVALENCIA DE ARENA. ....	78
TABLA 8.8. MASAS DE LOS MORTEROS CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	79
TABLA 8.9. MASAS DE LOS MORTEROS CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	80
TABLA 8.10. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE G.E. EN MORTEROS CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	81
TABLA 8.11. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE G.E. EN MORTEROS CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	82
TABLA 8.12. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DENSIDAD EN MORTEROS CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	83
TABLA 8.13. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE DENSIDAD EN MORTEROS CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	84
TABLA 8.14. RESISTENCIAS A COMPRESIÓN SIMPLE DE ESPECÍMENES CÚBICOS CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	85
TABLA 8.15. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DE CUBOS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	86
TABLA 8.16. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE PRISMA CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	87
TABLA 8.17. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE PRISMAS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	88
TABLA 8.18. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE BRIQUETAS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	89
TABLA 8.19. RESISTENCIA A LA TENSIÓN DE BRIQUETAS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	90
TABLA 8.20. VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN CUBOS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	91
TABLA 8.21. VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN CUBOS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	92
TABLA 8.22. VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN PRISMAS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	93
TABLA 8.23. VELOCIDADES DE PULSO ULTRASÓNICO EN PRISMAS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	94
TABLA 8.24. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE LOS CUBOS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	95
TABLA 8.25. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE CUBOS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	96
TABLA 8.26. RESISTIVIDAD ELÉCTRICA DE PRISMAS DE MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	97
TABLA 8.27. RESISTENCIA A LA ADHERENCIA DE MORTEROS CON SUSTITUCIÓN DE CM. ....	98
TABLA 8.28. RESISTENCIA A LA ADHERENCIA DE MORTEROS CON SUSTITUCIÓN DE EAH. ....	99



## OBJETIVO.

La utilización de cemento es causante de contaminantes muy nocivos, pero gracias a la actual investigación del cemento se han encontrado diversos sustitutos de este que disminuyen su utilización y aun mejor cuando en las investigaciones emplean los desechos de industrias haciendo mejoras en la calidad de los productos terminados del cemento.

Se pretende que en esta investigación se logre identificar sobretodo el comportamiento mecánico así como el comportamiento físico de los morteros con diferentes sustituciones, que van del 5 al 30%, de carbón mineral (CM) y de la escoria de alto horno (EAH), a fin de que si se logra la mejora del comportamiento mecánico y físico del mortero con las sustituciones anteriores se pueda disminuir la utilización del cemento y aprovechar estos desechos que se producen en las siderúrgicas, y paralelamente disminuir la emisión de contaminantes.



# 1 INTRODUCCIÓN



## **1.-Introducción.**

La protección del medio ambiente ha sido de gran importancia en los últimos años, por tal motivo diversas organizaciones se han preocupado para reducir los contaminantes de las industrias al mismo tiempo gobiernos, universidades y empresas privadas han invertido para apoyar la investigación de nuevas tecnologías y materiales con desechos industriales. Entre estas investigaciones está la de la disminución de la utilización del cemento, que es un material que al elaborarse crea una gran cantidad de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para la construcción de concretos, morteros y demás derivados del cemento. Esta disminución y mejoramiento de los productos se hace a base de puzolanas, la cual es un material cementante, y de minerales, desechos de industrias, que puedan mejorar la calidad del cemento. Con estos nuevos productos se va dando un avance en la construcción de una vida sustentable.

Para nuestro caso, la investigación se lleva a cabo en morteros las cuales están formados por conglomerantes e inertes que, mediante la adición de agua adquieren una consistencia pastosa que nos sirve para unir piedras naturales o artificiales, recubrir superficies y pavimentos, y otros usos, los materiales conglomerantes han sido la cal y el yeso y entre los inertes se usan las arenas y a veces se utilizan aditivos como sangre, resinas vegetales, huevo y otros materiales.

Una manera de reducir el consumo de cemento, se puede lograr sustituyéndolo en los morteros por minerales y cenizas, en este caso y para esta investigación se utiliza como sustituto el carbón mineral (CM) y la escoria de alto horno (EAH). Y para esto es necesario conocer sus propiedades mecánicas y físicas del mortero con las diferentes sustituciones.

Esta investigación fue dividida en ocho capítulos. En el primer capítulo se presenta la justificación de esta investigación así como los objetivos, las limitantes que presenta y los alcances.

En el segundo capítulo se describen los antecedentes históricos del cemento tanto en el mundo como en México, así como los distintos tipos de cementos que hay comercialmente con sus componentes y características específicas, e igualmente la producción y consumo del cemento en el mundo como en México.



En el tercer capítulo se describen las puzolanas y el uso que se le da en la producción del cemento.

En el cuarto capítulo se trata lo relacionado con los morteros, los fundamentos generales, componentes, y la clasificación del mortero, ya que la investigación se hace en mezclas de mortero y por tal motivo se debe conocer las principales características de este.

En el quinto capítulo se describen las pruebas no destructivas que se le aplican a los especímenes del mortero con las distintas sustituciones, tales como las pruebas de velocidad de pulso, prueba de la resistividad eléctrica, gravedad específica y densidad.

En el sexto capítulo se describe las técnicas de caracterización que se le aplicaron a algunos materiales como al cemento portland CPC 30R RS, a las cenizas y al mineral, así como a la arena que se utilizó para la elaboración de las mezclas.

Para el capítulo séptimo se expone el desarrollo experimental que se lleva en la investigación, tal como los materiales que se utilizan, el procedimiento que se emplea para la elaboración de las mezclas y de los distintos especímenes. También se explica la forma en la que se aplican las pruebas tanto no destructivas como destructivas sobre los especímenes elaborados.

Para el capítulo octavo se exponen los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los diferente especímenes a distintos porcentajes de sustitución, así como el comportamiento a las edades de pruebas.

En el capítulo noveno se describe las conclusiones que se obtuvieron al sustituir los materiales a distintos porcentajes, planteando el material y el porcentaje que mejor se comportó y los posibles usos que se le puedan dar.



# 2 CEMENTO



## 2.- Cemento.

En el sentido general de la palabra, el cemento puede describirse como un material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos naturales para formar un todo compacto. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes.

Para efectos de construcción, el significado del término cemento restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arenas, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cementos son compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tiene la propiedad de fraguar y endurecer bajo o sumergidos en agua, en virtud de que experimentan una reacción química con esta y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos.(Neville A. M., 1999)

La hidratación continúa desde que existan condiciones favorables de temperatura y humedad y espacio disponible para la formación de los productos de hidratación. A medida que la hidratación continúa la mezcla se vuelve más dura y resistente. Gran parte de la hidratación y el desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero si hay humedad y temperatura adecuadas, continúa de manera más lenta, por un largo periodo. Se ha reportado el aumento continuo de resistencia, excediendo 30 años.(Steven H. Kosmatka, 2004)

### 2.1.- Historia del cemento.

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo. Los egipcios ya utilizaban yeso impuro calcinado. Los griegos y los romanos utilizaban caliza calcinada y, posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo o tejas quebradas. Este fue el primer concreto de la historia. Un mortero de cal no endurece bajo el agua; por tanto, para construcciones sumergidas en agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica o con teja de arcilla quemada, finalmente trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encuentra en las cenizas y en las tejas se combinaban con cal para producir lo que se conoce como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Pozzuoli, cerca de Vesubio, donde se encontró por primera vez ceniza volcánica. El nombre del cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para describir cementos obtenidos simplemente de moler materiales naturales a temperatura normal. Algunas de las estructuras romanas en las cuales la mampostería se unió con morteros,



tales como el Coliseo en Roma y el Pont du Gard, cerca de Nimes, y estructuras de concreto tal como el Panteón en Roma han sobrevivido hasta esta época, con su material cementante aun duro y firme. En las ruinas de Pompeya, a menudo el mortero se encuentra menos dañado por la intemperie que la piedra blanda.

En la edad media hubo una disminución general en la calidad y el uso del cemento, y solo en el siglo XVIII se observó un progreso en el conocimiento de los cementos. En 1756, John Smeaton fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone, en la costa de Cornish, Inglaterra, y descubrió que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. Al darse cuenta del importante papel de la arcilla, que hasta entonces no se consideraba conveniente, Smeaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica, un material que se obtiene al quemar una mezcla de cal y arcilla.

A partir de esto se desarrollaron otro tipo de cementos hidráulicos, -tal como el “cemento romano” que obtuvo James Parker por calcinación de nódulos de caliza arcillosa-; que vinieron a culminar en la parte del “cemento portland” que obtuvo en 1824 Joseph Aspdin, un ladrillero, albañil y constructo de Leeds. Este cemento fue preparado calentando una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar el CO<sub>2</sub>; esta temperatura era mucho más baja que la necesaria para la formación de clinker. El prototipo del cemento moderno lo obtuvo en 1841 Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta formar el clinker, con la cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementante.

El nombre del cemento portland, concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento endurecido y la piedra de portland –una caliza obtenida en una cantera de Dorset-, se ha conservado en todo el mundo hasta nuestros días para describir un cemento que se obtiene al mezclar minuciosamente materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina, u óxidos de fierro, quemándolos a una temperatura de formación de clínekery por medio de la molienda el clínekery resultante que posteriormente se le agrega cal.(Neville A. M., 1999)

## **2.2- Historia del Cemento en México.**

En México a principios del siglo XX fue cuando se empezó a consumir el cemento importado de Inglaterra y para 1906 se constituyó la primera Compañía de Cementos Portland, en Toluca estado de Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909.



La revolución mexicana de 1920 y la crisis mundial de 1929 fueron factores determinantes que retrasaron el desarrollo de la industria cementera mexicana; sin embargo, Desde principios del siglo XX el uso del cemento se ha popularizado hasta convertirse en un producto estratégico para el crecimiento económico. En México las primeras fábricas iniciaron a principios del siglo XX. Actualmente México tiene la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, a pesar de ser el décimo productor mundial(Pacifica, 2008).

### **2.3- Producción del Cemento.**

La materia prima para la fabricación del cemento portland se encuentran casi en todos los países, y las fábricas de cemento operan en todo el mundo.

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclar minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura aproximadamente a 1450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clínker. El clínker se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino, después se le adiciona un poco de yeso, y el producto resultante es el cemento portland comercial que tanto se usa en todo el mundo.(Neville A. M., 1999)

Los materiales utilizados para la producción del cemento portland debe contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Durante la fabricación se hace análisis químico frecuentemente de todos los materiales para garantizar una calidad alta y uniforme del cemento.

Como las operaciones de las plantas de cemento no son básicamente iguales, no se puede ilustrar adecuadamente por un mismo grafico todas las plantas. No hay instalaciones típicas para la producción del cemento; cada planta tiene diferencias significativas en disposición, equipos o apariencia general. Pero la producción del cemento pasa por los siguientes procesos en general:

- Extracción y molienda de la materia prima.
- Homogeneización de la materia prima.
- Producción del Clinker.
- Molienda de cemento.



El proceso de elaboración se puede describir como sigue: las materias seleccionadas se transportan de la cantera, trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada. La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcareo, tal como la caliza y el material arcilloso, tal como la arcilla, pizarra o escoria de alto horno. El cemento se fabrica por tanto por vía seca como por vía húmeda (figura 2.1). En el proceso de vía seca las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con materiales secos, ya en el proceso vía húmeda los materiales se mezclan con agua en forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares.

Después del mezclado se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno. La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible se fuerza a la parte interior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de canicas.

Después de esto, el clínker se enfría y se pulveriza. Durante esta operación se adiciona una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado del cemento y para que se mejoren las propiedades de contracción y desarrollo de la resistencia. En el molino, el clínker se muele tan fino como puede pasar, casi completamente, a través de un tamiz de 45 micrómetros. Este polvo gris extremadamente fino es el cemento portland. (Steven H. Kosmatka, 2004)

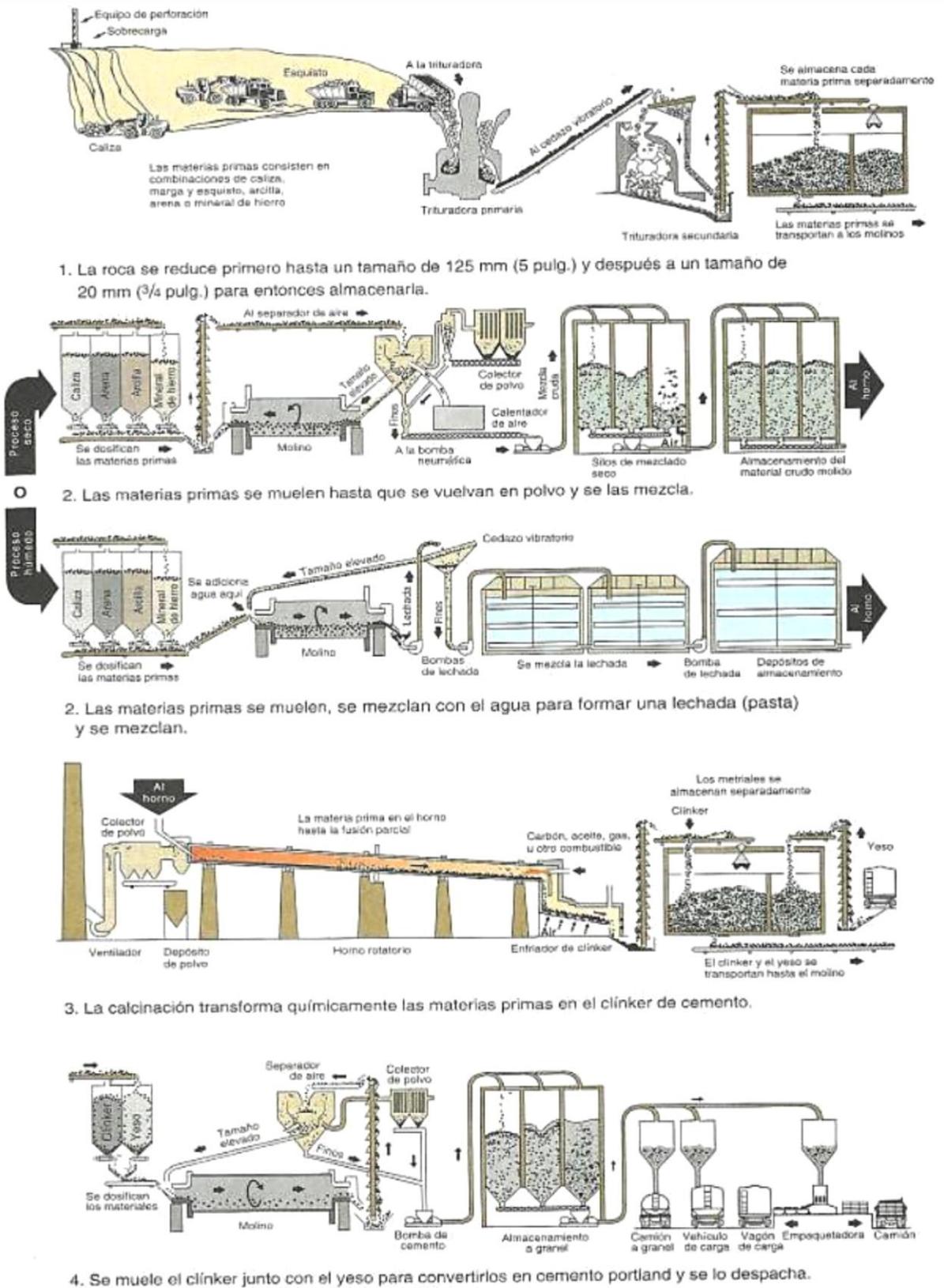


Figura 2.1. Producción tradicional del cemento (Steven H. Kosmatka, 2004).



El proceso de la formación del clinker del cemento involucra la transformación de las materias primas a productos más complejos por medio de las reacciones que se lleva en los hornos a grandes temperaturas, formando así los óxidos del cemento (Tabla 2.1) y finalmente se obtienen los componentes principales del cemento (Tabla 2.2).

FORMULA	NOMBRE	ABREVIATURA
<b>CaO</b>	Oxido de Calcio "Cal"	C
<b>SiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de Sílice "Silicato"	S
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Oxido de Aluminio "Aluminato"	A
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	Óxido de Hierro "Hierro"	F

Tabla 2.1. Abreviaturas de los óxidos del cemento(Instituto del concreto, 1997).

NOMBRE	COMPOSICION	ABREVIATURA
<b>Silicato tricálcico</b>	3CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>3</sub> S
<b>Silicato dicálcico</b>	2CaO.SiO <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> S
<b>Aluminato tricálcico</b>	3CaO.SiO <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> A
<b>Aluminoferritotretacálcico</b>	4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>4</sub> AF

Tabla 2.2 Componentes principales del cemento(Shetty, 2005).

A continuación se muestra en la tabla 2.3 algunos de los valores típicos de la composición de los diferentes tipos de cementos.

CEMENTO	COMPOSICION QUIMICA EN %			
<b>Portland</b>	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
<b>Tipo I</b>	48	27	12	8
<b>Tipo II</b>	40	35	5	13
<b>Tipo III</b>	62	13	9	8
<b>Tipo IV</b>	25	50	5	12
<b>Tipo V</b>	38	37	4	9

Tabla 2.3. Valores típicos de los compuestos de los tipos de cementos (Instituto del concreto, 1997).



## 2.4- Tipos de Cemento.

Actualmente se fabrican varios tipos de cemento portland para satisfacer varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas.

La clasificación de los tipos de cemento esta proporcionada por la norma NMX-C-414-ONNCE-2004, estos son los que se utilizan en la industria de la construcción en México para las distintas obras, la cual establece lo siguiente(ONNCE, 2003):

TIPO	DENOMINACION	CLASE RESISTENTE	CARACTERISTICAS ESPECIALES
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario	20	RS Resistente a los sulfatos
<b>CPP</b>	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA Baja reactividad álcali agregado
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30R	BCH Bajo calor de hidratación
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto	40	B Blanco
<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de sílice	40R	
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno		

*Tabla 2.4. Clasificación de los cementos de acuerdo a la norma NMX-C-414-ONNCE-2004.*

Según las necesidades del proyecto los cementos pueden requerir de una o más características especiales.

Los cementos se designan por uno de los 6 tipos de cementos, seguido por la clase de resistencia y por la característica especial:

### **Composición + Resistencia + característica especial**

La ASTM C 150/C150M-12, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland, designa los siguientes tipos de cemento, usando los números romanos, como sigue:



NOMENCLATURA	CARACTERÍSTICAS
Tipo I	Normal
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistente a los sulfatos
Tipo IIA	Moderada resistente a los sulfatos con aire incluido
Tipo II (MH)	Moderada calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos.
Tipo II (MH)A	Con aire incluido con moderada calor de hidratación y resistencia a los sulfatos
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Bajo calor de hidratación
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos

Tabla 2.1. Tipos de cementos de acuerdo a la ASTM C 150/C150M-12.

## 2.5- El Cemento en los Últimos Años.

El consumo y producción del cemento está directamente relacionados con la marcha del sector de construcción, y por lo tanto, con la coyuntura económica general.

En la figura se aprecia que la producción mundial del cemento ha crecido progresivamente desde el comienzo de los años 50, con una fabricación creciente en los países en desarrollo, particularmente en Asia, que cuenta con la mayor parte del crecimiento en la producción mundial de cemento en los años 90.

Producción de cemento en la UE y en el Mundo desde 1950

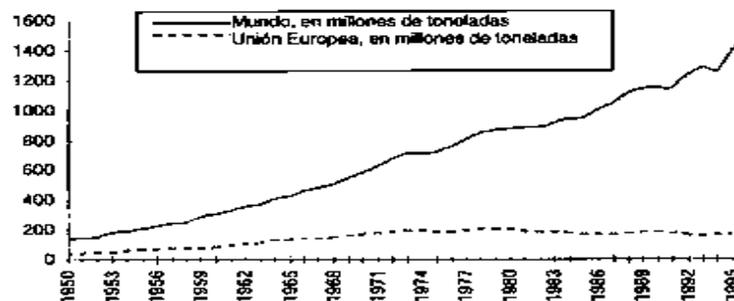


Figura 2.2. Producción del cemento en el mundo.



En la tabla 2.6 se puede observar los principales productores de cemento desde 1994 hasta el año 2003. En esta tabla se puede observar como hay un incremento en la producción mundial, sobre todo en los principales productores. También se observa como México ya es uno de los principales productores de cemento. Actualmente México es el cuarto productor más importante del mundo.

Países	1994		Países	2003	
	Capacidad	Rango		capacidad	Rango
<b>China</b>	400	1	<b>China</b>	750	1
<b>Japón</b>	91	2	<b>India</b>	110	2
<b>Estados Unidos</b>	77.9	3	<b>EE UU</b>	92.6	3
<b>India</b>	54	4	<b>Japón</b>	72	4
<b>Corea del Sur</b>	52.1	5	<b>Kor Corea de sur</b>	56	5
<b>Rusia</b>	50	6	<b>Rusia, Brasil, España, Italia</b>	40	6
<b>Alemania</b>	40.4	7	<b>Tailandia</b>	35	7
<b>Italia</b>	40	8	<b>Indonesia</b>	34	8
<b>Turquía</b>	30	9	<b>Turquía</b>	33	9
<b>España</b>	26	10	<b>México</b>	31.5	10
<b>Total: diez países</b>	861.4	62.88	<b>Total: diez países</b>	1254.1	67.42
<b>Total mundial</b>	1370		<b>Total mundial</b>	1860	

*Tabla 2.6. Diez países principales productores de cemento en el mundo: 1994 y 2003 (millones de toneladas (Babu Kumaran & Martínez González, 2008, pág. 169).*

En 2000 la producción mundial de cemento alcanzo los 1.670 M.t. la tabla muestra la distribución de la producción de cemento por regiones geográficas(CONCRETONLINE, 2011).

PAIS	2000	PAIS	2000
<b>China</b>	36%	<b>Estados Unidos</b>	5.3%
<b>Japón</b>	5%	<b>Resto de América</b>	8.3%
<b>Resto de Asia</b>	21.2%	<b>África</b>	4.3%
<b>Unión europea</b>	11.4%	<b>CEI</b>	2.5%
<b>Resto de Europa</b>	5.4%	<b>Oceanía</b>	0.5%

*Tabla 2.7. Producción del cemento(CONCRETONLINE, 2011).*



La producción del cemento y el consumo en México, del 2000 al 2010, se muestran en la figura 1.4.

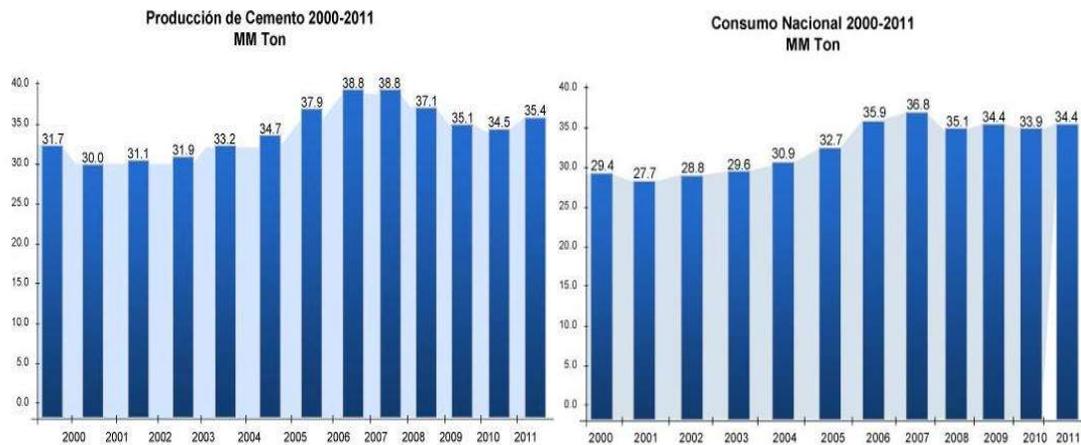


Figura 2.3. Producción y consumo del cemento en México(CANACEM, 2010).

La industria del cemento en México se caracteriza por ser de las más eficientes del mundo, gracias a las inversiones continuas en tecnología y equipamiento de punta; capacidad técnica de su personal; y la seguridad de sus procesos, equipos y operaciones.

Esto permite que México se encuentre entre los 15 principales productores de cemento en el mundo. En México se produce y comercializa este producto desde 1906, en la actualidad es el segundo productor de cemento a nivel de Latinoamérica.

El total del cemento que se consume en nuestro país es fabricado por seis empresas, en 32 plantas distintas, en todo el territorio nacional. Cemex México, HolcimApasco, Cementos Moctesuma, GCC cemento, Lafarge y la Cooperativa la Cruz Azul, con la mayor parte de la producción vendida al mercado interno. El cemento contribuye en forma directa con su producción y en forma indirecta como insumo de varias actividades económicas(Montalván Luna, Suárez Mora, & Téllez Linares, 2010, pág. 87).



