



# **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.**

**Facultad de Ingeniería Civil.**

**Maestría en Infraestructura del Transporte en la Rama de  
las Vías Terrestres.**

**TESIS PROFESIONAL  
“INNOVACIÓN EN EL DISEÑO DE CONCRETO; EMPLEO DE  
PUZOLANAS PARA INCREMENTAR LA DURABILIDAD”**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:  
ING. MIGUEL ANGEL VILICAÑA CUPA**

**ASESOR(A):  
DOCTORA EN INGENIERÍA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN**

**COASESORES:  
DOCTOR EN INGENIERÍA JOSÉ TRINIDAD PÉREZ QUIROZ  
DOCTOR EN INGENIERÍA ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA**

**Morelia Michoacán, Septiembre del 2014.**





## Agradecimientos

A dios por permitirme alcanzar una meta tan importante en mi vida así como por estar siempre a mi lado cuidándome.

A mis padres Arturo Villicaña Villicaña y Serafina Felisa Cupa Flores, por regalarme la vida y por motivarme día a día a seguir adelante sin importar las situaciones difíciles y no darme por vencido.

A mis hermanos: Miriam, Araceli y José por todo su cariño y, por formar parte tan importante de mi vida,

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su apoyo en la realización del presente trabajo, su paciencia, su tiempo y su sugerencias en la dirección del mismo.

Al Dr. José Trinidad Pérez Quiroz. Por su apoyo incondicional para la realización del presente trabajo, por sus consejos y la motivación brindada.

Al Dr. Hugo Luis Chávez García, por su orientación, por brindarme su apoyo y amistad, y por toda la ayuda recibida de su persona para la realización del presente

A mis amig@s: José Eduardo Hernández Razo, Isaías Trujillo Calderón, Oscar Cuellar Martínez, Josué de Jesús García Chávez, Maybelin Carolina García Chiquito, Daniela Bocanegra Martínez, Elizabeth Contreras Marín, Arturo Zalapa Damián ya a todas aquellas personas que ayudaron en la elaboración de los especímenes de concreto para el presente trabajo.

A los amigos y compañeros Cipriano Bernabé Reyes, Tranquilino Francisco Martínez y Gabriel Rosemberg Jiménez, José Guadalupe Martínez Gonzales, así como a los jóvenes del Verano Nicolaita por su valiosa ayuda para la elaboración de las pruebas realizadas a los especímenes de concreto.

Al Ing. José Guiza, por su valioso apoyo con el fluidificante para la elaboración de las mezclas de concreto.

A la UMSNH, por permitirme realizar mis estudios profesionales.

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luís Silva Rúelas” de la U.M.S.N.H. por proporcionarme y las instalaciones y el equipo necesario para realización de este trabajo.

Al CONACYT: Por el apoyo económico para la realización de mis estudios de maestría.

A todas mis amigos y/o compañeros de quienes recibí ayuda o motivación para seguir adelante con mi trabajo de tesis y que sin querer omito en este agradecimiento.



## Índice

|                                                         |    |
|---------------------------------------------------------|----|
| Agradecimientos .....                                   | 2  |
| Índice de Figuras .....                                 | 5  |
| Índice de Gráficas .....                                | 8  |
| Índice de Tablas .....                                  | 8  |
| I. RESUMEN .....                                        | 11 |
| II. ABSTRACT .....                                      | 12 |
| III. JUSTIFICACIÓN.....                                 | 13 |
| IV. HIPÓTESIS.....                                      | 17 |
| V. OBJETIVOS.....                                       | 17 |
| VI. ALCANCES.....                                       | 17 |
| 1. MARCO TEÓRICO.....                                   | 18 |
| 1.1 CEMENTOS .....                                      | 18 |
| 1.1.1 Historia del cemento .....                        | 18 |
| 1.1.2 Proceso de fabricación del cemento Pórtland ..... | 20 |
| 1.1.3 Tipos de cementos y cementantes.....              | 21 |
| 1.2 CONCRETO.....                                       | 24 |
| 1.2.1 Tipos y usos .....                                | 24 |
| 1.2.2 Criterios de diseño .....                         | 27 |
| 1.2.3 Durabilidad del concreto.....                     | 29 |
| 1.2.4 Mecanismos y factores de degradación.....         | 31 |
| 1.2.5 Métodos de prevención .....                       | 38 |
| 1.3 Aditivos.....                                       | 40 |
| 1.3.1 Tipos y usos .....                                | 40 |
| 1.4 Puzolanas.....                                      | 41 |
| 1.4.1 Reacción de la puzolana .....                     | 42 |
| 1.4.2 Clasificación de las puzolanas .....              | 43 |
| 1.4.3 Tipos y usos de puzolanas .....                   | 44 |
| 1.5 Uso de las puzolanas como aditivo del cemento.....  | 51 |
| 1.6 Resistencia a cloruros y la EAH.....                | 52 |
| 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL .....                        | 54 |
| 2.1 Programa experimental.....                          | 54 |



|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2. 2 Materiales y equipo.....                                                                | 54  |
| 2.3 Pruebas realizadas a los agregados pétreos .....                                         | 63  |
| 2.4 Pruebas de caracterización de las puzolanas.....                                         | 64  |
| 2.5 Diseño de la mezcla.....                                                                 | 64  |
| 2.5.1 Método ACI. ....                                                                       | 65  |
| 2. 6 Cálculo .....                                                                           | 66  |
| 2.7 Elaboración de los espécimenes .....                                                     | 76  |
| 2.8. Elaboración de las mezclas.....                                                         | 78  |
| 2.9 Curado de los espécimenes (NMX-C-159-ONNCCE, 2004). ....                                 | 80  |
| 2.10 Pruebas no destructivas .....                                                           | 81  |
| 2.10.1 Prueba de Resistividad eléctrica .....                                                | 81  |
| 2.10.2 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico. ....                                        | 82  |
| 2.10.3 Métodos de frecuencias de resonancia .....                                            | 84  |
| 2.11 Pruebas destructivas .....                                                              | 87  |
| 2.11.1 Determinación de la resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto ..... | 87  |
| 2.11.2 Determinación de la resistencia a la tensión indirecta en cilindros de concreto ..... | 88  |
| 2.11.3 Determinación de la resistencia a la flexión en especímenes prismáticos .....         | 89  |
| 2.11.4 Resistencia al ataque por sulfatos (durabilidad).....                                 | 91  |
| 2.11.5 Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados . | 92  |
| 2.11.6 Estimación indirecta de la Porosidad del concreto .....                               | 93  |
| 2.12 Pruebas electroquímicas .....                                                           | 96  |
| 2.12.1 Medición de Potenciales .....                                                         | 96  |
| 2.12.2 Medida de la Velocidad de Corrosión .....                                             | 96  |
| 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....                                                             | 97  |
| 3.1 Caracterización de los agregados pétreos .....                                           | 97  |
| 3.1.1 Agregado fino (Arena) .....                                                            | 97  |
| 3.1.2 Agregado grueso (grava) .....                                                          | 102 |
| 3.1.3 Agregado fino (EAH) .....                                                              | 105 |
| 3.2 Pruebas no destructivas .....                                                            | 108 |
| 3.2.1 Resistividad eléctrica.....                                                            | 108 |
| 3.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico .....                                                   | 110 |
| 3.2.3 Frecuencia de resonancia.....                                                          | 112 |



|                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.2.4 Determinación del módulo de elasticidad dinámico utilizando la velocidad de pulso ultrasónico.....  | 114 |
| 3.2.5 Determinación del módulo de elasticidad utilizando el método de las Frecuencias de resonancia ..... | 115 |
| 3.3 Pruebas destructivas .....                                                                            | 116 |
| 3.3.1 Determinación de la resistencia a la compresión simple.....                                         | 116 |
| 3.3.2 Determinación de la resistencia a la tensión indirecta en cilindros .....                           | 116 |
| 3.3.3 Determinación de la resistencia a la flexión .....                                                  | 117 |
| 3.3.4 Resistencia al ataque por sulfatos.....                                                             | 118 |
| 3.3.5 Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados .               | 121 |
| 3.3.6 Estimación indirecta de la Porosidad .....                                                          | 124 |
| 3.4 Pruebas electroquímicas .....                                                                         | 126 |
| 3.4.1 Resistividad eléctrica.....                                                                         | 126 |
| 3.4.2 Medición de Potenciales .....                                                                       | 127 |
| 3.4.3 Densidad de corriente de Corrosión .....                                                            | 129 |
| 3.5 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) .....                                                        | 131 |
| 3.5.1 Puzolanas.....                                                                                      | 131 |
| 3.5.2 Mezclas de concreto .....                                                                           | 133 |
| CONCLUSIONES .....                                                                                        | 137 |
| 5. BIBLIOGRAFÍA.....                                                                                      | 139 |
| 6. ANEXOS .....                                                                                           | 150 |
| 7.1 Porosidad.....                                                                                        | 150 |
| 7.1.1 Ensayo de absorción capilar .....                                                                   | 150 |
| 7.2 Pruebas electroquímicas .....                                                                         | 151 |
| 7.2.1 Resistividad eléctrica.....                                                                         | 151 |
| 7.2.2 Diferencia de potencial .....                                                                       | 153 |
| 7.2.3 Velocidad de Corrosión .....                                                                        | 156 |

## Índice de Figuras

|                                                                                                                                         |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. Segmentos de poros capilares (Neville & Brooks, 2010). .....                                                                  | 33 |
| Figura 2. Modelo idealizado de cómo pueden inducirse las fisuras causadas por la reacción álcali-sílice (Segarra Foradada, 2005). ..... | 36 |
| Figura 3. Reacción puzolánica de la escoria (Newman & Choo, 2003). .....                                                                | 42 |



Figura 4. Elección del revenimiento y T.M.A. con ayuda de la hoja de cálculo (propia del autor)... 66

Figura 5. Calculo del agua necesaria para 1 m3 de concreto (Propia del autor). ..... 68

Figura 6. Calculo del f'c de diseño (Fcr) con ayuda de la hoja de cálculo (Propia del autor)..... 69

Figura 7. Calculo de la relación agua cemento con ayuda de la hoja de cálculo (Propia del autor). 69

Figura 8. Obtención del volumen de agregado grueso para la elaboración de 1m3 de concreto (Propia del autor). ..... 71

Figura 9. Calculo de los materiales para un número conocido de cilindros con ayuda de la hoja de cálculo (Propia del autor). ..... 76

Figura 10. Espécimen cilíndrico para realización de las pruebas de Rp y diferencia de potencial. (Propia del autor) ..... 78

Figura 11. Prueba de revenimiento en la mezcla de concreto fresco. (Propia del autor) ..... 79

Figura 12. Llenado de los especímenes cilíndricos de la mezcla Testigo. (Propia del autor)..... 79

Figura 13. Llenado de los especímenes prismáticos de la mezcla Testigo. (propia del autor) ..... 80

Figura 14. Curado de los especímenes de concreto elaborados con las diferentes mezclas de concreto, con y sin sustitución. (Propia del autor) ..... 81

Figura 15. Medición de la resistencia eléctrica un espécimen prismático de la mezcla EAH. (Propia del autor)..... 82

Figura 16. Medición de la velocidad de pulso ultrasónico en espécimen prismático de mezcla CBC. (Propia del autor) ..... 83

Figura 17. Realización de la prueba para determinar la frecuencia de resonancia en un espécimen prismático de EAH. (Propia del autor)..... 87

Figura 18. Prueba de compresión simple en un espécimen cilíndrico de la mezcla testigo. (Propia del autor)..... 88

Figura 19. Prueba de tensión indirecta en espécimen cilíndrico de la mezcla CBC. (Propia del autor) ..... 89

Figura 20. Prueba de flexión en espécimen prismático de la mezcla EAH. (Propia del autor) ..... 90

Figura 21. Especímenes de EAH sumergidos en la solución de sulfato. (Propia del autor) ..... 91

Figura 22. Secado de los especímenes hasta peso constante. (Propia del autor) ..... 91

Figura 23. Especímenes cilíndricos de concreto de las diferentes mezclas, dentro del congelador (primer ciclo). (Propia del autor)..... 92

Figura 24. Especímenes dentro del horno después de 24 horas de congelamiento (Primer ciclo). (Propia del autor) ..... 93

Figura 25. Realización del ensayo de absorción capilar. (Propia del autor)..... 94

Figura 26. Especímenes sumergidos para realización el ensayo de Absorción de agua. (Propia del autor)..... 95

Figura 27. Obtención del peso sumergido de una probeta con sustitución de EAH para realización del ensayo de porosidad total. (Propia del autor) ..... 95

Figura 28. Realización de la prueba para medir la diferencia de potencial. (Propia del autor)..... 96

Figura 29. Realización de la prueba de Resistencia a la Polarización (Rp), para posterior cálculo de la velocidad de corrosión, en espécimen con sustitución de EAH. (Propia del autor)..... 97

Figura 30. Prueba de colorimetría en la arena (CRUZ JIMÉNEZ, 2012)..... 99



Figura 31. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto, realizada a cilindros para la prueba de compresión. (Propia del autor) ..... 109

Figura 32. Resultados de resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto, realizada a cilindros para la prueba de tensión. (Propia del autor) ..... 109

Figura 33. Resultados de resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto, realizada a los prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor)..... 110

Figura 34. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenida en las diferentes mezclas, realizada a cilindros para la prueba de compresión. (Propia del autor) ..... 111

Figura 35. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenida en las diferentes mezclas, realizada a cilindros para la prueba de tensión. (Propia del autor) ..... 111

Figura 36. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos en las diferentes mezclas, realizada a prismas de para la prueba de flexión. (Propia del autor) ..... 112

Figura 37. Resultados de frecuencia de resonancia obtenida en las diferentes mezclas, realizada a prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor) ..... 113

Figura 38. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en cilindros para la prueba de compresión. (Propia del autor) ..... 114

Figura 39. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en cilindros de para la prueba de tensión. (Propia del autor) ..... 114

Figura 40. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor) ..... 115

Figura 41. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor) ..... 115

Figura 42. Resultados obtenidos de esfuerzo a la compresión en las diferentes mezclas, en cilindros. (Propia del autor)..... 116

Figura 43. Resultados obtenidos del esfuerzo a la tensión obtenido en las diferentes mezclas en cilindros. (Propia del autor)..... 117

Figura 44. Resultados obtenidos de esfuerzo a la flexión en las diferentes mezclas en prismas de concreto. (Propia del autor) ..... 117

Figura 45. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas, después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)..... 118

Figura 46. Velocidad de pulso ultrasónico en las diferentes mezclas obtenida después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)..... 119

Figura 47. Módulo de elasticidad dinámico obtenida en las diferentes mezclas después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)..... 119

Figura 48. Resistencia a la compresión en las diferentes mezclas obtenida después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)..... 120

Figura 49. Masa obtenida en las diferentes mezclas después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor) ..... 120

Figura 50. Especímenes cilíndricos de las diferentes mezclas de concreto después de 4 ciclos de inmersión en la solución de sulfato. (Propia del autor) ..... 121

Figura 51. Especímenes cilíndricos de las diferentes mezclas, después de 15 ciclos repetidos de congelamiento y deshielo. (Propia del autor)..... 123



Figura 52. Porcentaje de absorción total obtenida para cada mezcla de concreto. (Propia del autor) ..... 125

Figura 53. Porcentaje de porosidad total obtenida para cada mezcla de concreto. (Propia del autor) ..... 126

Figura 54. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto (espécimen 1 lado izquierdo, espécimen 2 lado derecho). (Propia del autor) ..... 127

Figura 55. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas (espécimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor) ..... 127

Figura 56. Diferencia de potencial eléctrica obtenida en las diferentes mezclas (espécimen 1 lado izquierdo, espécimen 2 lado derecho). (Propia del autor) ..... 128

Figura 57. Diferencia de potencial eléctrica obtenida en las diferentes mezclas (espécimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor) ..... 128

Figura 58. Densidad de corriente de corrosión obtenida en las diferentes mezclas (espécimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor)..... 130

Figura 59. Densidad de corriente de corrosión obtenida en las diferentes mezclas (espécimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor)..... 130

Figura 60. Forma de la partícula de la EAH (propia del autor)..... 132

Figura 61. Forma y tamaño de partícula de la CBC (propia del autor)..... 133

Figura 62. Microestructura de la mezcla de concreto Testigo. (Propia del autor) ..... 134

Figura 63. Microestructura de la mezcla de concreto con sustitución de EAH. (Propia del autor) 134

Figura 64. Microestructura de la mezcla de concreto con sustitución de CBC. (Propia del autor) 135

### Índice de Gráficas

Gráfica 1. Emisiones de CO2 en la fabricación del cemento (Cardim de Carvalho Filho, 2001) ..... 14

Gráfica 2. Producción de cemento en México del año 2000 al 2012. (canacem, 2012) ..... 14

Gráfica 3. Consumo de cemento en México del año 2000 al 2012. (canacem, 2012)..... 15

Gráfica 4. Consumo de azúcar en México (Periodo 1998-2007) (FOLICTH, 2007)..... 16

Gráfica 5. Origen de los problemas patológicos con relación a las etapas de producción y uso de las obras civiles (Neville & Brooks, 2010). ..... 30

Gráfica 6. Ley de evolución de los costos, ley de Sitter (Neville & Brooks, 2010). ..... 30

Gráfica 7. Muestra la relación de la diferencia de las masas en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo, para cada mezcla de concreto. (Propia del autor) ..... 124

### Índice de Tablas

Tabla 1. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). ..... 21

Tabla 2. Clasificación de los cementos hidráulicos (NMX C-414-ONNCCCE, 2004). ..... 23

Tabla 3. Tipos de cementos de acuerdo a la (ASTM C150 / C150M, 12). ..... 24

Tabla 4. Diferentes tipos de concretos especiales (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004). ..... 26



|                                                                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 5. Requisitos químicos de puzolanas (ASTM C618 - 12a).....                                                                                                                             | 44  |
| Tabla 6. Especificaciones y Clases de los Materiales Cementantes Suplementarios en los Estados Unidos. ....                                                                                  | 45  |
| Tabla 7. Materiales utilizados en la experimentación. ....                                                                                                                                   | 54  |
| Tabla 8. Equipo utilizado en la experimentación .....                                                                                                                                        | 56  |
| Tabla 9. Elección del T.M.A. ....                                                                                                                                                            | 67  |
| Tabla 10. Volumen de agregado grueso en base al módulo de finura. ....                                                                                                                       | 71  |
| Tabla 11. Resumen de características de los materiales a emplear (Propia del autor). ....                                                                                                    | 72  |
| Tabla 12. Volumen de material necesario para elaborar 1 m <sup>3</sup> de concreto. (Propia del autor) .....                                                                                 | 73  |
| Tabla 13. Cantidades de espécimenes elaborados para cada mezcla (propia del autor) .....                                                                                                     | 77  |
| Tabla 14. Resumen de características obtenidas en cada mezcla. ....                                                                                                                          | 80  |
| Tabla 15. Humedad actual en la arena. (Propia del autor) .....                                                                                                                               | 98  |
| Tabla 16. Humedad de absorción en la arena. (Propia del autor) .....                                                                                                                         | 99  |
| Tabla 17. Colorimetría en la arena. (CRUZ JIMÉNEZ, 2012) .....                                                                                                                               | 99  |
| Tabla 18. Densidad de la arena. (Propia del autor).....                                                                                                                                      | 100 |
| Tabla 19. Masa volumétrica seca suelta de la arena. (Propia del autor) .....                                                                                                                 | 101 |
| Tabla 20. Masa volumétrica seca varillada de la arena. (Propia del autor) .....                                                                                                              | 101 |
| Tabla 21. Composición granulométrica de la arena. (Propia del autor) .....                                                                                                                   | 102 |
| Tabla 22. Humedad actual en la Grava. (Propia del autor).....                                                                                                                                | 102 |
| Tabla 23. Humedad de absorción en la Grava. (Propia del autor).....                                                                                                                          | 103 |
| Tabla 24. Densidad de la Grava. (Propia del autor) .....                                                                                                                                     | 103 |
| Tabla 25. Masa volumétrica seca suelta de la Grava. (Propia del autor).....                                                                                                                  | 104 |
| Tabla 26. Masa volumétrica seca varillada de la Grava. (Propia del autor).....                                                                                                               | 104 |
| Tabla 27. Composición granulométrica de la Grava. (Propia del autor) .....                                                                                                                   | 105 |
| Tabla 28. Humedad actual en la EAH. (Propia del autor).....                                                                                                                                  | 105 |
| Tabla 29. Humedad de absorción en la EAH. (Propia del autor).....                                                                                                                            | 106 |
| Tabla 30. Densidad de la EAH. (Propia del autor) .....                                                                                                                                       | 106 |
| Tabla 31. Masa volumétrica seca suelta de la EAH. (Propia del autor).....                                                                                                                    | 107 |
| Tabla 32. Masa volumétrica seca varillada de la EAH. (Propia del autor).....                                                                                                                 | 107 |
| Tabla 33. Composición granulométrica de la EAH. (Propia del autor).....                                                                                                                      | 108 |
| Tabla 34. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Malhotra V. M., 1985).....                                                                                              | 112 |
| Tabla 35. Rangos aproximados de frecuencias de resonancia de espécimenes de concreto cilíndricos y prismáticos. (Jones, 1962).....                                                           | 113 |
| Tabla 36. Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto Vs Cu/CuSO <sub>4</sub> . (DURAR, 1998) .....                                                                          | 129 |
| Tabla 37. Resumen de resultados para las diferentes pruebas realizadas a las diferentes mezclas de concreto. (Propia del autor).....                                                         | 136 |
| Tabla 38. Relación de la diferencia de las masas en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo, para cada mezcla de concreto .....                                        | 150 |
| Tabla 39. Resultados de resistividad eléctrica obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 1 y 2. (Propia del autor) ..... | 151 |



Tabla 40. Resultados de resistividad eléctrica obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 3 y 4. (Propia del autor) ..... 152

Tabla 41. Resultados de diferencia de potencial obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 1 y 2. (Propia del autor) ..... 153

Tabla 42. Resultados de diferencia de potencial obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 3 y 4. (Propia del autor) ..... 154

Tabla 43. Resultados de intensidad de corriente de corrosión obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas, espécimen 1 y 2. (Propia del autor) ..... 156

Tabla 44. Resultados de velocidad de corrosión obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas, espécimen 3 y 4. (Propia del autor) ..... 157



## I. RESUMEN

El concreto es el producto resultante de la mezcla de un aglomerante (generalmente cemento) arena, grava y agua, que al fraguar y endurecer adquiere resistencia mecánica.

El concreto puede sufrir daños debido a agentes agresivos que están presentes en el medio ambiente, por lo que su durabilidad, se ve afectada; esto implicará el gasto de recursos destinados a mantenimiento y reparación.

En las últimas décadas se ha puesto atención a la durabilidad del concreto, ya que el comportamiento que han presentado las estructuras diseñadas bajo los criterios de resistencia no han sido los adecuados y por lo tanto se pretende disminuir costos que involucran la reparación y conservación de estas.

Se ha comprobado que para lograr que una estructura de concreto reforzado cubra su vida útil en condiciones óptimas de servicio, es indispensable considerar, además de un buen diseño por resistencia mecánica, un diseño por durabilidad.

Existen varios mecanismos que disminuyen la durabilidad del concreto, y con ello disminuye la vida útil de una estructura, como son las reacciones álcali-sílice, reacciones álcali-carbonato y ataques por sulfatos.

La tecnología del concreto ha intentado desarrollar metodologías adecuadas para mitigar el efecto de los agentes agresivos y asegurar la vida útil del concreto.

Algunas de las acciones que se han propuesto para asegurar la durabilidad del concreto son:

- Selección del cemento adecuado.
- Reducir la relación Agua/cemento (emplear un reductor de agua)
- Extender la granulometría con cemento puzolánico
- **Incorporar microsílice, cenizas, escorias, geopolímeros, aditivos etc.**

La utilización de puzolanas como aditivos en el concreto mejoran sus características físico-mecánicas.

Las puzolanas fueron ampliamente usadas en la antigüedad, antes de la invención del cemento portland, y se ha demostrado en varias investigaciones realizadas en México y en diversos países que las puzolanas de origen orgánico logran un mejor desempeño del concreto.

**Palabras clave:** Concreto, Durabilidad, Cenizas, Escoria.



## II. ABSTRACT

The concrete one is the resultant product of the mixture of a binder (generally cement) sand, gravel and water, which on having set and to harden acquires mechanical resistance.

The concrete one can suffer damages due to aggressive agents who are present in the environment, for what his permanence, one sees affected; this will imply the expense of resources destined for maintenance and repair.

In the last decades it has put on attention to the concrete durability on, since the behavior that there have presented the structures designed under the criteria of resistance they have not been the suitable ones and therefore one tries to diminish costs that involve the repair and conservation of these.

There has been verified that to achieve that a structure of I make concrete reinforced covers his useful life in ideal conditions of service, it is indispensable to consider, besides a good design for mechanical resistance, a design for durability.

There exist several mechanisms that diminish the permanence of the concrete one, and with it diminishes the useful life of a structure, since they are the alkali-silica reactions, alkali-carbonate reactions and sulphate attack.

The technology of the concrete one has tried to develop methodologies adapted to mitigate the effect of the aggressive agents and to assure the useful life of the concrete one.

Some of the actions that they have proposed to assure the durability of the concrete are:

- Selection of the suitable cement.
- The relation Reduces Water / cement (to use a water reducer)
- To extend the granulometry with pozzolanic cement
- To incorporate microsilica, ashes, slags, geopolymer, additives etc.

The utilization of pozzolans as additives in the concrete, improve their physicommechanical characteristics.

The pozzolans were widely used in the antique, before the invention of the cement Portland, and there has been demonstrated in several researches realized in Mexico and in diverse countries that the pozzolans of organic origin achieve a better performance of the concrete one.

**Keywords:** Concrete, Durability, Ash, Slag.



### III. JUSTIFICACIÓN

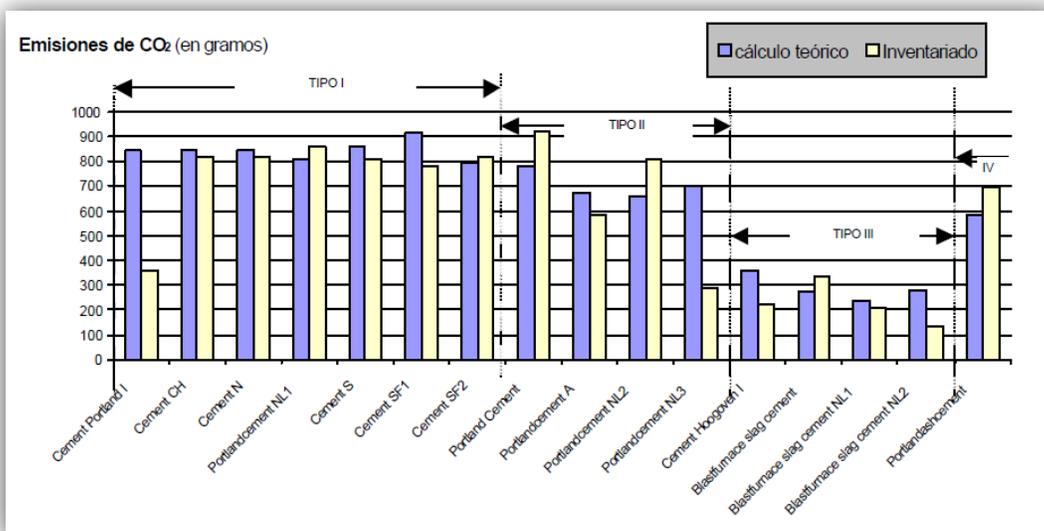
En los últimos veinte años el término “durabilidad” se ha escuchado con más frecuencia en la ingeniería civil. Países industrializados como EUA, algunos en Europa (España, Francia, Reino Unido) y Japón, la han tomado como tema de gran importancia, invirtiendo sumas millonarias en investigación.