# 3 PUZOLANAS



### 3.- Puzolanas.

Las puzolanas naturales se usan desde hace siglos. El término “Puzolana” viene de una ceniza volcánica extraída en Pozzuoli, un pueblo de Nápoles, Italia. Esta ceniza fue resultado de la erupción del monte Vesuvio, en 79 DC. Sin embargo, el empleo de la ceniza volcánica y de la arcilla calcinada en otras culturas data de 2000 AC o tal vez antes. Muchas de las estructuras romanas, griegas, hindúes y egipcias, producidas con concreto de puzolana, se les puede visitar hoy en día, comprobando la durabilidad de estos materiales. (Steven H. Kosmatka, 2004)

Una definición formal es la que da la norma ASTM 618-94a describe a la puzolana como un material síliceo y aluminoso el cual, en sí mismo, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Es esencial esté en un estado finamente dividido pues es solamente entonces que la sílice se puede combinar con hidróxido de calcio en presencia de agua para formar silicatos de calcio estables, los cuales tienen propiedades cementantes.

Hablando libremente, los materiales puzolánicos pueden ser de origen natural o artificial. Los materiales puzolánicos naturales encontrados más comúnmente son: ceniza volcánica – la puzolana original – pumicita, pizarras y pedernales opalinos, tierra calcinada diatomácea, y arcilla quemada. (Neville A. M., 1999)

#### 3.1.- Uso de las puzolanas como aditivo del cemento.

La experiencia americana con puzolanas naturales data del principio del siglo XX en proyectos de obras públicas, tales como presas, donde fueron utilizadas para controlar el aumento de la temperatura en concreto masivo y actuar como material cementante. Además del control del aumento de temperatura, las puzolanas naturales se usan para aumentar la resistencia al ataque de los sulfatos y está entre los primeros materiales a controlar, comprobadamente, la reacción álcali-agregado.

Las puzolanas naturales más comúnmente utilizadas hoy en día, son los materiales procesados, los cuales se tratan con altas temperaturas en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquistos calcinados y metacaolinita. (Steven H. Kosmatka, 2004)



En México la producción de cemento portland puzolánico se encuentra bajo la normativa NMX-C-414-ONNCCE-2004.

Un cemento puzolánico contiene aproximadamente los siguientes compuestos:

- 55-70% de Clinker Portland
- 30-45% de puzolana
- 2-4% de yeso

Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico sobre el resto se detallan a continuación:

- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en fraguado.
- Reducción del calor de hidratación.
- Incremento de la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la abrasión.
- Aumento de la durabilidad del cemento.
- Disminuye la necesidad del agua.



# 4 MORTEROS



## 4.- Morteros.

### 4.1.- Fundamentos generales del mortero.

El mortero se puede definir 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 endurecer presentan propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para las siguientes funciones (Sánchez de Guzmán, 2006):

- Unir los elementos de mampostería.
- Servir como material de asentamiento para dichos elementos.
- Nivelar y asentar los elementos.
- Proporcionar cualidades estéticas a la estructura.

El mortero comienza a unir los elementos de mampostería en cuanto fragua. Durante la construcción, los ladrillos y los bloques deben forzarse y presionarse para hacer que el mortero entre en los poros de los elementos de mampostería con el fin de conseguir una adhesión máxima entre los mismos. Sin embargo, hay que observar que el mortero es la parte más débil de la pared de mampostería. Por lo tanto, las capas de mortero finas suelen dar como resultado paredes más fuertes que las gruesas.

A diferencia del concreto, la resistencia a la compresión no es la propiedad más importante del mortero. Puesto que el mortero se utiliza como adhesivo y como sellante, es muy importante que forme una unión completa, fuerte y duradera con los elementos de mampostería y con las barras de armadura que puedan utilizarse para reforzar las paredes de mampostería. La capacidad de unir elementos individuales se mide mediante la resistencia a la tracción de la unión del mortero (ASTM C952), que está relacionada con la fuerza requerida para separar los elementos. La resistencia a la tracción de la unión afecta a la resistencia cortante y de flexión de los elementos de mampostería. La resistencia a la tracción de la unión varía entre 0.14MPa y 0.55MPa.

Otras propiedades importantes del mortero son la facilidad del trabajo, la resistencia a la tracción, la resistencia a la compresión, la resistencia a la congelación y la descongelación, y la retención de agua.(MICHAEL S. MAMLOUK, 2009)



#### 4.2.- Aglutinantes.

Son productos pulverizados que, cuando se mezclan con agua, sufren unas transformaciones químicas que producen su endurecimiento al aire o bajo el agua. Este proceso se conoce como fraguado.

En estado pastoso y con consistencia variable, tiene la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, de unir distintos materiales entre sí, protegerlos, endurecer y alcanzar resistencias mecánicas considerables. Según la forma en que se llevan a cabo a la unión, se denominan aglomerantes o conglomerantes. (Materiales de Construcción)

- En los aglomerantes la unión tiene lugar por procesos físicos, ejemplo: el barro, la cola, el betún, etc.
- En los conglomerantes la unión ocurre mediante transformaciones químicas. Ejemplos: el yeso, la cal y el cemento.

#### 4.3.- Material inerte.

Un material inerte o árido, utilizado para la mezcla de un mortero, generalmente es arena de distinta composición y granulometría, generalmente encontrado de forma natural en bancos de material, ríos u obtenidos de la trituración. Generalmente se dice que la arena natural tiene como límite inferior de tamaño 60 y 70  $\mu\text{m}$ .

La arena al mezclarse con los aglomerantes constituye el soporte para el mortero y evita el requebramiento que se produciría si se empleara el aglomerante solo, aparte de que su uso reduce al menos un tercio del aglomerante. Las arenas deben de estar libres de sustancias que impidan la adherencia o influyan desfavorablemente en el proceso de endurecimiento como ácidos, grasas, restos vegetales y cantidades perjudiciales de arcillas y sales minerales. (ARQHYS).

Desde el punto de vista de durabilidad en ambientes agresivos deben preferirse los áridos de tipo silíceo (gravas y arenas de río o de cantera) y los que provienen de machaqueo de rocas volcánicas (basaltos, andesitas) o de calizas sólidas y densas. Las rocas sedimentarias (calizas, dolomitas) y las volcánicas sueltas (pómez, toba) deben ser objeto de análisis. No deben de emplearse áridos que provengan de calizas blandas, feldespatos, yeso, piritas o rocas porosas. (INGENIERIA RURAL, 2001)



Los agregados son más baratos que el cemento y, por lo tanto, es más barato poner la mayor cantidad posible de agregados y la menor cantidad de cementos. No obstante, la economía no es la única razón para utilizar agregados: éstos proporcionan además a la mezcla una enorme ventaja técnica, al darle mayor estabilidad volumétrica y más durabilidad que si se empleara solamente pasta de cemento. (Neville A. M., 1999)

#### 4.4.- Clasificación de los morteros.

Los morteros pueden clasificarse de distintas formas, a continuación presentamos distintas clasificaciones según su aplicación, concepto y fabricación. (MORTERO, 2003)

Según su aplicación constructiva los morteros se pueden clasificar como:

- Morteros para formación de fábricas.
- Morteros de revestimiento.
- Morteros para pavimentos.
- Morteros cola.
- Morteros impermeabilizantes.

Esta clasificación puede diversificarse e incrementarse pero las clases de mortero señaladas cubren la mayor parte de las aplicaciones edificatorias.

El desarrollo industrializado de los morteros ha facilitado la capacidad de producir morteros a la medida del cliente. Tanto en lo relativo de las propiedades que tendrá el mortero servido como en la afinada composición y proporción de sus componentes. Conforme a esto cabe otra clasificación según el concepto:

- **De prestación.** Donde las propiedades de los morteros se obtienen.
- **De receta.** Donde ya existe una composición y las proporciones de la mezcla.

La tecnología de la fabricación de los morteros y su llegada a obra ha evolucionado y se ha diversificado considerablemente en los últimos años. Desde los tradicionales morteros *in situ* a los actuales morteros industriales suministrados desde fábrica, se establece otra clasificación según su forma de clasificación:



- **Morteros hechos *in situ*.** Estos morteros están compuestos por los componentes primarios, dosificados, mezclados y amasados con agua en la obra.
- **Morteros industriales semiterminados.** Dentro de este grupo existen los morteros predosificados y los morteros premezclados de cal y arena.
  - **Morteros predosificados.** Son aquellos que cuyos componentes básicos dosificados independientemente en una fábrica, se suministran al lugar de utilización, donde se mezclan en las proporciones y condiciones especiales por el fabricante.
  - **Morteros premezclados de cal y arena.** Son aquellos cuyos componentes se han dosificado y mezclado en fábrica para su posterior suministro al lugar de construcción.
- Morteros industriales. Son aquellos que se han dosificado, mezclado y, en su caso, amasado con agua en una fábrica y suministrado al lugar de construcción. Estos pueden ser:
  - **Morteros húmedos.** Son morteros ponderales de sus componentes primarios. Además pueden tener adiciones en proporciones adecuadas. Se amasan en una fábrica con el agua necesaria hasta conseguir una mezcla homogénea para su utilización.
  - **Morteros secos.** Son morteros ponderales de sus componentes primarios (conglomerantes y áridos secos). Se preparan en fábricas y se suministran en silos o en sacos y se amasan en obra, con el agua precisa, hasta obtener una mezcla homogénea para su utilización.

#### 4.5.- Tipos de mezclados.

Es esencial que los ingredientes de la mezcla se mezclen apropiadamente para producir mortero o concreto fresco en el cual la superficie de todas las partículas de agregado es recubierta con pasta de cemento y que sea homogénea en la macroescala para que posea propiedades uniformes.

##### 4.5.1.- Mezclado con mezcladoras de concreto

Las mezcladoras de concreto no solo realizan la uniformidad de la mezcla que se acaba de mencionar, sino que también deben descargar la mezcla sin modificar su uniformidad. De hecho el método de descarga es una de las bases de clasificación de las mezclas de concreto. Para las mezclas existen una gran variedad de mezcladoras.



#### 4.5.2.- Mezclado a mano

Se tienen algunas ocasiones en que es necesario mezclar a mano pequeñas cantidades mortero y, como en este caso la uniformidad es más difícil de alcanzar, se necesitan cuidados y esfuerzos especiales. Para asegurar que el arte más importante no se olvide, se describe un procedimiento adecuado.

Se extenderá el agregado sobre una base dura, limpia y no porosa en una capa uniforme; el cemento se extiende entonces sobre el agregado, y los materiales secos se mezclan volcando desde uno a otro extremo de la artesa y “cortando” con una pala hasta que la mezcla parezca uniforme. Usualmente se requiere volcar unas tres veces. Entonces se agrega el agua gradualmente, de manera que no se pueda escapar ni por sí mismo ni con cemento. La mezcla se traspalea, por lo general tres veces, hasta que parezca uniforme en color y en consistencia. (Neville A. M., 1999, págs. 142,147)



# 5 PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.



## 5.- 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. 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).

Los ensayos no-destructivos se basan en la medición de las propiedades de los materiales, y en el caso de los métodos ultrasónicos lo que se busca es establecer relaciones entre los diferentes parámetros de las constantes de propagación y la existencia de posibles defectos en un material. Las técnicas de inspección no destructiva tienen las siguientes limitaciones(Gaete & A., 2001):

- En algunos casos se requiere una inversión inicial bastante alta, aunque se puede justificar si se analiza correctamente la relación costo-beneficio.
- La propiedad física a controlar es medida de forma indirecta y es evaluada cualitativamente o por comparación
- Una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores en el caso en el que no existan procedimientos de inspección preparados y cualificados debidamente o no se cuente con patrones de calibración adecuados.
- se requiere que el personal encargado de ello esté debidamente capacitado y calificado. Además deberá contar con la experiencia necesaria para interpretar y evaluar correctamente los resultados.

Los ensayos no destructivos se han practicado por muchas décadas. Se tiene registro desde 1868, cuando se comenzó a trabajar con campos magnéticos. Uno de los métodos más utilizados fue la detección de grietas superficiales en ruedas y ejes de ferrocarril. Las piezas eran sumergidas en aceite, y después se limpiaban y se esparcía con un polvo que revelará el aceite que había penetrado en las grietas. Cuando una grieta estaba presente, el aceite que se había filtrado en la discontinuidad, mojaba el polvo que se había esparcido, indicando que el componente estaba dañado. Esto condujo a formular nuevos aceites que serían utilizados específicamente para realizar éstas y otras inspecciones, y



esta técnica de inspección ahora se llama prueba por líquidos penetrantes (Charles, 2001).

Sin embargo con el desarrollo de los procesos de producción, la detección de discontinuidades ya no era suficiente. Era necesario también contar con información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad, para utilizarla como fuente de información, con el fin de realizar cálculos matemáticos y poder predecir así la vida mecánica de un componente.(Charles, 2001). Después se formarían sociedades promotora de ensayos no destructivos así como de material educativo y programas, creadores también de estándares y certificación de personal que realiza estos ensayos.

### **5.1.- Gravedad específica o peso específico.**

La definición de gravedad específica o peso específico es la relación entre la densidad de una sustancia y la de la otra, para sólidos y líquidos la relación se hace con base al agua. El peso específico estará relacionado con la gravedad y el campo electromagnético en las distancias atómicas.

La gravedad específica es una medida relativa de la densidad de un elemento y dependerá de la concentración de masa por unidad de volumen de cada elemento. Dicha concentración de masa estará efectuada por la estructura tridimensional molecular y número másico de los átomos.(Molina, 2008, pág. 52)

### **5.2.- Densidad.**

Una de las propiedades de los sólidos, así como de los líquidos e incluso la de los gases es la medida del grado de compactación de un material: su densidad.

La densidad es una medida de cuanto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es decir la cantidad de masa por unidad de volumen.

La densidad del mortero varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad.



### 5.3.-Pruebas de velocidad de pulso ultrasónico.

El método de velocidad de pulso ultrasónico ha sido utilizado exitosamente para evaluar la calidad del concreto por más de 60 años. Este método puede ser utilizado para evaluar grietas internas y otros defectos como por ejemplo cambios en el concreto por deterioro debido a acciones químicas del medio ambiente, así como por congelación y deshielo. Mediante el uso del método de velocidad ultrasónica, también puede ser posible estimar la resistencia de especímenes de concreto y de concreto en obra. Este método utiliza ondas mecánicas que no ocasionan ningún daño al elemento de prueba. El espécimen de prueba puede ser probado varias veces en la misma localización, lo cual es útil para el monitoreo de concreto sometido a cambios estructurales internos por un largo periodo de tiempo.(Malhotra & Carino, 2004)

La segunda guerra mundial aceleró las investigaciones con respecto a las pruebas no destructivas usando métodos de propagación de onda de estrés. El desarrollo del método de velocidad de pulso comenzó en Canadá e Inglaterra alrededor del mismo tiempo. En Canadá los investigadores Leslie y Cheesman desarrollaron un instrumento llamado soniscope(Leslie & Chesma, 1949). En Inglaterra, otro investigador desarrolló un instrumento llamado probador ultrasónico (Jones, 1948). En un principio, ambos, el soniscope y el probador ultrasónico, fueron bastante similares, con pequeñas diferencias en detalle. Desde 1960, los métodos de velocidad de pulso han sido llevados fuera de los laboratorios, a las construcciones u obras civiles (Whitehurst, 1966).

#### 5.3.1.- Teoría de propagación de onda.

Cuando un medio sólido es alterado por una carga dinámica o vibratoria, se producen tres tipos de propagación de ondas mecánicas, Figura 5.1, (también llamadas ondas de esfuerzo). Las ondas de compresión se propagan a través del medio sólido de manera análoga a las ondas sonoras que se propagan a través del aire. Cada tipo de onda se propaga con una velocidad característica. Para un sólido dado, las ondas de compresión tienen la mayor velocidad mientras que las ondas de superficie tienen la menor(228, 1998). La velocidad particular de una onda depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio. Para un medio sólido homogéneo elástico la velocidad de la onda de compresión está dada por la ecuación 1:

$$V = \sqrt{\frac{(1-\mu)/((1+\mu)(1-2))E}{\rho}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde:



$V$ = velocidad de la onda de compresión.

$$K = (1 - \mu) / ((1 + \mu)(1 - 2))$$

$E$ = módulo de elasticidad dinámica.

$\rho$ = densidad.

$\mu$ = relación dinámica de Poisson.

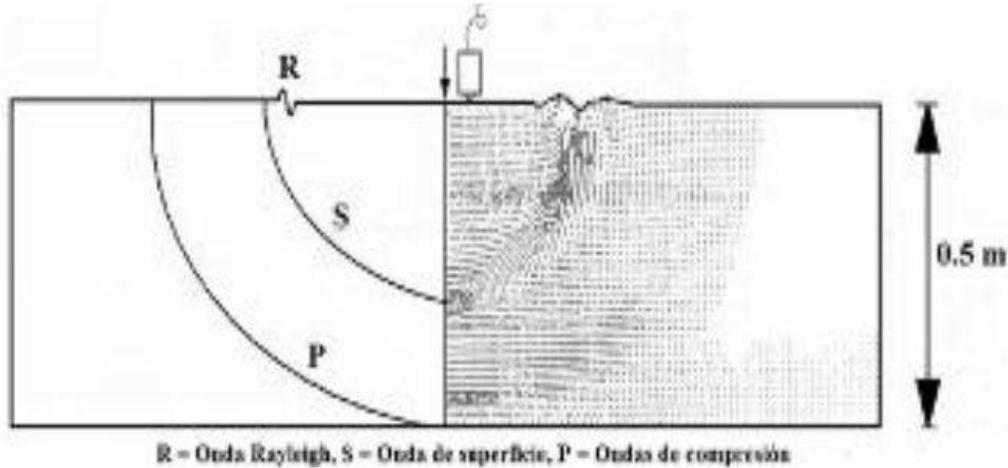


Figura 5.1. Ondas P, ondas S y ondas R

La frecuencia  $f$  y la longitud de onda  $\lambda$  del movimiento de propagación de onda están relacionados por la velocidad de propagación:  $V=f\lambda$ . La frecuencia es reportada en unidades de Hertz (o ciclos por segundo) y la longitud de onda en unidades de distancia (por ejemplo mm). Cuando un pulso de propagación de onda incide en una interface con un medio que tiene distintas propiedades de material, una porción de la energía de onda se dispersa fuera de la trayectoria de la onda original (Jones, 1962). Para el concreto, el límite superior de frecuencias que se usan es de alrededor de 500khz el cual es asociado a una longitud de onda de aproximadamente 10mm, Se pueden recorrer mayores longitudes de camino usando menores frecuencias (por lo tanto mayores longitudes de onda): una frecuencia de 20khz puede generalmente recorrer hasta 10m de concreto (Jones, 1962).

En el método de velocidad de pulso ultrasónico, un pulso de onda ultrasónica a través del concreto es creado en un punto sobre la superficie del objeto de prueba, y el tiempo que éste tarda en viajar de ese punto a otro es medido. Conociendo la distancia entre los dos puntos, la velocidad del pulso de onda puede ser determinada. Un equipo portátil de velocidad de pulso está disponible hoy en día en el mercado para realizar pruebas en concreto y determinar el tiempo de llegada del primer frente de onda. Para la



mayoría de las configuraciones de prueba, esta resulta ser la onda de compresión directa, ya que es la más rápida.

### 5.3.2.-Instrumentos de prueba.

El instrumento de prueba consiste de un medio para producir un pulso de onda en el concreto (generador y transmisor de pulso) y un medio de sensibilidad de llegada de pulso (receptor) y medir con precisión el tiempo tomado por el pulso que viaja a través del concreto. El equipo puede ser conectado a un osciloscopio o a otro dispositivo de pantalla, para observar la naturaleza del pulso recibido. En la Figura 5.2 se muestra un diagrama esquemático. Típicamente, los tiempos de pulso son de hasta  $6500\mu\text{s}$  y pueden ser medidos con una resolución de  $0.1\mu\text{s}$ . La medición del tiempo de viaje es promediada. El instrumento cuenta con 2 transductores, uno para recibir y uno para transmitir el pulso ultrasónico. Estos transductores tienen frecuencias de 25 a 100kHz y son los usados para realizar pruebas en el concreto.

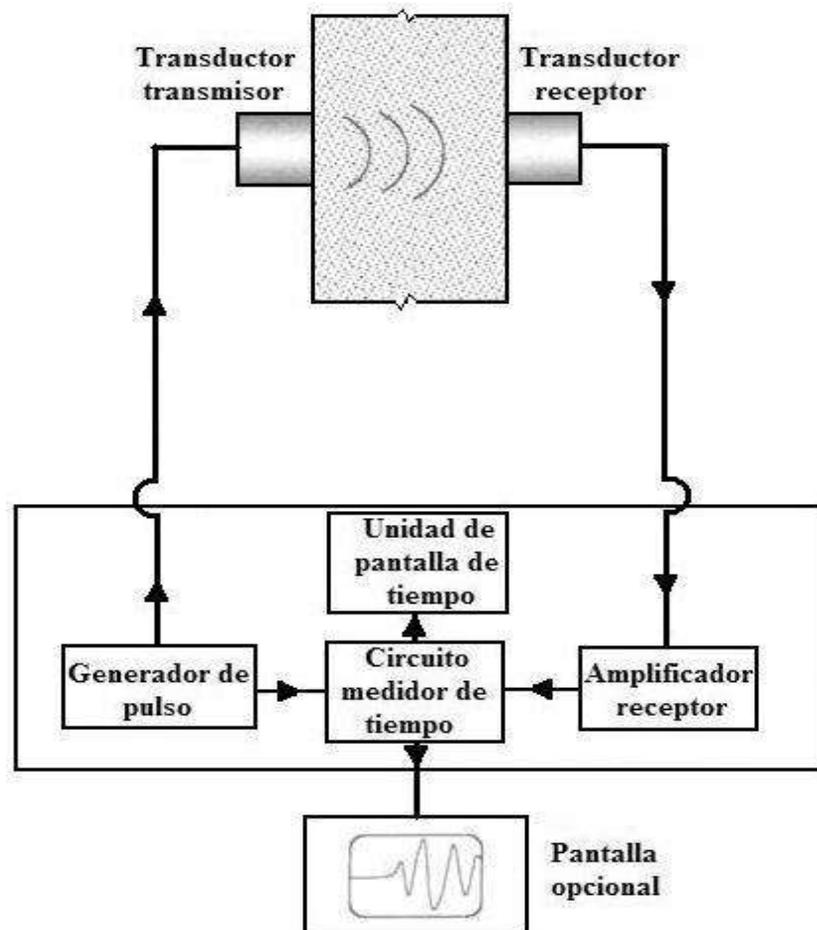


Figura 5.2. Diagrama esquemático del circuito de prueba de velocidad de pulso (Malhotra & Carino, 2004).



### 5.3.3.- Método de velocidad de pulso.

La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio (Malhotra & Carino, 2004).

La idea básica del método de velocidad de pulso es establecer que la velocidad de un pulso de onda de compresión a través de un medio depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio.

El transductor transmisor del instrumento de velocidad de pulso transmite una onda en el concreto y el transductor receptor, a una distancia  $L$ , recibe el pulso que pasa por el concreto en otro punto. La pantalla del instrumento de velocidad de pulso indica el tiempo de tránsito,  $\Delta t$ , que toma el pulso de la onda de compresión en viajar a través del concreto. La velocidad del pulso de la onda de compresión  $V$ , por lo tanto, es:

$$V = \frac{L}{\Delta t} \text{ ecuación 2}$$

El pulso de compresión transmitido a través del concreto se somete a dispersión en los límites de los agregados. Para cuando el pulso llega a transductor receptor, este se transforma en una onda compleja, que contiene múltiples ondas de compresión y de cortante reflejadas. Desde luego, las ondas de compresión viajan más rápido y llegan primero al receptor.

Para transmitir o recibir el pulso, los transductores deben estar en complejo contacto con el objeto de prueba de otro modo el aire entre el objeto de prueba y el transductor puede introducir un error en el tiempo de tránsito indicado. Se puede usar muchos acopladores del mercado para eliminar el aire y asegurar un buen contacto entre la muestra y los transductores. Jalea a base de petróleo, nos da uno de los mejores acoplamientos. Tenemos también otros acopladores como grasas, jabón, pasta de caolín-glicerol. Las capas del acoplador deben de ser tan delgadas como sea posible. Si la superficie del concreto está muy rugosa, se debe emplear grasa espesa como acoplador. En algunos casos, que se tenga que suavizar la superficie rugosa o establecer una superficie lisa se puede hacer con el uso de yeso de París, o con una pasta de cemento de fraguado rápido o con un mortero epóxico de fraguado rápido. Sin embargo, hay que



destacar que esta prueba es buena sólo para recibir la señal. Se requiere una superficie lisa para el transductor transmisor (Malhotra & Carino, 2004).

La velocidad de pulso para un concreto ordinario es típicamente de 3700 a 4200m/s. Por tanto, para un trayecto de 300mm el tiempo de viaje es aproximadamente de 70 a 85 $\mu$ s.

Existen tres configuraciones en las cuales se pueden arreglar o acomodar los transductores, como se muestra en las Figuras 5.3a, 5.3b y 5.3c. Tenemos entonces, 1) transmisión directa; 2) transmisión semidirecta; y 3) transmisión indirecta o método de superficie. El método de transmisión directa, Figura 5.3a, es el más deseable y el arreglo más satisfactorio, debido a que con este arreglo, se transmite y recibe el máximo de la energía del pulso. El método de transmisión semidirecta, Figura 5.3b, puede ser usado satisfactoriamente también. Sin embargo, se debe tener cuidado de que los transductores no estén muy alejados; de otro modo la transmisión del pulso podría disminuir y por tanto la señal podría no detectarse. Este método es usado donde se tienen concentraciones de refuerzos. El método de transmisión indirecta o método de superficie, Figura 5.3c, es el menos satisfactorio por que la amplitud de la señal que se recibe es significativamente menor que la señal que se recibe por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores y se requiere un procedimiento especial para determinar la velocidad de pulso (Qixian & Bungey, 1996).

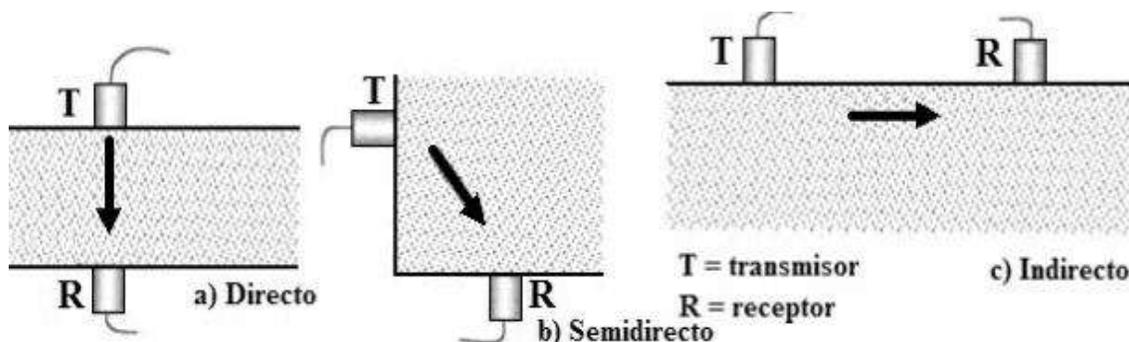


Figura 5.3. a) Transmisión directa; b) transmisión semidirecta; c) transmisión indirecta.



#### 5.4. Prueba de 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, et al, 2010).



# 6 TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN



## 6.- Técnica de caracterización.

Las últimas décadas del siglo XX, así como los inicios del siglo XXI, han sido están siendo testigos de avances espectaculares en el campo de los materiales. Entre ellos, quizás los más significativos, pero no los únicos, han sido el desarrollo tanto de los materiales superconductores “de alta temperatura crítica” como de los nanomateriales (dimensiones de los nanómetros) y/o nanoestructurados. Otros materiales de muchísimo interés recientemente descubiertos son los polímeros conductores, las cerámicas avanzadas, materiales inteligentes, etc. No es pues de extrañar que todo este grupo de materiales, con propiedades específicas, se denomine a veces como “nuevos materiales”. No cabe duda por otro lado, que estos avances no hubieran sido posibles sin un desarrollo paralelo de nuevas técnicas de preparación de muestras (ultramicrotomía, spin-coating, etc) y caracterización (MADLI-TOF, AFM, Microscopía confocal, aniquilación de positrones, microscopía electrónica de emisión de campo, etc.) y estudio de las propiedades de los materiales. Se puede afirmar, por tanto, que la ayuda de las nuevas técnicas de caracterización y análisis ha sido indispensable en el diseño, síntesis y procesado de estos materiales, permitiendo un cuidadoso control de sus propiedades, e incluso en muchos casos, con la posibilidad de prefijar de antemano alguna de sus características (“materiales a la carta”).

El estudio de los materiales tiene sentido desde el momento en el que se piensa que van a tener una función útil en nuestra vida. Atendiendo a la función que va a tener un material, es necesario que éste posea una serie de propiedades que le van a ser útiles para poder desempeñar dicha función de manera adecuada y duradera. Antiguamente la selección de materiales se hacía mediante ensayos de prueba y error. Se tomaban objetos directamente de la naturaleza y posteriormente se probaba su utilidad. Hoy en día es necesario conocer con antelación las propiedades de un determinado material con objeto de predecir si podrá ser útil o no para una determinada aplicación (González Benito, 2008).



### 6.1.- Caracterización de materiales.

Consiste en la obtención de información acerca de un material bajo estudio (composición, estructura, topología, topografía, morfología, propiedades en general) a partir de la interacción de una señal (eléctrica, luminosa, térmica, etc.) con una porción de dicho material. Por tanto, toda caracterización de un material supone una agresión al mismo, es decir, una perturbación del mismo. El estudio de la respuesta del material a dicha perturbación nos permite conocer las propiedades o más concretamente, las peculiaridades del mismo. A veces se suele confundir el término caracterización con el de análisis. Toda caracterización implica realizar un análisis del material, sin embargo no todo análisis implica realizar una caracterización. Por ejemplo, el seguimiento de un proceso de degradación empleando alguna técnica o método instrumental no implica conocer alguna característica intrínseca del material sino que nos permite saber como éste se comporta ante determinadas circunstancias. Precisamente son las características de dicho material las que condicionan dicho comportamiento (González Benito, 2008).

### 6.2.- Prueba de Fluorescencia de Rayos X.

La espectrometría de fluorescencia de rayos X es una técnica ampliamente utilizada para la determinación de una amplia gama de elementos de las aleaciones. La técnica proporciona un análisis rápido, exacto y preciso de múltiples elementos que facilita el control eficiente del proceso de fundido. También se usa ampliamente para la certificación y análisis de verificación de productos (ASTM-E-2465).

Los espectros de rayos X característicos se excitan cuando se irradia una muestra con un haz de radiación X de longitud de onda suficientemente corta. Las intensidades de los rayos X fluorescentes resultantes son casi 1000 veces más bajas que la de un haz de rayos X obtenido por excitación directa con electrones. El método de fluorescencia requiere de tubos de rayos X de alta intensidad, de unos detectores muy sensibles y se sistemas ópticos de rayos X adecuados.

Cuando se irradia con un haz de rayos X una muestra de composición desconocida, esta emitirá las radiaciones características de los elementos que la componen. Si podemos identificar la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones características, podremos conocer los elementos que componen la muestra, y si podemos medir sus intensidades, podremos conocer sus respectivas concentraciones.



# 7 DESARROLLO EXPERIMENTAL



## 7.- Desarrollo experimental.

### 7.1.- Cenizas en estudio.

Como lo que se pretende en esta tesis es dar a conocer las propiedades mecánicas de las cenizas como sustitución del cemento en morteros, para la reducción de la utilización del cemento, se empleara como sustituto el CARBÓN MINERAL (CM) Y ESCORIA DE ALTO HORNO (EAH). Las cuales se pretenden que tengan una reacción puzolánica y ayuden a mejorar las propiedades del mortero.

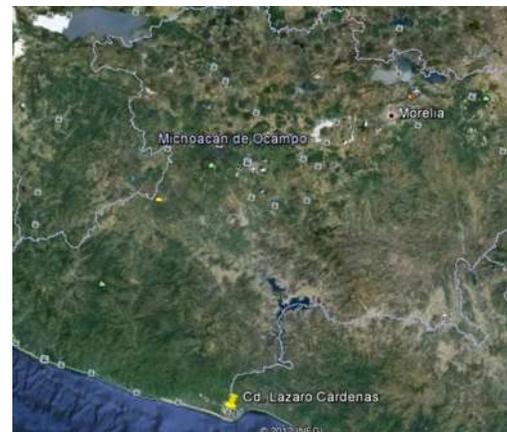


*Figura 7.1. Siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán.*

Estas cenizas son provenientes de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán, (Figura 7.1) Se localiza al sur del Estado, en las coordenadas 17°57' de latitud norte y 102°12' de longitud oeste, a una altura de 10 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Arteaga, al este con el Estado de Guerrero, al sur con el Océano Pacífico y al oeste con Aquila. Su distancia a la capital del Estado es de 401 km. Su superficie es de 1,160.24 km<sup>2</sup> y representa un 1.97 % por ciento del total del Estado (Figura 7.2).

Su relieve lo constituyen la Sierra Madre del Sur y planicies costañeras; además, los cerros Situntitlán, La Olla, de Santa Bárbara y Verde.

Su clima es tropical con lluvias en verano. Tiene una precipitación pluvial anual de 1,276.8 milímetros y una temperatura media anual de 27.8°C.



*Figura 7.2. Localización de Lázaro Cárdenas, tomada de Google Earth.*



### 7.1.1.- Carbón mineral.

El carbón mineral es un material vegetal de origen fósil que se desarrolla durante el periodo carbonífero y queda sepultado bajo agua y yacimientos térreos que lo protegen de la putrefacción. Se produce una descomposición lenta, resultado de la cual es la formación de turba, primera etapa de la metamorfosis del tejido vegetal en carbón. Durante este primer periodo se forman y desprenden dióxido de carbono, metano y agua. Durante las fases sucesivas de la metamorfosis, el contenido de carbón aumenta (Amoroch Cortés & Oliveros Villamizar, 2000, pág. 73).

En la figura 7.3 se muestra una clasificación del carbón mineral (Instituto Mundial del Carbón, 2005, pág. 4).

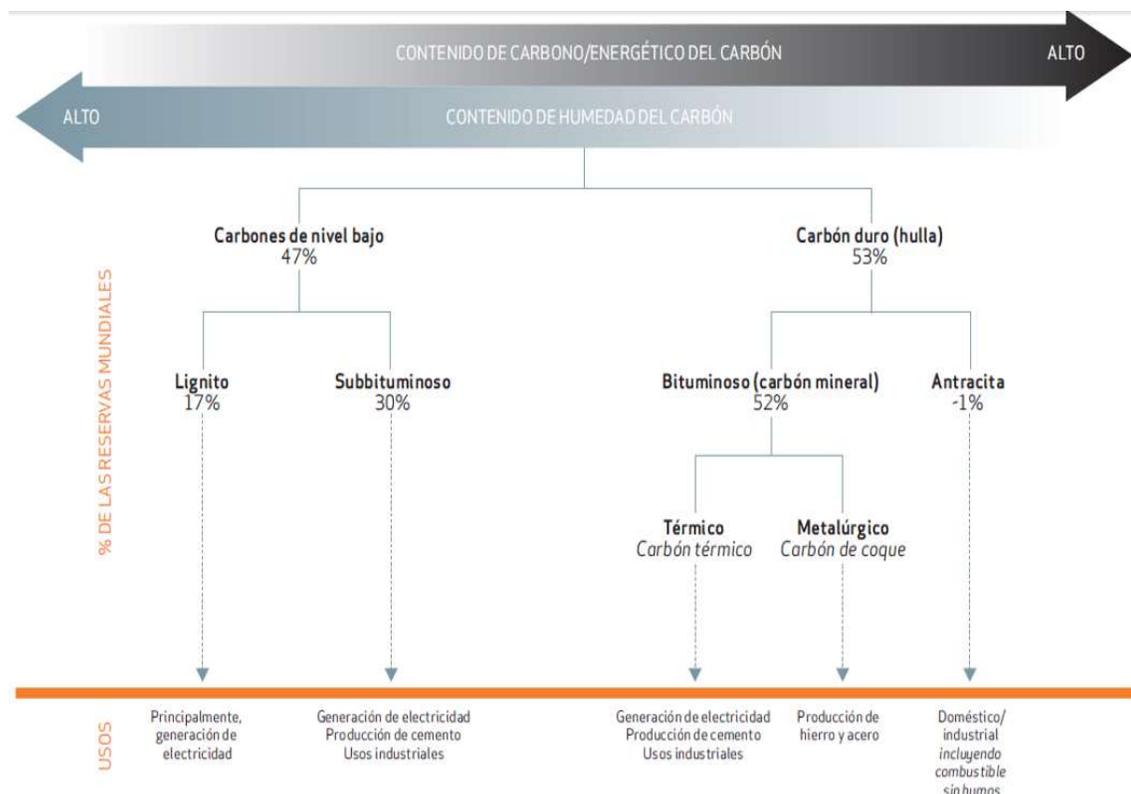


Figura 7.3. Clasificación del carbón mineral y sus usos (Instituto Mundial del Carbón, 2005)

El carbón se utiliza como fuente de energía para la producción del cemento. Se necesitan grandes cantidades de energía para producir cemento. Los hornos suelen quemar carbón en forma de polvo y consumen unos 450g de carbón por cada 900g de cemento producido.



Los productos de combustión del carbón (CCP) también juegan un papel importante en la producción del cemento. Los CCP son los subproductos generados al quemar carbón en las centrales eléctricas de combustión de carbón. Estos subproductos incluyen cenizas en suspensión, cenizas de suelo, escoria de caldera y yeso de desulfurización de gases. Las cenizas en suspensión, por ejemplo, pueden utilizarse para sustituir o complementar al cemento en el hormigón. El reciclaje de los productos derivados de la combustión del carbón resultan beneficiosos para el medio ambiente, ya que sirven para sustituir materias primas primarias (Instituto Mundial del Carbón, 2005, pág. 25).

Para este caso, el carbón mineral que se utiliza en esta experimentación no es en sí la ceniza resultado de una combustión sino que es un mineral el cual es el desecho del carbón mineral, llamado coque, seleccionado para la creación del acero. Este carbón mineral viene en forma granular (Figura 7.4.a), que posteriormente se muele hasta quedar una forma fina (7.4 b), que pase la malla N°200, en que se pueda sustituir por el cemento.



*Figura 7.4. a) Carbón mineral en forma granular; b) molienda del carbón mineral.*

#### **7.1.2.- Escoria de alto horno.**

Son un producto formado por la neutralización de óxidos ácidos y básicos que flota en el baño de la fundición del metal y se separa del mismo para su posterior enfriamiento. Los compuestos en la escoria son: principalmente Óxidos, silicatos, hierro, caliza, magnesio y manganeso. Además de remanentes de otros elementos químicos que son agregados al horno durante el proceso de fusión y refinación del acero.



Los componentes además del hierro en el arrabio de un alto horno empiezan a formar la escoria junto con el contenido de ceniza en la caliza y subproducto de coque, estos son separados del arrabio y recuperados.

La composición química de la escoria de alto horno, expresada en óxidos, tiene como principales constituyentes los óxidos de silicio, aluminio, calcio y magnesio que comprenden el 95% del total(ArcelorMittal).

Los componentes primarios de la escoria son la cal (CaO) y sílice (SiO<sub>2</sub>). Estos componentes también están contenidos en la corteza de la tierra en general o en rocas ordinarias y minerales. El CaO, el componente primario de la escoria, es soluble en el agua y expone una alcalinidad así como el cemento u hormigón. Y cuando es removido a temperaturas altas de 1,200°C o mayor, no contiene ninguna materia orgánica.(ArcelorMittal)

La escoria tradicionalmente ha sido utilizada en componentes del cemento y agregados en la construcción, normados en México por la NMX-C-414-ONNCE-2004 que nos indica los cementos que contienen escorias de alto horno. Otros usos innovadores de la escoria de acería son introducidos: grandes bloques de escoria carbonatados, llamados Bloques Marítimos, producidos inyectando dióxido de carbono en escoria compacta, y fertilizante de silicato de potasio producido añadiendo una fuente de potasio a escoria de acería.

La composición química, física y mineralógica de las escorias depende también del proceso el cual son producidas y del procesamiento que requiera según el uso o disposición final.

Las escorias de alto horno; y más concretamente las granuladas o peletizadas, tienen capacidad hidráulica latente o potencial; es decir, que finamente molidas y amasadas con agua son capaces de fraguar y endurecer. Esta capacidad hidráulica potencial de las escorias está muy atenuada y se manifiesta con lentitud, precisando de ciertos activadores para acelerar sus reacciones de hidratación(F. Puertas, 1993).

La escoria de acería para ser reciclada en el cemento presenta algunos materiales que ocasionan problemas de durabilidad debido a su contenido de óxido de calcio (libre) reactivo (f-CaO) u óxido de magnesio (MgO). Cuando f-CaO entra en contacto con el agua esta comienza a hidratar y una cantidad grande del calor es liberada. El calor puede



hacer que la pasta de cemento se agriete y reduzca así la fuerza del hormigón. El MgO se disminuye la durabilidad a largo plazo del hormigón, ya que la formación de brucite causa una extensión, y grietas subsecuentes en la pasta de cemento. Otros materiales han mostrado una reactividad baja con el cemento, causando que la fuerza y la durabilidad disminuyan.(ArcelorMittal).

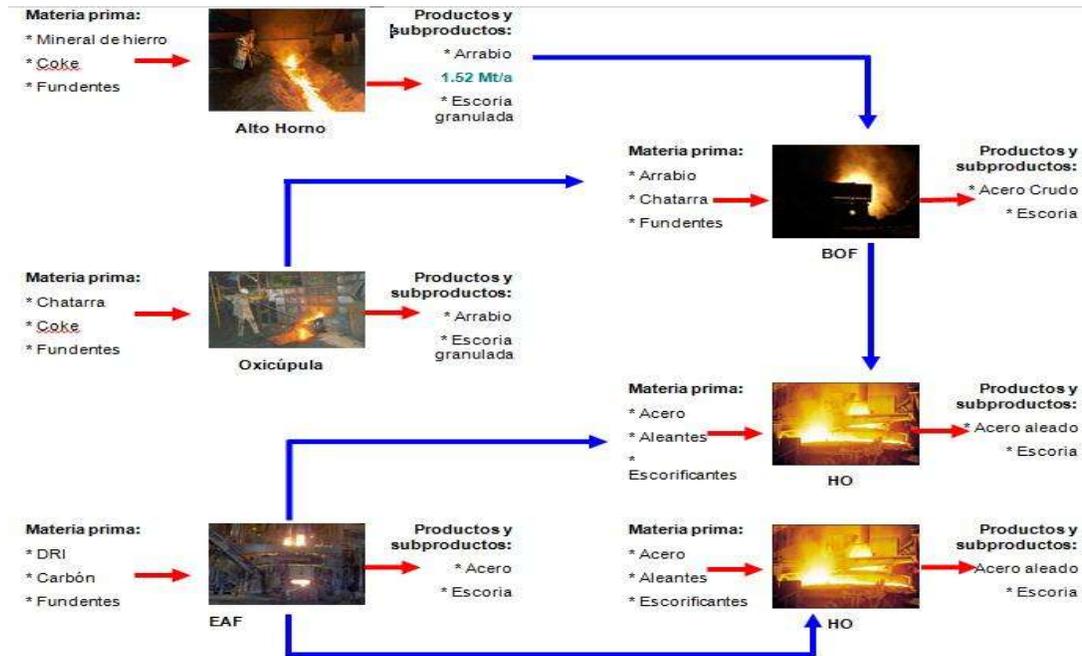


Figura 7.5. Producción del acero(ArcelorMittal).

Como ya se mencionó anteriormente la EAH que se utiliza en la experimentación es la ceniza resultante de la producción del acero (figura 7.5) de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán. La cual tiene una forma granular como se muestra en la figura 7.6.



Figura 7.6. a) EAH granular sin moler; b) Molienda de la EAH.



Esta ceniza granular posteriormente fue molida hasta una finura que pasa la malla N°200.

De acuerdo a la técnica de caracterización por medio de fluorescencia de rayos x (FRX) la escoria de alto horno tiene los siguientes componentes en porcentaje.

%	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PXC	SO <sub>3</sub>	total
EAH	36.383	0.556	10.631	0.335	0.417	10.107	37.551	0.298	0.424	0.053	-0.72	1.93	96.035

Tabla 7.1. Componentes en % de la EAH.

En los componentes de la escoria de alto horno se puede observar que tiene un alto contenido de sílice y alúmina, por lo que la tendrá una buena reacción de hidratación para formar el mortero.

## 7.2.- Cemento.

El cemento que se utiliza para la realización del mortero, es el Cemento Portland Compuesto de alta resistencia inicial y resistente a los sulfatos, Tolteca, (CPC 30R RS), figura 7.7, de acuerdo a la clasificación de la NMX-C-414-ONNCE-2004. Con este mortero se elaboran los diferentes especímenes que se someten a las pruebas no destructivas y pruebas destructivas.

El Cemento CPC 30R RS, que se utiliza, hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para cuando el concreto sea atacado por los sulfatos, y evitar que la sustancia que se forma cuando está endurecido, produzca su destrucción (Instituto del concreto, 1997).



Figura 7.7. Cemento Tolteca CPC 30R RS, utilizada en la elaboración de mortero.



A este cemento se le realiza una prueba de fluorescencia de rayos x para conocer sus peculiaridades que lo componen, dándonos una idea del comportamiento que se pueda tener al momento de la reacción de hidratación. En la tabla 7.2 se muestran los porcentajes de compuestos que forman a este cemento.

%	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PXC	SO <sub>3</sub>	total
EAH	27.932	0.201	6.437	2.217	0.083	1.301	49.773	0.669	1.255	0.118	5.12	3.37	95.106

Tabla 7.2. Componentes en % del cemento Tolteca CPC 30R RS.

### 7.3.- Material inerte.

La calidad del agregado es de suma importancia, ya que le corresponde aproximadamente tres cuartas partes del volumen total. El agregado no solo puede limitar la resistencia, sino que sus propiedades pueden afectar enormemente su durabilidad y desempeño.

Los agregados naturales se forman por procesos climáticos y abrasivos, o por molido artificial de una gran masa del material de origen. Muchas características del agregado dependerán de las propiedades de la roca original, como es la composición química y mineral, la clasificación petrográfica, la gravedad específica, la dureza, la resistencia, la estabilidad química y física, la estructura del poro, el color, etc. A demás el agregado tiene otras propiedades diferentes de la de la roca original: formas y tamaño de la partícula, textura de superficie y absorción; las cuales pueden influir considerablemente en la calidad de la mezcla fresca o fraguado.

Tanto la forma de la partícula como la textura de la superficie del agregado influyen considerablemente en la resistencia. Una textura más áspera dará por resultado una mayor adhesión o adherencia entre las partículas y la matriz del cemento. Igualmente, la mayor área de superficie de un agregado más angular propiciara una mayor adherencia. Generalmente las características de textura que no permitan la penetración de la pasta en la superficie de las partículas no favorecen una buena adherencia; por lo contrario, las partículas más suaves, porosas y mineralógicamente heterogeneas contribuirán a una mejor adherencia.(Neville & Brooks, 1988, pág. 38)

Para nuestro caso, la arena que se utiliza para realizar el mortero para los especímenes de prueba, es arena de rio, proveniente del Rio Lerma entre los estados de Michoacán y Guerrero, figura 7.8. Esta arena fue secada y posteriormente cribada, para



utilizar la arena que pasa la malla N°16 y la que se retiene en la malla N°30. La arena pose características similares a las que se especifica en la norma ASTM C 91, 1995, arena de Ottawa, que nos indica que debe de tener alto contenido de sílice.



*Figura 7.8. Arena de río Lerma sin cribar y arena cribada.*

### 7.3.1.- Caracterización de la arena.

Es importante mencionar que las pruebas que se presentan a continuación se efectuaron a la arena para tener un poco más de información acerca de ella, ya que para este caso las mezclas no conllevan un proporcionamiento de mezcla.

#### 7.3.1.1.- Humedad actual.

Esta prueba nos permite determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va a utilizar para elaborar una mezcla, para así poder realizar la corrección correspondiente por humedad (figura 7.9).



*Figura 7.9. Secado de arena de río para la obtención de Humedad actual.*



La humedad actual se determina según la norma NMX-C-166-ONNCCE-2006. En la cual se utiliza la siguiente formula:

$$\% \text{ humedad actual} = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Dónde:

Ph = peso de la muestra en gramos.

Ps = peso seco del material en gramos.

Ph-Ps = peso del agua que contenía el material.

#### **7.3.1.2.- Humedad de absorción.**

Esta prueba nos permite determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje (figura 7.10). Entendiendo como absorción el incremento en la masa de un agregado seco cuando es sumergido en agua durante 24 h, a temperatura ambiente. Este aumento de masa tiene lugar debido al agua que se introduce en los poros del material y no incluye el agua adherida a la superficie de las partículas. Se expresa como por ciento de la masa seca, y es el índice de la porosidad del material.



*Figura 7.10. Determinación de la Humedad Actual.*

La humedad de absorción se determina de acuerdo a la norma NMX-C-165-ONNCCE-2004. Para la obtención de la absorción se emplea la siguiente formula:



$$\% \text{ de humedad de absorcion} = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Dónde:

Ph = peso saturado y superficialmente seco en gramos.

Ps = peso seco del material en gramos.

### 7.3.1.3.- *Peso volumétrico seco y suelto de una arena (PVSS).*

En esta prueba se determina el peso por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural (figura 7.11).



Figura 7.11. Determinación del PVSS.

Esta prueba se lleva a cabo como se indica en la norma NMX-C-073-ONNCC-2004, donde se indica la siguiente formula:

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

Dónde:

P.V.S.S.= peso volumétrico seco y suelto en gramos.

P= peso de la arena en gramos.

V= volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>



#### 7.3.1.4.- *Peso volumétrico seco y varillado (PVSV).*

Tiene por objetivo obtener el peso por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación. Figura 7.12.



Figura 7.12. Determinación del PVSV.

Esta prueba se lleva a cabo como se indica en la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004, en la cual se presenta la fórmula siguiente para las operaciones:

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

Dónde:

P.V.S.V. = Peso volumétrico seco y varillado en gramos.

P = peso del material en gramos.

V = volumen del recipiente en cm<sup>3</sup>

#### 7.3.1.5.- *Colorimetría.*

Con esta prueba se determinará el contenido de material orgánico en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal. Figura 7.13.



Figura 7.13. Determinación de la colorimetría. Propias del autor.

Esta prueba se realiza debido a que la presencia de materia orgánica e impurezas en una arena puede modificar las reacciones químicas del cemento con el agua, alterando el correcto fraguado y endurecimiento.