En Latinoamérica un esfuerzo similar se realizó en 1997 al presentarse el reporte de la Red Temática Iberoamericana DURAR (1997), en el cual se expusieron algunos conceptos básicos sobre vida útil, evaluación, mantenimiento, reparación y/o rehabilitación de obras de concreto armado dañadas principalmente por corrosión de la armadura. La vida útil de una estructura se define como “el periodo de tiempo durante el cual la estructura conserva todas las características de funcionalidad, seguridad, resistencia y aspecto externo, con un nivel de seguridad suficiente” (Rangel López, y otros, 2006).

La durabilidad de una estructura de concreto es su capacidad para soportar, durante la vida útil para la que ha sido proyectada, las condiciones físicas y químicas a las que está expuesta, y que podrían llegar a provocar su degradación como consecuencia de efectos diferentes a las cargas y sollicitaciones consideradas en el análisis estructural (EHE-08).

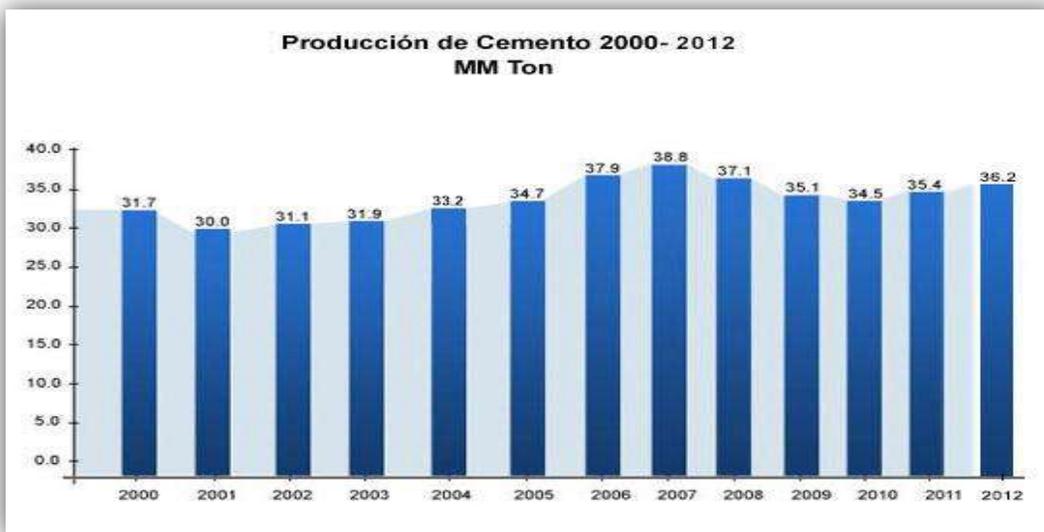
En general, es notable el incremento de la producción de cemento que han experimentado los países del tercer mundo en las últimas décadas. La producción global para el año 2005 se situó en 2,272 millones de toneladas, esto denota un crecimiento elevado y sostenido que se acompaña con el incremento en el impacto que se genera sobre el medio ambiente por las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Águila y Soso, 2008)

Las emisiones de CO<sub>2</sub> dependen del tipo de cemento, en otras palabras de la cantidad de clínker que tiene el cemento, ya que la aportación principal de CO<sub>2</sub> se produce en la fabricación del clínker. Para los cementos tipo I la emisión de CO<sub>2</sub> se sitúa en 800 gramos de CO<sub>2</sub> por kg de cemento (Gráfica 1), disminuyendo para los otros tipos de cementos en los que disminuye el contenido del clínker (Cardim de Carvalho Filho, 2001).

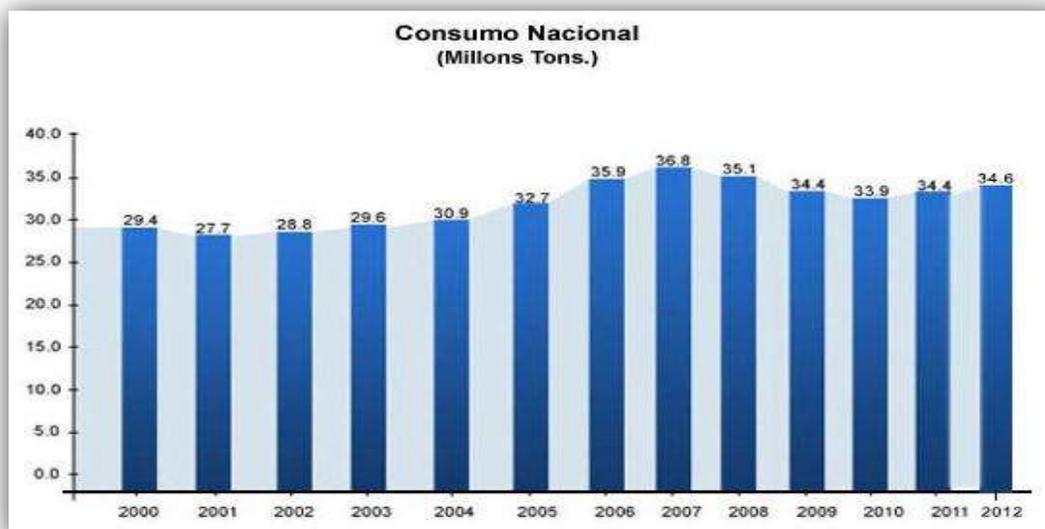


Gráfica 1. Emisiones de CO2 en la fabricación del cemento (Cardim de Carvalho Filho, 2001)

En México el consumo de cemento para 2012 fue de 295 kg/habitante, con una producción para ese mismo año de 36.2 millones de toneladas y un consumo de 34.6 millones de toneladas, como se observa en las gráficas 2 y 3 (canacem, 2012).



Gráfica 2. Producción de cemento en México del año 2000 al 2012. (canacem, 2012)



Gráfica 3. Consumo de cemento en México del año 2000 al 2012. (canacem, 2012)

El alto consumo de recursos naturales, energéticos y las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes comprometen las posibilidades futuras de utilización de este material.

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

Con el descubrimiento de nuevos compuestos se incrementaron considerablemente las posibilidades para reducir la proporción del cemento en la mezcla, sin afectar su resistencia, además de mejorar sus propiedades.

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

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

La utilización de residuos de origen orgánico (cenizas de bagazo de caña, cascarilla de arroz, carbón vegetal, aserrín, etc.), ricos en sílice y alúmina, en la producción de las mezclas de concreto trae beneficios para el medio ambiente, ya que contribuye a reducir un volumen importante de emisiones de CO<sub>2</sub>, el uso de estos subproductos agroindustriales

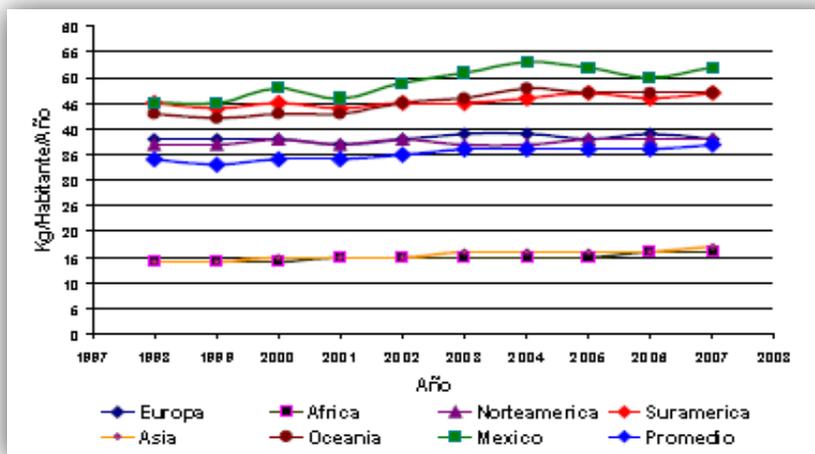


permitirá reducir sustancialmente una parte importante de la producción de cemento (S. Marquez-Montero Et Al, 2010; Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004; Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

### Producción de CBC (subproducto agroindustrial)

México es el quinto lugar a nivel mundial en producción de caña, en el periodo 2008-2009 se incendiaron en la industria mexicana 10 millones de toneladas de bagazo de caña (Hernández-Toledo, Montes-García, & Caballero-Aquino, 2010).

La importancia de la caña de azúcar en el sector agrícola durante el periodo 2000-2011, fue de 18 mil 550 millones de pesos, y en 2011 su valor máximo es de 29 mil 051 millones de pesos. La superficie cosechada ascendió a 673 mil hectáreas en la zafra 2010/2011, participando con el 3.3% del total nacional en el año agrícola 2010; en ese periodo se produjeron 44 millones 131 mil 570 toneladas que fueron transformadas en azúcar y alcohol (economia.gob.mx) (Gráfica 4).



Gráfica 4. Consumo de azúcar en México (Periodo 1998-2007) (FOLICTH, 2007)

En México, cifras de la Unión Nacional de Cañeros reportan que en el periodo 2010-2011 se produjeron aproximadamente 44 millones de toneladas de caña de azúcar y se incineraron aproximadamente 12.8 millones de toneladas de bagazo de caña, generando cerca de **350 mil toneladas anuales de ceniza de bagazo de caña (CBC)**, la cual es desechada en gran parte a la intemperie, generando por consecuencia un problema ambiental.



Se tienen localizados cuatro ingenios azucareros en el estado de Michoacán, México, el primero está en el municipio de Tacámbaro, el segundo en el municipio de Tocumbo, el tercero en el municipio de Taretan y el cuarto en el municipio de Los Reyes.

Por lo descrito anteriormente y observando las cantidades producidas de algunos de estos residuos agroindustriales (por ejemplo la CBC), se puede justificar el uso de esta en la elaboración de concreto.

#### **IV. HIPÓTESIS**

Es factible incrementar la durabilidad de las estructuras de concreto adicionando materiales puzolánicos como la Ceniza de Bagazo de Caña (CBC) y la Escoria de Alto Horno (EAH).

#### **V. OBJETIVOS**

##### **General**

- Evaluar el comportamiento del concreto adicionado con materiales puzolánicos frente al ataque del medio ambiente.

##### **Particulares**

- Diseñar un concreto hidráulico durable, incorporando materiales puzolánicos (CBC y EAH).
- Determinar las propiedades físicas, mecánicas y químicas del concreto adicionado con materiales puzolánicos.
- Reducir el consumo de cemento portland en la mezcla de concreto para disminuir su costo de elaboración.

#### **VI. ALCANCES**

- Fabricar un concreto durable, el cual contendrá materiales puzolánicos (CBC y EAH).
- Estudiar el comportamiento de diferentes materiales puzolánicos (CBC y EAH), al ser incorporado como sustitución a las mezclas de concreto hidráulico para la construcción.



## 1. MARCO TEÓRICO

### 1.1 CEMENTOS

El cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad (NMX C-414-ONNCCE, 2004).

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004), que es producido por la cocción a una fusión parcial, a una temperatura de aproximadamente 1500° C (Newman & Choo, 2003). Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada piedra machacada, pedrejón u otro material granular), la pasta actúa como un adhesivo y une los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado en el mundo (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

#### 1.1.1 Historia del cemento

Los constructores antiguos usaban la arcilla para unir piedras para formar una estructura sólida de protección. El concreto más antiguo descubierto data de cerca de 7000 AC y fue encontrado en 1985, cuando se destapó un piso de concreto durante la construcción de una carretera en Yiftah El, en Galilea, Israel. Éste consiste en un concreto de cal, preparado con caliza calcinada para producir cal rápida (cal viva, cal virgen), la cual al mezclarse con el agua y piedra, se endureció formando el concreto (Brown, 1996) .

2500 años antes de Cristo, se empleó un material cementante entre los bloques de piedras en la construcción de la gran pirámide en Giza, en el Egipto antiguo. Algunos informes dicen que era un mortero de cal, mientras que otros dicen que el material cementante se produjo por quemar sulfato de calcio. 500 años antes de Cristo, el arte de la producción de morteros a base de cal llegó a la Grecia antigua. Los griegos usaban materiales a base de cal como aglomerantes (conglomerantes) entre piedras y ladrillos y como material para una



capa de revestimiento de calizas porosas normalmente usadas en la construcción de sus templos y palacios.

Fueron encontrados ejemplos del concreto del antiguo imperio romano, que datan de 300 años antes de Cristo. La palabra concreto se deriva del latín “concretus”, que significa crecido junto o compuesto. Los romanos perfeccionaron el uso de puzolanas como material cementante. En algún momento del siglo II antes de Cristo, los romanos extrajeron cenizas volcánicas cerca de Pozzuoli; pensando que era arena, la mezclaron con cal y descubrieron que la mezcla era mucho más resistente que las que se produjeron anteriormente. El descubrimiento tuvo un efecto importante en la industria de la construcción. El material no era arena, sino una ceniza volcánica fina, conteniendo sílice y alúmina, las cuales combinadas químicamente con la cal, producen lo que se llama cemento puzolánico.

Los constructores de los famosos muros de Roma, acueductos y otras estructuras históricas, incluyendo el teatro en Pompeya (con capacidad para 20,000 espectadores), el Coliseo y el Panteón en Roma usaron este material. Parece que la puzolana fue ignorada durante la edad media, cuando las prácticas de construcción eran mucho menos refinadas que las antiguas y la calidad de los materiales cementantes deteriorada. La práctica de calcinación de la cal y el uso de puzolanas no se usó nuevamente hasta el siglo XIV.

No se hicieron esfuerzos hasta el siglo XVIII para determinarse porqué algunas calces poseían propiedades hidráulicas mientras que otras (aquellas producidas de calizas fundamentalmente puras) no las poseían. John Smeaton concentró su trabajo en este campo. Descubrió que las calizas impuras y blandas, conteniendo materiales arcillosos, producían los mejores cementos hidráulicos. Él empleó este cemento combinado con la puzolana, importada de Italia, en su proyecto para la reconstrucción del faro de Eddystone, en el Canal de la Mancha, al sudoeste de Plymouth, Inglaterra. Se ha reconocido esta obra como una importante realización en el desarrollo de la industria del cemento. Un gran número de descubrimientos se siguieron en la industria del cemento natural, provenientes de los esfuerzos direccionados para la producción de un material de calidad consistente (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

El desarrollo del cemento portland es el resultado de la investigación persistente de la ciencia y la industria para producir un cemento natural de calidad superior. La invención del cemento portland se atribuye normalmente a Joseph Aspdin, un albañil inglés. En 1824, obtuvo la patente para este producto, al cual lo denominó cemento portland pues producía un concreto con color semejante a la caliza natural que se explotaba en la isla de Portland en el Canal de la Mancha. Este nombre permanece hasta hoy y se usa en todo el mundo, con la adición de las marcas y nombres comerciales de sus productores (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de



ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Joseph Aspdin no fue el primero en producir un cemento de silicato de calcio, pero su patente le dio la prioridad para el uso del término "Cemento Portland". Otros trabajadores fueron activos al mismo tiempo o antes, destaca Louis Vicat en Francia (Newman & Choo, 2003).

Aspdin fue el primero en prescribir una fórmula para el cemento portland y el primero en patentarlo. Sin embargo, en 1845, I. C. Johnson, de White and Sons, Swanscombe, Inglaterra, afirmó que había “quemado el cemento crudo con una temperatura extraordinariamente alta hasta que la masa casi se vitrificó”, produciendo un cemento portland como ahora lo conocemos. Este cemento se volvió la elección popular en la mitad del siglo XIX y se exportó de Inglaterra para varias partes del mundo. La producción también empezó en Bélgica, Francia y Alemania aproximadamente en el mismo periodo y la exportación de estos productos de Europa para los Estados Unidos comenzó en 1865. El primer embarque de cemento portland para los EU fue en 1868. El primer cemento portland producido en EU se fabricó en una planta en Coplay, Pensilvania, en 1871. La producción de cemento en Latinoamérica empezó al final del siglo XIX y principio del siglo XX: 1888 en Brasil, 1897 en Guatemala, 1898 en Cuba, 1903 en México, 1907 en Venezuela, 1908 en Chile, 1909 en Colombia, 1912 en Uruguay, 1916 en Perú, 1919 en Argentina, 1923 en Ecuador, 1926 en Paraguay, 1928 en Bolivia y recientemente en 1936 en Puerto Rico, 1941 en Nicaragua y 1949 en El Salvador (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

En México a principios del siglo XX fue cuando se empezó 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 (Pacífica, 2008).

### 1.1.2 Proceso de fabricación del cemento Pórtland

El cemento portland se produce por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos



aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio (CaO), sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), hierro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Durante la fabricación, se hace análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizar una calidad alta y uniforme del cemento.

Las materias primas seleccionadas (Tabla 1) se transportan de la cantera, se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada.

**Tabla 1. Fuentes de las Materias Primas Usadas y la Fabricación del Cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).**

| <b>Cal, CaO</b>            | <b>Hierro Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>Sílice SiO<sub>2</sub></b> | <b>Alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>Yeso o Sulfato, CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O</b> |
|----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| Desechos industriales      | Polvo de humo de horno de fundición       | Silicato de calcio            | Mineral de aluminio*                       | Anhidrita                                               |
| Aragonita*                 | Arcilla*                                  | Roca calcárea                 | Bauxita                                    | Sulfato de calcio                                       |
| Calcita*                   | Mineral de hierro*                        | Arcilla*                      | Roca calcárea                              | Yeso*                                                   |
| Polvo del horno de cemento | Costras de laminado*                      | Ceniza volante                | Arcilla*                                   |                                                         |
| Roca calcárea              | Lavaduras de mineral                      | Greda                         | Escoria de cobre                           |                                                         |
| Creta                      | Lavaduras de mineral                      | Caliza                        | Ceniza volante*                            |                                                         |
| Arcilla                    | Cenizas de piritita                       | Loes                          | Greda                                      |                                                         |
| Greda                      | Esquisto                                  | Marga*                        | Granodiorita                               |                                                         |
| Caliza*                    |                                           | Lavaduras de mineral          | Caliza                                     |                                                         |
| Mármol                     |                                           | Cuarcita                      | Loes                                       |                                                         |
| Marga*                     |                                           | Ceniza de arroz               | Lavaduras de mineral                       |                                                         |
| Coquilla                   |                                           | Arena*                        | Esquisto*                                  |                                                         |
| Esquisto*                  |                                           | Arenisca                      | Escoria                                    |                                                         |
| Escoria                    |                                           | Esquisto*                     | Estauroлита                                |                                                         |
|                            |                                           | Escoria                       |                                            |                                                         |
|                            |                                           | Basalto                       |                                            |                                                         |

Nota: Muchos subproductos industriales tienen potencial como materia prima para la producción del cemento Portland.

\* Las fuentes más comunes

### 1.1.3 Tipos de cementos y cementantes

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 (Neville A. M., 1999).

Los aglutinantes o cementantes son materiales que mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica. Las cuales pueden ser cal, cemento, yeso, arcilla (Rivera Flores., “Morteros de albañilería para



restauración, como aditivo miel de abeja”. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, págs. 5-22., 2002), escoria granulada de alto horno molida, cemento natural, y combinaciones de estos y de otros materiales (Hernández Toledo, 2010.), sustancias o materiales que sirven para aglomerar, adherir, unir, etc. De acuerdo con sus características proporcionan al concreto resistencia, tiempo de fraguado, durabilidad y economía diferentes (Rivera Flores., “Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja”. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, págs. 5-22., 2002).

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).

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permite la unión de fragmentos minerales y entre sí, formando un todo compacto. En la construcción se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico que se denomina cemento portland, debido a que es el más común. El cemento portland es una mezcla de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, presentándose un proceso de reacción química que se conoce como hidratación (Instituto del concreto:, 1997).

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

La clasificación de los tipos de cemento (Tabla 2) esta proporcionada por la norma NMX-C-414-ONNCE-2010, estos son los que se utilizan en la industria de la construcción en México para las distintas obras, la cual establece lo siguiente (IMCYC, imcyc.com., 2012):



Tabla 2. Clasificación de los cementos hidráulicos (NMX C-414-ONNCCE, 2004).

| Tipo | Denominación                                         | Clase Resistente | Características especiales              |
|------|------------------------------------------------------|------------------|-----------------------------------------|
| CPO  | Cemento Portland Ordinario                           | 20               | RS<br>Resistente a los sulfatos         |
| CPP  | Cemento Portland Puzolánico                          | 30               | BRA<br>Baja reactividad álcali agregado |
| CPEG | Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno | 30R              | BCH<br>Bajo calor de hidratación        |
| CPC  | Cemento Portland Compuesto                           | 40               | B Blanco                                |
| CPS  | Cemento Portland con Humo de Sílice                  | 40R              |                                         |
| CEG  | Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno          |                  |                                         |

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**

Además de estos cementos, aún están disponibles en el mercado mexicano, el cemento para servicios de albañilería y el cemento para cementaciones de pozo de petróleo tipo G (según la norma NMX – C – 315) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

La ASTM C 150/C150M-12, Especificaciones de Norma para el Cemento Portland, designa los siguientes tipos de cemento, usando los números romanos (Tabla 3), como sigue:



Tabla 3. Tipos de cementos de acuerdo a la (ASTM C150 / C150M, 12).

| 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                                                  |

## 1.2 CONCRETO

El concreto es, por definición, un material o compuesto, consistiendo básicamente en un medio aglomerante (aglutinante) y partículas de agregado y puede tomar varias formas (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Es una mezcla de un material aglutinante (normalmente cemento Portland Hidráulico), un material de relleno (agregados), agua y eventualmente aditivos que al endurecerse forman un sólido compacto que después de cierto tiempo es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión (Instituto del concreto., 1997).

### 1.2.1 Tipos y usos

En general existen tres tipos de concretos, los convencionales, los de alto desempeño y los concretos especiales. En seguida se describen los diferentes tipos:

**Concreto convencional:** Son concretos que poseen la capacidad de endurecer con el tiempo y adquirir características que lo hacen de uso común en la construcción. En estado fresco permite el tiempo suficiente de manejabilidad. Se subdivide en tres tipos:



- De 5 kg/cm<sup>2</sup> a 70 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizan para mejoramiento de suelos.
- De 105 kg/cm<sup>2</sup> a 210 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizan en obras menores.
- De 245 kg/cm<sup>2</sup> a 385 kg/cm<sup>2</sup>, se utilizan en elementos estructurales (CEMEX).

**Concreto de alto desempeño:** El concreto de alto desempeño (CAD) supera las propiedades y la constructibilidad del concreto convencional. Para producir estos concretos especialmente diseñados, se usan materiales normales y especiales y pueden ser necesarias prácticas especiales de mezclado, colocación (colado) y curado. Normalmente, un gran número de pruebas de desempeño es necesario para demostrar la satisfacción de las necesidades específicas del proyecto. El concreto de alto desempeño está siendo usado principalmente en túneles, puentes y edificios altos debido a su resistencia, durabilidad y alto módulo de elasticidad. También se puede utilizar en reparaciones de concreto (concreto lanzado), postes, garajes y aplicaciones agrícolas.

Las características del concreto de alto desempeño se desarrollan para aplicaciones y ambientes particulares. Algunas de las propiedades que se pueden requerir incluyen:

- Alta resistencia
- Alta resistencia inicial
- Alto módulo de elasticidad
- Alta resistencia a abrasión
- Alta durabilidad y larga vida útil en ambientes severos
- Baja permeabilidad y difusión
- Resistencia al ataque químico
- Alta resistencia a la congelación y a los daños causados por las sales de deshielo
- Tenacidad y resistencia al impacto
- Estabilidad de volumen
- Fácil colocación
- Compactación sin segregación
- Inhibición del crecimiento de bacterias y moho

El concreto de alto desempeño casi siempre tiene mayor resistencia que el concreto normal. Sin embargo, la resistencia no siempre es la principal propiedad requerida. Por ejemplo, un concreto con resistencia normal con durabilidad bien alta y baja permeabilidad se considera con propiedades de alto desempeño.



**Concretos especiales:** Concretos especiales son aquéllos que tienen propiedades no ordinarias o aquéllos producidos por técnicas poco comunes.

La Tabla 4 lista varios concretos especiales producidos con cemento portland y algunos elaborados con otros tipos de aglutinante.

Tabla 4. Diferentes tipos de concretos especiales (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

| Algunos tipos de concreto producidos con cemento portland |                                         |                                    |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|
| Concreto Aislante                                         | Concreto con revenimiento cero          | Concreto modificado por látex      |
| Concreto arquitectónico                                   | Concreto con vermiculita                | Concreto modificado por polímero   |
| Concreto auto-compactante                                 | Concreto de alta resistencia            | Concreto para blindaje             |
| Concreto blanco                                           | Concreto de alta resistencia inicial    | Concreto para clavar               |
| Concreto celular de autoclave                             | Concreto de alto desempeño              | Concreto para relleno              |
| Concreto ciclópeo                                         | Concreto de baja densidad               | Concreto para tubo embudo (tremie) |
| Concreto colado por centrifuga                            | Concreto de contracción compensada      | Concreto poroso                    |
| Concreto coloidal                                         | Concreto de gran peso                   | Concreto pre-empacado              |
| Concreto coloreado                                        | Concreto de polvo reactivo              | Concreto premoldeado               |
| Concreto compactado con rodillo                           | Concreto empacado a seco                | Concreto reciclado                 |
| Concreto con agregado de aserrín                          | Concreto estampado                      | Concreto reforzado con fibras      |
| Concreto con agregado expuesto                            | Concreto fluido                         | Concreto superplastificado         |
| Concreto con agregado pre-colado                          | Concreto con geopolímero                | Concreto tratado al vacío          |
| Concreto con ceniza volante                               | Concreto lanzado                        | Ferrocemento                       |
| Concreto con granulometría discontinua                    | Concreto ligero de resistencia moderada | Relleno de densidad controlada     |
| Concreto con humo de sílice                               | Concreto ligero estructural             | Relleno fluido                     |
| Concreto con puzolana                                     | Concreto masivo                         | Suelo-cemento                      |
| Concreto sin revenimiento                                 | Concreto modificado por epóxi           | Terrazo                            |
| Algunos tipos de concreto que no usan cemento portland    |                                         |                                    |
| Concreto acrílico                                         | Concreto de fosfato de magnesio         | Concreto de silicato de sodio      |
| Concreto asfáltico                                        | Concreto de látex                       | Concreto de yeso                   |
| Concreto de aluminato de calcio                           | Concreto de metacrilato de metilo (MMA) | Concreto epóxico                   |
| Concreto de azufre                                        | Concreto de poliéster                   | Concreto furano                    |
| Concreto de fosfato de aluminio                           | Concreto de silicato de potasio         | Concreto polimérico                |



### 1.2.2 Criterios de diseño

El proceso de determinación de las características requeridas del concreto y que se pueden especificar se llama diseño de mezcla. Las características pueden incluir: Propiedades del concreto fresco, propiedades mecánicas del concreto endurecido y la inclusión, exclusión o límites de ingredientes específicos. El diseño de la mezcla lleva al desarrollo de la especificación del concreto.