#### 7.3.1.6.- Sedimentación.

Esta prueba determina si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para definir si se acepta o no. Figura 7.14.



Figura 7.14. Determinación de sedimentos en la arena.



### 7.3.1.7.- Prueba de terrones de arcilla en arena.

Conoceremos la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan la mezcla, cuando se encuentra en forma abundante formando parte de la arena. Figura 7.15.



Figura 7.15. Prueba de terrones de arcilla en arena.

Para el resulta de esta prueba se usa la siguiente formula:

$$\% \text{ de terrones} = \frac{P_i - P_f}{P_i}$$

Dónde:

$P_i$ = 100 gramos.

$P_f$ = peso seco sin terrones.



#### 7.3.1.8.- *Equivalente de arena.*

En esta prueba determinamos las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos.

Es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como sub base, carpeta asfáltica y arena para concreto. Figura 7.16.



Figura 7.16. Obtención de la equivalencia de arena.

El cálculo se lleva a cabo con la siguiente formula:

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

#### 7.4.- *Agua.*

El agua que se utilizó para la elaboración de las mezclas de concreto, fue agua de la red de agua potable (figura 7.17) de la universidad proveniente de pozos de agua profunda. Esta agua no contiene sustancias en suspensión o disueltas que alteren el fraguado del cemento. Siendo esta una agua incolora, inodora, insípida, fresca y no contiene material orgánico.

Los mayores problemas del concreto provenientes del agua están relacionados con la cantidad y no con la calidad. Cuando se sospecha de la calidad del agua lo mejor es hacer ensayos comparativos de cementación, resistencia mecánica y estabilidad del volumen.



Figura 7.17. Agua utilizada en la elaboración de la mezcla

### 7.5.- Elaboración de la mezcla.

Una vez elegido el tipo de cemento y analizado la arena que se previó para el desarrollo de la investigación, se continuo con la elaboración del mortero. Dicha mezcla está conformada por los elementos para realizar un mortero estándar, es decir, cemento + arena + agua y será denominada durante este trabajo como “testigo”. Como se está trabajando con un cemento del tipo CPC la norma *ASTM C 109/C 109M 07* indica que la proporción en peso de los materiales secos para elaborar el mortero estándar debe consistir de una parte de cemento y 2.75 de arena graduada y la cantidad de agua de mezclado debe ser la que produzca una fluidez de  $110\% \pm 5\%$  determinada como se especifica en la norma. La misma norma establece las cantidades para elaborar cierto número de especímenes, Tabla 7.3:

Materiales	Caso 1	Caso 2
Numero de especímenes.	6	9
Cemento	500g	740g
Arena graduada	1375g	2035
Agua para cemento CPO	242ml	359m
Agua para cemento CPP, COC, CPEG, CPS CEG.	La necesaria para dar una fluidez de $110\% \pm 5\%$	La necesaria para dar una fluidez de $110\% \pm 5\%$

Tabla 7.3. Cantidades para la elaboración de especímenes.

Para determinar la cantidad de agua necesaria se efectuó la prueba de fluidez la cual consiste en llenar el molde troncocónico con la mezcla de mortero, sobre el plato circular, es decir sobre la mesa de fluidez, tal como se muestra Figura 7.18 a, el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde



aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie, tal como se muestra en la Figura 7.18 b, se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a esta capa otros 25 golpes con el pisón, se enraza el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde.



*Figura 7.18. a) Mesa de fluidez; b) Apisonamiento de la mezcla.*

Mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación debe hacerse un total de 15 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos. Una vez realizado lo anterior se proceda a medir con el uso de un vernier la fluidez de la mezcla, esto se haciendo la sumatoria de cuatro medidas del diámetro de la mezcla desparramada sobre la mesa, dicha mediciones deben pasar por el centro del plato o bien siguiendo las guías si es que están marcadas en la superficie de la mesa de fluidez Figura 7.19.



*Figura 7.19. Medición de la fluidez.*

Es importante mencionar que para obtener una mezcla más rápida y homogénea se usa un taladro eléctrico marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, al cual se le incorpora unas aspas mezcladoras. Dado que se hace uso de este equipo para realizar las mezclas, se incorpora a la idea usar cubetas con capacidad de 19 lts como recipientes para realizar el mezclado, de esta forma se evita que el material se disperse por acción de las revoluciones de las aspas, Figura 7.20a. Este método de realizar la mezcla es de gran utilidad ya que resulta sencillo, práctico y sobretodo funcional, Figura 7.20b.



*Figura 7.20. a) Taladro eléctrico con aspa; b) Elaboración de la Mezcla.*



Con todo lo anterior se logra realizar el testigo, Tabla 7.4, el cual además de ser el parámetro por el cual serán comparadas todas las mezclas con las sustituciones planteadas, marcará la pauta de la relación A/C que se respetará en las mezclas subsecuentes. En el caso que los morteros con sustituciones de Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) y Ceniza de Carbón Vegetal (CCV) no cumplan con la fluidez marcada en la norma, se le añadirá un aditivo fluidificante cuya función como bien dice su nombre es proporcionar a la mezcla una mayor trabajabilidad la cual se ve reflejada con la fluidez.

Cemento	1481 gm
Arena	4095 gr
Agua	1495 ml
Relación A/C	1.01
fluidez	108%

Tabla 7.4. Proporciones del testigo.

### 7.6.- Elaboración de cubos.

Para la elaboración de los cubos de mortero, se utilizaron moldes de acero inoxidable como lo indica la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010. La cual nos indica que los moldes deben consistir de dos piezas, con paredes de suficiente rigidez para evitar las deformaciones y provista de dispositivos que sujeten firmemente las dos partes entre sí para evitar fugas. Además tienen cavidades cubicas de 50mm; y no tener más de tres de ellas por molde. Los ángulos de las caras deben de ser de 90°. Tal como se muestra en la figura 7.21.



Figura 7.21. Moldes para cubos.





mortero. La espera fue necesaria ya que si se hace un llenado con una mezcla muy fluida se corre el riesgo de que el mortero sufra un sangrado y por lo tanto se pierda lechada. A continuación se muestra una tabla que indica el tiempo transcurrido para alcanzar una fluidez de  $110\text{cm} \pm 5\text{cm}$  después del mezclado inicial. Tabla 7.5.

SUSTITUCION	Tiempo transcurrido para una fluidez de $110 \pm 5\text{cm}$ (min)	
	CM	EAH
0%	15	15
5	45	25
10	90	30
15	45	45
20	60	45
30	70	60

Tabla 7.5. Tiempos transcurridos para una fluidez de  $110 \pm 5\text{cm}$ .

Fabricados el número de cubos necesarios para las pruebas de las distintas edades y con las sustituciones de los porcentajes de 5, 10, 15, 20 y 30 por ciento, se prosigue a la rotulación de los especímenes con información de fecha de elaboración, porcentaje de sustituto en la mezcla, y el tipo de sustituto del cemento.

El curado de los especímenes se lleva a cabo de acuerdo a la norma NMX-C-061-ONNCCE-2010, en el que nos indica que el curado se debe de hacer sumergiendo las muestras en el agua, en un recipiente no corrosivo. Para nuestro caso se utilizaron cubetas de 19 litros, en las cuales se sumergen los especímenes de prueba. Figura 7.23.



Figura 7.23. Curado de los especímenes.



### 7.7.- Elaboración de prismas.

Para la elaboración de los prismas de mortero, se utilizaron moldes de acero de un material similar a las descritas en la elaboración de cubos. Estos moldes tienen dimensiones de 40mm de ancho, 40mm de espesor, y 160mm de largo, con 10 cavidades por molde, como se muestra en la figura 7.24.



*Figura 7.24. Moldes de prismas con 10 cavidades.*

Los moldes fueron aceitados con aceite, utilizado como desmoldante, para que pasadas las 24 horas después del colado de los prismas sea más sencillo descimbrar los prismas.

Después de que se han aceitado, se prosigue al llenado de los moldes con las mezclas correspondientes a cada sustitución, el llenado se hace de la siguiente manera (Figura 7.25): se llena una primera capa, a una altura de la mitad de la altura del molde, en la cual se compacta, con un pisón, 12 veces en una dirección tratando de cubrir toda la superficie; enseguida se llena en su totalidad la segunda capa y posteriormente se vuelve a compactar 12 veces más, pero en una dirección perpendicular a la compactación anterior. Terminada esta acción se enraza con una espátula plana, de tal forma que la superficie quede nivelada. Figura 7.26.



*Figura 7.25. Llenado de los moldes prismáticos.*



*Figura 7.26. Llenado final de los prismas.*

Unas ves pasadas 24 horas después del llenado de los moldes, se descimbraron y se etiquetaron con fecha de elaboración, porcentaje y material de sustitución; enseguida se pasaron a curar los especímenes en cubetas de 19 litros de plástico para evitar alguna reacción con el recipiente.

### **7.8.- Elaboración de briquetas.**

La elaboración de las briquetas me mortero para cada una de los sustitutos correspondientes, se hicieron en moldes de bronce (Figura 7.27), con tres cavidades por molde, este molde está compuesto por dos partes las cuales se unen entre sí.



Figura 6.27. Molde de bronce para briquetas.

Como no hay una norma que nos indique la forma de llenado, se llena de la forma que recomienda el manual de Análisis de Materiales Tercera Edición de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Este manual nos dice que el llenado se lleva a cabo compactando la mezcla con el dedo índice y luego enrazando con ayuda de una espátula. Los especímenes se dejan sobre una base de cristal, previamente engrasado para evitar la adherencia sobre este.



Figura 7.28. Creación de las briquetas de mortero.

El curado se lleva a cabo sobre recipientes de plástico para evitar que reaccione con el recipiente contenedor, esto una vez etiquetados como los demás especímenes y pasadas 24 horas después del colado.



## 7.9 Elaboración de las losas para adherencia.

### 7.9.1.- Losa de concreto.

Como a la losa de concreto no se le practica en si alguna prueba en particular, la elaboración de la losa de concreto se hizo conforme a las recomendaciones del fabricante para una resistencia de  $f'c=200\text{kg/cm}^2$  y un agregado máximo de  $\frac{3}{4}$ , por lo que se utilizaron las siguientes cantidades: 1 bulto de cemento, 6.5 botes de grava, 4 botes de arena. La mezcla se llevó a cabo en una revolvedora automática con motor eléctrico (figura 7.29).



Figura 7. 29. Revolvedora automática con motor eléctrico.

La cimbra para las losas se hizo con madera de pino de tercera calidad, el molde se forma de tal manera que quedarán oquedades de  $1\text{m}^2$  y 10 cm de altura, estos moldes se pusieron sobre un piso nivelado y cubierto con un plástico para evitar la adherencia del concreto con el piso.

Teniendo listo los moldes, se coloca dentro de los moldes malla electrosoldada, para reforzar las losas, teniendo cuidado que la malla estuviera separado del fondo del molde a una altura de 2.5cm para que tuviera un recubrimiento adecuado. Posteriormente y con la mezcla de concreto ya hecha, se llenaron los moldes hasta una altura de 7 cm, varillándolo y luego nivelándolo. Pasados 28 días y después de averlos curado durante ese tiempo se distribuyó el espacio, marcándolo, con 6 espacios de  $50\text{cm} * 33\text{cm}$  aproximadamente en el que se recubre cada espacio con la mezcla correspondiente a cada sustitución.



### 7.9.2.-Revestimiento de las losas

Para la elaboración de la prueba de adherencia se elaboraron mezclas de mortero tanto de la mezcla testigo como de las mezclas con sustituciones de carbón mineral y escoria de alto horno, con los porcentajes correspondientes. Estas mezclas se elaboraron como se indica en el capítulo 7.5.

Las losas de concreto fueron divididas en 6 partes, de 50 cm por 33 cm, para que una vez hecha la mezcla con cada porcentaje y para cada material, se recubrieran con la mezcla de cada porcentaje de 5, 10, 15, 20 y 30%, así como el revestimiento testigo. Figura 7.30.



Figura 7.30. Preparación de las losas para la prueba de adherencia.

## 7.10.- Pruebas no destructivas.

### 7.10.1.-Gravedad específica o peso específico.

La prueba de gravedad específica se le realiza a los especímenes cúbicos, esta prueba se lleva a cabo como se indica en el manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, tercera edición.

El procedimiento es el que se describe a continuación:

- Se secan las muestras superficialmente con una franela y se determina su masa superficial seca ( $M_{ss}$ =Masa seca).
- Se adapta una canastilla a la balanza y se sumerge en agua para determinar su masa.
- Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla (figura 7.31).
- Se determina la masa sumergida del espécimen ( $M_a$ =Masa sumergida).
- Se secan las muestras en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.



- Se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa seca con ayuda de una balanza ( $M_s$ =Masa seca).

Los cálculos para la obtención de la gravedad específica se hace con la siguiente formula:

$$G.E. = \frac{M_s}{M_{ss} - M_a}$$



*Figura 7.31. Determinación de la gravedad específica.*

#### **7.10.2.- Densidad.**

La prueba de densidad se le aplica a los especímenes cúbicos de cada material por cada porcentaje, el procedimiento que se sigue es el que se indica en el manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, Tercera edición. El procedimiento es como se describe:

- Los especímenes se sacan de los recipientes de curado y se enumeran, posteriormente se secan superficialmente con una franela y registrando su masa como masa de la muestra ( $M$ ).
- Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada esperando a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen ( $V$ ) del espécimen.



Los cálculos para obtener la densidad de los especímenes cúbicos se hace con la siguiente formula:

$$D = \frac{M}{V}$$

Dónde:

D=densidad en g/cm<sup>2</sup>

M=masa del espécimen en g.

V=volumen del espécimen en cm<sup>3</sup>.



*Figura 7.32. Determinación de la densidad de especímenes cúbicos.*

### 7.10.3.- Velocidad de pulso ultrasónico.

La prueba de velocidad de pulso ultrasónico se realizó a los especímenes cúbicos y prismas. Para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico se empleó un equipo dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, en este instrumento se le introducen de forma automática los resultados del esclerómetro, el modelo del equipo es 58-E0049/B, marca CONTROLS, medidor de pulso ultrasónico Figura 7.33. Este equipo usa una escala de frecuencia de 24 a 150kHz, impedancia de entrada del receptor de 1M, salida RS 232, cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; tiene una medición de tiempo de propagación de 0.1 a 1999.9µs; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; teniendo una precisión de 1µs; salida del transmisor hasta 1500V. El equipo funciona con baterías recargables internas además incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.



Figura 7.33. Equipo para medir la velocidad de pulso.

Antes de la realización de la prueba de medición de la velocidad de pulso ultrasónico, fueron etiquetados en un orden ascendente (figura 7.34) y posteriormente se le sacaron las dimensiones como ancho largo y espesor, el dato del espesor se introducía en el equipo para que pudiese hacer los cálculos.



Figura 7.34. Especímenes cúbicos y primas etiquetados y medidos.

Al equipo de velocidad de pulso, para la realización de la prueba, se le conectan dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores, al momento de hacer la prueba, tienen que tener un buen contacto con la superficie de los especímenes sin que haya espacios vacíos entre el transductor y la superficie del espécimen, para tal fin se empleó como acoplador un gel a base de alcohol (gel antibacterial).

A los especímenes se les hicieron pruebas directas de medición de velocidad de pulso (Figura 7.35), estas muestras también se probaron en un estado saturado de agua, para que los vacíos estuvieran en su totalidad ocupados por el gel producto de la reacción puzolánica o por agua, y así evitar las variaciones de las lecturas.



Esta prueba se realizó a los especímenes para cada material y para cada porcentaje correspondiente, así como para las edades de 14, 28 y 45 días.



Figura 7.35. Especimen prismático en prueba de velocidad de pulso.

#### 7.10.4.- Resistividad eléctrica.

Después de la prueba de velocidad de pulso, se pasaba a realizar la prueba de resistividad eléctrica, esta prueba se le realizó a los especímenes cúbicos y prismáticos. Teniendo a los especímenes en un estado saturado de agua ya que tienden a ver variaciones si está en una forma seca o semiseca, ya que los geles y el agua que hay entre la matriz del espécimen hacen el papel del transductor.

El equipo utilizado para la realización de esta prueba fue un Resistómetro, que mide la resistividad eléctrica en suelos y en material poroso, de marca Nilsson (Figura 7.36)



Figura 7.36. Resistómetro marca Nilsson.



Para realizar la prueba se sigue el siguiente procedimiento:

- Se monta el equipo con los distintos cables y accesorios conectándolos al tablero principal y esta a su vez a una pila recargable, como se muestra en la figura 7.36.
- Se coloca el espécimen entre las placas de cobre, cubiertas de una tela de algodón mojada, la cual está conectada al tablero principal, el espécimen se coloca de la forma en que se va a probar a compresión simple (Figura 7.37).
- Una vez puesta el espécimen adecuadamente, se le hace pasar una corriente dada, (I) y voltaje (E).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como  $E/I$  y se expresa como Ohmios la cual hace el equipo automáticamente. De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

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

Dónde:

$\rho$  = Resistividad eléctrica en  $K\Omega\text{-cm}$  (ohm-m).

$R_e$  = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona.

$A$  = Área transversal del espécimen en  $\text{cm}^2$ .

$L$  = Longitud del espécimen en cm.



*Figura 7.37. Especimen prismático colocado entre las dos placas de cobre lista para tomar la resistencia eléctrica.*



Esta prueba se realizó a los especímenes para cada material y para cada porcentaje correspondiente, así como para las edades de 14, 28 y 45 días.

### 7.11.- Pruebas destructivas.

Las pruebas destructivas, como su nombre lo indica destruyen al espécimen en su totalidad, por consiguiente estas pruebas se hacen hasta el final, después de haber determinado las características geométricas de espécimen así como las pruebas no destructivas.

Como los especímenes se tuvieron en un estado húmedo para someterlas a las pruebas no destructivas, entonces también se mantienen de la misma forma hasta el término de todas las pruebas.

#### 7.11.1.- Resistencia a la compresión simple en cubos de mortero.

La prueba de compresión simple fue aplicada a los especímenes cúbicos, de los cuales se han determinado anteriormente sus dimensiones. Esta prueba de compresión simple, se realizó con la maquina universal TiniusOlsen(Figura 7.38.a). La carga se aplica sobre las caras de los especímenes que estuvieron en contacto con las paredes verticales del molde, el espécimen se coloca en la maquina centrándolo cuidadosamente con respecto a la placa superior, Figura 7.38b,(NMX-C-061-ONNCCE-2010, 2010).Aplicando la carga a una velocidad constante en un rango de 5000kg, con aproximación a 0.5kg, manteniéndose constante esta velocidad hasta la ruptura del espécimen(ASTM-C-109M, 2001).



Figura 7.38. a) Maquina universal TiniusOlsen, b) Especimen colocado en la platina.



Se probaron 3 especímenes por cada porcentaje de sustitución de CM, EAH y de los especímenes testigos, a las edades de 14, 28 y 45 días. De estos tres especímenes se saca un promedio de la resistencia a la compresión simple.

Para la determinación de la resistencia a la compresión se usó la ecuación siguiente:

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

Dónde:

R= resistencia a la compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>.

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

A= área de muestra, en cm<sup>2</sup>.

#### 7.11.2.- Resistencia a la flexión en prismas de mortero.

La prueba de flexión se aplicó a los especímenes prismáticos de 4x4x16cm. A estos se les determinaron sus dimensiones y posteriormente se marca en una cara del espécimen, marcas donde se colocan los apoyos inferiores, que es a una pulgada de sus extremos y a la mitad de la longitud del prisma, donde se aplica la carga (figura 7.39).



Figura7.39. Prismas marcados a 1in de los extremos y a ½ de la longitud.

Esta prueba se realizó en la maquina TiniusOlsen a una velocidad constante hasta la ruptura, como se indica en la prueba de compresión simple, a diferencia de la prueba de compresión que se usa una platina, a la maquina se le colocan apoyos adecuados para esta prueba como se muestra en la figura 7.40a. La carga se le aplica al prisma en una de las caras laterales perpendiculares a la cara de llenado.



Figura 7.40. a) Colocación de los apoyos y del prisma, b) Ruptura del prisma.

La prueba se le aplico a los especímenes de cada material de cada porcentaje a las edades de 14, 28, y 45 días.

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

$$MR = \frac{3WL}{2BD^2}$$

Dónde:

MR = módulo de ruptura, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

W = Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, en kg.

L = longitud entre apoyos de la muestra, en cm.

B = ancho promedio de la muestra, en cm.

D = espesor de la muestra en promedio

Si la fractura se produce en la superficie de la tensión fuera del tercio medio de la longitud del tramo y no más de 5% de la longitud del tramo, el módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{3Wa}{BD^2}$$

Dónde:



$a$  = distancia media entre la línea de fractura y el soporte más cercano medida en la superficie de tensión de la viga, en cm.

Si la fractura se produce en la superficie de la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en más de un 5% de la longitud del tramo, se deberá desechar los resultados de la prueba.

### 7.11.3.- Resistencia a la tensión en briquetas de mortero.

La prueba a tensión se le aplicó a los especímenes en forma de briquetas o maní con la máquina de pruebas con mordazas especiales para briquetas de mortero (Figura 7.41). Para la prueba se describe el procedimiento siguiente (Navarro Sánchez, Martínez Molina, & Espinoza Mandujano, 2011, pág. 117):

1. Las muestras se sacan del recipiente de curado, en las edades de 14, 28 y 45 días, y se secan hasta obtener una superficie suficientemente seca.
2. Se toman las medidas de la sección media de la briqueleta, se lleva a la máquina que previamente será nivelada, se aplicará la carga lentamente por medio de municiones hasta la falla de la muestra, las municiones serán colocadas en la tolva de la máquina.
3. Después de la falla de la muestra se retirarán las municiones pesándolas al décimo de gramo. La masa de las municiones será considerada como la carga que soporto la sección media de la briqueleta.

Los cálculos correspondientes para determinar la resistencia a la tensión, se utilizó la siguiente ecuación:

$$R = Pm \frac{50}{Sm}$$

Dónde:

$R$  = resistencia a la tensión en  $\text{kg/cm}^2$ .

$Pm$  = peso de las municiones en kg.

$Sm$  = sección media de la briqueleta en cm.

50 = constante de la máquina.





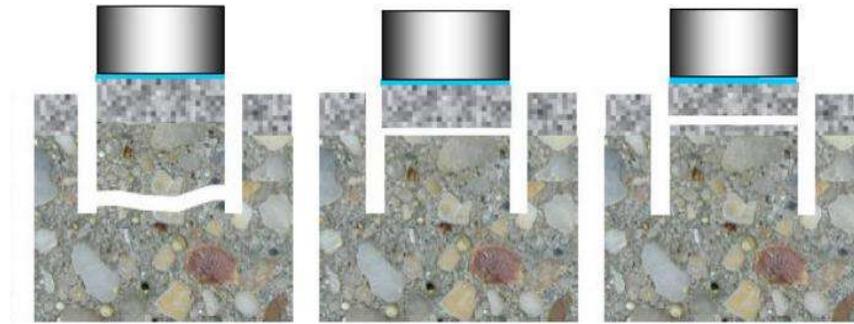
Posterior a las perforaciones, se deja limpia la superficie de la circunferencia, en esta área se pegan cilindros, de un área de  $2.835\text{cm}^2$ , de acero inoxidable (conocidos como Dollys). El pegamento con la cual se unió fue un epóxico de marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel. Los dollys se pegaron 5 días antes de las pruebas, para dejar que el epóxico secase perfectamente.

Pasados los 5 días, se realiza la prueba de adherencia con ayuda del instrumento para prueba de adherencia, Pull Off Controls con un rango de trabajo de 0.25 a 16kN y una aproximación de 1% (Figura 7.43).



*Figura 7.43. Instrumento de prueba de adherencia y aplicación de la prueba.*

En la prueba, se inserta el perno con cabeza cilíndrica en el Dolly, que esta adherido en el recubrimiento, después se coloca el instrumento de prueba en el perno con cabeza cilíndrica para posteriormente aplicar una precarga hasta sentir una ligera tensión, después se comienza a aplicar la carga lentamente y constante hasta que la muestra falla. Las formas de falla que se tomaron en cuenta son: a) Falla en la capa inferior o falla del concreto; b) Falla en la unión del mortero y el concreto o falla en la interface; c) Falla en capa superior o falla del mortero (Figura 7.44 y 7.45).



a) Falla en capa inferior   b) Falla en unión   c) Falla en capa superior

*Figura 7.44. Tipos de falla (INSTRUMENTS, 2007).*



*Figura 7.45. Facturas del EAH, a) falla del concreto; c) falla por interface; falla del mortero.*



# 8

# RESULTADOS



## 8.- Resultados.

### 8.1.- Caracterización de arena.

Como ya se mencionó anteriormente los resultados de las pruebas, que se le efectuaron a la arena, es para tener un poco más de información acerca de ella, son de carácter informativo, ya que para este caso los resultados no conllevan un proporcionamiento de la mezcla.

#### 8.1.1.- Humedad actual.

El resultado es el promedio de tres pruebas que se le hicieron a la arena. Tabla 8.1.

Ph (gm)	Ps (gr)	% de H.A.
300	297.4	0.874
300	298.4	0.536
300	297.2	0.942
	<b>Promedio</b>	<b>0.784</b>

Tabla 8.1. Promedio de Humedad Actual.

#### 8.1.2.- Humedad de absorción.

Para la obtención de un resultado aceptable se hacen tres pruebas de las cuales se saca un promedio. Tabla 8.2.