El proporcionamiento (dosificación) de la mezcla se refiere al proceso de determinación de las cantidades de los ingredientes del concreto, usando materiales locales, para que se logren las características específicas. Un concreto adecuadamente proporcionado debe presentar las siguientes cualidades:

- Trabajabilidad aceptable del concreto fresco
- Durabilidad, resistencia y apariencia uniforme del concreto endurecido
- Economía

Es importante el entendimiento de los principios básicos del diseño de mezclas, tales como los cálculos usados para establecer las proporciones de la mezcla. Las cualidades citadas arriba se pueden alcanzar en las construcciones en concreto sólo con la selección adecuada de los materiales y de las características de la mezcla (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

#### **Selección de las características de la mezcla**

Antes que se puedan determinar las proporciones de la mezcla, se seleccionan sus características considerando el uso que se propone dar al concreto, las condiciones de exposición, tamaño y forma de los elementos y las propiedades físicas del concreto (tales como resistencia a la congelación y resistencia mecánica) requeridas para la estructura. Las características deben reflejar las necesidades de la estructura, por ejemplo, se debe verificar la resistencia a los iones cloruro y se deben especificar los métodos de ensayos apropiados.

Después que se hayan elegido las características, se puede proporcionar (dosificar) la mezcla a partir de datos de campo o de laboratorio. Como la mayoría de las propiedades deseadas en el concreto endurecido dependen principalmente de la calidad de la pasta cementante, la primera etapa para el proporcionamiento del concreto es la elección de la relación agua-material cementante (ligante) apropiada para la resistencia y durabilidad necesarias.



## **Resistencia y Relación Agua-Material Cementante**

La resistencia (compresión o flexión) es el indicador de la calidad del concreto más universalmente utilizado. A pesar de ser una característica importante, otras propiedades, tales como durabilidad, permeabilidad y resistencia al desgaste se reconocen hoy en día como de igual importancia o, en algunos casos, de mayor importancia, especialmente cuando se considera la vida útil de la estructura.

Dentro del intervalo normal de resistencias usadas en la construcción de concreto, la resistencia es inversamente proporcional a la relación agua-cemento o agua-material cementante (ligante). Para concretos totalmente compactados, producidos con agregados limpios y sanos, la resistencia y otras propiedades requeridas del concreto, bajo las condiciones de obra, se gobiernan por la cantidad del agua de mezcla usada por unidad de cemento o material cementante.

La resistencia de la pasta cementante en el concreto depende de la calidad y de la cantidad de componentes reactivos en la pasta y de su grado de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el tiempo, siempre que la temperatura y la humedad disponibles sean adecuadas. Por lo tanto, la resistencia en cualquier edad está en función tanto de la relación agua-material cementante original y del grado de hidratación del material cementante. La importancia del curado temprano y minucioso se reconoce fácilmente.

## **Agua-Material Cementante**

La relación agua-material cementante (ligante) es simplemente la masa del agua dividida por la masa del material cementante (cemento Portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales). La relación agua-material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir las condiciones de exposición. Cuando la durabilidad no es el factor que gobierne, la elección de la relación agua-material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión. En estos casos, la relación agua-material cementante y las proporciones de la mezcla para la resistencia requerida se deben basar en datos de campo adecuados o en mezclas de prueba que empleen los materiales de la obra, a fin de que se determine la relación entre la resistencia y la relación agua-material cementante (ligante).

En el diseño de mezclas, la relación agua-material cementante,  $a/mc$ , se usa frecuentemente como sinónimo de la relación agua-cemento ( $a/c$ ). Sin embargo, algunas especificaciones diferencian las dos relaciones. Tradicionalmente, la relación agua-cemento se refiere a la relación agua-cemento portland o agua-cemento adicionado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).



Con lo anterior se pueden distinguir dos criterios de diseño, por resistencia y por durabilidad. Siendo el factor común la relación agua/material cementante (Arreola Sánchez, 2013).

### 1.2.3 Durabilidad del concreto

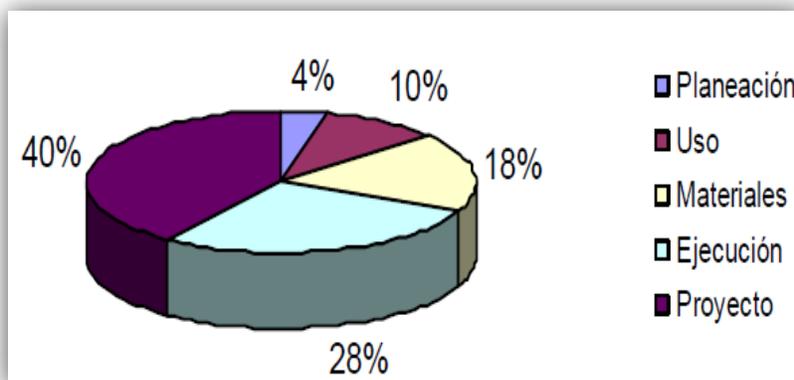
El concreto de cemento Portland ha probado ser el material de construcción más adecuado para las estructuras, superando con grandes ventajas otras alternativas viables, como madera, acero o mampostería.

Desde los inicios del empleo del concreto armado, a mediados del siglo XIX, los edificios, las obras de arte, las carreteras, los canales, las presas y tantas otras construcciones civiles en concreto simple, armado o pretensado han resistido las más variadas sobrecargas y acciones del medio ambiente.

No obstante, el concreto pudiera ser considerado un material prácticamente eterno - siempre que reciba un mantenimiento sistemático y programado - hay construcciones que presentan manifestaciones patológicas de significativa intensidad e incidencia, acompañadas de elevados costos para su rehabilitación. Siempre hay disputa de los aspectos estéticos y en la mayoría de los casos, reducción de la capacidad resistente, pudiendo llegar en ciertas situaciones, al colapso parcial o total de la estructura.

Los problemas patológicos sólo se manifiestan durante la construcción o después de la ejecución propiamente dicha, última etapa de la fase de producción. Normalmente ocurren con mayor incidencia en la etapa de uso.

Un elevado porcentaje de las manifestaciones patológicas tiene origen en las etapas de planeamiento y proyecto, como se muestra en la Gráfica 5. Las fallas de planeamiento y proyecto son en general más graves que las fallas de calidad de los materiales o de mala ejecución. Es siempre preferible invertir más tiempo en el detalle del diseño de la estructura, que por falta de previsión, tomar decisiones apresuradas y adaptadas durante la ejecución.



Gráfica 5. Origen de los problemas patológicos con relación a las etapas de producción y uso de las obras civiles (Neville & Brooks, 2010).

Dividiendo las etapas constructivas y de uso en cuatro períodos, correspondientes al diseño, ejecución, mantenimiento preventivo efectuado antes de los cinco primeros años, y mantenimiento correctivo efectuado posterior al surgimiento de los problemas, a cada uno corresponderá un costo que sigue una progresión geométrica de razón cinco, presentado en la Gráfica 6.



Gráfica 6. Ley de evolución de los costos, ley de Sitter (Neville & Brooks, 2010).

Una interpretación adecuada de cada uno de estos períodos o etapas de obra puede ser la que sigue:

**Proyecto:** toda medida tomada en el ámbito de diseño con el objetivo de aumentar la protección y durabilidad de la estructura, por ejemplo, aumentar el espesor del recubrimiento de la armadura, reducir la relación agua / cemento del concreto, especificar



tratamientos protectores superficiales, escoger detalles constructivos adecuados, especificar cementos, aditivos y adiciones con características especiales y otras, implica un costo que se puede asociar al número 1 (uno).

**Ejecución:** toda medida fuera del proyecto, tomada durante la ejecución propiamente dicha, incluyendo en ese período la obra recién construida, implica un costo 5 (cinco) veces superior al costo que se hubiese ocasionado si esta medida hubiera sido tomada en el ámbito de diseño, para lograr el mismo “grado” de protección y durabilidad de la estructura.

**Mantenimiento preventivo:** toda medida tomada con antelación y previsión, durante el periodo de uso y mantenimiento de la estructura, puede ser asociada a un costo 5 (cinco) veces menor que aquel necesario para la corrección de los problemas generados a partir de una intervención no prevista tomada ante una manifestación explícita e irreversible de patología. Al mismo tiempo estará asociada a un costo 25 (veinticinco) veces superior a aquel que habría ocasionado una decisión de proyecto para la obtención del mismo “grado” de protección y durabilidad de la estructura.

**Mantenimiento correctivo:** corresponde a los trabajos de diagnóstico, pronóstico, reparación y protección de las estructuras que ya presentan manifestaciones patológicas, o sea, corrección de problemas evidentes. A estas actividades se les puede asociar un costo 125 (ciento y veinticinco) veces superior al costo de las medidas que podrían haber sido tomadas en el ámbito de proyecto y que redundarían en un mismo “grado” de protección y durabilidad que se estime de la obra a partir de la corrección (Helene & Pereira, 2003).

La durabilidad del concreto es una de sus propiedades más importantes porque el concreto debe ser capaz de soportar las condiciones para las que ha sido diseñado a lo largo de la vida de una estructura.

#### 1.2.4 Mecanismos y factores de degradación

La falta de durabilidad puede ser causada por agentes externos derivados del medio ambiente o por los agentes internos dentro del concreto. Las causas pueden ser clasificadas como físicas, mecánicas y químicas.

Las causas físicas surgen de la acción de las heladas y de las diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento, mientras que las causas mecánicas están asociadas principalmente a la abrasión.

Las causas químicas: ataque por sulfatos, ácidos, agua de mar, y también por los iones cloruro, que inducen la corrosión del acero de refuerzo. Dado que este ataque se lleva a



cabo dentro de la masa de concreto, el agente atacante debe ser capaz de penetrar en todo el concreto, que por consiguiente tiene que ser permeable. La permeabilidad es, por lo tanto, de interés crítico. El ataque se favorece por el transporte interno de los agentes por difusión debido a gradientes internos de la humedad y de la temperatura y por ósmosis (Neville & Brooks, 2010).

### **Permeabilidad:**

La permeabilidad es la facilidad con que los líquidos o gases pueden viajar a través del concreto. Esta propiedad es de interés en relación a la estanqueidad al agua de las estructuras de retención de líquido y al ataque químico.

Aunque no hay pruebas prescritas por la norma ASTM, la permeabilidad del concreto se puede medir por medio de una prueba de laboratorio, pero los resultados son cualitativos.

La permeabilidad del concreto al aire u otros gases es de interés en estructuras tales como tanques de aguas residuales y purificadores de gas, y en recipiente a presión en los reactores nucleares. Para el concreto hecho con agregado habitual de peso normal, la permeabilidad se rige por la porosidad de la pasta de cemento, pero la relación no es simple ya que la distribución de tamaño de poro es un factor importante. Por ejemplo, a pesar de que la porosidad del gel de cemento es de 28 por ciento, su permeabilidad es muy baja, debido a la extremadamente fina textura del gel y el tamaño muy pequeño de los poros del gel. La permeabilidad de la pasta de cemento hidratado en su conjunto es mayor debido a la presencia de grandes poros capilares, y, de hecho, su permeabilidad es generalmente una función de la porosidad capilar. Ya que la porosidad capilar está gobernada por la relación agua / cemento y por el grado de hidratación, la permeabilidad de la pasta de cemento también depende principalmente de estos parámetros.

La gran influencia de la segmentación de los poros capilares en la permeabilidad ilustra (Figura 1) el hecho de que la permeabilidad no es una función simple de porosidades pero con diferentes permeabilidades. De hecho, sólo un gran paso que conecta los poros capilares dará lugar a una gran permeabilidad, mientras que la porosidad se mantendrá prácticamente sin cambios.

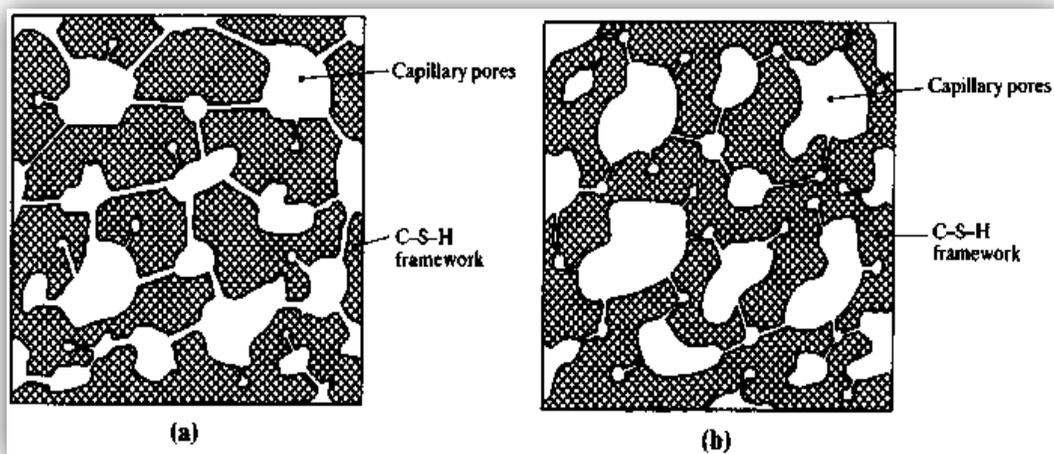


Figura 1. Segmentos de poros capilares (Neville & Brooks, 2010).

Desde el punto de vista de la durabilidad, alcanzar baja relación agua/cemento es ventajoso debido a que la etapa en la que los poros capilares se convierten en segmentos, se consigue después de un período más corto de curado húmedo (Neville & Brooks, 2010).

### Sulfatos y Cristalización de Sales

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (por ejemplo sulfato de calcio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del concreto (pérdida de cohesión de la pasta y de resistencia). El sulfato de calcio ataca el aluminato de calcio hidratado y forma etringita. El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita y yeso. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma principalmente en la superficie del concreto, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y descompone el silicato de calcio hidratado.

La taumasita se puede formar durante el ataque de sulfato en condiciones de humedad con temperatura entre 0°C y 10°C y ocurre como resultado de la reacción entre: silicato de calcio hidratado, sulfato, carbonato de calcio y agua. En los concretos, donde el deterioro está asociado al exceso de taumasita, las fisuras se pueden llenar de taumasita y un halo de taumasita blanca puede encontrarse alrededor de los agregados.



Como en las rocas naturales, tales como en las piedras calizas, el concreto poroso es susceptible al ataque de las intemperies causado por cristalización de sales. Estas sales pueden o no contener sulfatos y pueden o no reaccionar con los compuestos hidratados en el concreto. Algunas sales conocidas por causar deterioro en concreto son el carbonato de sodio y sulfato de sodio (los estudios de laboratorio también relataron soluciones saturadas de cloruro de calcio y otras sales como responsables por el deterioro de concreto). El mayor daño ocurre cuando se secan las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables, expuestos a condiciones de secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por la acción de los poros capilares y, posteriormente, – como resultado de la evaporación en la superficie – la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, algunas veces generando presiones suficientes para causar la fisuración. Ambas, las partículas de agregado y la pasta de cemento pueden ser atacadas por sales. El ataque de sulfatos y la cristalización de sales son más severos donde el concreto está expuesto a ciclos de mojado y secado, que donde el concreto está constantemente mojado (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

### **Ataque por agua de mar**

El agua de mar contiene sulfatos y podría esperarse que ataquen de manera similar a lo descrito anteriormente pero, ya que también están presentes cloruros, el ataque de agua de mar no causa generalmente expansión del concreto. La explicación radica en el hecho de que el yeso y la etringita son más solubles en una solución de ion cloruro que en agua pura, lo que significa que pueden ser fácilmente lixiviados hacia fuera por el agua de mar. En consecuencia, no hay ninguna interrupción pero solamente un aumento muy lento en la porosidad (Neville & Brooks, 2010).

El concreto se ha usado en ambientes marinos por décadas con buen desempeño. Sin embargo, son necesarios cuidados especiales en el diseño de las mezclas y en la selección de los materiales para estos ambientes severos. Una estructura expuesta al agua del mar o al salpique del agua de mar es más vulnerable en la zona de marea o que salpica, donde hay ciclos repetidos de mojado y secado y/o congelamiento y deshielo. Los sulfatos y los cloruros presentes en el agua del mar requieren el uso de concretos de baja permeabilidad para minimizar la corrosión de la armadura (refuerzo) y el ataque de sulfatos (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).



### **Ataque por ácidos**

No hay cemento Portland resistente al ataque de agentes ácidos. En condiciones húmedas, el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) u dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), así como algunos otros gases en la atmósfera, forman ácidos que atacan al concreto mediante la disolución y eliminación de una parte de la pasta de cemento hidratado y dejan una masa suave y débil. Esta forma de ataque se encuentra en diferentes condiciones industriales, como chimeneas y en algunas condiciones agrícolas, tales como pisos de industrias lácteas.

En la práctica, el grado de ataque aumenta a medida que aumenta la acidez; el ataque se produce a valores de pH por debajo de 6.5, un pH de menos de 4.5 es ataque severo. La tasa de ataque también depende de la habilidad de los iones hidrógeno para difundir a través del gel de cemento (C-S-H) después de que el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se ha disuelto y lixiviado hacia fuera del concreto.

Aunque de naturaleza alcalina, las aguas residuales domésticas causan deterioro de alcantarillas, especialmente con temperaturas altas, cuando los compuestos de azufre en las aguas residuales son reducidos por las bacterias anaerobias a  $\text{H}_2\text{S}$ . Esto no es un agente destructivo en sí mismo, pero si se disuelve en películas de humedad sobre la superficie expuesta del concreto y sufre oxidación por las bacterias anaerobias, finalmente produce ácido sulfúrico  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . El ataque se produce, por lo tanto, por encima del nivel del flujo de las aguas residuales. El cemento se disuelve gradualmente y un deterioro progresivo de concreto se lleva a cabo (Neville & Brooks, 2010).

### **Reactividad Álcali-Agregado**

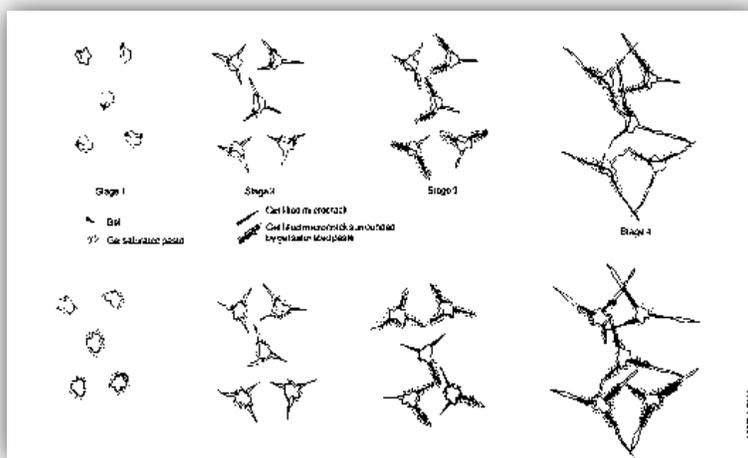
La reactividad álcali-agregado es un tipo de deterioro que ocurre cuando los constituyentes minerales activos de algunos agregados reaccionan con los hidróxidos de los álcalis en el concreto. La reactividad es potencialmente peligrosa cuando produce expansión considerable. La reactividad álcali-agregado ocurre de dos formas – reacción álcali-sílice (RAS) y reacción álcali-carbonato (RAC). La reacción álcali-sílice es más preocupante que la reacción álcali-carbonato pues es más común en la presencia de agregados que contienen minerales de sílice (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

La reacción álcali-sílice (RAS) es la más común y estudiada de las reacciones álcali-árido.

En la fabricación del concreto, la hidratación del Portland da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los



poros del concreto y los minerales silíceos de algunos áridos reaccionan para formar un gel, que en contacto con el agua, aumenta de volumen (Figura 2).



**Figura 2. Modelo idealizado de cómo pueden inducirse las fisuras causadas por la reacción álcali-sílice (Segarra Foradada, 2005).**

Para que se dé la reacción álcali-sílice, es necesaria la presencia de sílice reactiva, álcalis sodio y potasio, y agua. Pero para que la reacción además produzca fisuración y expansión se requiere que las cantidades tanto de sílice reactiva como de álcalis disponibles, sean significativas y que el agua provenga de una fuente externa.

La reacción cesará pues cuando uno de los reactivos se consume o cuando la concentración de ión hidroxilo es tan baja que la sílice reactiva no es atacada (Segarra Foradada, 2005).

Las manifestaciones de la presencia de reactividad álcali-agregado son red de agrietamiento, juntas cerradas o dislocación de diferentes partes de la estructura. Como el deterioro por reactividad álcali-agregado es un proceso lento, el riesgo de rotura catastrófica es bajo. La reacción álcali-agregado puede causar problemas de utilización (servicio, funcionalidad) y empeorar otros mecanismos de deterioro, como aquellos de la exposición a congelamiento, anticongelantes o sulfatos (Kosmatka, Kerckhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Las formas reactivas de sílice son ópalo (amorfo), calcedonia (criptocristalina fibrosa) y tridimita (cristalino). Estos materiales se encuentran en varios tipos de rocas: cherts (esquirlas) opalinos o calcedonia, calizas silíceas, riolitas y filitas (Neville & Brooks, 2010).



## **Resistencia a los iones Cloruro y Corrosión de la Armadura**

El concreto protege a la armadura (refuerzo) embebida de la corrosión, debido a su alta alcalinidad. El pH elevado en el concreto (normalmente mayor que 12.5) promueve la pasivación y la formación sobre el acero de una película de protección de óxido no corrosivo. Sin embargo, la presencia de iones cloruro de los anticongelantes y del agua del mar puede destruir o penetrar la película. Cuando se alcanza el límite de corrosión por cloruros (aproximadamente 0.15% cloruro solubles en agua por peso de cemento), una célula eléctrica se forma a lo largo del acero y entre las barras de acero y el proceso electroquímico de la corrosión empieza. Algunas regiones del acero a lo largo de las barras se vuelven en ánodos, descargando corriente en la célula eléctrica; y de allá el hierro entra en solución. Las áreas del acero que reciben corriente son los cátodos donde los iones de hidróxido se forman (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Los iones de hierro e hidróxido forman el hidróxido de hierro,  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , el cual más tarde se oxida, formando polvo (óxido de hierro). La formación de polvo es un proceso expansivo – el polvo se expande hasta cuatro veces su volumen original – el cual induce a la formación de tensiones internas y descascaramientos o descascarillados del concreto sobre el acero de refuerzo. El área de la sección transversal del acero también se puede reducir considerablemente.

Una vez que empieza, la velocidad de corrosión del acero está influenciada por la resistividad eléctrica del concreto, la humedad y la migración del oxígeno del concreto hacia el acero. Los iones cloruro pueden también penetrar la capa pasivadora del refuerzo; éstos se combinan con los iones de hierro, formando un compuesto de cloruro de hierro soluble, el cual lleva el hierro hacia dentro del concreto para más tarde oxidarse (polvo).

## **Carbonatación**

La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el dióxido (bióxido) de carbono  $\text{CO}_2$  del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos de calcio para formar carbonatos. En la reacción con el hidróxido de calcio hay formación de carbonato de calcio. La carbonatación y el secado rápido del concreto fresco pueden afectar la durabilidad de la superficie, pero esto se puede evitar con el curado adecuado. La carbonatación del concreto endurecido no hace daño a la matriz del concreto. Sin embargo, la carbonatación reduce considerablemente la alcalinidad (pH) del concreto. La alta alcalinidad es necesaria para la protección de la armadura (refuerzo) contra la corrosión y, por consiguiente, el concreto debe ser resistente a la carbonatación para prevenirse la corrosión del acero de refuerzo.



Se aumenta considerablemente el grado de la carbonatación en el concreto que tiene alta relación agua-cemento, bajo contenido de cemento, corto periodo de curado, baja resistencia mecánica y pasta altamente permeable (porosa).

### **Resistencia al Congelamiento y Deshielo**

Se espera que el concreto empleado en estructuras y pavimentos tenga una vida larga y poco mantenimiento. El concreto debe tener una buena durabilidad para resistir a condiciones de exposición. El factor de intemperismo potencialmente más destructivo es la congelación y deshielo (hielo-deshielo) mientras el concreto está húmedo, principalmente en la presencia de anticongelantes (descongelantes). El deterioro es causado por la congelación del agua y su posterior expansión en la pasta, agregado o ambos.

Cuando la congelación ocurre en el concreto que contiene agregado saturado, presiones hidráulicas perjudiciales se pueden crear también en el agregado. El agua, desplazada de las partículas de agregado durante la formación del hielo, no se puede escapar hacia la pasta circundante suficientemente rápido para el alivio de presión. Sin embargo, para la mayoría de las condiciones de exposición, una pasta de buena calidad (baja relación agua-cemento) va a prevenir la saturación de la mayoría de los agregados.

Si la pasta contiene aire incluido, ella va a acomodar la pequeña cantidad de agua en exceso que se pueda expeler de los agregados, protegiendo así el concreto contra el daño del congelamiento y deshielo.

#### **1.2.5 Métodos de prevención**

La forma de prevenir los efectos nocivos de los mecanismos de degradación del concreto, es la utilización de criterios de durabilidad en la etapa de proyecto de la mezcla y/o estructura (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

En la actualidad, se considera que los concretos de baja permeabilidad, con baja relación agua-cemento, bien compactados y adecuadamente curados, son poco susceptibles de ser atacados por iones sulfato y los casos reales documentados de deterioro corresponden a concretos porosos y con deficiencias de curado (Helene & Pereira, 2003).

Los cementos con contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) del 4% al 10%, ofrecen protección satisfactoria contra el ataque de sulfatos del agua del mar, o bien como protección contra la corrosión de la armadura por cloruros. Se debe garantizar un



recubrimiento adecuado sobre el refuerzo (ACI 318). La relación agua/material cementante no debe exceder 0.40. En climas más fríos, el concreto debe contener un mínimo del 6% de aire incluido. El concreto de alta resistencia se puede utilizar donde las grandes formaciones de hielo desgastan la estructura.