Ph (gm)	Ps (gr)	% de H.A.
300	289.4	3.66
300	291.2	3.02
300	284.5	5.44
	<b>Promedio</b>	<b>4.04</b>

Tabla 8.2. Determinación de la humedad de absorción.



### 8.1.3.- Peso volumétrico seco y suelto de una arena (PVSS).

Para la obtención de un resultado más confiable fue necesario hacer tres pruebas de las cuales se saca un promedio. Tabla 8.3.

P (gm)	V (cm <sup>3</sup> )	MVSS (gm/cm <sup>3</sup> )
3800	2759	1.01
3700	2759	0.97
3700	2759	0.97
<b>Promedio</b>		<b>0.98</b>

Tabla 8.3. Determinación de MVSS.

### 8.1.4.- Peso volumétrico seco y varillado (PVSV).

Para la obtención de un mejor resultado fue necesario hacer tres pruebas de las cuales se saca un promedio. Tabla 8.4.

P (gm)	V (cm <sup>3</sup> )	MVSV (gm/cm <sup>3</sup> )
4000	2759	1.45
3900	2759	1.41
4050	2759	1.47
<b>Promedio</b>		<b>1.44</b>

Tabla 8.4. Determinación del MVSV

### 8.1.5.- Colorimetría.

Para un mejor resultado se hicieron tres pruebas. Tabla 8.5.

N° Prueba	Colorimetria.
1	Escala 3
2	Escala 3
3	Escala 3

Tabla 8.5. Determinación de la colorimetría.

En esta prueba se obtuvo un nivel de escala para la colorimetría del número tres, por lo que nos indica que nuestra arena está dentro de los límites permisibles del



contenido de materiales orgánicos en una arena. Si se fuera a utilizar esta arena para la mezcla, no fuera necesario hacer un lavado de arena.

### 8.1.6.- Sedimentación.



Figura 8.1. Determinación de sedimentos en la arena.

Como el material fino no rebasa el límite de la marca de 444, se considera un material aceptable para el contenido de finos, por lo que se podría utilizar para la elaboración de una mezcla.

### 8.1.7.- Prueba de terrones de arcilla en arena.

Pi (gm)	Pf (gm)	%de terrones
100	90.7	9.3
100	95.5	4.5
100	91.3	8.7
	<b>Promedio</b>	<b>7.5</b>

Tabla 8.6. Porcentaje de terrones en arena.



8.1.8.- Equivalente de arena.



Figura 8.2. Determinación de equivalente de arena.

L. arena	L. arcilla	%E. arena
10.0	11.55	86.58
9.90	11.4	86.84
9.8	11.2	87.5
	<b>Promedio</b>	<b>260.92</b>

Tabla 8.7. Porcentaje de la equivalencia de arena.



### 8.2.- Masa de los cubos de mortero.

Para conocer el comportamiento de los cubos de mortero con las diferentes sustituciones a distintas edades, se les toma el peso de los cubos. Estos pesos se obtuvieron del promedio de tres especímenes, en estado húmedo saturado. El peso nos da una idea de la reacción de hidratación que se lleva dentro de los poros, estos poros se llenan primero de agua después de gel y por último de la pasta endurecida del cementante.

Porcentaje	Masa en cubos de CM (gr)		
	14 días	28 días	45 días
0%	0.23	0.25	0.25
5%	0.24	0.24	0.24
10%	0.24	0.24	0.24
15%	0.25	0.25	0.25
20%	0.24	0.24	0.24
30%	0.24	0.24	0.24

Tabla 8.8. Masas de los morteros cúbicos con sustitución de CM.

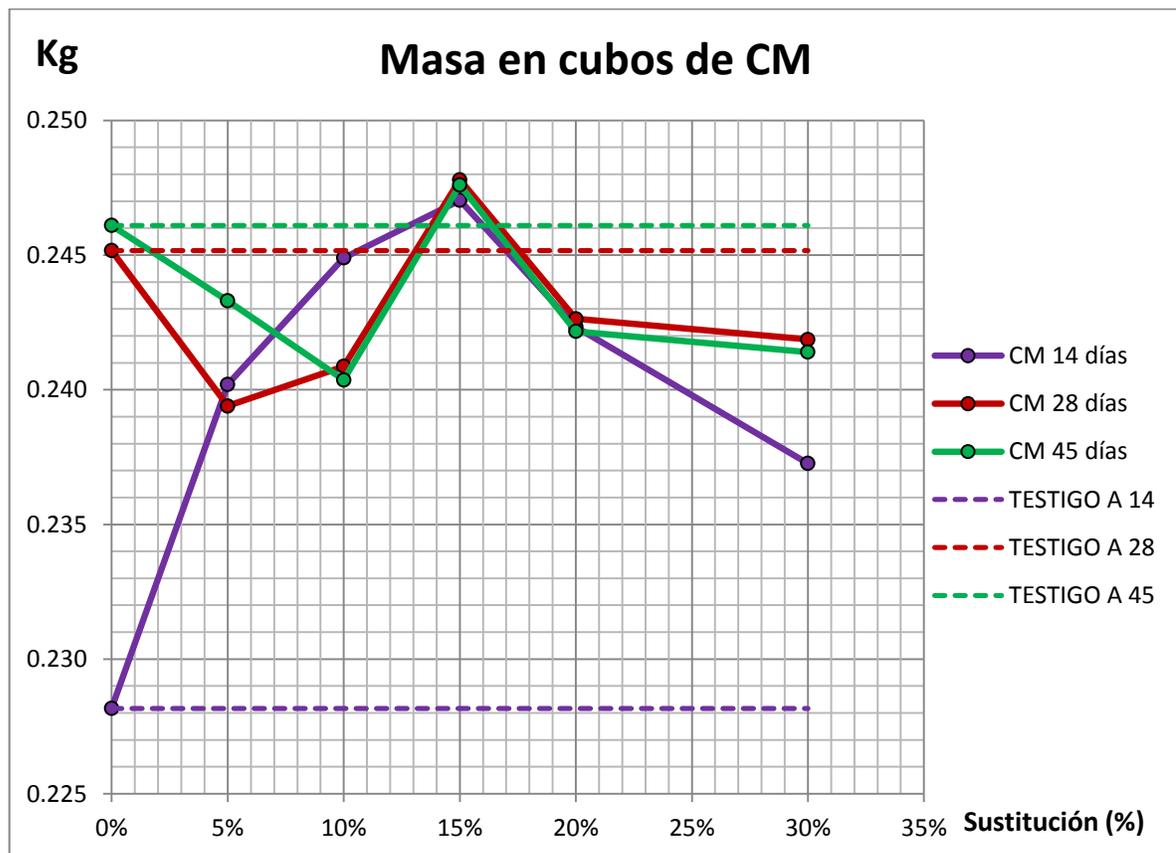


Figura 8.3. Comportamiento de cubos de mortero al peso con sustitución de CM.



El comportamiento de la sustitución del CM en los cubos, a una edad temprana es de un aumento del peso pero a la edad de 45 días el peso disminuye hasta por debajo del espécimen testigo el porcentaje que mayor disminución presenta es el del 5 y 30% (Tabla 8.8 y Figura 8.3).

Para el caso de las sustituciones de la EAH a la primera edad aumenta mucho el peso pero este peso tiende a disminuir conforme aumenta su edad hasta por debajo del espécimen testigo, los porcentajes que mayor disminución de peso que presenta es el 10%(Tabla 8.9 y Figura 8.4).

Porcentaje	Masa en cubos de EAH (gm)		
	14 días	28 días	45 días
0%	0.23	0.25	0.25
5%	0.24	0.24	0.24
10%	0.24	0.24	0.24
15%	0.25	0.25	0.25
20%	0.25	0.25	0.25
30%	0.24	0.24	0.24

Tabla 8.9. Masas de los morteros cúbicos con sustitución de EAH.

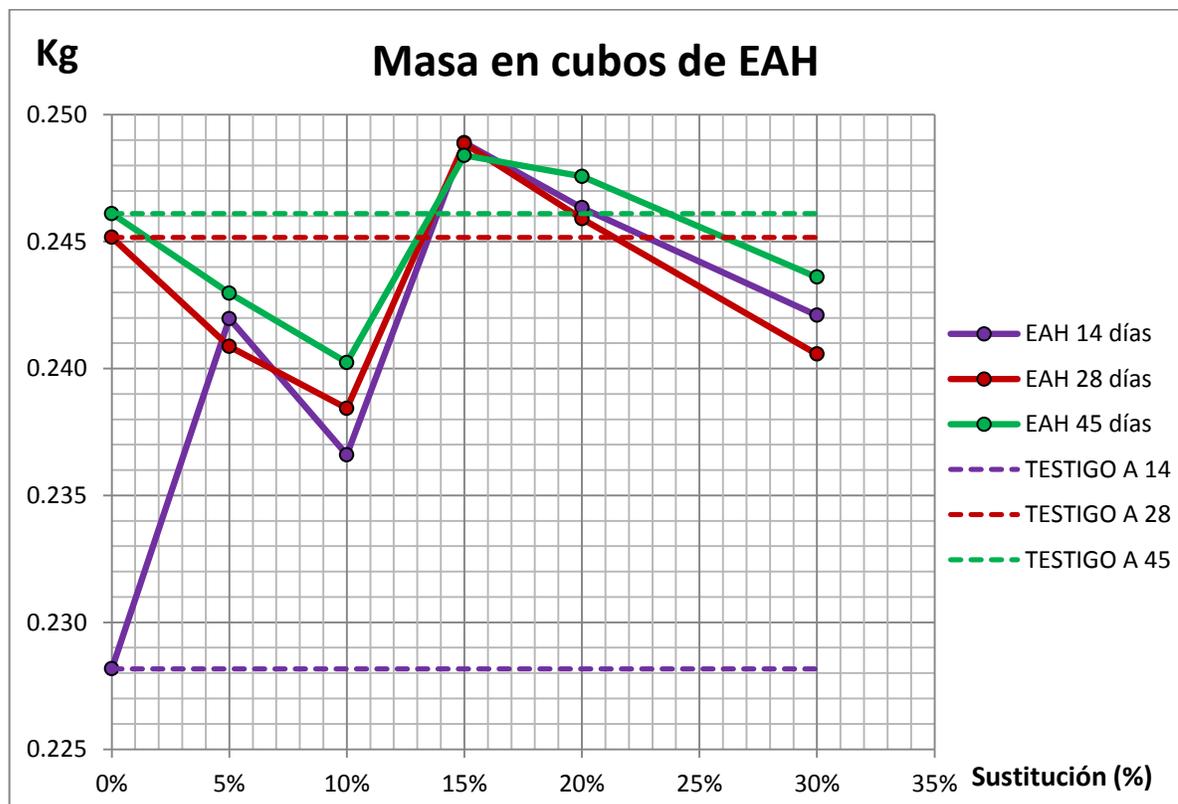


Figura 8.4. Comportamiento de cubos de mortero al peso con sustitución de EAH.



### 8.3.-Gravedad específica o peso específico.

Los resultados de la prueba de gravedad específica, a cubos de mortero con sustitución de CM, se muestra en la tabla 8.10 y en la figura 8.5. El comportamiento que muestra este material al realizarle la prueba, es que a edad temprana (14 días) la gravedad específica aumenta notablemente con respecto al testigo en todas la sustituciones, pero este aumento disminuye conforme aumenta la edad del espécimen tendiendo a disminuir a porcentajes mayores.

Porcentaje	Gravedad específica en cubos de CM		
	14 días	28 días	45 días
0%	1.452	1.655	1.619
5%	1.590	1.601	1.596
10%	1.606	1.571	1.581
15%	1.623	1.595	1.654
20%	1.481	1.557	1.590
30%	1.505	1.561	1.568

Tabla 8.10. Resultados de la Prueba de G.E. en morteros cúbicos con sustitución de CM.

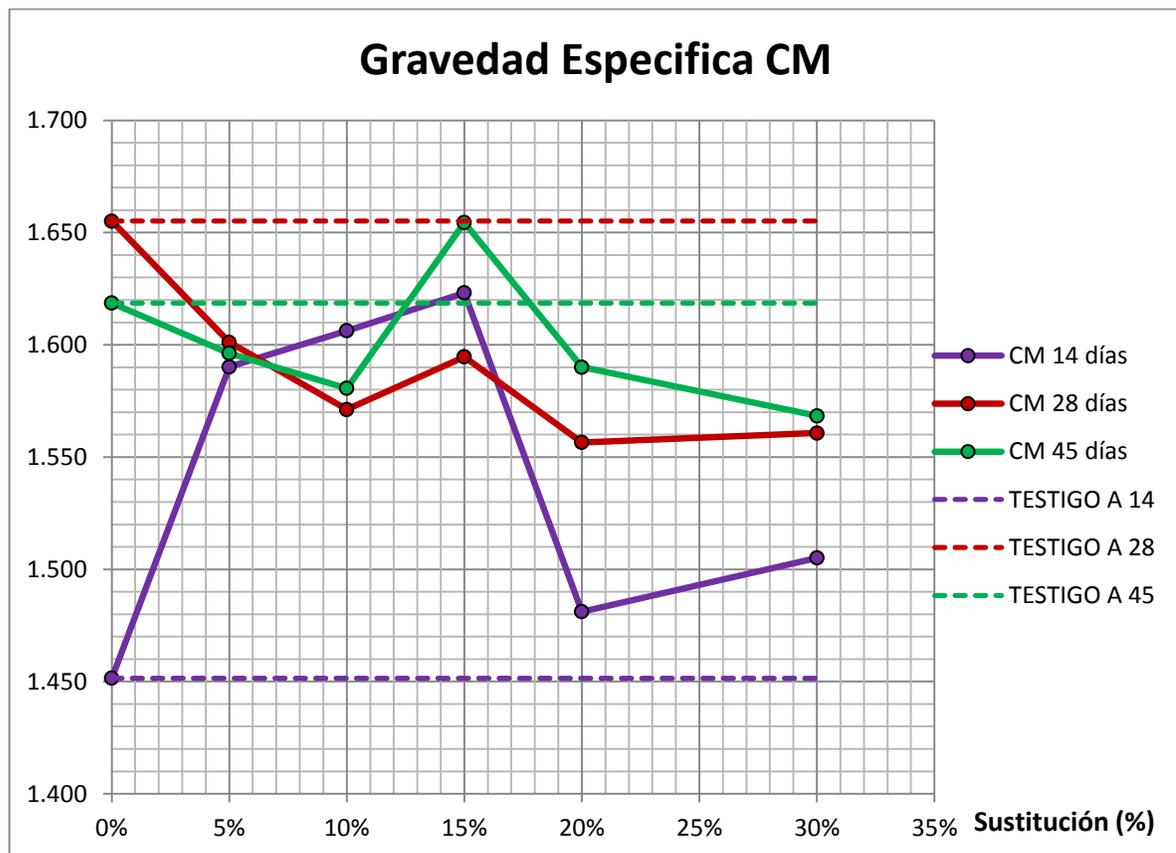


Figura 8.5. Comportamiento de cubos de mortero a la Gravedad específica con distintas sustituciones de CM.



El resultado de la prueba de la gravedad específica se muestra en la tabla 8.11 y en la Figura 8.6, el comportamiento de la sustitución de EAH en los cubos de mortero, a una edad temprana (14 días), es que aumenta notablemente la gravedad específica de los especímenes en las distintas sustituciones pero conforme aumenta la edad de estos disminuye la gravedad específica por debajo de los especímenes testigos. La sustitución en la que más se disminuye es la del 20%.

Porcentaje	Gravedad específica en cubos de EAH		
	14 días	28 días	45 días
0%	1.452	1.655	1.619
5%	1.604	1.616	1.614
10%	1.604	1.600	1.609
15%	1.537	1.649	1.666
20%	1.608	1.606	1.606
30%	1.611	1.602	1.690

Tabla 8.11. Resultados de la Prueba de G.E. en morteros cúbicos con sustitución de EAH.

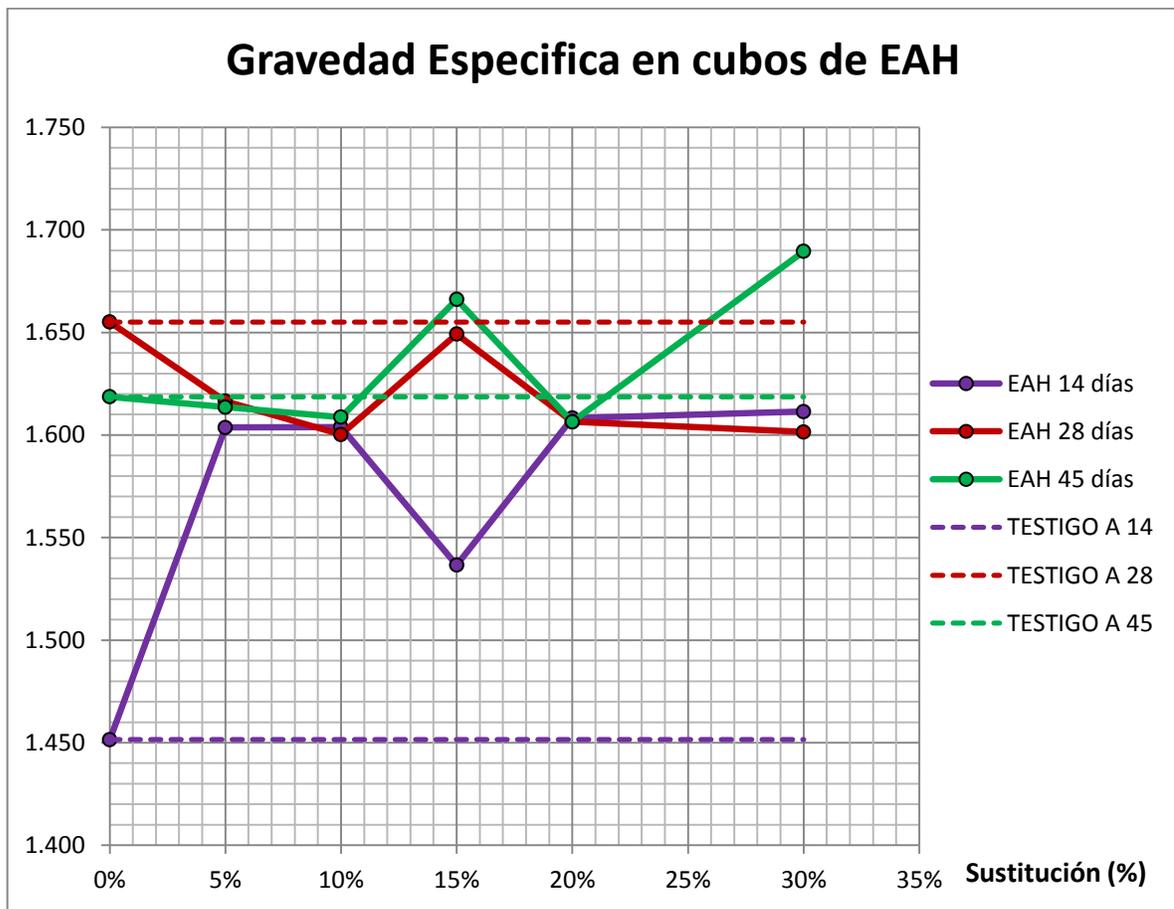


Figura 8.6. Comportamiento de cubos de mortero a la G.E. con sustituciones de EAH.



### 8.4.- Densidad en cubos.

Los resultados de la prueba de la densidad en los cubos de mortero con sustitución de CM se encuentran en la tabla 8.12 y en la figura 8.7, puede notarse que a una edad temprana la densidad aumenta en todas las sustituciones y a edad de 45 días la densidad disminuye en todas las sustituciones. El porcentaje que mayor disminución tiene es la del 5%.

Porcentaje	Densidad en cubos de CM (kg/m <sup>3</sup> )		
	14 días	28 días	45 días
0%	1737.37	1946.57	1902.86
5%	1937.40	1860.71	1966.73
10%	1918.36	1894.70	1912.88
15%	1876.29	1916.04	1924.46
20%	1835.99	1895.57	1911.94
30%	1883.51	1870.26	1900.88

Tabla 8.12. Resultados de la Prueba de Densidad en morteros cúbicos con sustitución de CM.

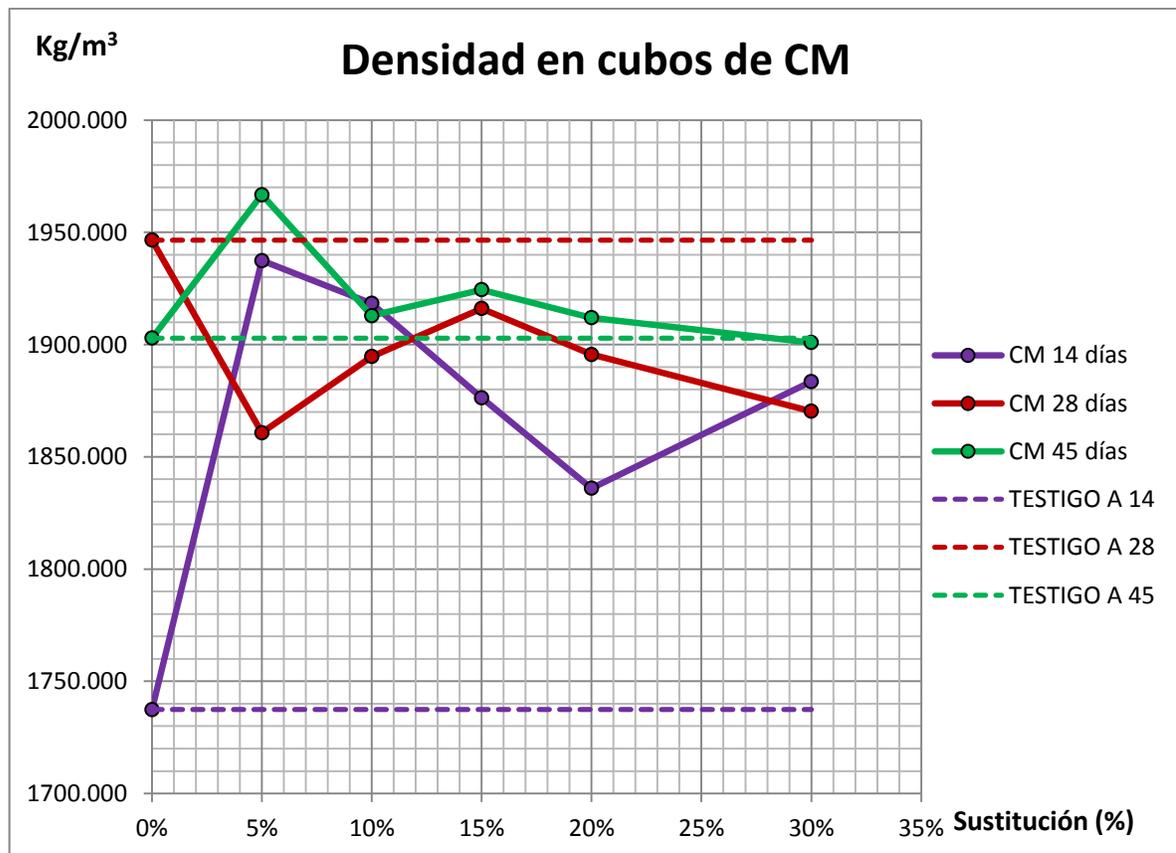


Figura 8.7. Comportamiento de cubos de mortero a la densidad con sustituciones de CM.



Para el caso de las sustituciones de la EAH, los resultados se presentan en la tabla 8.13 y en la figura 8.8. se nota que el comportamiento de esta sustitución sobre los morteros es de que la densidad, a una edad de 45 días, aumento sobrepasando la densidad del espécimen testigo sin embargo a la edad de 45 días esta densidad disminuye incluso menos que el testigo. El porcentaje que mayor disminución presenta es el del 5%.

Porcentaje	Densidad en cubos de EAH (kg/m <sup>3</sup> )		
	14 días	28 días	45 días
0%	1737.37	1946.57	1902.86
5%	1910.81	1825.68	1935.43
10%	1848.54	1892.91	1896.53
15%	1944.65	1954.66	1940.63
20%	1914.61	1936.25	1914.24
30%	1942.59	1909.33	1913.12

Tabla 8.13. Resultados de la Prueba de Densidad en morteros cúbicos con sustitución de EAH.