Con el empleo de aire incluido, el concreto es altamente resistente a este tipo de deterioro. Durante la congelación, el agua desplazada por la formación de hielo en la pasta se acomoda, no siendo perjudicial; las burbujas microscópicas de aire en la pasta ofrecen cámaras para que el agua entre y entonces alivie la presión hidráulica generada (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Para el caso del ataque por ácidos, el ataque de  $\text{Ca(OH)}_2$  puede prevenirse o reducirse mediante su fijación. Esto se logra mediante el tratamiento con vaso de agua diluida (silicato de sodio) para formar silicatos de calcio en los poros. Tratamiento superficial con brea de alquitrán de hulla, de caucho o pinturas bituminosas, resinas epoxi, y otros agentes que también se han utilizado con éxito. El grado de protección alcanzado por los diferentes tratamientos varía, pero en todos los casos es esencial que la capa protectora se adhiera bien al concreto y permanezca sin daños por las agentes mecánicos (Neville & Brooks, 2010).

Las prácticas corrientes para el control de la reacción álcali-sílice incluyen el uso de materiales cementantes suplementarios o cementos adicionados. Dichos materiales suplementarios han sido verificados y comprobadamente pueden controlar la reacción álcali-sílice. Los materiales cementantes suplementarios incluyen cenizas volantes, escoria granulada de alto horno, sílice activa (humo de sílice, microsílice) y puzolanas naturales.

Los cementos adicionados también contienen estos materiales para el control de la reactividad álcali-sílice. Esta práctica permite el uso de agregados y materiales cementantes disponibles en la región. La reducción del contenido de álcalis en el concreto también puede controlar la reacción.

La resistencia del concreto a los iones cloruro en general es buena, pero se puede mejorar con una relación agua-cemento baja (0.40), por lo menos siete días de curado y el uso de materiales cementantes suplementarios, tales como cenizas volantes, para reducirse la permeabilidad. El aumento del recubrimiento encima del acero también reduce la migración de iones cloruro.

Otros métodos de reducción de corrosión de acero incluyen el uso de aditivos inhibidores de corrosión, acero revestido con epóxico tratamientos de superficie, revestimiento del concreto y protección catódica (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).



Seguendo las prácticas estándar para producir concreto de baja permeabilidad se puede prevenir también la carbonatación. Éstas incluyen relaciones bajas de agua/cemento, compactación apropiada por vibración, uso de puzolanas tales como ceniza volante o humo de sílice y curado apropiado. Todas estas prácticas reducen la permeabilidad del concreto y hacen más difícil para que el dióxido de carbono se difunda a través de este (Rick, 2000).

### 1.3 Aditivos

Los aditivos son productos químicos, adicionados al concreto, mortero o lechada de cemento en el momento de la mezcla, para modificar las propiedades, ya sea en estado húmedo, inmediatamente después de la mezcla o después de que la mezcla se haya endurecido. Ellos pueden ser una sola sustancia química o una mezcla de varias sustancias químicas y pueden ser suministrados en forma de polvos, pero la mayoría son soluciones acuosas debido a que en esta forma son más fáciles de agregar con precisión.

La dosificación puede ser expresada como litros o kg por 100 kg de cemento, cemento y normalmente incluye cualquier escoria, PFA o demás aglutinantes añadidos en el mezclador.

Los aditivos presentados en este subcapítulo no son los mismos que los aditivos, que son productos químicos premezclados con el cemento o una mezcla cementosa seca. Tampoco son los mismos que las adiciones, que se añaden a la mezcla. Tipo I adiciones son esencialmente inertes, por ejemplo, polvo de piedra caliza o pigmentos. Adiciones de tipo II son puzolánicas o ligantes hidráulicos latentes como PFA o humo de sílice (Newman & Choo, 2003).

#### 1.3.1 Tipos y usos

El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, resistente, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas calidades se pueden obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados, preferiblemente el uso de aditivos (a excepción de los inclusores de aire cuando son necesarios).

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducción del costo de la construcción de concreto.
- Obtención de propiedades del concreto de manera más efectiva que otras;



- Mantenimiento de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado.

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

## 1.4 Puzolanas

Considerando la urgencia de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, es evidente la necesidad de desarrollar materiales cementosos alternativos, que reduzcan el impacto ambiental de las actividades de construcción con cemento portland. Entre las diversas rutas posibles, está el desarrollo de cementos compósitos (Malhotra & Mehta, 1996.), con la sustitución parcial del cemento por aditivos minerales como escorias metalúrgicas, ceniza volante, metacaolín, etc. Estos tipos de cementos son considerados ya por las normas o estándares en diversos países (NMX C-414-ONNCCE, 2004); sin embargo, hay muchos aspectos que requieren investigación para incrementar las posibilidades de utilización de dichos cementos (Escalante, Navarro, & Gómez, 2011).

Durante el proceso de manufacturación (seco o húmedo) del cemento, la industria cementera incorpora materiales suplementarios y/o alternativos de origen: industrial, agrícola, natural o materia prima calcinada para la manufacturación del cemento Pórtland denominándolas “puzolanas” por el alto contenido silico-aluminoso que reaccionan químicamente con la portlandita  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (Martínez Reyes, Alavez Ramírez, Montes García, & Jiménez Quero, 2010.)

La puzolana es el nombre que recibe la ceniza volcánica, que provenía de la población de Puzzuoli, en las faldas del Vesubio, Italia, donde ya era explotada en tiempos de los romanos. Posteriormente el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la Puzolana de origen natural podían tener usos sustitutivos.

Las puzolanas son materiales silíceos o alumino-silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad Romana hasta la invención del cemento Pórtland en el siglo XIX.

El código (ASTM C618 - 12a) especifica a las puzolanas como «materiales silíceos o alumino-silíceos quienes por si solos poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes».



Con la intención de proveer durabilidad al concreto reforzado, ya sea mejorando sus propiedades mecánicas, estructurales, físicas o químicas, en diversas investigaciones se ha realizado sustitución del cemento por algunos tipos de cenizas, de las cuales destacan: cenizas volantes, cenizas de alto horno, cenizas de bagazo de caña, cenizas de cascarilla de arroz, entre otras (S. Marquez-Montero Et Al, 2010) (Águila & Soso, 2008).

### 1.4.1 Reacción de la puzolana

Como ya se mencionó, la puzolana es un material que contiene sílice natural o artificial en una forma reactiva. Por sí mismas, las puzolanas tienen poco o ningún valor cementante. Sin embargo, en una forma finamente dividida y en presencia de humedad van a reaccionar químicamente con los álcalis, generados por la hidratación del cemento portland, para formar compuestos de cementación.

En la Figura 3, se muestra las dos reacciones químicas necesarias para que los materiales puzolánicos formen los mismos compuestos cementantes que en la hidratación del cemento Portland.

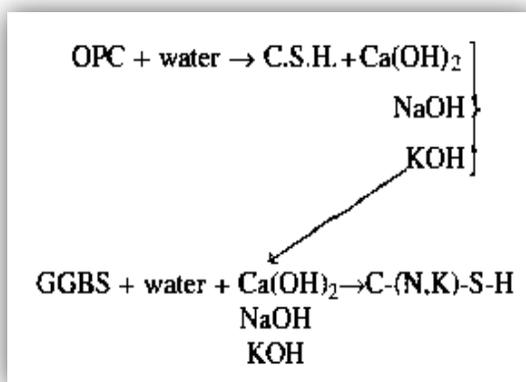


Figura 3. Reacción puzolánica de la escoria (Newman & Choo, 2003).

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



### 1.4.2 Clasificación de las puzolanas

Como se puede leer en los párrafos anteriores, las puzolanas se pueden clasificar según su origen en, puzolanas naturales y puzolanas artificiales (cenizas); estas últimas pueden ser subproductos de algún proceso industrial o agroindustrial.

La norma (ASTM C618 - 12a) da una clasificación para estos dos grupos de puzolanas, dicha clasificación toma en cuenta varios factores. Tales como, origen y composición química; las cuales se muestran en seguida:

Definición de ceniza volante:

La ceniza volante es el residuo finamente dividido que resulta de la combustión de la planta o el carbón en polvo y que es transportado por los gases de combustión.

#### Clasificación

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

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

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

Composición química

Las cenizas volantes y puzolanas naturales deben cumplir con los requisitos sobre la composición química prescrito en la Tabla 5 (ASTM C618 - 12a).



Tabla 5. Requisitos químicos de puzolanas (ASTM C618 - 12a).

| Requerimientos Químicos                                                                 |                  |    |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|------------------|----|----|
| Compuesto                                                                               | Tipo de Puzolana |    |    |
|                                                                                         | N                | F  | C  |
| SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %min | 70               | 70 | 50 |
| SO <sub>3</sub> %Max                                                                    | 4                | 5  | 5  |
| Contenido de Humedad %Max                                                               | 3                | 3  | 3  |
| Pérdida sobre ignición %Max                                                             | 10               | 6* | 6  |

\*El empleo de puzolana Clase F conteniendo hasta un 12.0 % de la pérdida sobre ignición puede ser aprobado por el usuario si hay registros de funcionamiento aceptables o los resultados de prueba disponibles están hechos en laboratorio.

### 1.4.3 Tipos y usos de puzolanas

Newman (Newman & Choo, 2003) y Kosmatka (2004) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004) describen las aportaciones de los principales materiales puzolánicos se usan de forma común en la fabricación de concreto, dichos materiales son: Ceniza volante, Escoria granulada de alto horno, Humo de sílice y puzolanas naturales (dentro de éstas de las más usadas son el Metacaolín y la piedra caliza).

Aunque al día de hoy existen otros materiales que también han sido muy estudiados, tales como la ceniza de bagazo de caña y la ceniza de cascarilla de arroz (S. Marquez-Montero Et Al, 2010) (Águila & Soso, 2008) (Hernández Toledo, 2010.); estos materiales podrían clasificarse dentro de las puzolanas artificiales de origen agrícola o agroindustrial.

#### **Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice y Puzolanas Naturales**

El uso de materiales cementantes suplementarios en concreto viene creciendo desde la década de los 70’s. La mayoría de estos materiales son subproductos de procesos industriales Su empleo sensato es deseable no sólo bajo el punto de vista de la conservación del medio ambiente y de la energía, sino también por los beneficios que estos materiales pueden ofrecer al concreto.

Los materiales cementantes suplementarios se adicionan al concreto como parte del sistema cementante. Se los puede utilizar como adición o como sustitución parcial del cemento



portland o del cemento adicionado, dependiendo de las propiedades de los materiales y de los efectos esperados en el concreto.

Los materiales cementantes suplementarios se usan para mejorar una propiedad particular del concreto, tal como resistencia a la reactividad álcali-agregado. La cantidad óptima de adición se debe establecer a través de pruebas para determinar (1) si el material realmente mejora la propiedad y (2) la correcta cantidad, pues una sobredosis o una dosis insuficiente pueden ser perjudiciales o los efectos deseados no se logran. Los materiales cementantes suplementarios también reaccionan de manera diversa con los diferentes tipos de cemento.

Tradicionalmente, la ceniza volante, escoria, arcilla calcinada, esquisto calcinado y humo de sílice se usaban separadamente en el concreto. Actualmente, debido a la facilidad del acceso a estos materiales, los productores de concreto pueden combinar dos o más de estos materiales, para optimizar las propiedades del concreto. Las mezclas que usan tres materiales cementantes, llamadas mezclas ternarias, se están haciendo comunes. En los Estados Unidos, los materiales cementantes suplementarios se usan, por lo menos, en 60% del concreto premezclado (PCA2000) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004) (Tabla 6).

**Tabla 6. Especificaciones y Clases de los Materiales Cementantes Suplementarios en los Estados Unidos.**

|                                                                        |
|------------------------------------------------------------------------|
| Escorias granuladas de alto horno de hierro —ASTM C 989 (AASHTO M 302) |
| Grado 80                                                               |
| Escorias con bajo índice de actividad                                  |
| Grado 100                                                              |
| Escorias con índice moderado de actividad                              |
| Grado 120                                                              |
| Escorias con alto índice de actividad                                  |
| Ceniza volante y puzolana natural—ASTM C 618 (AASHTO M 295)            |
| Clase N                                                                |
| Puzolanas naturales crudas o calcinadas, incluyendo:                   |
| Tierras diatomáceas (tobas)                                            |
| Sílex opalino y esquistos                                              |
| Tufo y cenizas volcánicas o pumitas (piedras pómez)                    |
| Arcillas calcinadas, incluyendo metakaolinita y esquisto               |
| Clase F                                                                |
| Ceniza volante con propiedades puzolánicas                             |
| Clase C                                                                |
| Ceniza volante con propiedades puzolánicas y cementantes               |
| Humo de sílice —ASTM C 1240                                            |



## **Ceniza volante**

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad y es el material cementante suplementario más utilizado en los Estados Unidos. Bajo la ignición (combustión) en el horno, la mayor parte de la materia volátil y el carbono del carbón se queman. Durante la combustión, las impurezas minerales del carbón (tales como arcilla, feldespato, cuarzo y esquisto) se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica como pequeñas esferas vítreas llamadas cenizas volantes. Luego, se colecta la ceniza volante de los gases de escape a través de precipitadores electrostáticos o de filtros de manga. La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores.

Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de 1  $\mu\text{m}$  (micrómetro) hasta más de 100  $\mu\text{m}$ , siendo que el tamaño de una partícula típica es de 20  $\mu\text{m}$ . Sólo el 10% al 30% de la masa de las partículas es mayor que 45  $\mu\text{m}$ . El área superficial es normalmente de 300 a 500  $\text{m}^2/\text{kg}$ , a pesar de que algunas cenizas pueden tener área superficial tan baja como 200  $\text{m}^2/\text{kg}$  o tan alta como 700  $\text{m}^2/\text{kg}$ .

La ceniza volante es básicamente un vidrio de silicato que contiene sílice, alúmina, hierro y calcio. Los constituyentes menores son magnesio, azufre, sodio, potasio y carbono. Los compuestos cristalinos están presentes en pequeñas cantidades. La masa específica relativa de la ceniza volante normalmente varía de 1.9 a 2.8 y el color es generalmente gris o marrón.

Las cenizas volantes Clase F y Clase C de la ASTM C 618 (AASHTO M 295) se emplean comúnmente como aditivos (adiciones) puzolánicos en concretos de uso universal. Los materiales de Clase F son normalmente cenizas volantes con bajo contenido de calcio (menos del 10% de CaO) y contenido de carbono menor que 5%, pero algunas pueden contener hasta 10%. Los materiales de la Clase C normalmente presentan alto contenido de calcio (del 10% al 30% de CaO) y contenido de carbono menor que 2%. Muchas de las cenizas volantes de la Clase C cuando se exponen al agua, se hidratan y se endurecen en menos de 45 minutos. Algunas cenizas volantes se encuadran en ambas Clases F y C (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).



### **Escoria granulada de alto horno**

Escoria de alto horno es un subproducto de la producción de arrabio, una etapa en la producción de acero, aproximadamente 300 kg de escoria se generan por cada tonelada de arrabio (Neville A. , 1997). Se produjeron en todo el mundo más de 167 millones de toneladas de escoria en 1996 (Lang E. Blast, 2002.)]. Se estima que alrededor de 1,4 millones son producidos anualmente por los dos mayores empresas siderúrgicas (Escalante, Gómez, Johal, Mendoza, Mancha, & Méndez, 2001 ).

Este producto se desarrolla en el estado fundido simultáneamente con el acero en un alto horno. La escoria fundida a la temperatura de cerca de 1500°C se enfría rápidamente y se apaga en el agua para formar un material granulado vítreo. El material granulado, el cual es molido hasta menos de 45  $\mu\text{m}$ , tiene un área superficial Blaine de 400 a 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . La masa específica relativa para la escoria granulada de alto horno molida es de 2.85 a 2.95 y la masa unitaria varía de 1050 a 1375  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

La composición química de la escoria varía ampliamente entre plantas debido a las diferencias en las materias primas empleadas (Lang E. Blast, 2002.), se han propuesto diversos índices, para intentar predecir la calidad de las escorias aceptables, un ejemplo es el índice  $I_h = (C + 1,4 M + 0,56 A) / S > 1,65$  (Daube & Bakker, 1986).

La escoria granulada es áspera y tiene forma angular. En presencia del agua y de un activador, NaOH o CaOH, ambos suministrados por el cemento Portland, la escoria se hidrata y se endurece de una manera similar al cemento Portland. Sin embargo, las escorias enfriadas por el aire no presentan las propiedades hidráulicas de las escorias enfriadas por el agua (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

BFS (Blast Furence slag) se pueden utilizar para reemplazar parcialmente CPO (cemento Portland ordinario), o como un material cementoso en sí después de la activación química. Muchas investigaciones se han desarrollado en las dos áreas, sin embargo, los estudios comparativos de ambas vías en uno BFS no son comunes. Varios factores influyen en la reactividad de BFS, entre ellos están: la superficie, la composición química, la fracción vítrea, etc.

Los concretos basados en escoria activada son de menor impacto ambiental, ya que la escoria no requiere tratamiento térmico y no hay descarbonatación de  $\text{CaCO}_3$  como en el cemento Portland. La escoria es más resistente a la molienda que el cemento Portland, un tamaño de partícula más grueso contribuye a reducir los costos también (Escalante-García, Espinoza-Pérez, Gorokhovsky, & Gómez-Zamorano, 2009).



## **Humo de sílice**

El humo de sílice, también llamado de microsílice, humo de sílice condensado o sílice activa, es un subproducto que se usa como una puzolana. Este subproducto es el resultado de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de liga de silicio o ferrosilicio. El humo de sílice sube como un vapor oxidado de los hornos a 2000°C. Cuando se enfría, el humo se condensa y se colecta en bolsas de tela enormes. El humo de sílice condensado se procesa para removerle las impurezas y para controlar el tamaño de las partículas.

El humo de sílice condensado es básicamente dióxido de silicio (normalmente más del 85%) en una forma no cristalina (amorfa). Por ser un material transportado por el aire, tal como la ceniza volante, presenta una forma esférica. Se trata de un material extremadamente fino, con partículas con menos de 1  $\mu\text{m}$  de diámetro y con diámetro promedio de cerca de 0.1  $\mu\text{m}$ , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento.

El área superficial del humo de sílice condensado es aproximadamente 20,000  $\text{m}^2/\text{kg}$  (método de la adsorción de nitrógeno). Los cementos ASTM tipos I y III tienen un área superficial de 300  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 400  $\text{m}^2/\text{kg}$  y de 500 a 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ , respectivamente. La masa específica relativa del humo de sílice es generalmente de 2.20 a 2.5, mientras que la masa específica relativa del cemento portland es cerca de 3.15. La masa unitaria del humo de sílice varía de 130 a 430  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

El humo de sílice se usa en cantidades que varían del 5% al 10% de la masa total de material cementante. Se emplea donde sea necesario un alto grado de impermeabilidad y alta resistencia del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

## **Puzolanas naturales**

Puzolanas naturales son materiales vítreos amorfos, que normalmente se clasifican en cuatro grupos:

1) Materiales volcánicos - estos son ricos en vidrio en estado natural o parcialmente alterada. Se encuentran en todo el mundo en las regiones volcánicas. Son el resultado de la explosión de magma que se enfrió rápidamente por ser inactivada para formar vidrio microporoso. A menudo, estos materiales se componen de > 50 por ciento de sílice, seguido de alúmina, óxidos de hierro y cal. A menudo tienen un alto contenido de álcali de hasta 10 por ciento.



2) Tobas - donde un vidrio volcánico se ha transformado en parte o totalmente en compuestos zeolíticos debido a la intemperie. La gama de la composición química es similar a los materiales volcánicos. La pérdida por ignición es una indicación del grado de transformación que se ha producido debido a la intemperie.

3) Sedimentaria - estos son ricos en diatomeas opalina. Las diatomeas son los esqueletos de los organismos que se componen principalmente de ópalo. Ellos tienen alto contenido de sílice, sin embargo, estos materiales están a menudo contaminados con arcilla.

4) Diagenética - Estos son ricos en sílice amorfa y derivados de la erosión de las rocas silíceas. Ellos son normalmente altos en sílice y bajos en otros óxidos, dependiendo de la composición mineral de la roca madre.

Con todos los materiales puzolánicos, la forma y la gradación de partículas tendrá un efecto significativo en la necesidad de agua del hormigón. Puzolanas de origen natural suelen tener forma irregular, que aumentará la demanda de agua a menos que se utilizan plastificantes para compensar (Newman & Choo, 2003).

Otro grupo de materiales puzolánicos naturales, que son los más comúnmente empleados hoy en día, son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperaturas en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Estos materiales incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Los materiales arcillosos con un alto porcentaje de cuarzo y feldespatos, minerales que son altamente cristalinos y no reactivos a la cal. Son materiales que al ser empleados como puzolanas reaccionan pobremente en estado natural e incrementan su reactividad cuando es inducida una activación térmica debido a la modificación de la estructura cristalina además dichos materiales interaccionan con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  formando un gel C-S-H secundario y estratlingita ( $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ) (Martínez Reyes, Alavez Ramírez, Montes García, & Jiménez Quero, 2010.).

Las arcillas calcinadas se emplean en construcciones en concreto para uso universal, de la misma manera que las otras puzolanas. Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15% y 35% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfato, controlar la reactividad álcali-agregado y reducir la permeabilidad. Su masa específica relativa es de 2.40 a 2.61 y su finura Blaine es de 650  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 1350  $\text{m}^2/\text{kg}$ . El esquisto calcinado puede contener del 5% al 10% de calcio, resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, el esquisto calcinado tiene una pérdida por ignición del



1% al 5%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante.

La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolin de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a 2 micrómetros. La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesite baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mucho más como un aditivo (adición) al concreto que como un sustituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10% de la masa del cemento. Las puzolanas naturales se clasifican por la ASTM C 618 (AASHTO M 295) como puzolana Clase N (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 2004).

Las propiedades desarrolladas en concretos al incorporar materiales puzolánicos arcillosos dependen de la cantidad además de las características de los componentes, del medio de activación o del uso de agentes alcalinos aunado al tiempo de exposición del tratamiento térmico con el objeto de obtener un material cementicio cuya estructura puede ser amorfa o cristalina resultante de la reacción de hidratación además de la influencia en la zona de interface y en el desarrollo de una matriz homogénea. Estos materiales presentan una combinación de propiedades similares a materiales cerámicos (dureza y resistencia a alta temperatura) y cementicios (pastas y ligantes) (Zhang, Gong, & Lu) (Lee & Van Deventer, 2002).

Otro material con potencial puzolánico es el residuo de la producción de energía eléctrica mediante la extracción de calor del subsuelo, en las plantas geotérmicas a base de salmuera. La práctica de esta tecnología se ha incrementado considerablemente en años recientes, debido a que es una fuente de energía limpia, generalmente renovable, y de menor costo relativo a otras formas de generación de energía (Whitescarver, Wells, & T. Kwan, 1990).

Dicho desecho, denominado Desecho Geotérmico (DG), es obtenido de la mezcla de salmuera y vapor (presurizados naturalmente), que pasa a través de diferentes etapas de extracción de calor. Conforme la temperatura se reduce (inicialmente ~200 °C), de la mezcla se precipita sílice amorfa de tamaño nanométrico, junto con cloruros de sodio y potasio. El precipitado causa serios problemas ya que se deposita en las tuberías como una cascarilla que crece varias pulgadas por mes y debe ser removida periódicamente (Diaz & Rincon, 1990).

Además de estas incrustaciones, una fracción de salmuera remanente se reinyecta al subsuelo y el resto se deposita en lagunas de evaporación que contienen miles de toneladas de este DG. La planta geotérmica de Cerro Prieto en Baja California, México, genera aproximadamente 50.000 toneladas anuales de este DG, el cual no tiene hoy una aplicación.



En base a esto, el objetivo de este trabajo fue el de estudiar al DG como reemplazo del CPO lo cual puede presentar una solución al gran problema ecológico que representa actualmente (Gomez-Zamorano, 2004).

En varias investigaciones se ha determinado que el DG acelera la hidratación de la cemento portland, el aumento de la reactividad de la alita y belita, y que posiblemente, las partículas del DG sirven como sitios de nucleación. Estos factores dieron lugar a la mejora de la resistencia a la compresión durante el período de tiempo de las pruebas (90 días) (Gómez-Zamorano, Escalante-García, & Mendoza-Suárez, 2004) (Gómez Zamorano & Escalante, 2009).

### 1.5 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, esquisto calcinado y metacaolinita. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5., 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.

Las ventajas anteriormente expuestas son el resultado de muchas investigaciones que se han hecho con la adición de diferentes tipos de puzolanas a mezclas tanto en concretos como en morteros. Por ejemplo se ha informado que la ceniza de la cascara de arroz contribuye a la resistencia del concreto en el término de 1 a 3 días, el humo de sílice usado entre las cantidades del 5 al 10% presentan un incremento en la resistencia y en la impermeabilidad, solo por mencionar algunas puzolanas.

## 1.6 Resistencia a cloruros y la EAH

Es posible que el deterioro de las estructuras ubicadas cerca del mar se dé por el acceso de iones de cloruros a la matriz de concreto, pudiendo éstos alcanzar al acero de refuerzo e iniciarse así el fenómeno de la corrosión. Debido a esto es de vital importancia implementar procedimientos que permitan establecer cual mezcla de concreto es la más indicada para estos casos.

En la Universidad de los Andes, en Bogotá se realizó una investigación para determinar cómo influye la adición de Escoria de Alto Horno (EAH), en el tiempo de curado y la resistencia a compresión en la penetración de iones cloruro en la matriz de concreto. El propósito de realizar dicha investigación se ubicó en poder llegar a ofrecer más recomendaciones para aumentar la durabilidad de las estructuras expuestas a este ambiente, a partir del empleo de materiales nacionales.

Para desarrollar la investigación se utilizó un equipo hecho en ese país que sigue los requerimientos del equipo de permeabilidad rápida a cloruros según ASTM1202, y que mide fundamentalmente la corriente sobre una muestra de concreto por donde atraviesan iones cloruro en una dirección. La cantidad de iones que atraviesa la muestra depende de las propiedades resistentes del concreto a este paso iónico. Las medidas recolectadas se utilizan para calcular la carga eléctrica total que ha atravesado la muestra durante 6 horas, y así precisar la capacidad del concreto para evitar el paso de iones cloruro.



El procedimiento de ensayo comenzó dos días antes de evaluar la permeabilidad de la muestra, utilizando una probeta de 10 cm de diámetro y 5 cm de alto, que fue cortada de un cilindro más grande, de manera que las dos caras paralelas de la muestra eran lo más horizontales posible. Para taparlas se aplicó un sellante que detiene la salida del líquido en esa dirección, así los iones cloruro pueden solamente desplazarse en una dirección.

Al segundo día se somete la probeta al vacío, utilizando una bomba de vacío que pueda generar una presión de 1 mm de Hg. Este procedimiento se hace con el objetivo de sacarle el aire a la muestra y prepararla para que sea más factible la generación de canales por donde puedan fluir los iones cloruro. Al tercer día, comienza el ensayo con el empleo del equipo por un tiempo de 6 horas, recolectando luego los datos de voltaje del multímetro e introduciéndolos a un software para hallar los datos de corriente en cada lapso. Finalmente el sistema calcula la integral de corriente vs tiempo, obteniéndose así la carga total que pasa por la muestra durante las 6 horas.

Durante la calibración del equipo se utilizaron tres tipos de concreto con relación a/c de 0.84, con cemento tipo III, adicionando también tres diferentes porcentajes de EAH: 0%, 26% y 40% (referido al cementante total). También se introdujo como variable el nivel de voltaje, considerándose de 15, 30 y 60 V. la edad del concreto se consideró entre los 50 y 60 días, asimismo, para los ensayos definitivos se utilizaron 6 diferentes relaciones a/c, oscilantes entre 0.46 y 0.84.

Se escogieron como variables principales: la relación a/c, el tiempo de saturación y el porcentaje de EAH. Adicionalmente se hicieron ensayos de resistencia a compresión simple a 3, 7, 28 y 56 días para todas las muestras. También se realizaron ensayos de absorción, densidad, porosidad, velocidad de onda de ultrasonido y módulos de elasticidad en las muestras.

De acuerdo a los resultados obtenidos, para proteger las estructuras ubicadas cerca del mar y que se encuentran bajo la acción de cloruros, se deben utilizar mezclas con adición de EAH cuya cantidad sea de aproximadamente el 25% del total de cementantes, relaciones a/c inferiores 0.51 y resistencias a compresión elevadas ( en lo posible mayores a los 40 MPa). Los concretos con estas características presentaron permeabilidades asociadas a un material con baja permeabilidad a cloruros (Santamaría, Yamín, & Arcila, 2006).



## 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 2.1 Programa experimental

Nuestro programa experimental contempla las siguientes actividades:

1. Obtención de las puzolanas artificiales a emplear en la mezcla de concreto
2. Reducción de tamaño de partícula de las puzolanas (Molienda)
3. Pruebas de calidad en los agregados pétreos
4. Diseño de la mezcla
5. Elaboración de especímenes
6. Realización de pruebas en los especímenes de concreto
7. Obtención y análisis de resultados

### 2.2 Materiales y equipo

Tabla 7. Materiales utilizados en la experimentación.

| Material                                                            | Descripción                                                                                                     | Imagen                                                                                |
|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Agregado pétreo fino (Arena)                                        | Arena de río, proveniente del Rio Lerma entre los estados de Michoacán y Guanajuato.                            |  |
| Agregado pétreo grueso (Grava)                                      | Grava triturada proveniente del banco de joyitas ubicado en la ciudad de Morelia en Michoacán.                  |  |
| Material puzolánico utilizado como sustitución del pétreo fino(EAH) | EAH, ceniza resultante de la producción del acero, recolectada de la siderúrgica de Lázaro Cárdenas, Michoacán. |  |



|                                                                 |                                                                                                                                                                       |                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Material puzolánico utilizado como sustitución del cemento(CBC) | Ceniza de Bagazo de Caña, obtenida gracias al apoyo del Ingenio de Azúcar “Lázaro Cárdenas”, ubicado en las afueras del poblado de Taretan en el estado de Michoacán. |    |
| Cemento                                                         | Cemento CPC 30R, de la marca MOCTEZUMA                                                                                                                                |    |
| Agua                                                            | Agua proveniente de la red de agua potable de la ciudad de Morelia Michoacán                                                                                          |    |
| Fluidificante                                                   | SikaCem Fluidificante: aditivo fluidificante de concretos o morteros el cual incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aprox.               |  |
| Súper plastificante                                             | CRISOTAN R-5: súper plastificante de concreto, acelerante de resistencia, reductor de agua de alto alcance y fluidificante.                                           |  |



Tabla 8. Equipo utilizado en la experimentación

| Material                                  | Descripción o uso                                                                                                                                                 | Imagen                                                                                |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Charolas grandes de lámina                | Para realizar pruebas como cuarteo, para vaciar la mezcla de concreto, entre otras.                                                                               |    |
| Varilla punta de bala de 5/8" de diámetro | Para realizar pruebas de calidad en los agregados, revenimiento, elaboración de espécimenes etc.                                                                  |    |
| Cucharones                                | Para realizar pruebas de calidad en los agregados, revenimiento, elaboración de espécimenes etc.                                                                  |    |
| Palas                                     | Para realizar pruebas de calidad en los agregados, mezclar, elaboración de espécimenes etc.                                                                       |  |
| Balanza o báscula.                        | Para determinar la masa de los materiales utilizada en las diferentes pruebas, así como medir las cantidades de materiales utilizados en las mezclas de concreto. |  |



|                                                     |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                      |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Divisor de muestras.</p>                         | <p>Para realizar pruebas de calidad en los agregados.</p>                                                                                                                                          |    |
| <p>Espátula.</p>                                    | <p>Utilizada para realización de pruebas de calidad en los agregados.</p>                                                                                                                          |    |
| <p>Parrilla.</p>                                    | <p>Utilizada para realización de pruebas de calidad en los agregados.</p>                                                                                                                          |    |
| <p>Cristal.</p>                                     | <p>Utilizada para realización de pruebas de calidad en los agregados.</p>                                                                                                                          |  |
| <p>Balanza con aproximación al décimo de gramo.</p> | <p>Para determinar la masa de los materiales (pequeñas cantidades) utilizada en pruebas de calidad, así como medir las cantidades de algunos materiales utilizados en las mezclas de concreto.</p> |  |



|                                                                                                              |                                                                                                                          |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Cono metálico.</p>                                                                                        | <p>Utilizado para realizar la prueba de Humedad superficial y humedad de absorción en el agregado fino.</p>              |     |
| <p>Pisón.</p>                                                                                                | <p>Utilizado para realizar la prueba de Humedad superficial y humedad de absorción en el agregado fino.</p>              |     |
| <p>Dos botellas iguales de vidrio incoloro de 250 a 350 cm<sup>3</sup> con marcas cada 25 cm<sup>3</sup></p> | <p>Utilizados para realizar la prueba de colorimetría en la arena.</p>                                                   |    |
| <p>Frasco de Chadman.</p>                                                                                    | <p>Utilizado para realizar la prueba de densidad en el agregado fino.</p>                                                |  |
| <p>Probetas graduadas.</p>                                                                                   | <p>Utilizadas para medir la cantidad de agua desalojada por muestras de agregados, para obtención de la de densidad.</p> |   |



|                                       |                                                                                                            |                                                                                      |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Picnómetro.                           | Utilizado para medir conocer el volumen de cierta cantidad de agregados, para obtención de la de densidad. |    |
| Charola.                              | Utilizada para realización de pruebas de calidad en los agregados.                                         |    |
| Recipiente de peso y volumen conocido | Para determinación de las M.V.S.S. y M.V.S.V.                                                              |  |
| Juego de mallas                       | Utilizadas para realización del análisis granulométrico en los agregados.                                  |  |
| Raf-Tap                               | Utilizado para realización del análisis granulométrico en el agregado fino.                                |  |



|                                 |                                                                                             |                                                                                      |
|---------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Revolvedora de concreto         | Utilizada para elaborar las mezclas de concreto.                                            |    |
| Cubeta                          | Para medir cantidades de materiales y agua, para la elaboración de las mezclas de concreto. |    |
| Placa metálica                  | Para realización de la prueba de revenimiento en concreto fresco.                           |   |
| Cono para medir el revenimiento | Para realización de la prueba de revenimiento en concreto fresco.                           |  |
| Flexometro                      | Para realización de la prueba de revenimiento en concreto fresco.                           |  |



|                                                                  |                                                                                                                                                        |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Carretilla</p>                                                | <p>Utilizada para transportar el concreto hasta el lugar donde se encuentran los diferentes moldes para la elaboración de espécimenes de concreto.</p> |   |
| <p>Moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro x 20 cm de altura</p> | <p>Para la elaboración de espécimenes cilíndricos de concreto.</p>                                                                                     |    |
| <p>Moldes prismáticos de dimensiones: 15cm x 15cm x 60cm</p>     | <p>Para la elaboración de espécimenes prismáticos de concreto.</p>                                                                                     |   |
| <p>Maso de goma</p>                                              | <p>Para la elaboración de espécimenes de concreto.</p>                                                                                                 |  |
| <p>Resistivimetro</p>                                            | <p>Para medir la Resistividad eléctrica en los espécimenes de concreto.</p>                                                                            |  |



|                                                            |                                                                                                                                            |                                                                                      |
|------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico</p> | <p>Para medir la velocidad de pulso ultrasónico en los espécimenes de concreto.</p>                                                        |    |
| <p>Equipo para medir la Frecuencia de resonancia</p>       | <p>Para medir la frecuencia de resonancia en los espécimenes de concreto.</p>                                                              |    |
| <p>Maquina universal de pruebas</p>                        | <p>Para realización de pruebas destructivas en espécimenes de concreto.</p>                                                                |   |
| <p>Horno</p>                                               | <p>Para secar los espécimenes de concreto sometidos a algunas pruebas (ataque por sulfatos, congelamiento y deshielo, porosidad etc.).</p> |  |
| <p>Congelador</p>                                          | <p>Para realización de la prueba de congelamiento y deshielo.</p>                                                                          |  |
| <p>Computadora, potencióstato / galvanostato</p>           | <p>Equipo utilizado para realizar la prueba de Resistencia a la polarización</p>                                                           |  |



|            |                                        |                                                                                     |
|------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Voltímetro | Para medir la diferencia de potencial. |  |
|------------|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|

### 2.3 Pruebas realizadas a los agregados pétreos

A continuación se enlistan las pruebas realizadas a los agregados pétreos, las cuales nos sirven para obtener los parámetros de calidad de los materiales, con los cuales se diseñará la mezcla de concreto.

- Cuarteo (NMX-C-170-ONNCCE, 1997)
- % Humedad actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)
- Humedad superficial y humedad de absorción
- Colorimetría
- Densidad Aparente y Gravedad específica (NMX-C-164-ONNCCE, 2002) (NMX-C-165-ONNCCE, 2004)
- Determinación de la Masa volumétrica seca suelta (M.V.S.S) y Masa volumétrica seca varillada (M.V.S.V.) (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)
- Análisis granulométrico o distribución granulométrica (NMX-C-077-ONNCCE, 1997)

El procedimiento de prueba se realizó según lo especificado en la norma oficial correspondiente para cada prueba, los parámetros obtenidos en las diferentes pruebas mencionadas anteriormente, se presentan en el siguiente capítulo (RESULTADOS).



## 2.4 Pruebas de caracterización de las puzolanas

La caracterización 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.

Algunas de las técnicas de caracterización actualmente utilizadas son: Microscopia Electrónica de Barrido, MEB, para la generación de imágenes de alta y baja resolución que permite observación de la morfología de materiales sólidos orgánicos e inorgánicos; Microscopía Óptica de luz polarizada transmitida, sirven de apoyo para la caracterización de materiales como metales, polímeros, cerámicos y compuestos, ayuda en la identificación de la microestructura, cuantificación de fases, tamaño de grano, entre otros parámetros de microestructura; La difracción de rayos X es una técnica analítica no destructiva para la identificación y determinación cualitativa de las varias formas cristalinas, conocidas como “fases” de componentes presentes en muestras pulverizadas o sólidas (González Benito F. J., 2008).

### **Distribución y tamaño de partícula**

Conocer el tamaño de las partículas con las que se trabaja resulta de gran interés ya que dependiendo de las aplicaciones, existen tamaños óptimos. Por otro lado hay que decir que no sólo es importante el tamaño de las partículas si no también su distribución, es decir, si son mono o polidispersas. Cuando todas las partículas que forman parte de una muestra presentan un tamaño igual o similar se consideran monodispersas mientras que si por el contrario, presentan una gran variabilidad, dan lugar a un índice de polidispersidad.

## 2.5 Diseño de la mezcla

Existen diversos métodos para el diseño de mezclas, como lo son:

- Método del American Concrete Institute (ACI)
- Método Talbot-Richart



- Método de Goldbeck y Gray
- Método de las Curvas de Abrams
- Método Bolomey
- Método de Faury
- Método de Weymouth y Fuller

### **Elección del método de diseño de mezcla**

Para esta investigación nos basaremos en el método del American Concrete Institute (ACI) para el diseño de mezclas, debido a que es un método amigable con las pruebas a realizarse, su sistema de cálculo es confiable, por su menor consumo de cemento y mayor permisibilidad de agregados entre otras razones, cabe mencionar que la elección del método de diseño de mezclas a utilizar es cuestión también de gustos.

#### **2.5.1 Método ACI.**

La American Concrete Institute (ACI) es una autoridad líder y de recursos a nivel mundial para el desarrollo y la distribución de las normas basadas en el consenso, recursos técnicos, programas educativos, y probada experiencia para los individuos y las organizaciones que participan en el diseño de concreto, la construcción y los materiales, que comparten un compromiso con la búsqueda de la mejor utilización del hormigón.

El American Concrete Institute (ACI) presentó, como resultado de extensas investigaciones y fundamentándose en los trabajos experimentales de Abrams, Richard y Talbot, Goldbeck y Gray, un método con resultados aceptables para concretos con dos agregados, de masa unitaria entre los 2,0 Mg/m<sup>3</sup> y los 2,5 Mg/m<sup>3</sup> y con requisitos de resistencia menores a 42 MPa, los cuales son llamados usualmente hormigones normales.

El método del ACI es un método de diseño de mezclas de concreto normal que se basa en las propiedades físicas de los materiales como lo son: la Densidad, el Peso Volumétrico Seco Suelto, el Peso Volumétrico Seco Varillado, % de Absorción, % de Humedad Actual, Módulo de finura, y Tamaño Máximo del agregado, estas propiedades las usa para obtener la cantidad necesaria del concreto por unidad de volumen para un concreto de peso normal.

Este procedimiento tiene en consideración los requisitos para la facilidad de colocación, la coherencia, fuerza y durabilidad.

En este método se utiliza el método del volumen absoluto, que es generalmente aceptado y es más conveniente para el concreto de peso pesado. El método de volúmenes absolutos se utiliza debido a su general aceptación (Kosmatka & Steven, 2004).



## 2.6 Cálculo

El cálculo de las cantidades de material se realizó para cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, con una mezcla sin aire incluido. Con un revenimiento de proyecto de 10 cm y un  $f'c$  de proyecto de 400 Kg/cm<sup>2</sup>.

El cálculo se realizó con la ayuda del programa de Microsoft; Excel, donde se programó una hoja de Cálculo, para que esta realice los respectivos cálculos.

A continuación se ilustra de manera detallada y explicada el procedimiento para realizar el cálculo de las cantidades de material necesarias para 1 m<sup>3</sup> de mezcla, posteriormente se realiza para el volumen necesario, todo esto con la ayuda de la hoja de cálculo.

### 1. Elección del Revenimiento y Tamaño Máximo del agregado (Figura 4).



Figura 4. Elección del revenimiento y T.M.A. con ayuda de la hoja de cálculo (propia del autor).

Se escoge un revenimiento de 10 cm debido a que los espécimenes que se realizaron son cilindros y primas, además que ese es el revenimiento de proyecto que se eligió para la investigación. Y un tamaño máximo de 3/4", debido a que los espécimenes cilíndricos son de **10 cm de diámetro y 20 cm de altura**, y para estas dimensiones el tamaño máximo del agregado que más se adecúa es 3/4".

A continuación se muestra como se obtuvo el tamaño máximo del agregado (T.M.A.)



- En ningún caso el Tamaño Máximo debe exceder  $1/5$  de la menor dimensión entre los costados del molde.

Por lo tanto:

Si el molde es de 10 cm de diámetro

Una quinta parte de la distancia de los costados es:  $\frac{10}{5} = 2 \text{ cm.}$

Entonces la distancia entre los costados es de 2 cm. y el tamaño más cercano a esta medida es el de  $3/4''$  ó 1.905 cm (Tabla 9).

Tabla 9. Elección del T.M.A.

| Tamaño del Agregado en Plg. | Tamaño del Agregado en cm. |
|-----------------------------|----------------------------|
| $3/8''$                     | 0.9525                     |
| $1/2''$                     | 1.27                       |
| $3/4''$                     | <b>1.905</b>               |
| 1''                         | 2.54                       |

## 2. Cálculo del Agua de mezclado y el Contenido del Aire.

Debido a que la mezcla es de concreto sin aire incluido y el Revenimiento es de 10 cm, se entra con este valor y donde se cruce con el valor del T.M.A. que es de  $3/4''$ , ese será el valor para la cantidad de agua para  $1 \text{ m}^3$  como se muestra en la Figura 5.

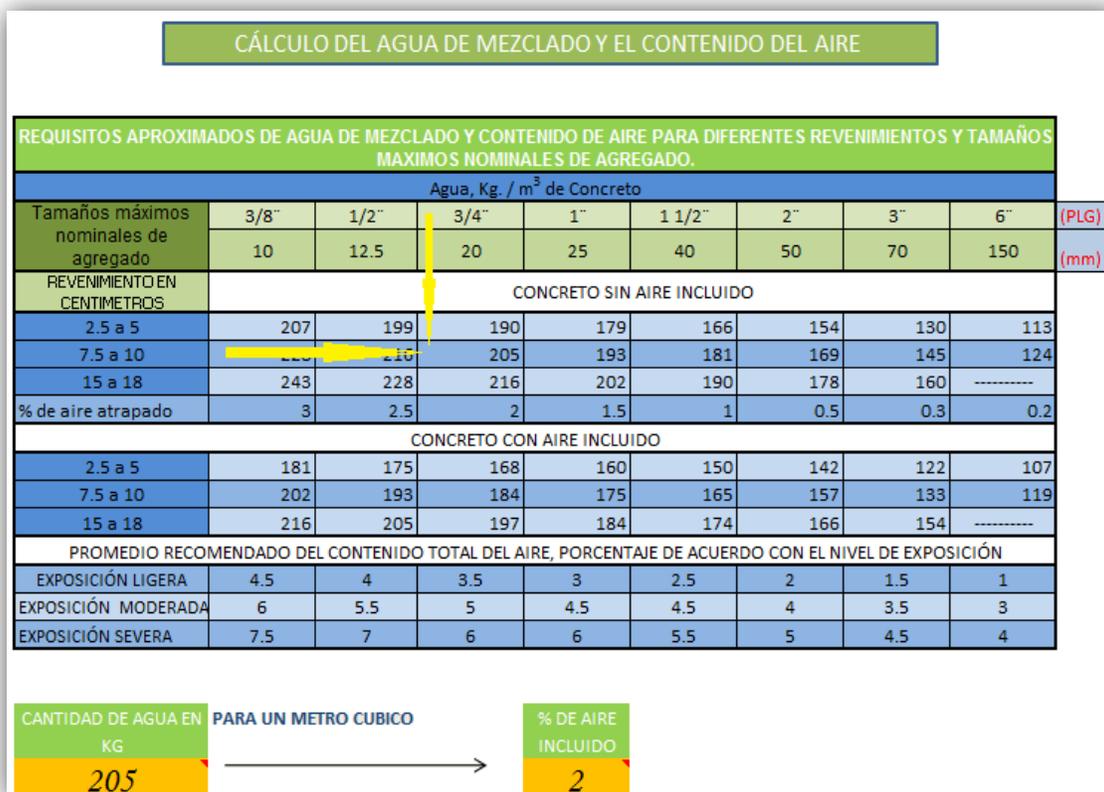


Figura 5. Calculo del agua necesaria para 1 m3 de concreto (Propia del autor).

Por lo tanto la cantidad de agua necesaria es de 205 kg. Y el % de aire incluido es del 2%.

### 3. Selección de la relación Agua/Cemento.

El  $f'c$  de proyecto es de  $400 \text{ Kg/cm}^2$ , pero el método del ACI nos marca que debemos tener un  $f'c$  de diseño llamado  $Fcr$ , este  $Fcr$  consiste en sumar al  $f'c$  de proyecto la desviación estándar de la resistencia del concreto, para esto debemos definir que procedimiento de fabricación se usará para poder elegir un valor "c", en este caso se elige un valor de:  $c = 45$  debido a que se usara un mezclado mecánico, proporciona miento, corrección por humedad y absorción de los agregados de una misma fuente y de calidad controlada.

Se tienen 2 fórmulas para determinar el  $Fcr$ , por cuestiones de seguridad se usará la que nos dé un  $Fcr$  mayor, Figura 6.



| FORMULAS PARA DETERMINAR EL Fcr   |       |       |
|-----------------------------------|-------|-------|
| 1) $F_{cr} = F'c + 1.28 * c$      | c =   | 45    |
| 2) $F_{cr} = F'c + 2.52 * c - 35$ | F'c = | 400   |
| 1)                                | Fcr = | 457.6 |
| 2)                                | Fcr = | 478.4 |

Figura 6. Calculo del f'c de diseño (Fcr) con ayuda de la hoja de cálculo (Propia del autor).

Por lo tanto el Fcr de diseño es de 478.4 kg/cm<sup>2</sup>

Una vez obtenido el valor de Fcr se procede a calcular la Relación Agua/Cemento por peso, en base a que nuestro Fcr = 478.4.2 Kg/cm<sup>2</sup>, y esta resistencia no está especificada, se procede a hacer una interpolación lineal para poder obtener el valor de la Relación A/C, que en nuestro caso se obtiene de **0.3516**, Figura 7.

|    |     |       |      |    |
|----|-----|-------|------|----|
| X1 | 420 | ----- | 0.41 | Y1 |
| X2 | 490 | ----- | 0.34 | Y2 |

→  $Y3 = Y1 + \frac{(Y2 - Y1)(X3 - X1)}{(X2 - X1)}$

|    |       |       |        |    |
|----|-------|-------|--------|----|
| X1 | 420   | ----- | 0.41   | Y1 |
| X3 | 478.4 | ----- | 0.3516 | Y3 |
| X2 | 490   | ----- | 0.34   | Y2 |

Figura 7. Calculo de la relación agua cemento con ayuda de la hoja de cálculo (Propia del autor).

La relación a/c es de 0.3516 (para 1 m<sup>3</sup> de concreto).

#### 4. Cálculo del contenido de Cemento.



En este paso se calcula la cantidad de cemento en peso, necesario para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto.

La operación que se efectúa para llegar al resultado es la siguiente:

$$\text{Cantidad de Cemento en peso} = \frac{\text{Cantidad de agua en Kg.}}{\text{Relación Agua/Cemento}} \quad (1)$$

Como nuestras cantidades son:

Cantidad de agua= 205 Kg

Relación Agua/Cemento= 0.3516

Por lo tanto:

$$\text{Cantidad de Cemento en peso} = \frac{205}{0.3516}$$

$$\text{Cantidad de Cemento en peso} = \mathbf{583.05 \text{ Kg.}}$$

Por lo tanto la cantidad de cemento en peso necesaria para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto es: 583.05 kg.

##### 5. Estimación del contenido del Agregado Grueso.

Una vez que se obtiene la cantidad de cemento, se estima el contenido de Agregado grueso en base a la Tabla 10, la cual muestra el volumen del agregado grueso en base al módulo de finura que contiene nuestro material, el cual en nuestro caso es de: 2.3.



Tabla 10. Volumen de agregado grueso en base al módulo de finura.

| VOLUMEN DE AGREGADO GRUESO POR VOLUMEN UNITARIO DE CONCRETO |                                                                                                                                         |     |      |      |      |      |
|-------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|------|------|------|------|
| Tamaño máximo del Agregado (mm)                             | Volumen de agregado grueso* varillado en seco, por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de figura de la arena indicados |     |      |      |      |      |
|                                                             | 2.4                                                                                                                                     | 2.6 | 2.8  | 3    | 3.2  | 3.4  |
| 9.5 (3/8")                                                  | 0.5                                                                                                                                     | 0.5 | 0.46 | 0.44 | 0.42 | 0.4  |
| 12.5 (1/2")                                                 | 0.59                                                                                                                                    | 0.6 | 0.55 | 0.53 | 0.51 | 0.49 |
| 19 (3/4")                                                   | 0.66                                                                                                                                    | 0.6 | 0.62 | 0.6  | 0.58 | 0.56 |
| 25(1")                                                      | 0.71                                                                                                                                    | 0.7 | 0.67 | 0.65 | 0.63 | 0.61 |
| 37.5(1 1/2")                                                | 0.75                                                                                                                                    | 0.7 | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 50(2")                                                      | 0.78                                                                                                                                    | 0.8 | 0.74 | 0.72 | 0.7  | 0.68 |
| 75(3")                                                      | 0.82                                                                                                                                    | 0.8 | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 150(6")                                                     | 0.87                                                                                                                                    | 0.9 | 0.83 | 0.81 | 0.79 | 0.77 |

\* Los volúmenes se basan en agregados en condiciones de varillado seco, como, como se describe en la forma ASTM C29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción. Para concretos menos + Para concretos mas trabajables, véase la ASTM Método 136 para el cálculo del módulo de figura.

Como se puede observar en la tabla 10, el valor de 2.3 no se encuentra por lo tanto se tiene que hacer una interpolación lineal para obtener el volumen de agregado grueso, Figura 8.

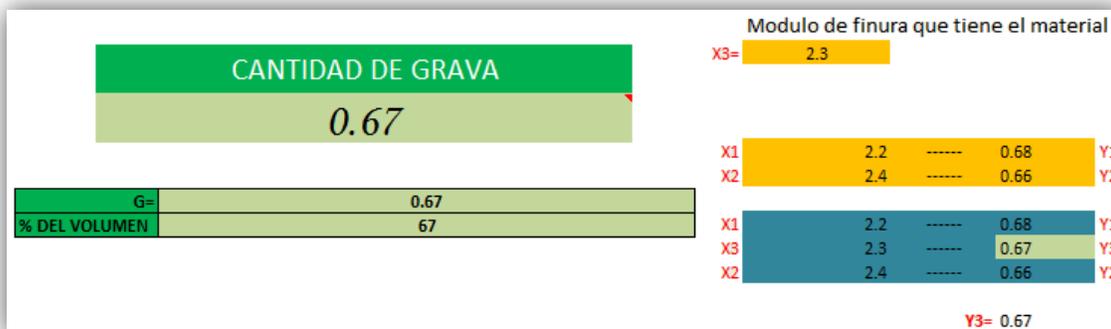


Figura 8. Obtención del volumen de agregado grueso para la elaboración de 1m<sup>3</sup> de concreto (Propia del autor).

Por lo tanto para nuestro caso tenemos que el contenido del agregado grueso es del 67% para 1 m<sup>3</sup>.

### 6. Estimación del contenido de Agregado Fino.

Para realizar el cálculo del contenido de Agregado fino primero se deben de tener los siguientes datos del material (Tabla 11), los cuales fueron obtenidos de las pruebas realizadas a dichos materiales en el laboratorio en un ambiente controlado.