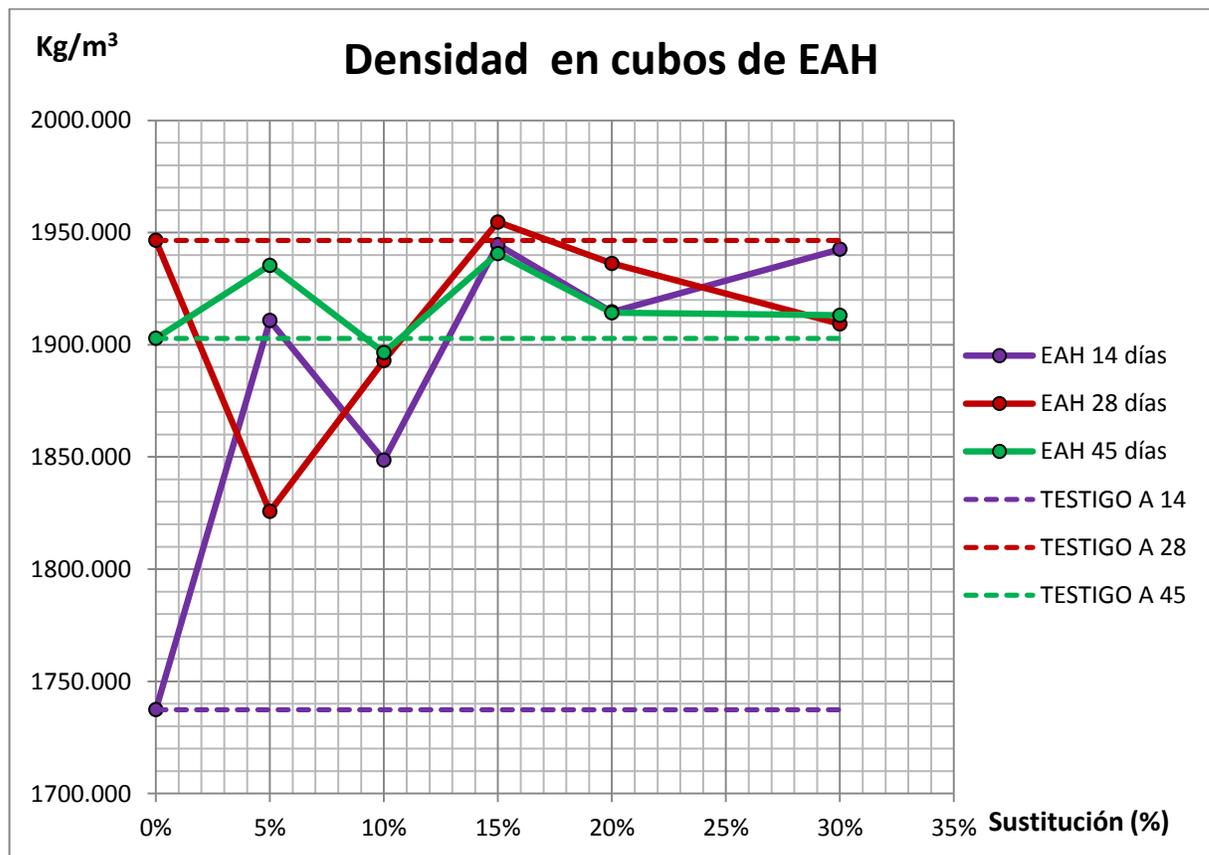


Figura 8.8. Comportamiento de cubos de mortero a la densidad con sustituciones de CM.



### 8.5.- Compresión simple en cubos de mortero.

En la Tabla 8.14 y en la figura 8.9, se aprecia el comportamiento de los especímenes cúbicos a diferentes edades y a los distintos porcentajes de sustitución. Se puede apreciar que el comportamiento, respecto a los porcentajes de sustitución, es de una forma descendente, es decir, que a mayor cantidad de CM y menor cantidad de cemento la resistencia a compresión simple disminuye notablemente respecto a los testigos.

Porcentaje	Resistencia a compresión CM (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	7.699	10.983	12.944
5%	7.157	8.080	9.539
10%	6.462	7.264	8.347
15%	6.231	7.400	8.413
20%	4.320	6.829	7.052
30%	3.184	4.255	5.084

Tabla 8.14. Resistencias a compresión simple de especímenes cúbicos con sustitución de CM.

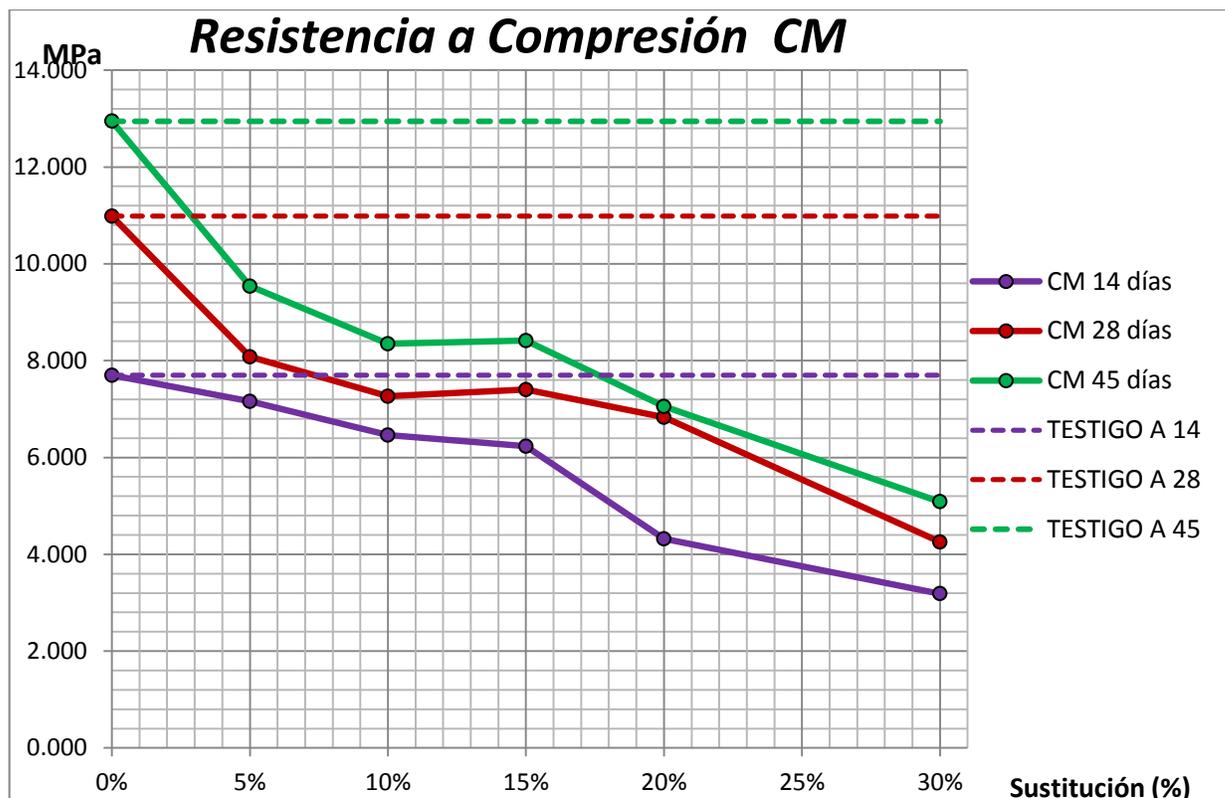


Figura 8.9. Comportamiento a compresión simple en cubos con CM.



La Tabla 8.15 y la imagen 8.10, nos muestra el comportamiento de los especímenes cúbicos que tienen como sustitución EAH. El comportamiento que se ilustra es de una tendencia descendente, esto nos indica que entre mayor cantidad del porcentaje de sustituto se encuentre en una mezcla, menor es su resistencia a la compresión. También se aprecia que al aumentar la edad de los especímenes va disminuyendo la resistencia con respecto a los especímenes testigos.

Porcentaje	Resistencia a compresión EAH (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	7.699	10.983	12.944
5%	7.198	8.422	10.435
10%	6.947	8.868	9.944
15%	5.698	8.210	10.485
20%	5.931	7.926	10.085
30%	4.909	7.171	8.213

Tabla 8.15. Resistencia a la compresión simple de cubos con sustitución de EAH.

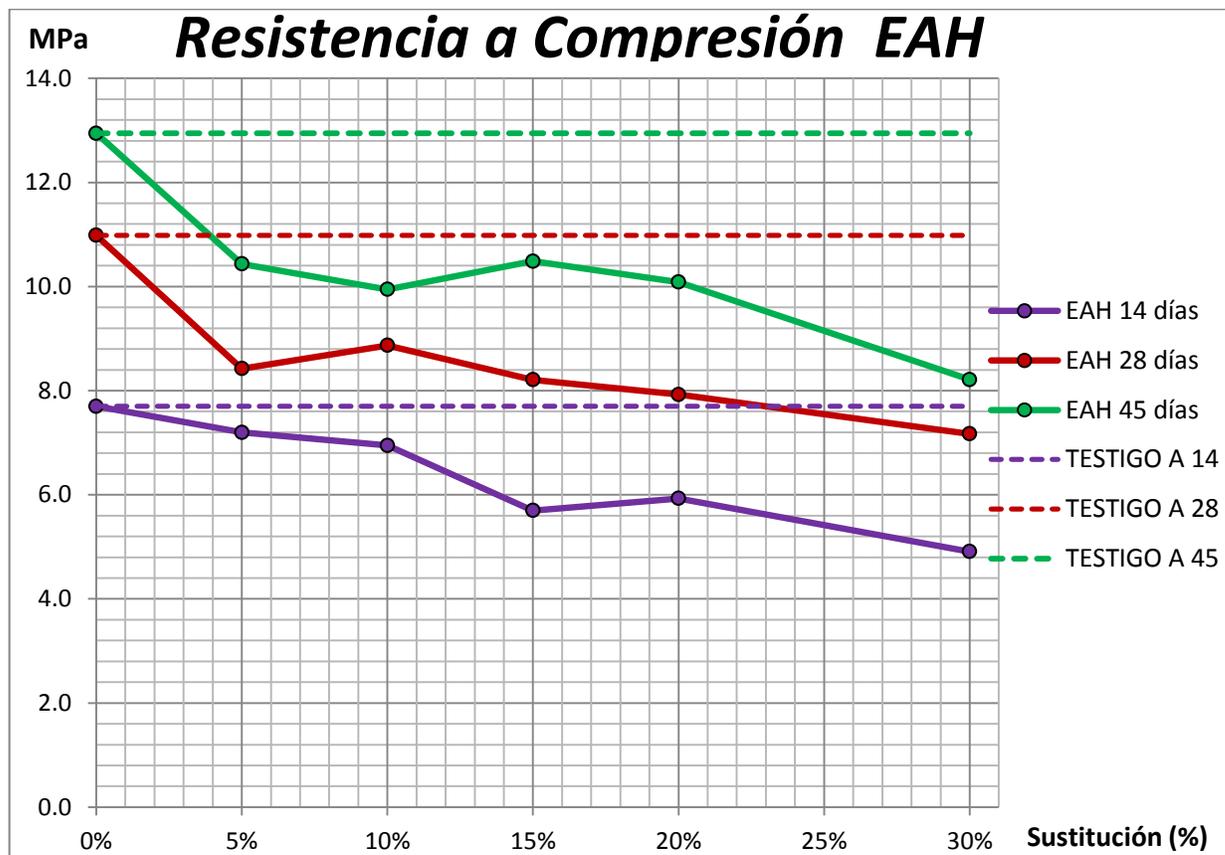


Figura 8.10. Comportamiento a compresión simple en cubos con sustitución de EAH.



### 8.6.- Flexión en prismas de mortero.

El comportamiento de los especímenes prismáticos, respecto a la resistencia a la flexión, se muestra en la tabla 8.16 y la figura 8.11. El comportamiento del mortero con sustitución de CM, a la flexión, es que a 14 días la resistencia es descendente y conforme aumenta la edad del material, 28 y 45 días, aumenta la resistencia a la flexión, sobretodo en la sustitución del 20% que es donde se muestra un pico ascendente, inclusive, la resistencia sobrepasa la resistencia del espécimen testigo.

Porcentaje	Resistencia a flexión CM (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	2.108	2.164	2.938
5%	1.724	1.867	2.528
10%	1.754	1.932	1.644
15%	1.613	2.599	2.579
20%	1.548	1.404	2.067
30%	0.601	1.564	1.713

Tabla 8.16. Resistencia a la flexión de prisma con sustitución de CM.

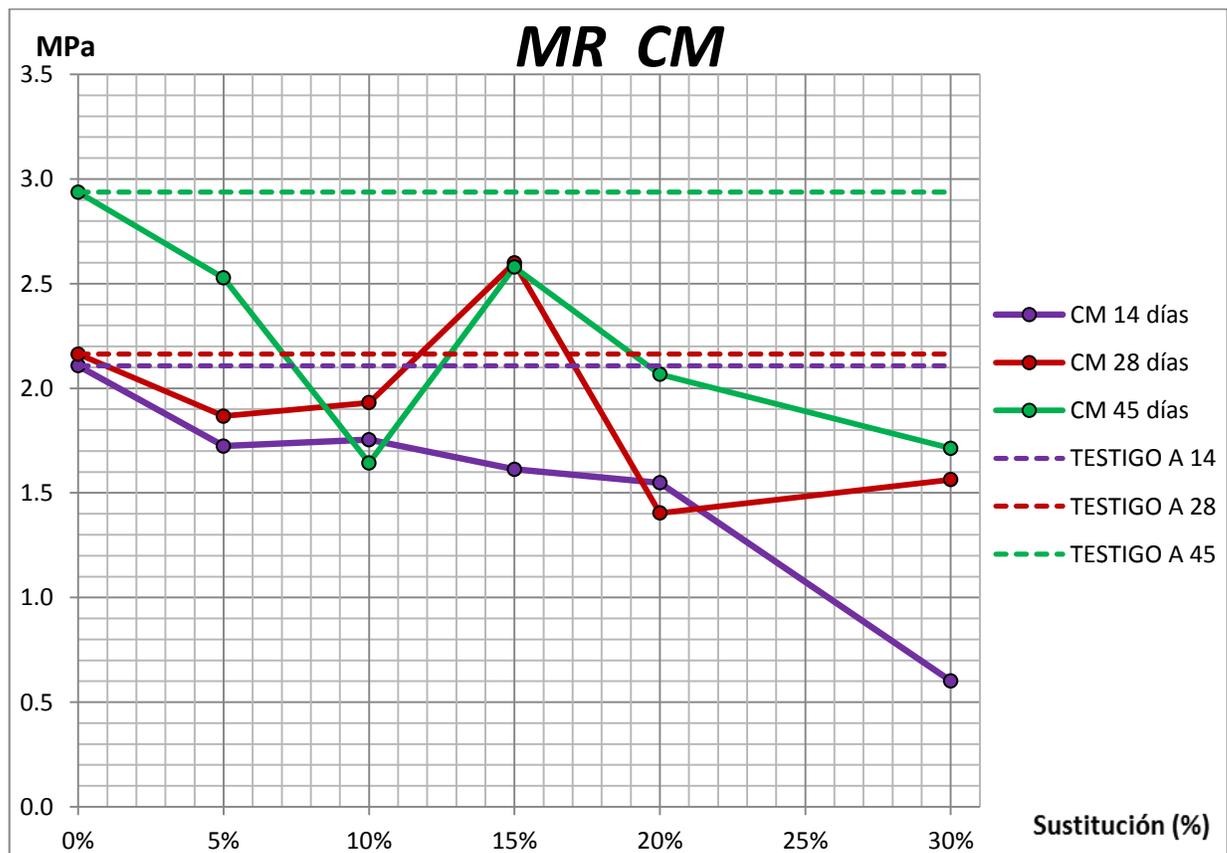


Figura 8.11. Comportamiento de prismas, de mortero con sustitución de CM, a la flexión.



La resistencia a la flexión que presentaron los especímenes prismáticos con sustitución de la EAH se muestra en la tabla 8.17, así como el comportamiento con los distintos porcentajes de sustitución y edades, que se ilustra en la figura 8.12. En tal figura se muestra que hay un aumento en la resistencia a la flexión, sobretodo en el porcentaje del 10%, donde a la edad de 14 días es un poco bajo con respecto al testigo, pero se incrementa sobrepasando a los especímenes testigos a las edades de 28 y 45 días. En general se nota que los porcentajes que más favorecen son de 5, 10 y 15%.

Porcentaje	Resistencia a flexión EAH (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	2.108	2.164	2.938
5%	2.158	2.672	2.868
10%	1.967	2.572	3.071
15%	2.475	2.377	2.524
20%	1.600	2.062	2.739
30%	1.524	2.833	2.576

Tabla 8.17. Resistencia a la flexión de prismas con sustitución de EAH.

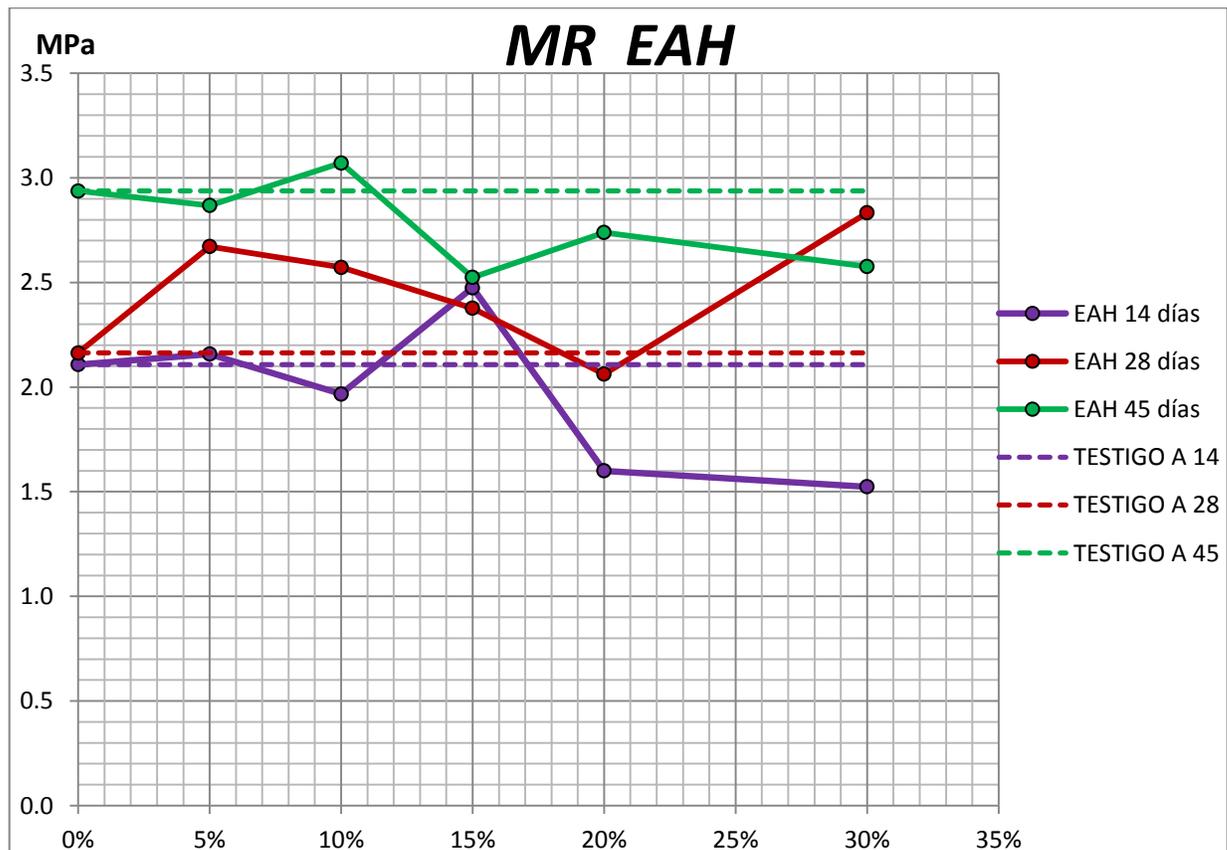


Figura 8.12. Comportamiento de prismas, de mortero con sustitución de EAH, a la flexión.



### 8.7.- Tensión en briquetas de mortero.

Las resistencias que presentaron las briquetas de mortero, en sus distintos porcentajes de sustitución de CM, se muestran en la tabla 8.18, mientras que el comportamiento, respecto a la sustitución y a la edad del material, se muestra en la Figura 8.13. Se puede ver gráficamente que las sustituciones no favorecen a la resistencia por tensión, se puede decir que el porcentaje que más favorece, es la sustitución del 15%, ya que a las primeras edades, 14 y 28 días, la resistencia de estos es menor con respecto al testigo pero aumenta su resistencia a edades más tardías, 45 días. Por lo que la tendencia de esta sustitución es ascendente y se predice que aumentara su resistencia a la tensión conforme aumente la edad del material.

Porcentaje	Resistencia a la tensión (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	1.009	1.040	1.104
5%	0.893	0.881	0.876
10%	0.649	0.781	0.886
15%	0.797	0.985	1.294
20%	0.601	0.812	0.807
30%	0.501	0.659	0.687

Tabla 8.18. Resistencia a la tensión de briquetas de mortero con sustitución de CM.

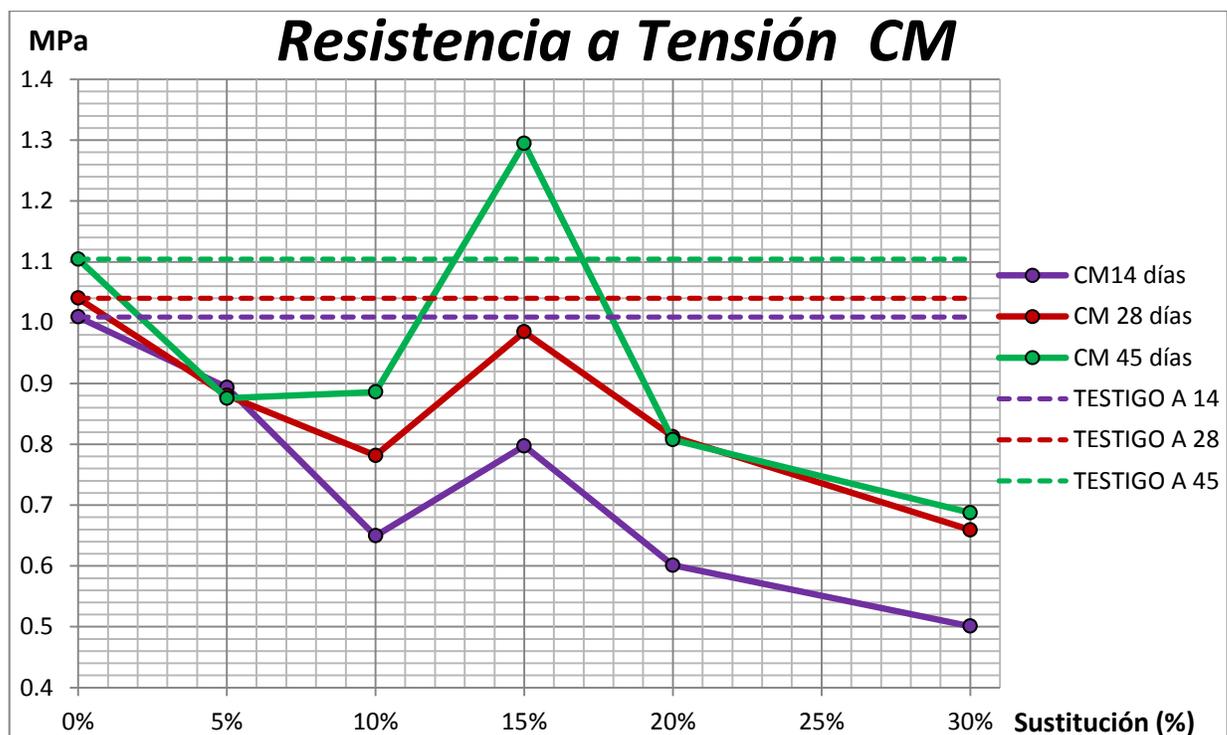


Figura 8.13. Comportamiento de briquetas, de mortero con sustitución de CM, a la tensión.



Las resistencias de las briquetas con sustitución de EAH, de los diferentes porcentajes y edades se muestran en la Tabla 8.19 y el comportamiento del mismo se puede observar en la Figura 8.14. este material le da un comportamiento, a los especímenes con respecto al testigo en las edades tempranas de 14 y 28 días, con una resistencia menor a la del testigo, para la edad de 45 días las resistencias de los porcentajes de sustitución aumentan notablemente, incluso mayor que la resistencia del testigo. El porcentaje que mejor se comporta es el del 5%, ya que en esta sustitución se puede notar que su comportamiento es de forma ascendente conforme aumenta la edad de este material.

Porcentaje	Resistencia a la tensión (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	1.009	1.040	1.104
5%	1.027	0.949	1.332
10%	0.820	0.930	1.179
15%	0.852	0.687	1.217
20%	0.664	0.993	1.264
30%	0.727	1.008	1.056

Tabla 8.19. Resistencia a la tensión de briquetas de mortero con sustitución de EAH.