Tabla 11. Resumen de características de los materiales a emplear (Propia del autor).

| MATERIAL | P.V.S.S. | P.V.S.V. | DENSIDAD | % ABSORCIÓN | % HUM. ACT. | M.F.  | T. MAX |
|----------|----------|----------|----------|-------------|-------------|-------|--------|
| GRAVA    | 1450     | 1570     | 2.62     | 2.68        | 0           | ----- | 3/4    |
| ARENA    | 1340     | 1460     | 2.43     | 3.18        | 0           | 2.3   | -----  |
| CEMENTO  | 1490     | -----    | 3.11     | -----       | -----       | ----- | -----  |
| AGUA     | -----    | -----    | 1        | -----       | -----       | ----- | -----  |
| AIRE     | -----    | -----    | -----    | -----       | -----       | ----- | -----  |

Para la estimación del contenido de Agregado fino se utiliza el método del Volumen absoluto, el cual se describe a continuación:

$$\text{➤ Cálculo del peso de la grava} = (\text{Cantidad de grava}) * (P.V.S.V.) \quad (2)$$

$$(.67) * (1570) = \mathbf{1051.90 Kg.}$$

Peso de la grava= **1051.90 Kg.**

Las densidades se obtuvieron de las pruebas realizadas a los materiales.

$$\text{➤ Cálculo del Volumen de la grava} = \frac{\left[ \frac{\text{Peso de la grava}}{\text{Densidad de la grava}} \right]}{1000} \quad (3)$$

$$= \left[ \frac{1051.90}{2.62} \right] / 1000 = \mathbf{0.4015 m^3}$$

Volumen de la grava= **0.4015 m<sup>3</sup>**

$$\text{➤ Cálculo del Volumen del cemento} = \frac{\left[ \frac{\text{Peso del cemento}}{\text{Densidad del cemento}} \right]}{1000} \quad (4)$$

$$= \left[ \frac{583.05}{3.11} \right] / 1000 = \mathbf{0.1875 m^3}$$

Volumen del Cemento= **0.1875 m<sup>3</sup>**

$$\text{➤ Cálculo del Volumen del agua} = \frac{\left[ \frac{\text{Peso del Agua}}{\text{Densidad del Agua}} \right]}{1000} \quad (5)$$

$$= \left[ \frac{205}{1} \right] / 1000 = \mathbf{0.205 m^3}$$

Volumen del Agua= **0.205 m<sup>3</sup>**



$$\begin{aligned} \text{➤ Cálculo del Volumen del aire} &= \left[ \frac{\% \text{ de Aire incluido}}{100} \right] \\ &= \left[ \frac{2}{100} \right] = \mathbf{0.020 \text{ m}^3} \end{aligned} \tag{6}$$

Volumen del Aire= **0.020 m<sup>3</sup>**

Una vez obtenidos estos valores se realiza una suma de volúmenes con excepción del volumen de la arena (Sv-a), ya que es el volumen que queremos encontrar.

$$(Sv-a) = (\text{Volumen de la grava} = \mathbf{0.4015 \text{ m}^3}) + (\text{Volumen del Cemento} = \mathbf{0.1875 \text{ m}^3}) + (\text{Volumen del Agua} = \mathbf{0.205 \text{ m}^3}) + (\text{Volumen del Aire} = \mathbf{0.020 \text{ m}^3})$$

$$(Sv-a) = \mathbf{0.8140 \text{ m}^3}$$

$$\text{➤ Cálculo del Volumen de la Arena} = 1 - (Sv - a) \tag{7}$$

$$1 - (0.8140) = \mathbf{0.186 \text{ m}^3}$$

Volumen de la Arena= **0.186 m<sup>3</sup>**

Por lo tanto el volumen de cada material nos queda como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Volumen de material necesario para elaborar 1 m3 de concreto. (Propia del autor)

| MATERIALES    | PESO (Kg.)  | DENSIDAD | VOLUMEN (m <sup>3</sup> ) |
|---------------|-------------|----------|---------------------------|
| Grava         | 1051.9      | 2.62     | 0.40148855                |
| Arena         | 452.0672702 | 2.43     | 0.186035914               |
| Cemento       | 583.0489192 | 3.11     | 0.187475537               |
| Agua          | 205         | 1        | 0.205                     |
| Aire          | -----       | -----    | 0.0200                    |
| <b>SUMAS=</b> | 2292.016189 |          | 1                         |

Una vez que se obtiene el volumen de la arena se calcula el peso de la arena para 1 m<sup>3</sup>.

$$\begin{aligned} \text{➤ Cálculo del peso de la Arena} &= \\ &= (\text{Densidad de la arena}) * (\text{Volumen de la arena}) \end{aligned} \tag{8}$$

$$(2.43) * (0.186) = \mathbf{451.98 \text{ Kg.}}$$



Peso de la arena = **451.98 Kg**

### 7. Ajustes o Correcciones por Humedad del Agregado.

Una vez que ya se tiene calculada la cantidad de material necesario para  $1\text{m}^3$  de mezcla se realizan las correcciones por humedad del agregado, esta corrección consiste en restar el % de la Humedad actual menos el % de Absorción del material (% H.ACTUAL - % ABS.).

El % de H.ACTUAL y el % de ABS. Son datos que se obtienen de las pruebas realizadas a los Agregados Pétreos

- Corrección por Humedad de la Grava en peso

$$(Peso\ de\ la\ grava) + \left[ \left( \frac{\% H.ACTUAL}{100} \right) * (Peso\ de\ la\ grava) \right] \quad (9)$$

$$(1051.90) + \left[ \left( \frac{0}{100} \right) * (1051.90) \right] = \mathbf{1051.90\ Kg.}$$

Peso de la Grava corregida por Humedad = **1051.90 Kg.**

- Corrección por Humedad de la Arena en peso

$$(Peso\ de\ la\ arena) + \left[ \left( \frac{\% H.ACTUAL}{100} \right) * (Peso\ de\ la\ arena) \right] \quad (10)$$

$$(451.98) + \left[ \left( \frac{0}{100} \right) * (451.98) \right] = \mathbf{451.98\ Kg.}$$

Peso de la Arena corregida por Humedad = **451.98 Kg.**

- Al cemento no se le hace corrección por Humedad

Nota: Para nuestro caso no se harán los ajustes de corrección por humedad hasta el momento que se realice la mezcla.

### 8. Corrección de la cantidad de Agua en base a la diferencia de los % de Humedad y de Absorción.

Si el % de ABS. Es mayor al % de HUMEDAD, en la grava se suma la diferencia del % de grava, y si el % de ABS, es mayor al % de HUMEDAD en la arena también se suma la Diferencia del % de la Arena.



Caso contrario si el % de ABS. Es menor al % de HUMEDAD en la grava se resta la diferencia del % de grava, y si el % de ABS. Es menor al % de HUMEDAD en la arena también se resta la Diferencia del % de la Arena.

Para nuestro se hará la suposición de que el % de ABS. Es mayor que el % de HUMEDAD en gravas y arenas, por lo tanto en ambos casos se suma.

$$\text{Cantidad de Agua Corregida} = (\text{Cantidad de Agua}) + (\text{Diferencia del \% de Grava}) + (\text{Diferencia del \% de Arena}) \quad (11)$$

Dónde:

$$\text{Diferencia del \% de Grava} = (\text{Peso de la grava}) * \left( \frac{\text{Factor de Corrección de la Grava}}{100} \right) \quad (12)$$

$$\text{Diferencia del \% de Arena} = (\text{Peso de la Arena}) * \left( \frac{\text{Factor de Corrección de la Arena}}{100} \right) \quad (13)$$

$$\text{Factor de Corrección de la Grava} = (\% H. ACTUAL - \% ABSORCIÓN) \quad (14)$$

$$\text{Factor de Corrección de la Arena} = (\% H. ACTUAL - \% ABSORCIÓN) \quad (15)$$

Para nuestro caso como se mencionó anteriormente, estas correcciones solo se harán hasta el momento de hacer la mezcla, ya que dependiendo del día y la hr, los agregados pueden contener mayor o menor humedad actual diferente a la calculada.

Por lo tanto la cantidad de materiales necesarios para elaborar  $1\text{m}^3$  son los que se muestran en la tabla 12.

9. Cálculo de la cantidad de material necesario para los especímenes que se van a realizar.

Una vez que ya se corrigieron las cantidades de material por humedad se procede a hacerse el cálculo de la cantidad para un volumen determinado, esta cantidad se busca en peso.

Para nuestro caso, con ayuda de la hoja de cálculo, tenemos que para 24 cilindros de dimensiones de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, necesitamos las siguientes cantidades de materiales, Figura 9.



Figura 9. Calculo de los materiales para un número conocido de cilindros con ayuda de la hoja de cálculo (Propia del autor).

Así mismo para cierto número de prismas de dimensiones 15 cm x 15 cm x 60cm, con ayuda de la hoja de cálculo podemos cuantificar las cantidades de materiales que se necesita para elaborar dichos espécimenes.

## 2.7 Elaboración de los espécimenes

Para nuestro proyecto se elaboraron 2 tipos diferentes de probetas de concreto, los cuales fueron: espécimenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, y espécimenes prismáticos de 15 cm de lado y 60 cm de longitud, con dichos espécimenes se realizaron las pruebas tanto destructivas como no destructivas, las cuales se mencionan más adelante.

Se realizaron dos mezclas para cada sustitución, debido a que el número de moldes disponibles era insuficiente, ya que para cada mezcla (sustitución) realizada se necesita de los siguientes espécimenes (Tabla 13.)



Tabla 13. Cantidades de especímenes elaborados para cada mezcla (propia del autor)

| Especímen                        | Prueba a realizar                | Cantidad de especímenes elaborados |
|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| Cilindros de 10cm x 20 cm        | Compresión Axial                 | 12                                 |
| Cilindros de 10cm x 20 cm        | Tensión por compresión diametral | 12                                 |
| Prismas de 15 cm x 15 cm x 60 cm | Módulo de ruptura                | 12                                 |
| Cilindros de 10cm x 20 cm        | Porosidad                        | 1                                  |
| Cilindros de 10cm x 20 cm        | Ataque por sulfatos              | 12                                 |
| Cilindros de 10cm x 20 cm        | Congelamiento y deshielo         | 10                                 |

Las probetas elaboradas para realizar las pruebas de Compresión Axial, Tensión por compresión diametral y Módulo de ruptura se realizaron para cumplir las edades de prueba de: 28, 60, 90 y 150 días, mientras que las pruebas de Porosidad, Ataque por sulfatos y Congelamiento y deshielo solo se realizaron a una edad, la cual fue después de los 90 días de edad del concreto.

Además de los especímenes mencionados, también se realizaron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para realizar pruebas electroquímicas (velocidad de corrosión y diferencia de potencial), pero a diferencia de los especímenes anteriores, a estos se les introdujo una barra de acero de alta resistencia (Grado 60) de 15 cm de longitud al centro, la cual serviría como electrodo de trabajo a la hora de realizar la prueba de resistencia a la polarización, también se introdujeron 2 barras de grafito a 1" de los extremos del cilindro (Figura 10), los cuales sirven como contraelectrodo, para estas pruebas se elaboraron 4 especímenes por cada mezcla, cabe destacar que se le realizaron las pruebas cada 3° día de edad del concreto (iniciando el día de descimbrado) y hasta una edad de 85 días.



Figura 10. Espécimen cilíndrico para realización de las pruebas de  $R_p$  y diferencia de potencial. (Propia del autor)

## 2.8. Elaboración de las mezclas

Lo primero que se hizo para elaborar las diferentes probetas, fue pesar los materiales que fueron obtenidos del cálculo de nuestro proporcionamiento con la hoja de Excel como se mencionó en párrafos anteriores.

Para la elaboración de nuestra mezcla de concreto se utilizó una revolvedora de concreto con capacidad para 1 saco de cemento de 50 kg (Tabla 8) el procedimiento fue:

1. Poner a trabajar la revolvedora
2. Poner aproximadamente la mitad del total del agua dentro de la revolvedora
3. Poner el agregado grueso dentro de la revolvedora
4. Poner el agregado fino dentro de la revolvedora
5. Poner el cemento dentro de la revolvedora
6. Poner la parte restante del agua de nuestra mezcla
7. Dejar trabajar unos minutos la revolvedora hasta lograr una mezcla homogénea

Una vez que se tuvo la mezcla homogénea de concreto hidráulico, se procedió a realizar la prueba de revenimiento (NMX-C-156-ONNCCE, 2010) en esta, para comprobar que cumpliera con revenimiento de proyecto (10 cm) como se observa en la Figura 11.



**Figura 11. Prueba de revenimiento en la mezcla de concreto fresco. (Propia del autor)**

Después de verificar que se cumplió con el revenimiento de proyecto, se procedió a llenar los diferentes moldes con nuestra mezcla de concreto, el procedimiento de llenado para los especímenes cilíndricos tal y como se especifica en la norma oficial correspondiente (NMX-C-159-ONNCCE, 2004) (Figura 12).



**Figura 12. Llenado de los especímenes cilíndricos de la mezcla Testigo. (Propia del autor)**

Para el llenado de los especímenes prismáticos (Figura 13) se siguió el procedimiento especificado en la norma oficial vigente (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).



Figura 13. Llenado de los espécimenes prismáticos de la mezcla Testigo. (propia del autor)

Cabe destacar que para elaborar las mezclas de concreto fue necesario el empleo de un fluidificante, debido a que nuestra relación agua cemento (A/C) de proyecto es baja ( $<0.4$ ), el fluidificante utilizado en la mezcla testigo y en la mezcla con sustitución de EAH, fue SikaCem fluidificante, y para la mezcla con sustitución de CBC, se utilizó un Superplastificante y reductor de agua el cual lleva por nombre CRISOTAN R-5, las características obtenidas de cada mezcla, así como el tipo y cantidad de fluidificante utilizado se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14. Resumen de características obtenidas en cada mezcla.

| Mezcla  | Relación (A/C) | Fluidificante empleado | Cantidad (gr) | Revenimiento (cm) |
|---------|----------------|------------------------|---------------|-------------------|
| Testigo | 0.37           | SikaCem                | 180           | 11.5              |
| EAH     | 0.38           | SikaCem                | 130           | 9.5               |
| CBC     | 0.39           | CRISOTAN R-5           | 477           | 0                 |

## 2.9 Curado de los espécimenes (NMX-C-159-ONNCCE, 2004).

El curado de los espécimenes de concreto elaborados con las diferentes mezclas de concreto, fue mediante la inmersión en agua de los diferentes espécimenes (Figura 14), como lo indica la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), dichos espécimenes se mantuvieron dentro de la pila de curado hasta la edad correspondiente para realizarle las diferentes pruebas.



Figura 14. Curado de los espécimenes de concreto elaborados con las diferentes mezclas de concreto, con y sin sustitución. (Propia del autor)

## 2.10 Pruebas no destructivas

Las pruebas no destructivas son aquellas que una vez realizadas no se pierde o se daña el espécimen estudiado. Generalmente son técnicas de carácter indirecto que nos permiten estimar la calidad de los especímenes y mediante correlaciones o modelos se puede estimar sus características mecánicas.

Las pruebas se realizaron como se describe a continuación:

Una vez cumplida la edad de prueba de los espécimenes mencionados anteriormente, estos fueron sacados de la pila de curado para realizarles primero las pruebas no destructivas, la primera prueba realizada a los espécimenes fue la de Resistividad Eléctrica, seguida por la de Velocidad de Pulso Ultrasónico y por último la de Frecuencia de Resonancia.

### 2.10.1 Prueba de Resistividad eléctrica

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo resistivímetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson (Figura 15). En el cual la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = Re \left( \frac{A}{L} \right) \quad (16)$$

Dónde;  $\rho$  es la resistividad eléctrica en  $K\Omega\text{-cm}$  (ohm-m)



Re: es la resistencia eléctrica que el equipo proporciona en  $K\Omega$

A: es el área transversal del espécimen en  $cm^2$

L: es la longitud del espécimen en cm.



Figura 15. Medición de la resistencia eléctrica un espécimen prismático de la mezcla EAH. (Propia del autor)

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de los especímenes:

Cilindros: diámetro y longitud.

Prismas: Ancho, peralte y longitud

2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas, Figura 48.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).
6. La resistencia eléctrica (R) se calcula como  $E/I$  y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente).
7. Se calcula la resistividad eléctrica con la ecuación (16).

### 2.10.2 Prueba de velocidad de pulso ultrasónico.

El procedimiento seguido para la determinación de la velocidad de pulso ultrasónico es el indicado en la (NMX-C-275-ONNCCE, 2004), el cual consiste en lo siguiente (Figura 16):



Después de tomadas las dimensiones de los especímenes (en este caso la longitud)

1. Se enciende el equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico.
2. Se calibra el equipo
3. Se aplicó gel en las caras planas del espécimen o en los transductores del equipo.
4. En el menú del equipo se buscó la opción para determinar la velocidad de pulso ultrasónico y se seleccionó la misma.
5. Se introduce la longitud del espécimen en cuestión.
6. Se hace contacto con los transductores del equipo en las caras planas del espécimen.
7. Se toma la lectura de velocidad de pulso ultrasónico.



Figura 16. Medición de la velocidad de pulso ultrasónico en espécimen prismático de mezcla CBC. (Propia del autor)

### Normalización del método de velocidad de pulso.

Muchas naciones han desarrollado procedimientos normalizados para medir la velocidad de pulso. En Estados Unidos, el comité C09 de la ASTM inicio el desarrollo de una norma para la velocidad de pulso a finales de 1960. Una norma tentativa se emitió en 1968. En 1971 se emitió una norma para el método y no se han hecho cambios significativos desde entonces (ASTM C-597-02, 2003). El significado y el uso del método de prueba, está dado en la norma ASTM C 597-03, de la siguiente manera (ASTM C-597-02, 2003):

La velocidad de pulso  $V$ , de una onda longitudinal de compresión en una masa de concreto está relacionada con sus propiedades elásticas y su densidad de acuerdo a la siguiente relación:

$$V = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (17)$$



Dónde:

$V$  = Velocidad de pulso ultrasónico  
 $E$  = Módulo de elasticidad dinámico  
 $\mu$  = Relación dinámica de Poisson  
 $\rho$  = Densidad

Este método de prueba es aplicado para evaluar la uniformidad y calidad relativa del concreto, al indicar la presencia de vacíos y grietas, y para evaluar la eficacia de la reparación de las grietas. También es aplicado para indicar cambios en las propiedades del concreto, y en el estudio de estructuras, para estimar la gravedad de la deterioración o agrietamiento. Cuando se usa para monitorear cambios en su condición con el tiempo, se marcan en la estructura ubicaciones de prueba para garantizar que las pruebas se repitan en las mismas posiciones.

### **Determinación del módulo de elasticidad y de la relación de Poisson.**

Es posible determinar el Módulo de Elasticidad de un material si la velocidad de pulso ultrasónico es medida y los valores de la relación de Poisson así como la densidad son conocidas.

La relación entre estas constantes elásticas y la velocidad de un pulso ultrasónico que viajan en un medio isotrópico elástico de infinitas dimensiones están dadas por la ecuación (17).

Si se conoce el valor de la relación de Poisson y de la densidad, entonces se puede usar la ecuación (17) para determinar el valor del Módulo de Elasticidad Dinámico de muestras de concreto para un rango amplio de formas y tamaños. Esto debido a que la velocidad de pulso no es afectada significativamente por las dimensiones del espécimen de prueba, excepto cuando una o más de las dimensiones laterales son relativamente más pequeñas que la longitud de onda del pulso. Similarmente, la relación de Poisson puede ser determinada si se conocen los valores de la densidad y del Módulo de Elasticidad Dinámico (Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, 2002).

### **2.10.3 Métodos de frecuencias de resonancia**

La frecuencia natural de vibración es una propiedad dinámica de un sistema elástico y se relaciona sobre todo con el Módulo de Elasticidad Dinámico y la densidad del sistema, por lo tanto, la frecuencia natural de vibración de una viga puede ser utilizada para determinar su Módulo de Elasticidad Dinámico.

#### **Calculo**

Para las vibraciones de flexión de una viga larga, delgada sin restricciones, se tiene la siguiente ecuación:



$$N = \frac{m^2 k}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (18)$$

Resolviendo para E, se tiene:

$$E = \frac{4\pi^2 L^4 N^2 \rho}{m^4 k^2} \quad (19)$$

Dónde:

$E$  = Módulo de Elasticidad Dinámico

$\rho$  = Densidad del material

$L$  = Longitud del espécimen

$N$  = Frecuencia fundamental flexural

$k$  = Radio de giro de la sección alrededor del eje perpendicular al plano de flexión ( $k = t/\sqrt{12}$  para sección transversal rectangular donde t es el espesor)

$m$  = Constante (4.73 para el modo fundamental de vibración)

Procedimiento para la determinación de frecuencias de resonancia fundamental longitudinal:

1. Se llevó el control de voltaje de salida y ganancia de amplificador totalmente a la izquierda. Se colocó en 1seg, el output – input se llevó a output, se seleccionó el modo manual en el botón de manual-auto. Se prendió el instrumento y se dejó prendido 10min para alcanzar una estabilidad térmica.



2. La frecuencia de resonancia fundamental longitudinal está en un punto nodal al centro del largo de un prisma o cilindro, por tanto el espécimen debe colocarse en el centro de apoyo de la tabla de pruebas en el punto nodal (Figura 17).
3. Se debe poner vaselina o un medio grasoso en los extremos de las barras de contacto del vibrador y acelerómetro. En esta investigación se usó grasa de calidad mecánica automotriz.
4. Para que los extremos de los especímenes estén libres a la vibración en la dirección longitudinal es esencial que se cuente con un mínimo de restricción en dichos extremos. Ambas barras, la del vibrador y la del acelerómetro son libres a moverse en el montaje y es necesario solamente el movimiento de los apoyos del vibrador y del acelerómetro a lo largo de los rieles hasta que las barras hagan contacto con el centro de los extremos del espécimen. Los apoyos deben asegurarse usando el tornillo de sujeción.
5. Se seleccionó el rango de frecuencia de interés, para especímenes de concreto éste estará generalmente en un rango de 1khz a 10khz dependiendo de las dimensiones del espécimen.
6. Posteriormente se ajustó el control del voltaje de salida para una lectura de 4 volt y se aumentó ligeramente la ganancia del amplificador partiendo de cero.
7. Comenzando del final de bajas frecuencias del rango se giró el control de frecuencia y al mismo tiempo se observó el medidor de ganancia. En la frecuencia fundamental de resonancia, la vibración de los extremos del espécimen será presentada por un máximo indicado por un pico del medidor de ganancia.

Teniendo establecida la región de la resonancia fundamental, el botón del control fino puede ser ajustado hasta que el medidor de ganancia de entrada indique un pico absoluto, la frecuencia de resonancia es entonces indicada en el contador digital de frecuencia.



Figura 17. Realización de la prueba para determinar la frecuencia de resonancia en un espécimen prismático de EAH. (Propia del autor)

## 2.11 Pruebas destructivas

Después de realizar las pruebas descritas anteriormente, se realizaron las pruebas destructivas a los especímenes de las diferentes mezclas, dichas pruebas nos sirven para determinar las propiedades físico-mecánicas de nuestras mezclas de concreto.

### 2.11.1 Determinación de la resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto

Se calcula la resistencia a la ruptura por compresión dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba, entre el área promedio de la sección transversal del espécimen.

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (20)$$

Dónde:

$f'c$  = Esfuerzo de ruptura por compresión del cilindro de concreto,  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

$P$  = Carga máxima en kg obtenida en la máquina de prueba, kg.



$A = \text{Área de la sección transversal del cilindro de concreto, cm}^2.$

### Procedimiento

El procedimiento realizado para efectuar la Determinación de la resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto es el descrito en la norma (ASTM C 39/C 39M –03) (Figura 18).



Figura 18. Prueba de compresión simple en un espécimen cilíndrico de la mezcla testigo. (Propia del autor)

Se probaron 3 cilindros a compresión por cada mezcla a las edades de 28, 60, 90 y 150 días.

#### 2.11.2 Determinación de la resistencia a la tensión indirecta en cilindros de concreto

El procedimiento realizado para efectuar la Determinación de la resistencia a la compresión simple en cilindros de concreto es el descrito en la norma (ASTM C 496/C 496M – 04) (Figura 19).

#### *Calculo*

El esfuerzo a la tensión indirecta se calcula de la siguiente manera:

$$T = \frac{2P}{\pi d} \quad (21)$$



Dónde:

$T$  = Esfuerzo de tensión, en  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .

$P$  = Carga máxima aplicada indicada por la máquina de ensaye, kg.

$l$  = Longitud, cm.

$d$  = Diámetro, cm.



Figura 19. Prueba de tensión indirecta en espécimen cilíndrico de la mezcla CBC. (Propia del autor)

Se probaron 3 cilindros a tensión por cada mezcla a las edades de 28, 60, 90 y 150 días.

### 2.11.3 Determinación de la resistencia a la flexión en especímenes prismáticos

Este método de prueba determina la resistencia a la flexión del concreto con el uso de una viga simple con carga en dos puntos tercios de la longitud.

El procedimiento de prueba seguido, es el especificado en la norma (ASTM C 78 – 02) (Figura 20)

#### *Cálculos*

Si se inicia la fractura en la superficie de la tensión en el tercio medio de la longitud del tramo, el Módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:



$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (22)$$

Dónde:

$R$  = Módulo de ruptura,  $\text{kg}/\text{cm}^2$

$P$  = Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba,  $\text{kg}$

$L$  = Longitud de la muestra,  $\text{cm}$

$b$  = Ancho promedio de la muestra,  $\text{cm}$

$d$  = Espesor promedio de la muestra,  $\text{cm}$

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

$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (23)$$

Dónde:

$a$  = Distancia media entre la línea de fractura y el soporte más cercano medida en la superficie de tensión de la viga,  $\text{cm}$ .

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



Figura 20. Prueba de flexión en espécimen prismático de la mezcla EAH. (Propia del autor)

Se probaron 3 prismas a flexión por cada mezcla a las edades de 28, 60, 90 y 150 días.



#### 2.11.4 Resistencia al ataque por sulfatos (durabilidad)

Para la determinación de la durabilidad de las diferentes mezclas de concreto con y sin sustitución, se realizó la prueba de resistencia al ataque por sulfatos. Para el análisis de la resistencia al ataque por sulfatos, se utilizaron especímenes cilíndricos, es decir idénticos a los especímenes utilizados para la prueba de resistencia a compresión, solo que en este caso se elaboraron 12 cilindros por cada porcentaje de sustitución.

Los especímenes se sometieron a ataque por sulfato de sodio a la edad de 90 días, el procedimiento de la prueba de ataque fue siguiendo lo especificado en la norma (ASTM C 88 - 99a) (Figura 21), (Figura 22).



Figura 21. Especímenes de EAH sumergidos en la solución de sulfato. (Propia del autor)



Figura 22. Secado de los espécimenes hasta peso constante. (Propia del autor)

Cabe destacar que a los especímenes de concreto de las diferentes mezclas sometidos a los ciclos de inmersión en sulfato, se realizaron las siguientes pruebas en el orden que sigue:

1. Resistividad eléctrica
2. Velocidad de pulso ultrasónico



3. Determinación de la resistencia a la compresión
4. Determinación de la pérdida de masa

Lo anterior para comparar cómo se comportan las diferentes mezclas ante las sollicitaciones después de haber sido sumergidas en sulfato.

### 2.11.5 Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados

Dicha prueba tiene por objeto determinar los efectos de las variaciones en las propiedades del concreto, sobre la resistencia del mismo a los ciclos de congelación y deshielo, dicho procedimiento no pretende proporcionar cuantitativamente la durabilidad que pueda esperarse de un tipo específico de concreto.

El procedimiento especificado para realizar esta prueba está dado por la norma (NMX-C-205-ONNCCE, 2005), pero debido a que en el laboratorio no se cuenta con el equipo especificado en dicha norma, la prueba consistió en lo siguiente:

1. Una vez llegada la fecha de prueba de los especímenes (para nuestro caso fue a los 90 días de edad del concreto de las diferentes mezclas), los especímenes (10 cilindros por cada mezcla de concreto) se sacaron de la pila de curado.
2. Se introdujeron los especímenes de cada mezcla de concreto a un congelador a una temperatura de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  aproximadamente y se dejaron ahí alrededor de 24 horas (Figura 23).



Figura 23. Especímenes cilíndricos de concreto de las diferentes mezclas, dentro del congelador (primer ciclo).  
(Propia del autor)



3. Transcurrido el tiempo de congelamiento de los especímenes, se sacaron del congelador y se pusieron a secar en un horno a una temperatura máxima de 60 °C, durante un tiempo aproximado de 24 horas (Figura 24).



Figura 24. Especímenes dentro del horno después de 24 horas de congelamiento (Primer ciclo). (Propia del autor)

4. Después del secado de los especímenes, se dejaron unas horas a temperatura ambiente y se introdujeron al congelador durante 24 horas nuevamente.
5. Se observaron minuciosamente los especímenes para verificar el surgimiento de microfisuras en la superficie del concreto después de cada ciclo de congelamiento-deshielo y se registraron estas observaciones en la bitácora.
6. Se repitió el paso 3 y 4 hasta completar los ciclos de congelamiento y deshielo propuestos en la investigación.
7. Se compararon los resultados observados en cada mezcla para verificar cuales especímenes (mezcla) fueron más afectados por el efecto de congelamiento-deshielo.

#### 2.11.6 Estimación indirecta de la Porosidad del concreto

El objetivo de esta prueba es determinar la absorción capilar porosidad del concreto como una medida de su compacidad.

Para conocer la porosidad en el concreto es necesario realizar los siguientes ensayos:

**Ensayo de absorción capilar.** La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Fagerlund y es base de la normativa sueca que describe la cinética de la absorción capilar



del concreto a través de tres coeficientes:  $m$  (Resistencia a la penetración),  $k$  (Coeficiente de absorción capilar), y  $\epsilon e$  (porosidad efectiva).



Figura 25. Realización del ensayo de absorción capilar. (Propia del autor)

Los coeficientes se calculan en base a las siguientes ecuaciones:

$$m = \frac{t}{z^2} \text{ (s/m}^2\text{)} \quad (24)$$

Donde  $z$  representa la profundidad de penetración del agua al tiempo  $t$ .

$$k = \frac{(Wt - W_0)/A}{\sqrt{t}} \text{ (} \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}^{\frac{1}{2}}}\text{)} \quad (25)$$

$$\epsilon e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} \text{ (\%)} \quad (26)$$

El coeficiente  $k$  puede ser evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico  $(Wt - W_0)/A$  en función de  $\sqrt{t}$ .

El coeficiente  $m$  puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando  $z = H$ .

Con la anterior información la Sorción Capilar,  $S$ , se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \text{ (mm/h}^{\frac{1}{2}}\text{)} \text{ o (m/s}^{\frac{1}{2}}\text{)} \quad (27)$$



### Ensayo de Absorción de Agua (% de Absorción Total).

El agua absorbida se expresa en porcentaje, según:

$$\% \text{ Agua absorbida} = \frac{(W_f - W_0) 100}{W_0} \quad (28)$$

Este ensayo difiere del anterior en que no se asegura un completo llenado de la red de capilares (Figura 26).



Figura 26. Especímenes sumergidos para realización el ensayo de Absorción de agua. (Propia del autor)

### Ensayo de Porosidad (Porosidad Total).

$$\% \text{ de Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^\circ\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} \times 100 \quad (29)$$



Figura 27. Obtención del peso sumergido de una probeta con sustitución de EAH para realización del ensayo de porosidad total. (Propia del autor)



El procedimiento de prueba para realizar los diferentes ensayos anteriores es el especificado en la Red (DURAR, 1998).

## 2.12 Pruebas electroquímicas

### 2.12.1 Medición de Potenciales

El potencial Electroquímico es el potencial eléctrico de un metal relativo a un electrodo de referencia, medido bajo condiciones de circuito abierto.

Dicha prueba tiene por objetivo medir el potencial del acero embebido en el concreto mediante el uso de electrodos de referencia, en el caso en cuestión el electrodo de referencia utilizado fue el de cobre sulfato de cobre (Cu/CuSO<sub>4</sub>) de propia fabricación.

El procedimiento de prueba seguido para la realización de esta es el que se indica en la norma (ASTM C-876-91)(Figura 28).

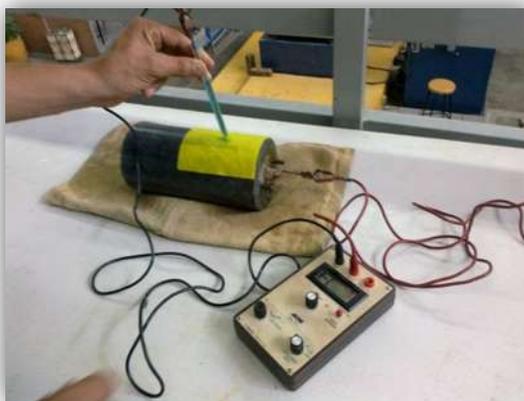


Figura 28. Realización de la prueba para medir la diferencia de potencial. (Propia del autor)

### 2.12.2 Medida de la Velocidad de Corrosión

Se llama velocidad o intensidad de corrosión ( $i_{corr}$ ) a la pérdida de metal por unidad de superficie y tiempo. Las unidades básicas son  $g/cm^2$  día, aunque la formula usual de definirla a partir de medidas de tipo electroquímico es en  $\mu A / cm^2$  o, transformando este dato a partir de la intensidad del metal, en unidades de penetración (mm/año).



El intervalo de barrido para la realización de la prueba fue de  $-20\text{ mV}$  a  $+20\text{ mV}$ , el área utilizada para calcular la densidad de corriente de corrosión fue de  $1\text{ cm}^2$  y la velocidad de barrido fue de  $0.125\text{ mV/s}$ .

El procedimiento que se siguió para realizar dicha prueba es el indicado en las normas (ASTM G 3 – 89), (ASTM G 5 – 94), (ASTM G 59 – 97), (ASTM G 102 – 89) (Figura 29).



Figura 29. Realización de la prueba de Resistencia a la Polarización ( $R_p$ ), para posterior cálculo de la velocidad de corrosión, en espécimen con sustitución de EAH. (Propia del autor)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las diferentes pruebas descritas en el capítulo anterior.

El orden de los resultados se presenta como se mencionaron las diferentes pruebas.

#### 3.1 Caracterización de los agregados pétreos

##### 3.1.1 Agregado fino (Arena)

Como ya se mencionó en el capítulo anterior, el agregado fino a utilizar en nuestra experimentación es arena de río, proveniente del Río Lerma entre los estados de Michoacán y Guanajuato, a continuación se presentan sus características:

##### **Humedad actual**

Para el cálculo de esta se utilizó la siguiente ecuación:



$$\% \text{ de humedad actual} = \frac{mh - ms}{ms} * 100 \tag{30}$$

Dónde:

mh → Peso húmedo de la grava en gramos.

ms → Peso seco de la grava en gramos.

Los resultados se muestran en la tabla 15.

**Tabla 15. Humedad actual en la arena. (Propia del autor)**

| <b>Humedad Actual</b> |             |          |
|-----------------------|-------------|----------|
| <b>Muestra</b>        | <b>1</b>    | <b>2</b> |
| Masa húmeda (gr)      | 300.00      | 300.00   |
| Masa seca (gr)        | 288.20      | 288.40   |
| % de Humedad Actual   | 4.09        | 4.02     |
| <b>Promedio</b>       | <b>4.06</b> |          |

### **Humedad de absorción**

Para el cálculo de esta se utilizó la siguiente ecuación:

$$\% \text{ Humedad de absorción} = \frac{mh - ms}{ms} * (100) \tag{31}$$

Dónde:

mh → Peso saturado y superficialmente seco (gramos).

ms → Peso seco del material (gramos).

Los resultados se muestran en la tabla 16.



Tabla 16. Humedad de absorción en la arena. (Propia del autor)

| Humedad de Absorción |             |        |
|----------------------|-------------|--------|
| Muestra              | 1           | 2      |
| Masa húmeda (gr)     | 300.00      | 300.00 |
| Masa seca (gr)       | 291.20      | 290.30 |
| Agua Absorbida       | 8.80        | 9.70   |
| Absorción            | 3.02        | 3.34   |
| <b>Promedio</b>      | <b>3.18</b> |        |

### Colorimetría

Los resultados obtenidos en esta prueba se presentan en la Tabla 17 (Figura 30).

Tabla 17. Colorimetría en la arena. (CRUZ JIMÉNEZ, 2012)

| Prueba | Colorimetría |
|--------|--------------|
| 1      | Escala 3     |
| 2      | Escala 3     |



Figura 30. Prueba de colorimetría en la arena (CRUZ JIMÉNEZ, 2012).

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.

### Densidad

La densidad de la arena se calculó con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad (D)} = \frac{A_s}{V_f - (K - F - A_s)} \quad (32)$$



Dónde:

As → Peso del agregado fino superficialmente seco en gr.

Vf → Volumen colocado dentro del frasco (ml).

K → Peso del frasco + agua + agregado en gr.

F → Peso del frasco en gr.

Los resultados se presentan en la tabla 18.

**Tabla 18. Densidad de la arena. (Propia del autor)**

| <b>Densidad</b>                |             |        |
|--------------------------------|-------------|--------|
| Muestra                        | 1           | 2      |
| Masa superf. Seca (gr)         | 300         | 300    |
| Volumen del frasco (ml)        | 450         | 450    |
| Masa del frasco (gr)           | 301         | 324.1  |
| Masa (frasco+agua+arena) (gr)  | 926.20      | 951.70 |
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2.40        | 2.45   |
| <b>Promedio</b>                | <b>2.43</b> |        |

### **Masa volumétrica seca suelta (M.V.S.S)**

La M.V.S.S. se calculó con la siguiente ecuación:

$$M.V.S.S. = \frac{P_n}{V} \tag{33}$$

Dónde:

M.V.S.S. → Peso volumétrico seco y suelto g/cm<sup>3</sup>.

Pn. → Peso del material en gr.

V → Volumen del recipiente cm<sup>3</sup>.

Los resultados se presentan en la tabla 19.



Tabla 19. Masa volumétrica seca suelta de la arena. (Propia del autor)

| <b>Masa Volumétrica Seca suelta</b> |             |      |
|-------------------------------------|-------------|------|
| Muestra                             | 1           | 2    |
| Masa bruta (gr)                     | 5680        | 5670 |
| Tara (gr)                           | 1950        | 1950 |
| Masa neta (Pn)                      | 3730        | 3720 |
| Volumen (V)                         | 2783        | 2783 |
| Masa volumétrica (Pn/V)             | 1.34        | 1.34 |
| <b>Promedio</b>                     | <b>1.34</b> |      |

### Masa volumétrica seca varillada (M.V.S.V)

La M.V.S.V. se calculó con la siguiente ecuación:

$$M.V.S.V. = \frac{Pn}{V} \tag{34}$$

Dónde:

M.V.S.V. → Peso volumétrico seco y varillado g/cm<sup>3</sup>.

Pn. → Peso del material en gr.

V. → Volumen del recipiente cm<sup>3</sup>.

Los resultados se presentan en la tabla 20.

Tabla 20. Masa volumétrica seca varillada de la arena. (Propia del autor)

| <b>Masa Volumétrica Seca Varillada</b> |             |      |
|----------------------------------------|-------------|------|
| Muestra                                | 1           | 2    |
| Masa bruta (gr)                        | 5990        | 6010 |
| Tara (gr)                              | 1950        | 1950 |
| Masa neta (Pn)                         | 4040        | 4060 |
| Volumen (V)                            | 2783        | 2783 |
| Masa volumétrica (Pn/V)                | 1.45        | 1.46 |
| <b>Promedio</b>                        | <b>1.46</b> |      |

### Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la tabla 21.



Tabla 21. Composición granulométrica de la arena. (Propia del autor)

| Composición Granulométrica |                                |                    |                      |             |                                |                    |                      |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Muestra 1                  | Masa de la muestra (gr)= 566.5 |                    |                      | Muestra 2   | Masa de la muestra (gr)= 566.5 |                    |                      |
| Malla                      | Masa retenida parcial (gr)     | % Retenido Parcial | % Retenido acumulado | Malla       | Masa retenida parcial (gr)     | % Retenido Parcial | % Retenido acumulado |
| 4                          | 9.9                            | 2                  | 2                    | 4           | 10.5                           | 2                  | 2                    |
| 8                          | 20                             | 4                  | 6                    | 8           | 14.6                           | 2                  | 4                    |
| 16                         | 28.3                           | 5                  | 11                   | 16          | 35.1                           | 6                  | 10                   |
| 30                         | 83.4                           | 15                 | 26                   | 30          | 91                             | 15                 | 25                   |
| 50                         | 336                            | 59                 | 85                   | 50          | 393.1                          | 66                 | 91                   |
| 100                        | 80                             | 14                 | 99                   | 100         | 40.7                           | 7                  | 98                   |
| 200                        | 6                              | 1                  | 100                  | 200         | 7.8                            | 1                  | 99                   |
| Charola                    | 2.9                            | 0                  | 0                    | Charola     | 3.7                            | 1                  | 100                  |
| <b>SUMA</b>                | 566.5                          | 100                |                      | <b>SUMA</b> | 596.5                          | 100                |                      |
|                            |                                | <b>M.F. =</b>      | <b>2.3</b>           |             |                                | <b>M.F. =</b>      | <b>2.3</b>           |

### 3.1.2 Agregado grueso (grava)

El agregado grueso utilizado en nuestra experimentación es grava triturada proveniente del banco de joyitas ubicado en la ciudad de Morelia en Michoacán, a continuación se presentan sus características:

#### Humedad actual

Para el cálculo de esta se utilizó la ecuación (30) los resultados se muestran en la tabla 22.

Tabla 22. Humedad actual en la Grava. (Propia del autor)

| Humedad Actual      |             |        |
|---------------------|-------------|--------|
| Muestra             | 1           | 2      |
| Masa húmeda (gr)    | 500.00      | 500.00 |
| Masa seca (gr)      | 493.00      | 495.00 |
| % de Humedad Actual | 1.42        | 1.01   |
| <b>Promedio</b>     | <b>1.21</b> |        |



### Humedad de absorción

Para el cálculo de esta se utilizó la ecuación (31) los resultados se muestran en la tabla 23.

Tabla 23. Humedad de absorción en la Grava. (Propia del autor)

| Humedad de Absorción |             |        |
|----------------------|-------------|--------|
| Muestra              | 1           | 2      |
| Masa húmeda (gr)     | 303.70      | 301.40 |
| Masa seca (gr)       | 294.40      | 294.90 |
| Agua Absorbida       | 9.30        | 6.50   |
| Absorción            | 3.16        | 2.20   |
| <b>Promedio</b>      | <b>2.68</b> |        |

### Densidad

La densidad de la arena se calculó con la siguiente ecuación:

$$D = \frac{Ph}{V} \quad (35)$$

Dónde:

D → Densidad en g/cm<sup>3</sup>.

Ph → Peso del agregado grueso en gramos.

V → Volumen del agregado en cm<sup>3</sup> o ml.

Los resultados se presentan en la tabla 24.

Tabla 24. Densidad de la Grava. (Propia del autor)

| Densidad                                         |             |       |
|--------------------------------------------------|-------------|-------|
| Muestra                                          | 1           | 2     |
| Volumen desalojado (ml)                          | 114         | 116   |
| Masa húmeda (gr)                                 | 300.8       | 301.7 |
| Densidad relativa aparente (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2.64        | 2.60  |
| <b>Promedio</b>                                  | <b>2.62</b> |       |

**Masa volumétrica seca suelta (M.V.S.S)**

La M.V.S.S. se calculó con la ecuación (33), los resultados se presentan en la tabla 25.

**Tabla 25. Masa volumétrica seca suelta de la Grava. (Propia del autor)**

| <b>Masa Volumétrica Seca Suelta</b> |             |          |
|-------------------------------------|-------------|----------|
| <b>Muestra</b>                      | <b>1</b>    | <b>2</b> |
| Masa bruta (gr)                     | 18500       | 18100    |
| Tara (gr)                           | 2930        | 2930     |
| Masa neta (Pn)                      | 15570       | 15170    |
| Volumen (V)                         | 10600       | 10600    |
| Masa volumétrica (Pn/V)             | 1.47        | 1.43     |
| <b>Promedio</b>                     | <b>1.45</b> |          |

**Masa volumétrica seca varillada (M.V.S.V)**

La M.V.S.V. se calculó con la ecuación (34), los resultados se presentan en la tabla 26.

**Tabla 26. Masa volumétrica seca varillada de la Grava. (Propia del autor)**

| <b>Masa Volumétrica Seca Varillada</b> |             |          |
|----------------------------------------|-------------|----------|
| <b>Muestra</b>                         | <b>1</b>    | <b>2</b> |
| Masa bruta (gr)                        | 18500       | 18100    |
| Tara (gr)                              | 2930        | 2930     |
| Masa neta (Pn)                         | 15570       | 15170    |
| Volumen (V)                            | 10600       | 10600    |
| Masa volumétrica (Pn/V)                | 1.47        | 1.43     |
| <b>Promedio</b>                        | <b>1.45</b> |          |

**Análisis granulométrico**

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la tabla 27.



Tabla 27. Composición granulométrica de la Grava. (Propia del autor)

| Composición Granulométrica |                                |                    |                      |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Muestra 1                  | Masa de la muestra (gr)= 15170 |                    |                      |
| Malla                      | Masa retenida parcial (gr)     | % Retenido Parcial | % Retenido acumulado |
| 2"                         | 0                              | 0                  | 0                    |
| 1 1/2"                     | 0                              | 0                  | 0                    |
| 1"                         | 0                              | 0                  | 0                    |
| 3/4"                       | 1640                           | 11                 | 11                   |
| 1/2"                       | 5730                           | 38                 | 49                   |
| 3/8"                       | 2430                           | 16                 | 65                   |
| No. 4                      | 4720                           | 31                 | 96                   |
| Pasa No. 4                 | 620                            | 4                  | 100                  |
| <b>SUMA</b>                | 15140                          | 100                |                      |
|                            |                                | <b>T.M.A. =</b>    | <b>3/4"</b>          |

### 3.1.3 Agregado fino (EAH)

Debido a que la EAH se utilizó como sustitución del agregado fino, también se le realizaron las mismas pruebas de calidad que a la arena, sus características se presentan a continuación:

#### Humedad actual

Para el cálculo de esta se utilizó la ecuación (30) los resultados se muestran en la tabla 28.

Tabla 28. Humedad actual en la EAH. (Propia del autor)

| Humedad Actual      |             |        |
|---------------------|-------------|--------|
| Muestra             | 1           | 2      |
| Masa húmeda (gr)    | 300.00      | 300.00 |
| Masa seca (gr)      | 297.60      | 298.40 |
| % de Humedad Actual | 0.81        | 0.54   |
| <b>Promedio</b>     | <b>0.67</b> |        |



### Humedad de absorción

Para el cálculo de esta se utilizó la ecuación (31) los resultados se muestran en la tabla 29.

Tabla 29. Humedad de absorción en la EAH. (Propia del autor)

| Humedad de Absorción |             |        |
|----------------------|-------------|--------|
| Muestra              | 1           | 2      |
| Masa húmeda (gr)     | 300.00      | 300.00 |
| Masa seca (gr)       | 294.30      | 294.30 |
| Agua Absorbida       | 5.70        | 5.70   |
| Absorción            | 1.94        | 1.94   |
| <b>Promedio</b>      | <b>1.94</b> |        |

### Densidad

La densidad de la arena se calculó con la ecuación (32), los resultados se presentan en la tabla 30.

Tabla 30. Densidad de la EAH. (Propia del autor)

| Densidad                       |             |        |
|--------------------------------|-------------|--------|
| Muestra                        | 1           | 2      |
| Masa superf. Seca (gr)         | 300         | 300    |
| Volumen del frasco (ml)        | 450         | 450    |
| Masa del frasco (gr)           | 300.1       | 324    |
| Masa (frasco+agua+arena) (gr)  | 937.50      | 961.60 |
| Densidad (gr/cm <sup>3</sup> ) | 2.66        | 2.67   |
| <b>Promedio</b>                | <b>2.67</b> |        |

### Masa volumétrica seca suelta (M.V.S.S)

La M.V.S.S. se calculó con la ecuación (33), los resultados se presentan en la Tabla 31.



Tabla 31. Masa volumétrica seca suelta de la EAH. (Propia del autor)

| <b>Masa Volumétrica Seca suelta</b> |             |      |
|-------------------------------------|-------------|------|
| Muestra                             | 1           | 2    |
| Masa bruta (gr)                     | 5810        | 5820 |
| Tara (gr)                           | 1945        | 1945 |
| Masa neta (Pn)                      | 3865        | 3875 |
| Volumen (V)                         | 2783        | 2783 |
| Masa volumétrica (Pn/V)             | 1.39        | 1.39 |
| <b>Promedio</b>                     | <b>1.39</b> |      |

### Masa volumétrica seca varillada (M.V.S.V)

La M.V.S.V. se calculó con la ecuación (34), los resultados se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Masa volumétrica seca varillada de la EAH. (Propia del autor)

| <b>Masa Volumétrica Seca Varillada</b> |             |      |
|----------------------------------------|-------------|------|
| Muestra                                | 1           | 2    |
| Masa bruta (gr)                        | 6300        | 6330 |
| Tara (gr)                              | 1945        | 1945 |
| Masa neta (Pn)                         | 4355        | 4385 |
| Volumen (V)                            | 2783        | 2783 |
| Masa volumétrica (Pn/V)                | 1.56        | 1.58 |
| <b>Promedio</b>                        | <b>1.57</b> |      |

### Análisis granulométrico

Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la tabla 33.



Tabla 33. Composición granulométrica de la EAH. (Propia del autor)

| Composición Granulométrica |                                |                    |                      |             |                                |                    |                      |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|-------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|
| Muestra 1                  | Masa de la muestra (gr)= 749.3 |                    |                      | Muestra 2   | Masa de la muestra (gr)= 669.4 |                    |                      |
| Malla                      | Masa retenido parcial (gr)     | % Retenido Parcial | % Retenido acumulado | Malla       | Masa retenido parcial (gr)     | % Retenido Parcial | % Retenido acumulado |
| 4                          | 0                              | 0                  | 0                    | 4           | 0                              | 0                  | 0                    |
| 8                          | 0                              | 0                  | 0                    | 8           | 0                              | 0                  | 0                    |
| 16                         | 1.5                            | 0                  | 0                    | 16          | 1.1                            | 0                  | 0                    |
| 30                         | 218.1                          | 30                 | 30                   | 30          | 218.8                          | 33                 | 33                   |
| 50                         | 262                            | 35                 | 65                   | 50          | 241.7                          | 36                 | 69                   |
| 100                        | 134.9                          | 18                 | 83                   | 100         | 83.2                           | 12                 | 82                   |
| 200                        | 68.7                           | 9                  | 92                   | 200         | 72.5                           | 11                 | 93                   |
| Charola                    | 61.6                           | 8                  | 100                  | Charola     | 48.9                           | 7                  | 100                  |
| <b>SUMA</b>                | 746.8                          | 100                |                      | <b>SUMA</b> | 666.2                          | 100                |                      |
|                            |                                | <b>M.F. =</b>      | <b>1.79</b>          |             |                                | <b>M.F. =</b>      | <b>1.84</b>          |

### 3.2 Pruebas no destructivas

A continuación se presentan graficas típicas de los resultados obtenidos de las pruebas no destructivas realizadas a los espécimenes de las diferentes mezclas realizadas en nuestra experimentación.

#### 3.2.1 Resistividad eléctrica

La prueba de resistividad eléctrica fue la primera realizada a nuestros espécimenes de las mezclas de concreto con las diferentes sustituciones, la resistividad eléctrica se calculó con la ecuación (16), los resultados se presentan a continuación:

#### Resistividad eléctrica en cilindros de concreto para la prueba de compresión

Los resultados se presentan en la Figura 31.

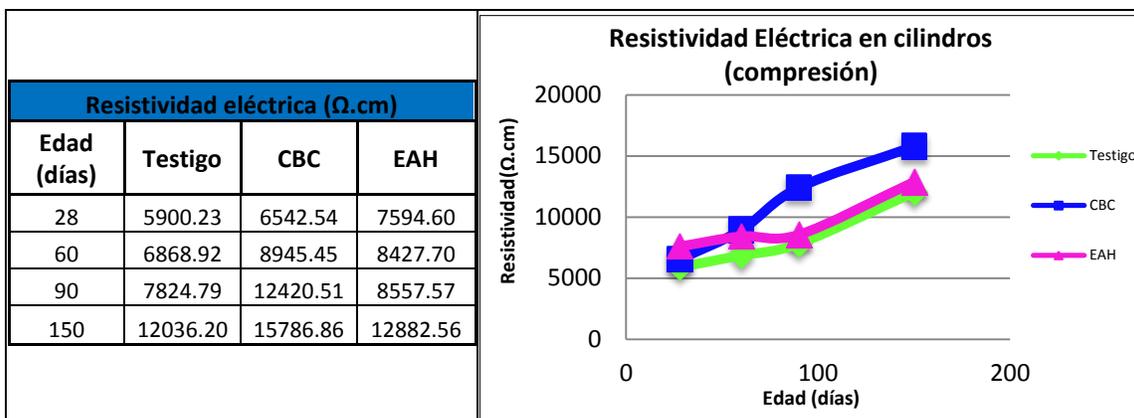


Figura 31. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto, realizada a cilindros para la prueba de compresión. (Propia del autor)

### Resistividad eléctrica en cilindros de concreto para la prueba de tensión

Los resultados se presentan en la Figura 32.