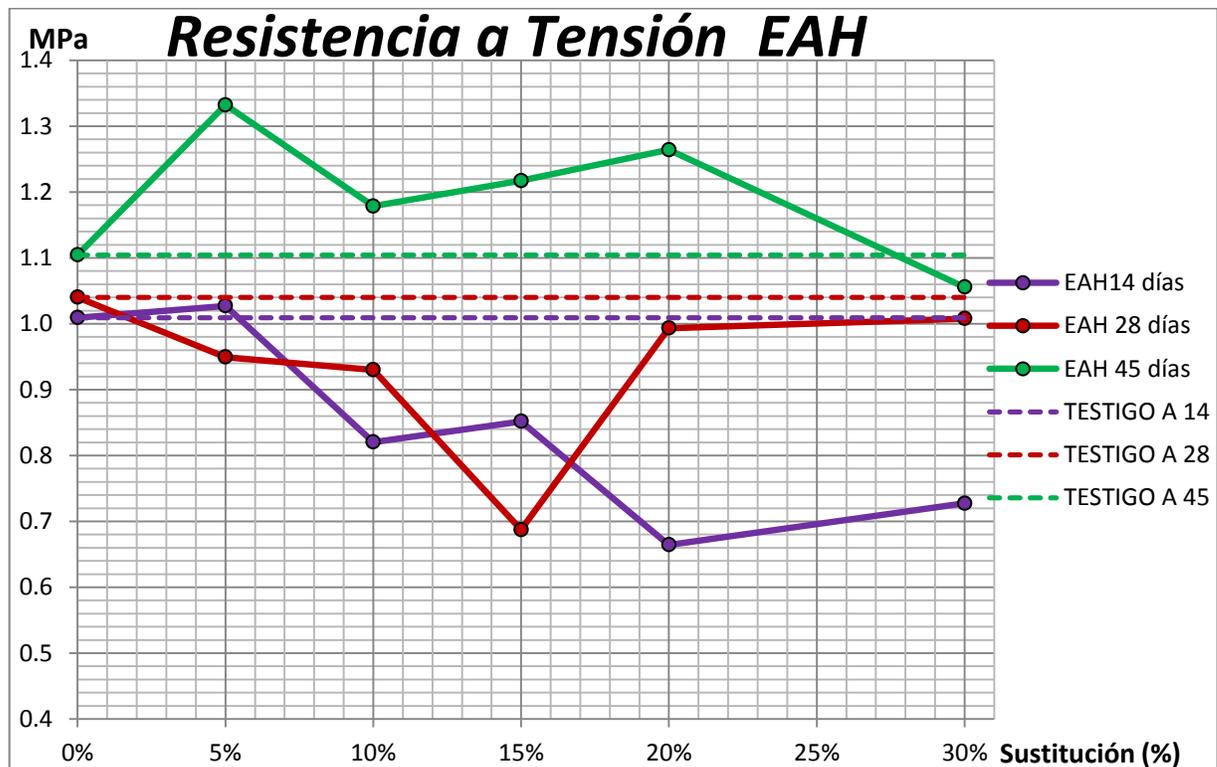


Figura 8.14. Comportamiento de briquetas de mortero a la resistencia a tensión con sustitución de EAH



### 8.8.- Velocidad de pulso.

La velocidad en que viaja el pulso en los especímenes cúbicos con sustituciones de CM a las distintas edades, se muestra en la Tabla 8.20, mientras que el comportamiento se muestra en la Figura 8.15. Se puede observar que en medida de que se aumenta sustitución de CM la velocidad de pulso ultrasónico disminuye notablemente, este comportamiento se muestra en todas las edades, por lo que la tendencia de la velocidad es descendente a causa del material de sustitución con respecto al testigo. Como la velocidad es descendente también la resistencia será de forma descendente.

Porcentaje	Velocidad de Pulso U. CM (m/s).		
	14 días	28 días	45 días
0%	3189.667	3033.333	2672.733
5%	2520.667	2892.333	2614.483
10%	2456.117	2417.850	2273.860
15%	2446.783	2483.860	2546.267
20%	2282.300	2430.687	2456.197
30%	2183.667	2295.563	2380.883

Tabla 8.20. Velocidades de pulso ultrasónico en cubos de mortero con sustitución de CM.

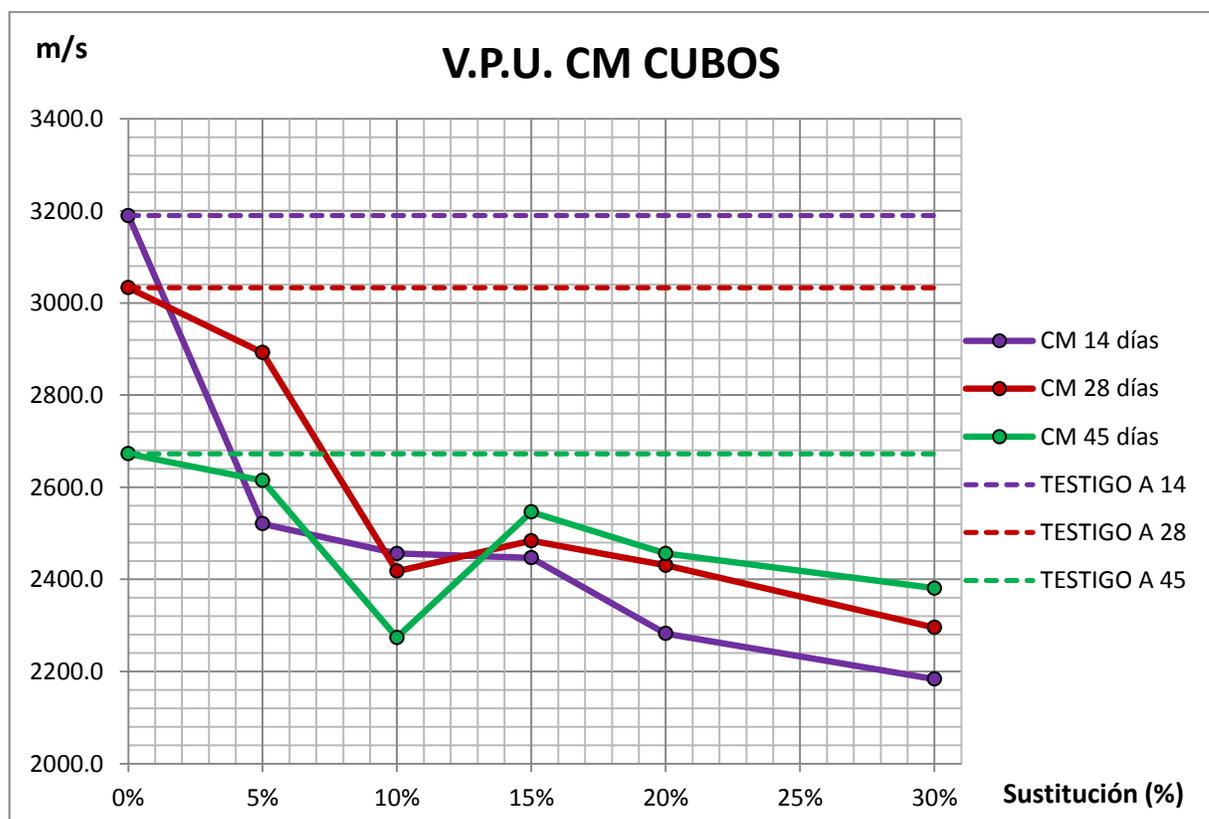


Figura 8.15. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en cubos de mortero con sustitución de CM.



En la tabla 8.21 se muestran los resultados de la velocidad del pulso ultrasónico que presentaron los especímenes cúbicos con sustituciones de EAH a edades de 14, 28 y 45 días, y en la Figura 8.16 se presenta el comportamiento de las mismas respecto a los especímenes testigos. Se observa que la velocidad de pulso ultrasónico tiene una forma descendente a edades de 14 y 28 días, mientras que en la edad de los 45 días se ve un incremento en la velocidad de pulso, en los porcentajes de 5 y 10%, que inclusive rebasan la velocidad que presenta el espécimen testigo.

Porcentaje	Velocidad de Pulso U. EAH (m/s).		
	14 días	28 días	45 días
0%	3189.667	3033.333	2672.733
5%	2494.667	2743.667	2879.333
10%	2670.000	2773.667	2796.000
15%	2283.943	2499.233	2616.997
20%	2411.413	2469.110	2607.330
30%	2202.803	2393.173	2573.597

Tabla 8.21. Velocidades de pulso ultrasónico en cubos de mortero con sustitución de EAH.

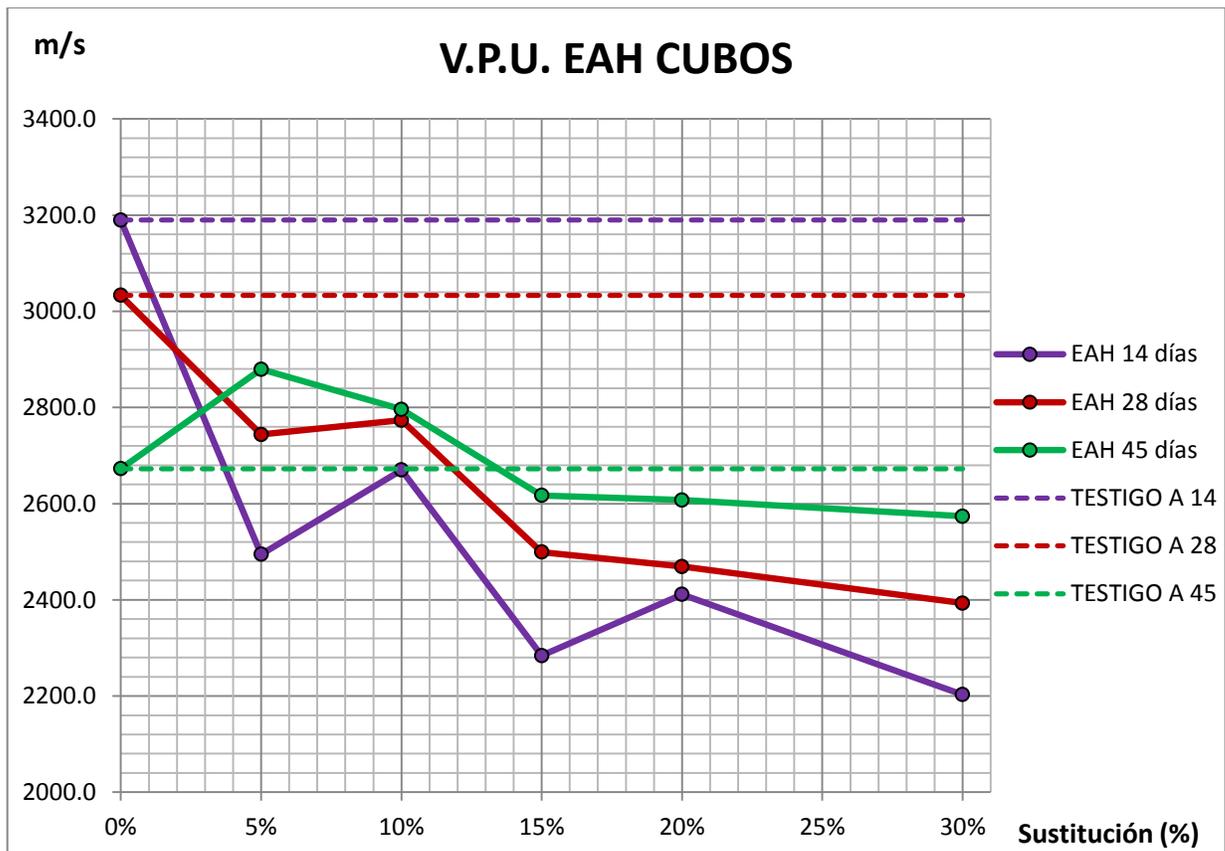


Figura 8.16. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en cubos de mortero con sustitución de EAH.



En los especímenes prismáticos el resultado de la velocidad de pulso que estos presentaron son los que aparecen en la Tabla 8.22 y en la Figura 8.17. Ningún porcentaje de sustitución de CM mejora las características del material de tal forma que aumentara la velocidad de pulso ultrasónico con respecto a los especímenes testigos, aunque en la edad de 45 días muestra un pequeño aumento de la velocidad de pulso pero sin superar al prisma testigo.

Porcentaje	Velocidad de Pulso U. CM cubo (m/s).		
	14 días	28 días	45 días
0%	2829.333	3083.000	3015.000
5%	2716.000	2830.333	2837.163
10%	2777.467	2840.640	2658.783
15%	2800.730	2889.433	2940.483
20%	2665.030	2823.600	2797.273
30%	2460.427	2597.787	3013.923

Tabla 8.22. Velocidades de pulso ultrasónico en prismas de mortero con sustitución de CM.

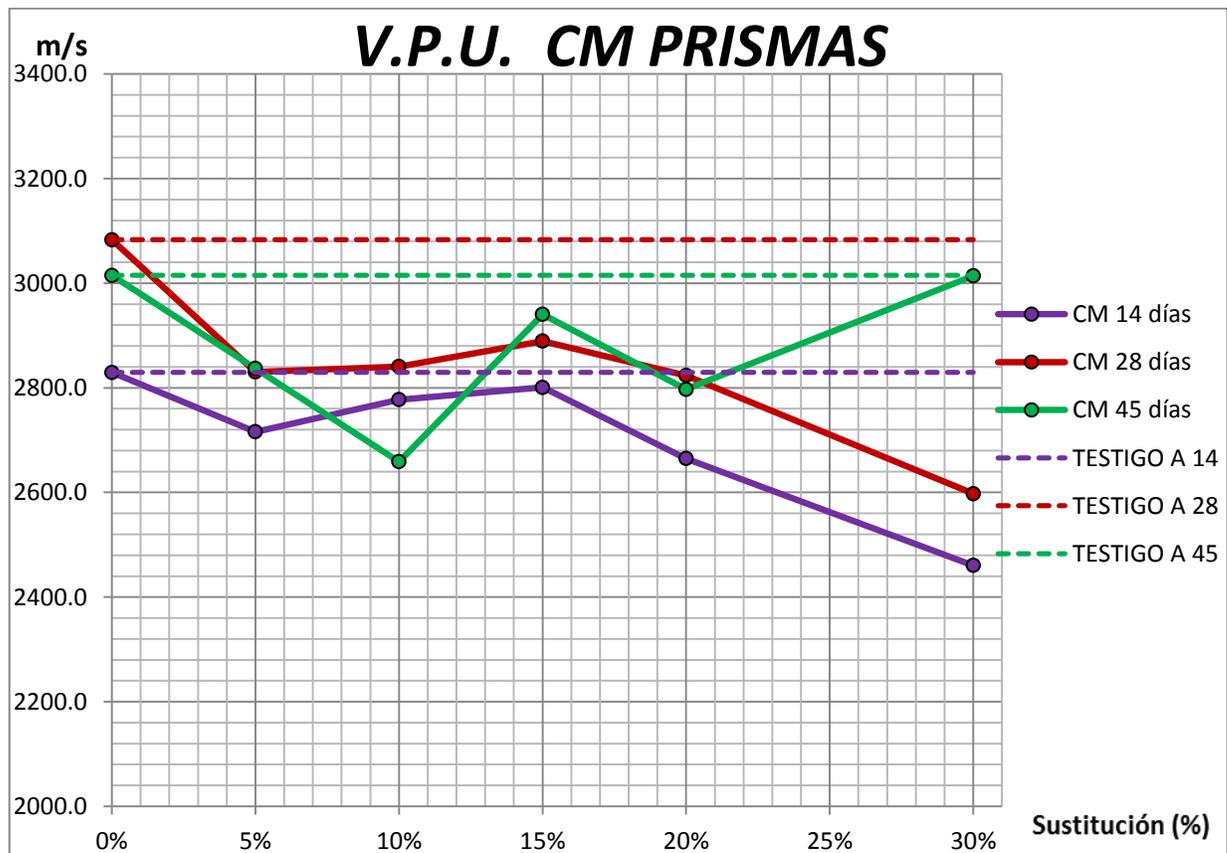


Figura 8.17. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en prismas de mortero con sustitución de CM.



Los resultados de la velocidad de pulso que presentan los especímenes prismáticos con sustituciones de EAH a edades de 14, 28 y 45 días, se muestran en la Tabla 8.23y el comportamiento en la Figura 8.18. Se observa que en la sustitución de un 5% la velocidad de pulso ultrasónico aumenta rebasando la velocidad de pulso de los especímenes testigos, mientras que en las sustituciones sucesivas esta velocidad disminuye notablemente teniendo una tendencia descendente.

Porcentaje	Velocidad de Pulso U. EAH pris (m/s).		
	14 días	28 días	45 días
0%	2829.333	3083.000	3015.000
5%	2878.000	2933.667	3036.333
10%	2813.000	2926.000	2898.333
15%	2682.903	2975.027	3003.283
20%	2698.900	2863.023	2966.313
30%	2490.647	2732.373	2865.993

Tabla 8.23. Velocidades de pulso ultrasónico en prismas de mortero con sustitución de EAH.

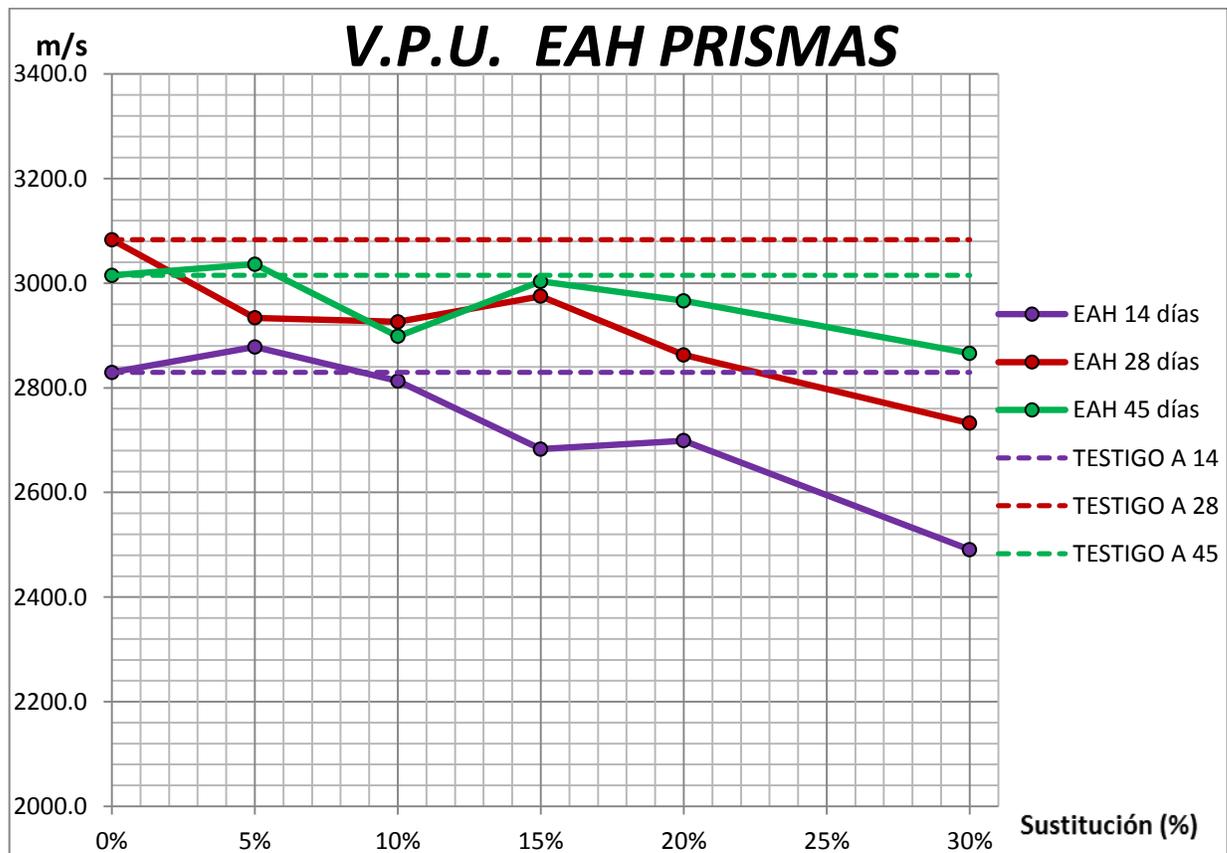


Figura 8.18. Comportamiento de la velocidad de pulso ultrasónico en prismas de mortero con sustitución de EAH



### 8.9.- Resistividad eléctrica.

El resultado de la prueba de la resistividad eléctrica, que se le practico a los especímenes cúbicos con sustituciones de CM, se muestra en la tabla 8.24 y figura 8.19. En la figura se puede observar que la resistividad en los especímenes con sustitución a las edades de 14 y 28 días es una resistividad que está por debajo de la resistividad que presentan los especímenes testigos, pero a medida en que aumenta la edad, aumenta también la resistividad de los especímenes sobrepasando los valores del testigo.

Porcentaje	Resistividad E. Cubos CM (Ohms-m)		
	14 días	28 días	45 días
0%	36.467	45.844	34.552
5%	17.635	27.885	28.613
10%	25.234	23.409	35.440
15%	19.341	25.791	44.588
20%	15.10	20.386	44.876
30%	16.255	29.868	51.718

Tabla 8.24. Resistividad eléctrica de los cubos de mortero con sustitución de CM.

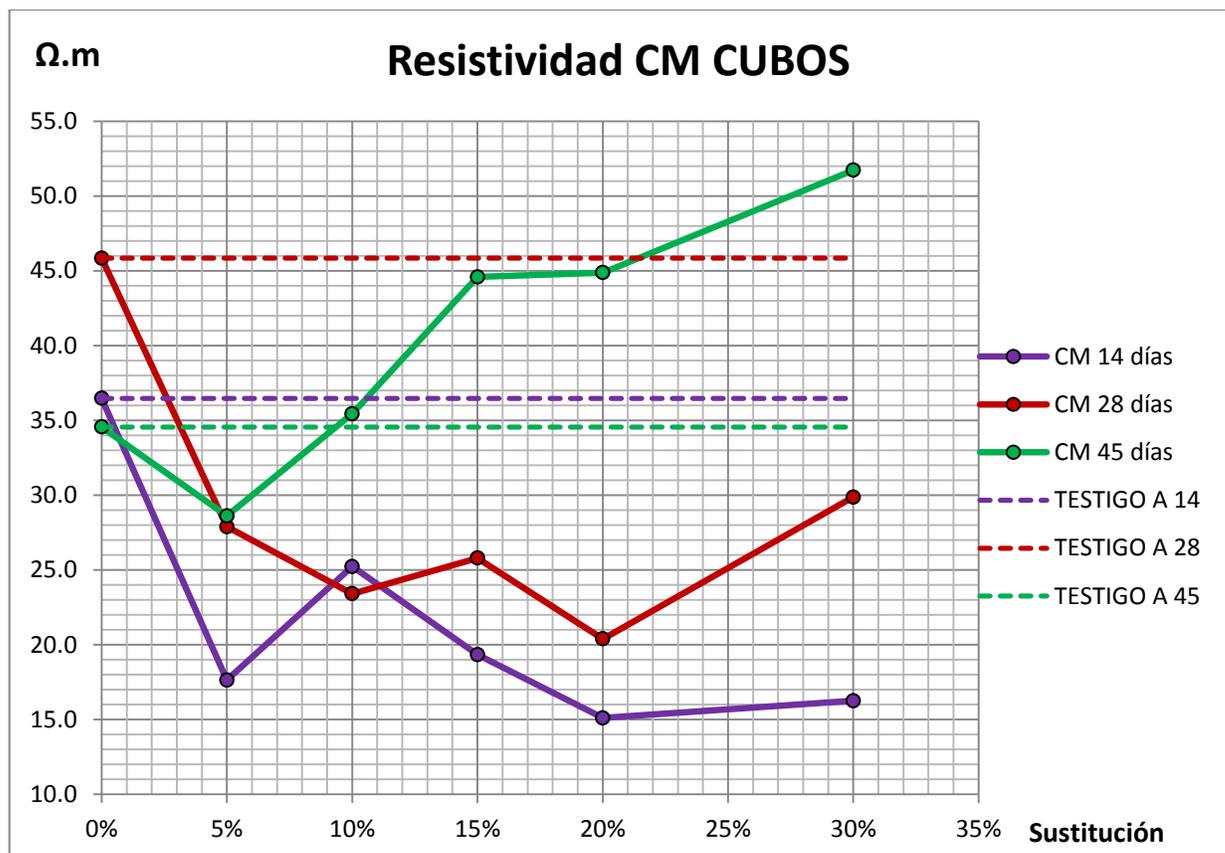


Figura 8.19. Comportamiento de la resistividad eléctrica de los cubos con sustitución de CM.



Para los resultados de la prueba de resistividad eléctrica, para cubos de mortero con sustitución de EAH, se muestran en la tabla 8.25 y en la figura 8.20 donde además se muestra el comportamiento de los distintos porcentajes de sustitución a las edades de 14, 28 y 45 días. El comportamiento que se observa es que a edades tempranas la resistencia está por debajo de la resistencia de los testigos pero conforme aumenta la edad, la resistencia de los especímenes con EAH aumenta notablemente, teniendo al 10 y 30% de sustitución como los porcentajes que mayor aumento indican. Esto nos indica que a edades más tardías se presenta un material con menores huecos, y por tanto, especímenes con un cuerpo más denso.

Porcentaje	Resistividad E. cubos EAH (Ohms-m)		
	14 días	28 días	45 días
0%	36.467	45.844	34.552
5%	45.011	47.768	57.555
10%	29.260	39.009	86.206
15%	22.350	31.005	41.667
20%	21.14	28.281	58.529
30%	27.782	79.923	89.304

Tabla 8.25. Resistividad eléctrica de cubos de mortero con sustitución de EAH.

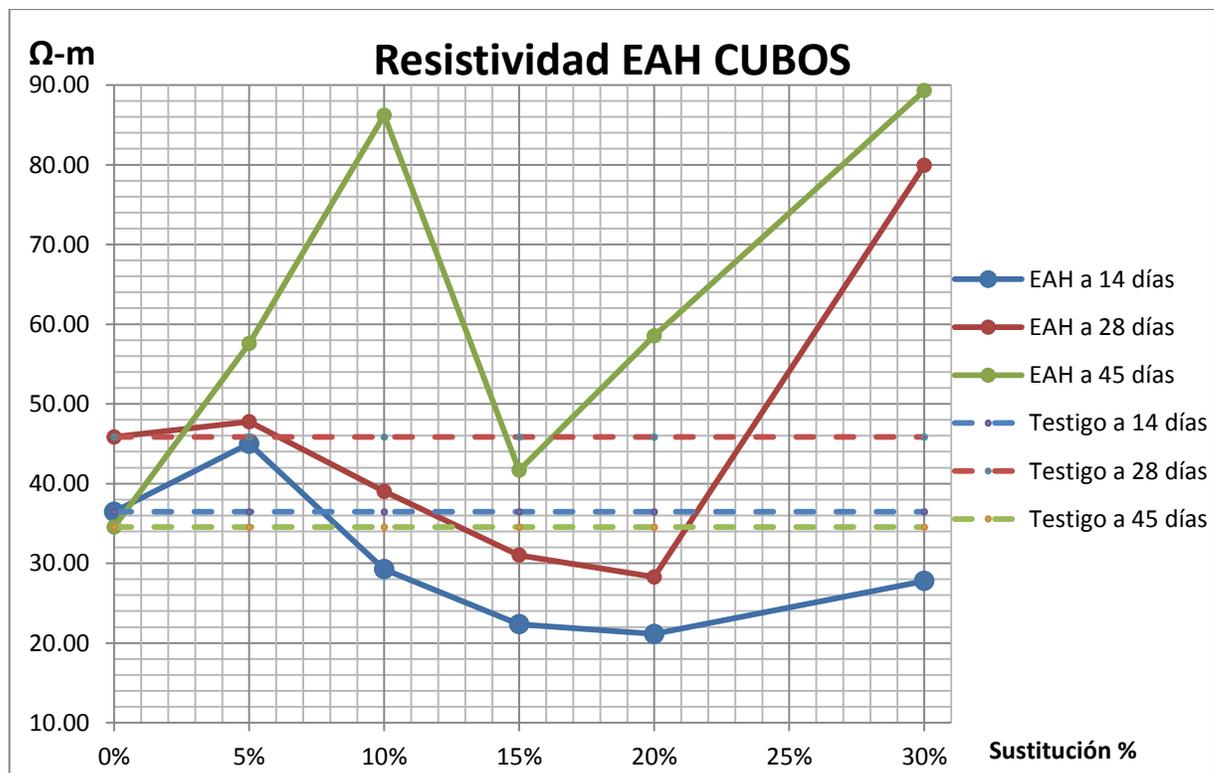


Figura 8.20. Comportamiento de la resistividad eléctrica de cubos de mortero con sustitución de EAH.



Los resultados de las pruebas de resistividad eléctrica practicados a los prismas con sustitución de EAH, se muestran en la tabla 8.26 y figura 8.21. estos resultados nos indican que el porcentaje que mayor resistividad eléctrica, con respecto al testigo, nos dio fue la del porcentaje de 30% que en las edades de 28 y 45 días nos dieron resultados mayores, mientras que los demás porcentajes a la primera edad nos día alta la resistividad pero posteriormente baja notablemente.

Porcentaje	Resistividad E. prisma CM (Ohms-m)		
	14 días	28 días	45 días
0%	13.624	21.062	25.781
5%	17.326	22.797	20.543
10%	16.255	28.642	23.959
15%	13.777	16.711	23.593
20%	11.443	21.035	27.182
30%	10.984	21.218	30.770

Tabla 8.26. Resistividad eléctrica de prismas de mortero con sustitución de EAH.

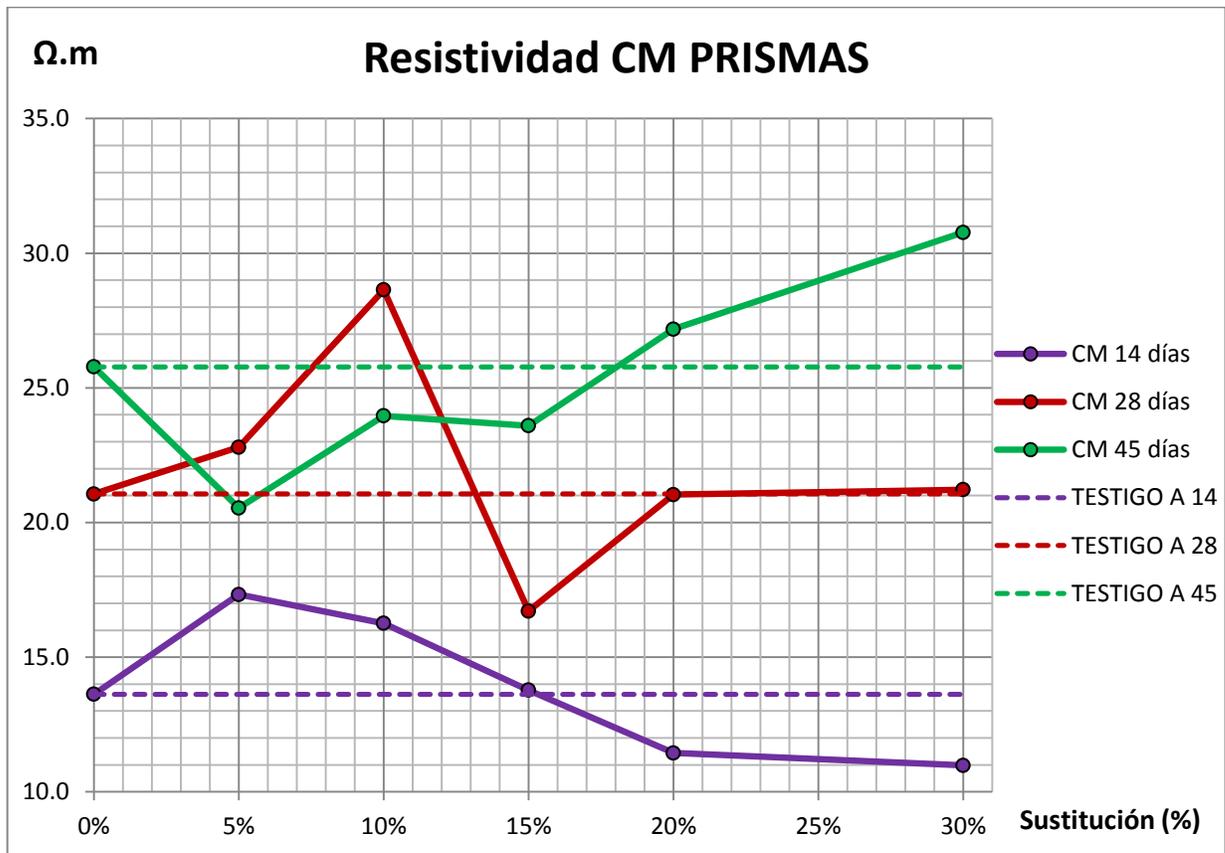


Figura 8.21. Comportamiento de la resistividad eléctrica de los prismas de mortero con sustitución de EAH.



### 8.10.- Adherencia.

Esta prueba que se utiliza para medir la fuerza de ligadura entre dos capas, en este caso las mezclas de mortero con sustituciones de CM. Tenemos los resultados de la prueba de adherencia en la tabla 8.27 y figura 8.22. Estos resultados nos indican que la adherencia que mejor resultados tuvo fue la del porcentaje de sustitución del 20%, ya que como se observa a las primeras edades aumenta notablemente la resistencia con respecto al espécimen testigo.

Porcentaje	Resistencia por adherencia CM (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	1.043	1.663	2.653
5%	1.507	1.310	1.970
10%	1.450	1.563	2.453
15%	1.773	1.820	2.213
20%	1.740	2.343	2.467
30%	1.680	1.820	2.203

Tabla 8.27. Resistencia a la adherencia de morteros con sustitución de CM.

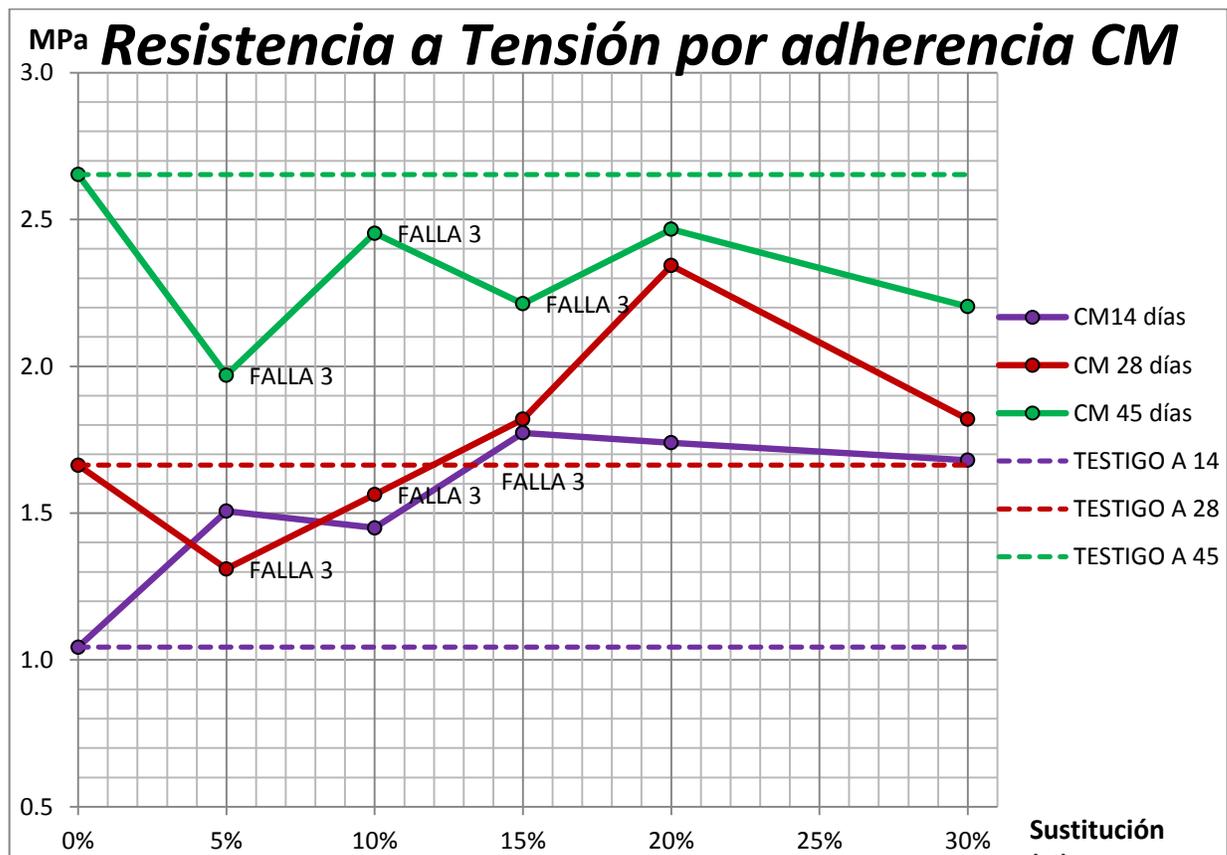


Figura 8.22. Comportamiento de la adherencia en morteros con sustitución de CM.



Para el caso del mortero con sustituciones de EAH, los resultados de la prueba de adherencia se muestran en la tabla 8.28 y figura 8.23. En estos resultados, nos indica que los porcentajes con los mejores comportamientos son del 5, 10 y 20% ya que en estos porcentajes la tendencia es ascendente, es decir, que a mayor edad la resistencia a la adherencia es mayor.

Porcentaje	Resistencia por adherencia EAH (MPa)		
	14 días	28 días	45 días
0%	1.043	1.663	2.653
5%	2.183	2.343	2.597
10%	2.663	1.780	2.380
15%	1.317	1.203	1.513
20%	2.183	0.963	3.007
30%	1.723	1.427	1.657

Tabla 8.28. Resistencia a la adherencia de morteros con sustitución de EAH.

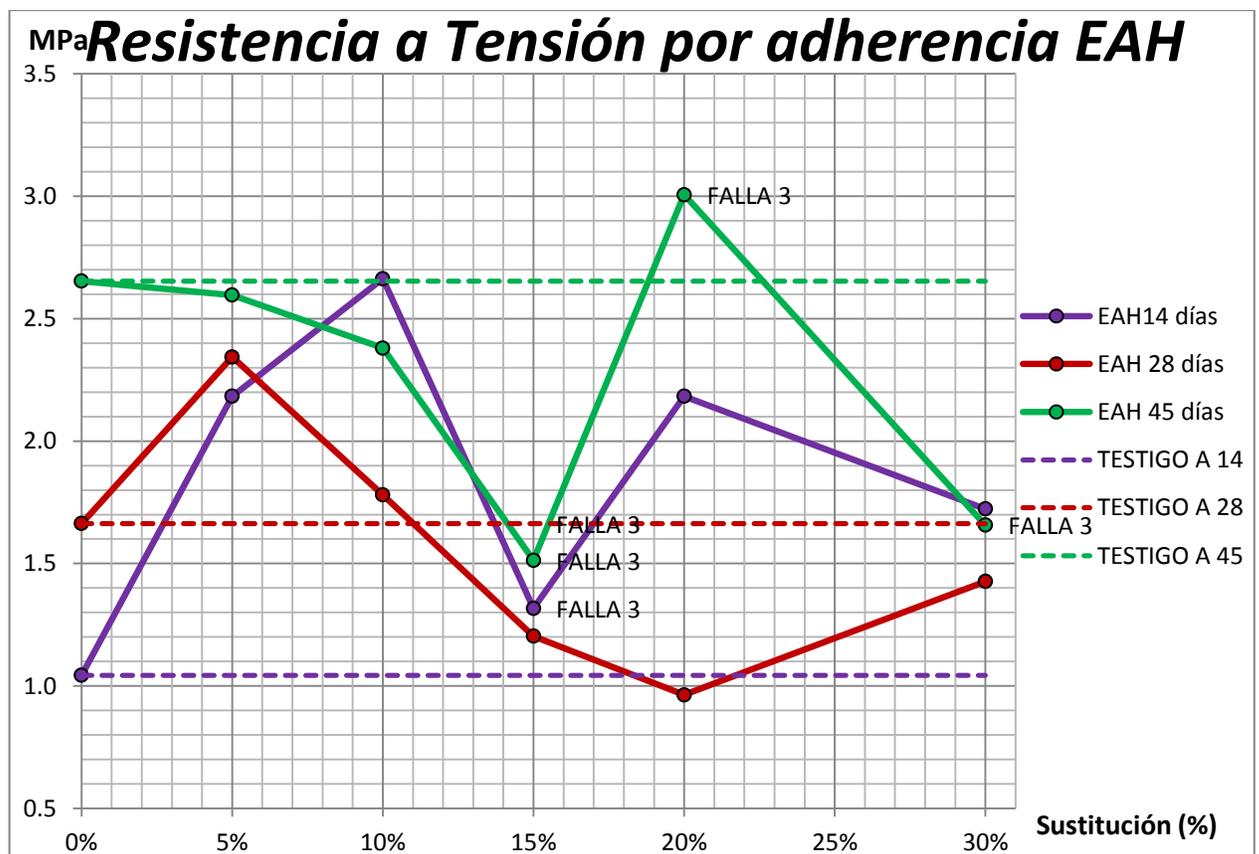


Figura 8.23. Comportamiento de la adherencia en morteros con sustitución de EAH.



# 9 CONCLUSIONES



## 9. Conclusiones.

La realización de esta investigación dio como resultado información útil para la utilización de materiales residuos de industrias.

En primera instancia se logró el primer objetivo que es conocer el comportamiento mecánico de los morteros sustituyendo parcialmente al cemento por el carbón mineral y por escoria de alto horno, además también se pudo tener información de pruebas físicas sobre el mismo mortero. Esta información es de mucha utilidad ya que da pie a seguir realizando más investigación sobre usos de residuos industriales, sobre todo con el carbón mineral ya que este residuo no ha sido investigado ampliamente como sustituto del cemento o como algún aditivo de las mezclas cementantes, solamente se ha investigado al residuo de este mineral después de la calcinación pero no como el carbón mineral sin procesar.

Hablando del carbón mineral, en primer lugar, el resultado que nos pudo arrojar al momento de realizar la mezcla es que tiene un efecto fluidificante sobre esta, teniendo fluides de hasta de 135cm, variando según el porcentaje de sustituto, en un tiempo de 15 minutos después del mezclado y manteniendo la relación agua/cemento que la mezcla testigo, con esta información podríamos hacer una reducción del agua sobre la mezcla bajando la relación agua cemento y haciendo que tenga mejores características mecánicas, sin embargo, como se mantuvo esa relación la resistencia a la compresión disminuyó notablemente conforme aumentaba la cantidad del porcentaje de sustituto. Para la prueba de flexión casi todos los porcentajes también disminuyeron la resistencia a excepción de la sustitución del 15% que tuvo una tendencia ascendente teniendo el mismo comportamiento en las pruebas de tensión. A lo que respecta a las pruebas físicas, el comportamiento es que a edades más tardías tienden a bajar la masa, gravedad específica y densidad al igual que la velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica. En general se puede decir que este material como sustituto del cemento no favorece, sin embargo, se puede hacer una futura investigación usando al carbón mineral como un aditivo reductor basándose en esta información.

Para el caso de la escoria de alto horno como sustituto parcial del cemento, se nota que cuando a mayor cantidad de sustituto disminuyen la resistencia a la compresión simple, por otra parte se ve un aumento de resistencia en las pruebas de flexión y tensión, al igual que en la adherencia, en estas dos últimas pruebas dieron buenos resultados sobre todo en el porcentaje del 5% que es en donde se nota la mayor mejoría. En el caso



## COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CARBÓN MINERAL Y DE LA ESCORIA DE ALTO HORNO EN MORTEROS COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO

---



de las pruebas físicas se tuvo una disminución en los porcentajes de 10%, en lo que es la masa, y un aumento en el porcentaje del 15%; y en los resultados de gravedad específica y densidad los valores no cambian mucho a edades más tardías se mantienen con resultados no muy variados a los de los especímenes testigos.



## 10. -Bibliografía

- 228, A. C. (1998). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills MI.: ACI 228.2R-98, American Concrete Institute.
- Amorocho Cortés, E., & Oliveros Villamizar, G. (2000). *Apuntes sobre Energía y Recursos Energeticos*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Anderson, D., & Seals, R. (1981, march-april). Pulse velocity as a predictor of 28 and 90 days strength. *Journal of the American Concrete Institute*(2), 116-119.
- ArcelorMittal. (n.d.). *Generación de escorias en las acerías*.
- ARQHYS. (n.d.). *ARQUYS ARCHITECTS SITE*. Retrieved OCTUBRE 11, 2012, from <http://www.arqhys.com/construccion/mortero.html>
- ASTM-C-109M. (2001). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (using 2in or 50mm cube specimens)*. USA.
- ASTM-E-2465. (n.d.). *ASTM INTERNATIONAL*. Retrieved Noviembre 13, 2012, from <http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/Q306/q306sepxray.html>
- Ávila, J. G. (2003). *Más allá de la Herrumbre II*. México: La ciencia para todos.
- Babu Kumaran, G., & Martínez González, S. (2008, Enero/Junio). Evolución reciente de la industria de cemento: un estudio comparativo entre México y la India. *PORTES, Revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico*, 2(3), 165-202.
- CANACEM. (2010). *CANACEM*. Retrieved OCTUBRE 8, 2012, from <http://www.canacem.org.mx/canacem.htm>
- Charles, J. H. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Chávez García, H. L. (2011). *Análisis comparativo entre técnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterización del concreto hidráulico elaborado con agregados volcánicos locales y cemento CPC30R RS*. Morelia: CIDEM.
- CONCRETONLINE. (2011). *CONCRETONLINE*. Retrieved OCTUBRE 8, 2012, from [http://www.concretonline.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=736&Itemid=35](http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&task=view&id=736&Itemid=35)
- F. Puertas. (1993). Escorias de Alto Horno: composición y comportamiento hidráulico. *CSIC Avierto*, 37-47.
- Gaete, L. Y., & A., P. (2001). *medida de los parámetros acústicos en el sonido II*. España: Jornada iberoamericana en ultrasonido e imagen ultrasonica.



- González Benito, F. J. (2008, julio 11). *Open Course Ware*. Retrieved octubre 15, 2012, from Universida Carlos III de Madrid: [http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes\\_Introduccion\\_a\\_las\\_Tecnicas\\_de\\_Caracterizacion.pdf/view](http://ocw.uc3m.es/ciencia-e-oin/caracterizacion-de-materiales/material-de-clase-1/Apuntes_Introduccion_a_las_Tecnicas_de_Caracterizacion.pdf/view)
- Hamid, R., Yusof, K., & Zain, M. (2009). A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume. *Construction and Bulding Materials*(24), 94-98.
- Hornibrook, F. (1939). Aplication of Sonic Method to Freezing and Thawing Studies of Concrete. *ASTM Bull*(101), 5.
- INGENIERIA RURAL. (2001). *INGENIERIA RURAL*. Retrieved OCTUBRE 11, 2012, from [http://www.uclm.es/area/ing\\_rural/Trans\\_const/Tema9.pdf](http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf)
- Instituto Mundial del Carbón. (2005). *EL CARBÓN COMO RECURSO, una visión general del carbón*. Reino Unido: Instituto Mundial del Carbón.
- Instituto del concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades* (Tercera reimpresión ed.). Colombia: Asociacion colombiana de productores de concreto ASOCRETO.
- INSTRUMENTS, G. (2007). *GERMANN INSTRUMENTS, Test Smart-Build Right*. Retrieved octubre 25, 2012, from [http://www.germann.org/Articles/download\\_files/Spanish%20catalogs/LOK,%20CAPO%20&%20BOND%20%20-%20Spanish.pdf](http://www.germann.org/Articles/download_files/Spanish%20catalogs/LOK,%20CAPO%20&%20BOND%20%20-%20Spanish.pdf)
- Jones, R. (1962). *Non-Destructive Testing of Concrete*. London.: Cambridge University Press.
- Kewalramani, M. A., & Gupta, R. (2005). Concrete compressive strength prediction using ultrasonic velocity through artificial neural networks,. *Automat Construction*, 15(3), 374-9.
- Leslie, J. R., & Chesma, W. J. (1949). An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures. *ACI J. Proc*, 17.
- Malhotra, V. M. (1976). *Testing of Hardened Concrete: Nondestructive Methods*. Detroit, MI: ACI Monograph 9, American Concrete Institute.
- Malhotra, V. M., & Carino, C. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press.
- Materiales de Construcción*. (n.d.). Retrieved Octubre 11, 2012, from <https://sites.google.com/site/materialesdeconstrucion/>
- MICHAEL S. MAMLOUK, J. P. (2009). *MATERIALES PARA INGENIERIA CIVIL*. MADRID (ESPAÑA): PEARSON EDUCATION.
- Molina, M. J. (2008). *Teoría de la Equivalencia Global* (Vol. III). Molwik.



- Montalván Luna, R. I., Suárez Mora, D. L., & Téllez Linares, A. E. (2010). *Estudio y Aplicación Normativa en la Fabricación del Cemento*. México DF: IPN.
- MORTERO, A. N. (2003). *MORTEROS: GUIA GENERAL*. MADRID: AFAM.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. A. (2011). *Análisis de Materiales* (Tercera edición ed.). Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. México DF.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Neville, A., & Brooks, J. (1988). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO*. MEXICO D.F.: TRILLAS.
- NMX-C-061-ONNCCE-2010. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CEMENTO HIDRAULICO-DETRMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CEMENTATES HIDRAULICOS*. MÉXICO: ONNCCE.
- obert, L. (1938). Sonic Method of Determining the Modulus of Elasticity of Building Materials Under Pressure. *Proc. ASTM*(39), 987.
- ONNCCE. (2003, Diciembre). *IMCYC*. Retrieved OCTUBRE 8, 2012, from <http://www.imcyc.com/normas/414%20cimento%20hidraulico2.pdf>
- Pacifica, R. M. (2008). Evolucion reciente de la industria del cemento. *Portes*, 165-202.
- Powers, T. C. (1938). Measuring Youngs Modulus of Elasticity By Means of Sonic Vibration. *Proc. ASTM, II*(38), 460.
- Qixian, L., & Bungey, J. H. (1996). Using compression wave ultrasonic transducer to measure the velocity surface waves and hence determine dynamic modulus of elasticity for concrete. *Construction and Building Materials*, 10, 237.
- Sánchez de Guzmán, D. (2006). *CONCRETOS Y MORTEROS*. COLOMBIA: INSTITUTO DEL CONCRETO.
- Shetty, M. (2005). *Concrete Technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand Companu LTD.
- Solis, C. R., Moreno, E. I., & Castillo Pak, W. R. (2004, Agosto). Predicción de la resistencia del concreto con base a la velocidad de pulso ultrasonico y un indice de calidad de los agregados. *Ingenieria Revista Academica Universidad Autonoma de Yucatan*, 8(002), 41-52.
- Steven H. Kosmatka, B. K. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Mexico: Portland Cement Association.



Sturrump, V. R., Vecchio, F. J., & Caratin, H. (1984). pulse velocity as a measure of concrete compressive strengths. *nondestructive testing of concrete*, 201-227.

Ward, S. H. (1980). Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods. *Geophysics*, 1659-1666.

Whitehurst, E. A. (1966). Evaluation of Concrete Properties from Sonic Test. *ACI Monograph 2*, American Concrete Institute, 94.