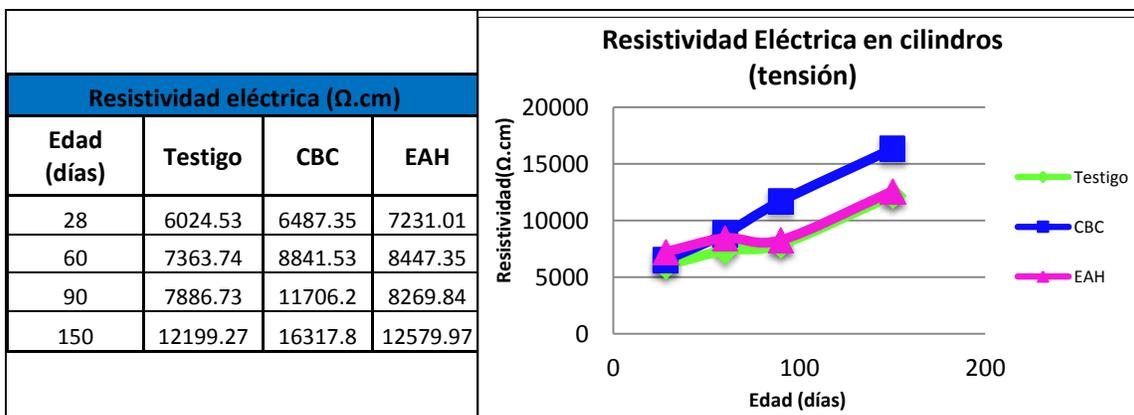


Figura 32. Resultados de resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto, realizada a cilindros para la prueba de tensión. (Propia del autor)

### Resistividad eléctrica en prismas de concreto para la prueba de flexión

Los resultados se presentan en la Figura 33.

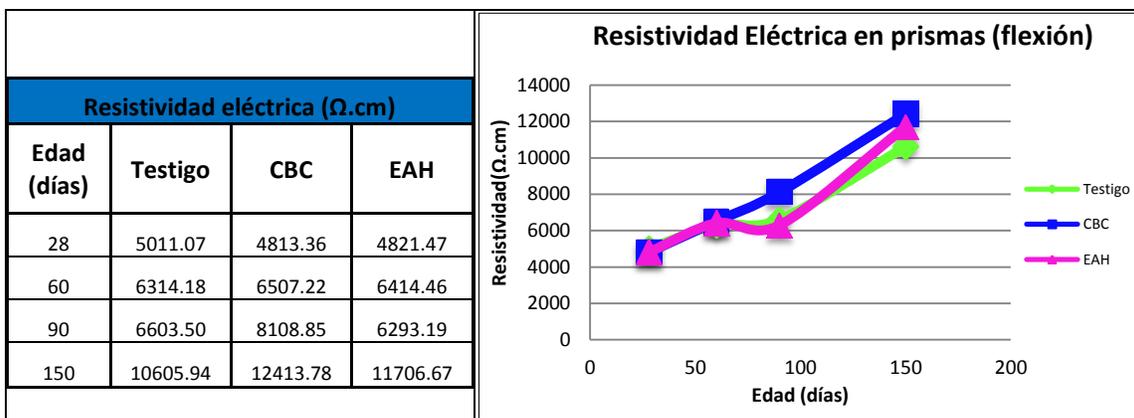


Figura 33. Resultados de resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto, realizada a los prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor)

En cuanto a los criterios de evaluación de dicha prueba se tiene lo siguiente:

**Criterios de Evaluación:**

No existe un acuerdo de carácter general entre los diferentes investigadores acerca del nivel límite de resistividad eléctrica por encima del cual el riesgo de corrosión de las armaduras puede ser considerado despreciable. Sin embargo la práctica ha demostrado que se puede utilizar como criterio general:

$$\begin{aligned} \rho > 200 \text{ k}\Omega.\text{cm} & \text{ Poco riesgo} \\ 200 \text{ K}\Omega.\text{cm} > \rho > 10 \text{ k}\Omega.\text{cm} & \text{ Riesgo moderado} \\ \rho < 10 \text{ k}\Omega.\text{cm} & \text{ Alto riesgo} \end{aligned}$$

En base a los criterios anteriores, se pueden clasificar a nuestras diferentes mezclas de concreto como un concreto con riesgo moderado a la corrosión del acero de refuerzo.

En cuanto a la diferencia de resistividad en prismas con respecto a cilindros en la mezcla de CBC, se puede deber al vibrado que se les dio tanto a unos como a otros, ya que fue sumamente difícil el vibrado en los espécimenes elaborados con esta mezcla, por lo que se puede decir los prismas elaborados con esta mezcla tienen mayor cantidad de poros debido a la geometría de estos.

**3.2.2 Velocidad de pulso ultrasónico**

La velocidad de pulso ultrasónico se calculó como se explicó en párrafos anteriores, los resultados de esta se presentan a continuación:

**Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de concreto para la prueba de compresión**



Los resultados se presentan en la Figura 34.

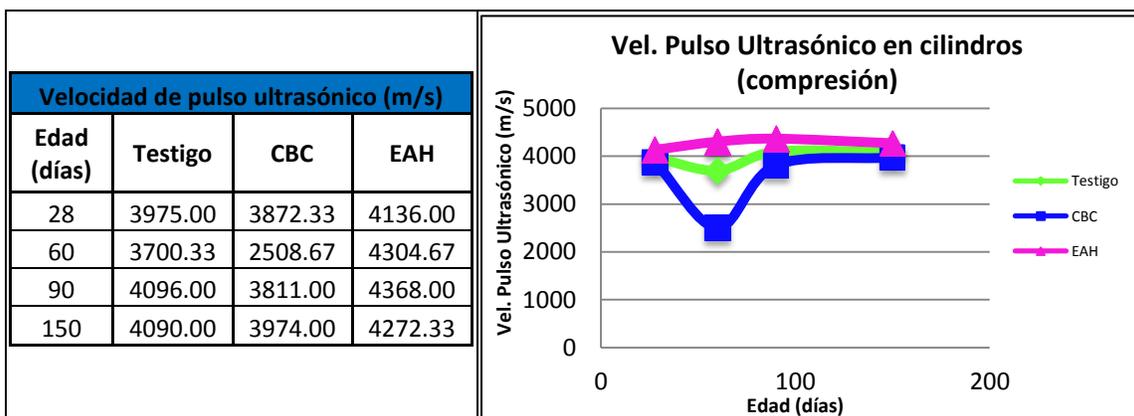


Figura 34. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenida en las diferentes mezclas, realizada a cilindros para la prueba de compresión. (Propia del autor)

### Velocidad de pulso ultrasónico en cilindros de concreto para la prueba de tensión

Los resultados se presentan en la Figura 35.

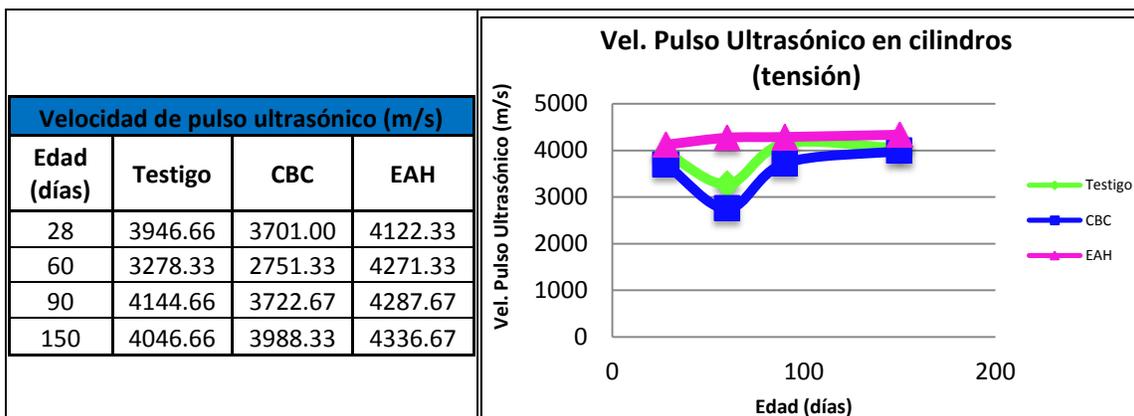


Figura 35. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenida en las diferentes mezclas, realizada a cilindros para la prueba de tensión. (Propia del autor)

### Velocidad de pulso ultrasónico en prismas de concreto para la prueba de flexión

Los resultados se presentan en la Figura 36.

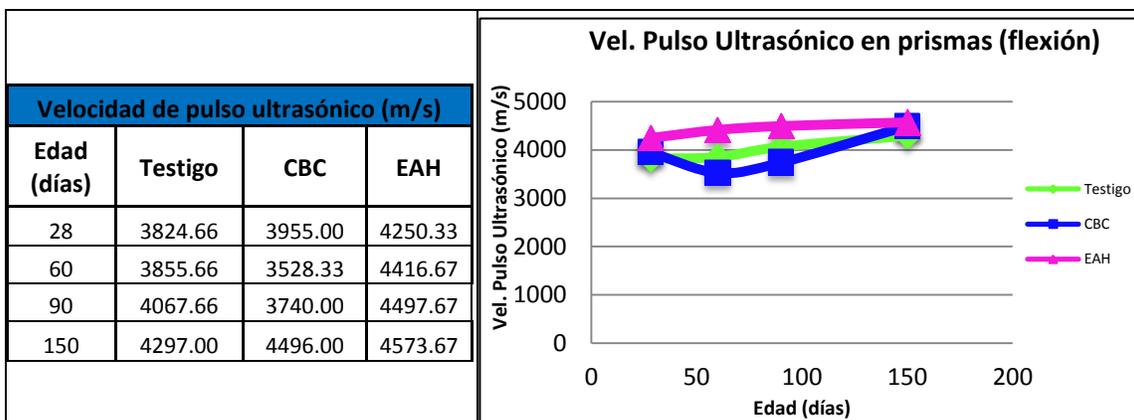


Figura 36. Resultados de velocidad de pulso ultrasónico obtenidos en las diferentes mezclas, realizada a prismas de para la prueba de flexión. (Propia del autor)

La velocidad de pulso para un concreto saturado es mayor que para un concreto seco. La humedad generalmente tiene menos influencia en la velocidad para concretos de alta resistencia que para concretos de baja resistencia debido a la diferencia en la porosidad (Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, 2002). Se puede esperar un incremento de un 4 a 5% en la velocidad de pulso, cuando concreto seco con una alta relación a/c es saturado (Jones, 1962). (Kaplan, 1958) Encontró que la velocidad de pulso para especímenes curados en laboratorio fue mayor que para especímenes curados en sitio.

En cuanto a los criterios de evaluación se tiene la siguiente tabla:

Tabla 34. Clasificación del concreto según su velocidad ultrasónica (Malhotra V. M., 1985).

| Velocidad ultrasónica, v (m/s) | Clasificación del concreto |
|--------------------------------|----------------------------|
| $V > 4\ 575$                   | Excelente                  |
| $4\ 575 > V > 3\ 660$          | Bueno                      |
| $3\ 660 > V > 3\ 050$          | Cuestionable               |
| $3\ 050 > V > 2\ 135$          | Pobre                      |

Por lo tanto haciendo caso de la Tabla 34, y atendiendo a los valores obtenidos de la velocidad de pulso ultrasónico para las diferentes mezclas, se tiene que la clasificación del concreto es **Bueno**.

### 3.2.3 Frecuencia de resonancia

La frecuencia de resonancia se obtuvo directamente del equipó utilizado para dicha prueba (como se explicó en el capítulo anterior), los resultados se presentan a continuación:



### Frecuencia de resonancia en prismas de concreto para la prueba de flexión

Los resultados se presentan en la Figura 37.

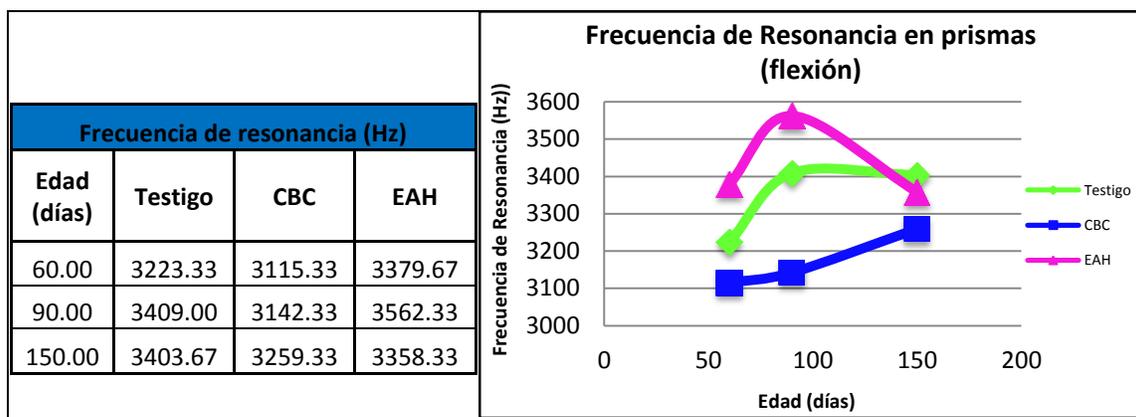


Figura 37. Resultados de frecuencia de resonancia obtenida en las diferentes mezclas, realizada a prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor)

La frecuencia de resonancia es la prueba más afectada por la morfología o geometría de las muestras analizadas, por lo que si se comparan las frecuencias de resonancia obtenidas de los cilindros ensayados a tensión como a compresión, con las especificadas en la literatura (Tabla 35) para cilindros de mayores dimensiones, se puede observar que los resultados son muy inferiores, por lo tanto estos resultados obtenidos en los cilindros no se utilizaron para determinar el módulo de elasticidad dinámico, puesto que se obtienen resultados mucho muy inferiores a los obtenidos con el módulo de elasticidad dinámico calculado con la velocidad de pulso ultrasónico y el módulo de elasticidad dinámico calculado con la frecuencia de resonancia obtenida en prismas (por lo tanto solo el módulo de elasticidad dinámico calculado con la frecuencia de resonancia obtenido en prismas se reporta en los resultados).

Tabla 35. Rangos aproximados de frecuencias de resonancia de especímenes de concreto cilíndricos y prismáticos. (Jones, 1962)

| Tamaño de especímenes (mm) | Rango aproximado de frecuencia de resonancia (Hz) |              |
|----------------------------|---------------------------------------------------|--------------|
|                            | Transversal                                       | Longitudinal |
| 152x152x710 prisma         | 550-1150                                          | 1800-3200    |
| 102x102x510 prisma         | 900-1600                                          | 2500-4500    |
| 152x302 cilindro           | 2500-4500                                         | 4000-7500    |



### 3.2.4 Determinación del módulo de elasticidad dinámico utilizando la velocidad de pulso ultrasónico

El módulo de elasticidad dinámico (calculado mediante la velocidad de pulso ultrasónico), se calculó con la ecuación (17), los resultados de la prueba se presentan a continuación:

#### Módulo de elasticidad dinámico en cilindros de concreto para la prueba de compresión

Los resultados se presentan en la Figura 38.

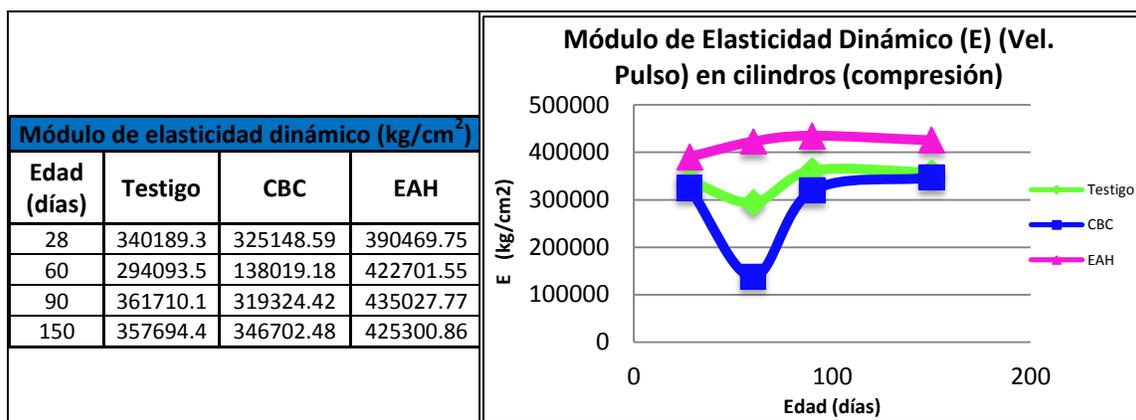


Figura 38. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en cilindros para la prueba de compresión. (Propia del autor)

#### Módulo de elasticidad dinámico en cilindros de concreto para la prueba de tensión

Los resultados se presentan en la Figura 39.

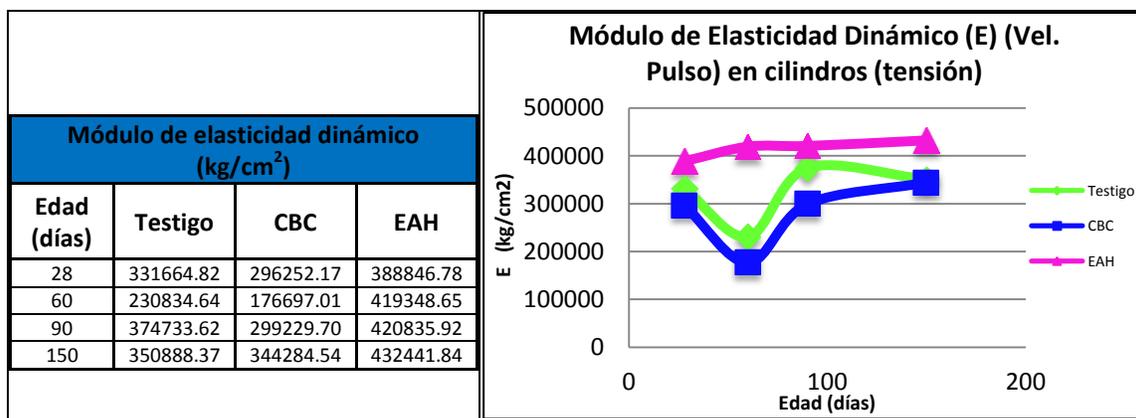


Figura 39. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en cilindros de para la prueba de tensión. (Propia del autor)



### Módulo de elasticidad dinámico en prismas de concreto para la prueba de flexión

Los resultados se presentan en la Figura 40.

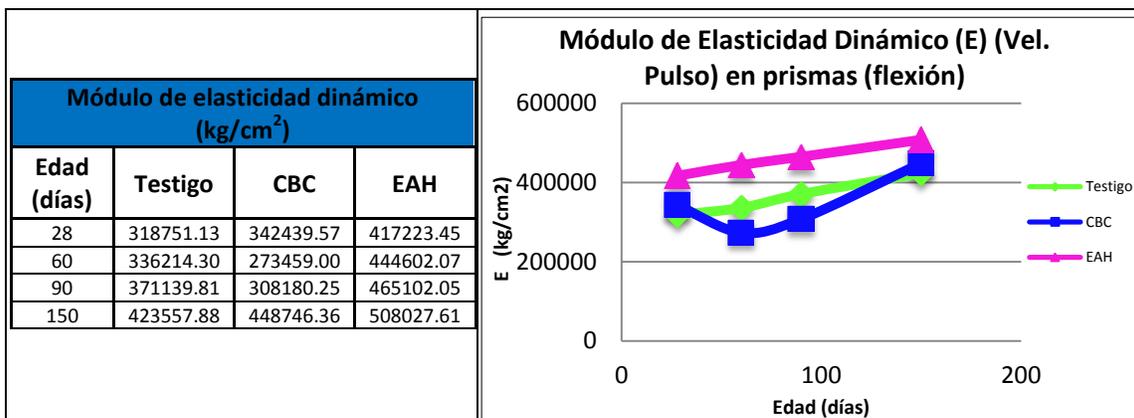


Figura 40. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor)

### 3.2.5 Determinación del módulo de elasticidad utilizando el método de las Frecuencias de resonancia

El módulo de elasticidad dinámico (calculado mediante la frecuencia de resonancia), se calculó con la ecuación (19), los resultados de la prueba se presentan a continuación:

### Módulo de elasticidad dinámico en prismas de para la prueba de flexión

Los resultados se presentan en la Figura 41.

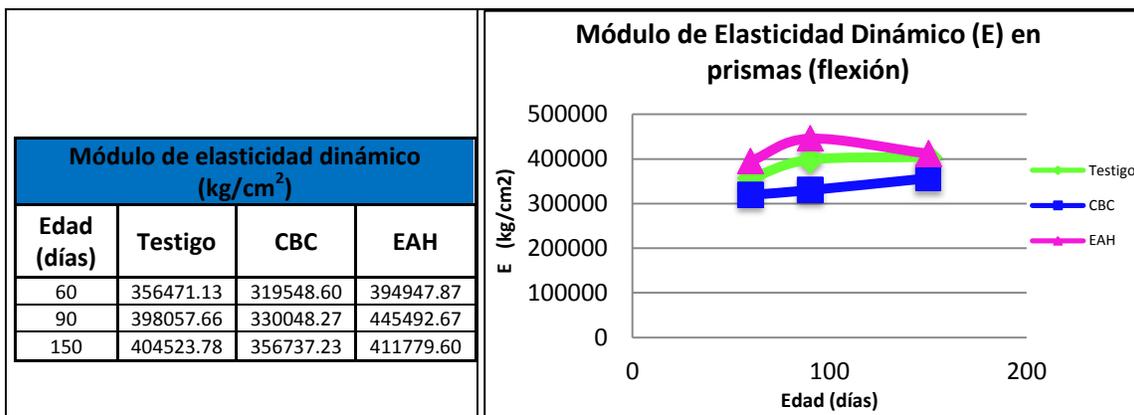


Figura 41. Resultados de módulo de elasticidad dinámico obtenido en las diferentes mezclas, en prismas para la prueba de flexión. (Propia del autor)



### 3.3 Pruebas destructivas

#### 3.3.1 Determinación de la resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión simple efectuada en cilindros de concreto se calculó mediante la ecuación (20), los resultados se presentan en la Figura 42.

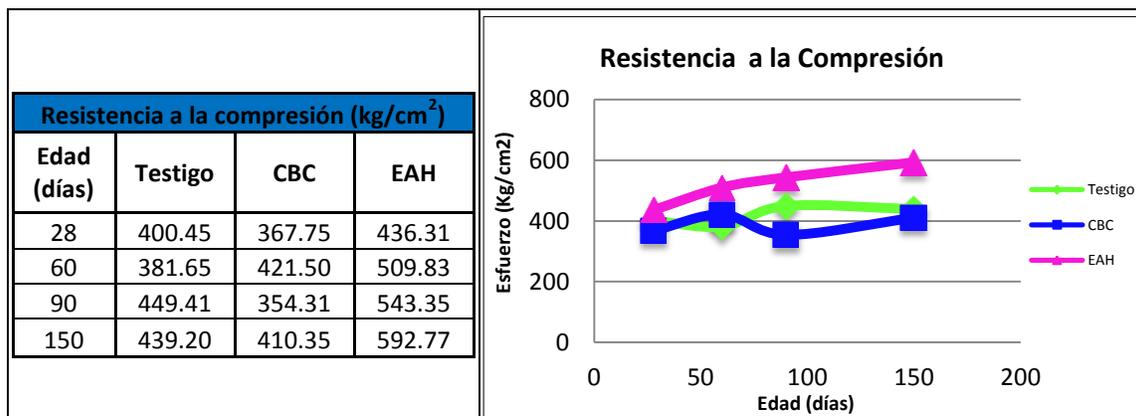


Figura 42. Resultados obtenidos de esfuerzo a la compresión en las diferentes mezclas, en cilindros. (Propia del autor)

En cuanto esta prueba, se tiene que los mejores resultados presentados en las diferentes mezclas, los tiene la mezcla de concreto con sustitución de EAH, puesto que a la edad de 150 días, el esfuerzo a la compresión aumento en un 48% con respecto a la resistencia de proyecto, por lo tanto esto indica que la sustitución utilizada es muy buena para nuestra mezcla, pues hace que aumente la resistencia en casi la mitad de lo que se propuso en el proyecto.

Después le sigue la mezcla testigo la cual aumento sus resistencia en un 9.75% con respecto a la de proyecto.

Por último se encuentra la mezcla de CBC con un aumento de esfuerzo de 2.5% con respecto a la de proyecto, cabe destacar que aunque no superó a la mezcla testigo en cuanto a su resistencia, es un muy buen resultado el obtenido, puesto que se obtuvo la resistencia de proyecto con la sustitución del 20% con respecto al cemento, por lo tanto se puede decir que esta sustitución del material en cuestión es eficaz en la mezcla de concreto.

#### 3.3.2 Determinación de la resistencia a la tensión indirecta en cilindros

La resistencia a la tensión indirecta efectuada en cilindros de concreto, se calculó mediante la ecuación (21), los resultados se presentan en la Figura 43.

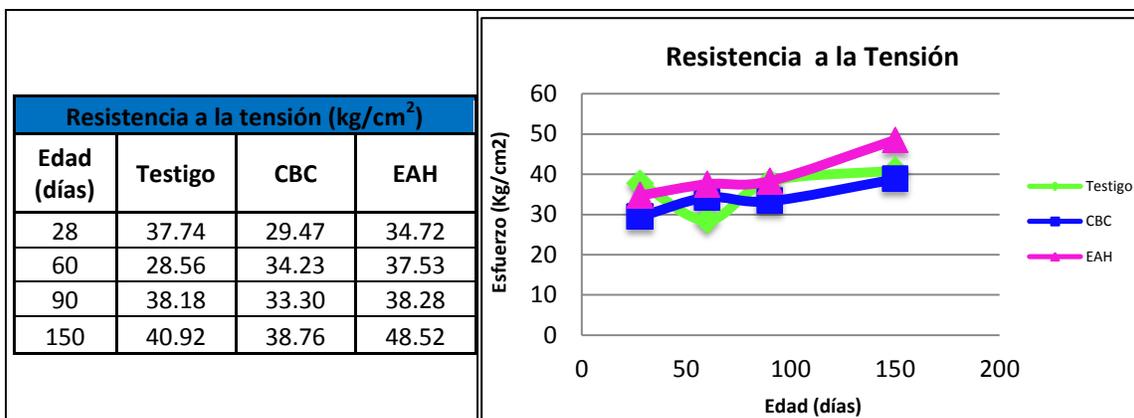


Figura 43. Resultados obtenidos del esfuerzo a la tensión obtenido en las diferentes mezclas en cilindros. (Propia del autor)

Los resultados obtenidos en esta prueba son favorables para las mezclas con las diferentes sustituciones de puzolanas, pues se tiene que en el esfuerzo a la tensión resistido en la mezcla testigo a la edad de 150 días, fue casi igual al esfuerzo obtenido en la mezcla con sustitución de CBC, e inferior que el obtenido en la mezcla con sustitución de EAH, los valores reportados en la literatura para el esfuerzo a tensión el concreto van de es aproximadamente de 8% a 12% de su resistencia a compresión, por lo tanto en base a los valores obtenidos de esta prueba, se puede observar que el esfuerzo a tensión resistido en mezclas de concreto con sustitución de puzolanas se encuentra en el rango indicado, por lo tanto es ejemplo que nuestras sustituciones de puzolanas son favorables en el concreto elaborado.

### 3.3.3 Determinación de la resistencia a la flexión

El cálculo de la resistencia a la flexión realizada en espécimenes prismáticos de concreto, se realizó utilizando la ecuación (22), los resultados se presentan en la Figura 44.

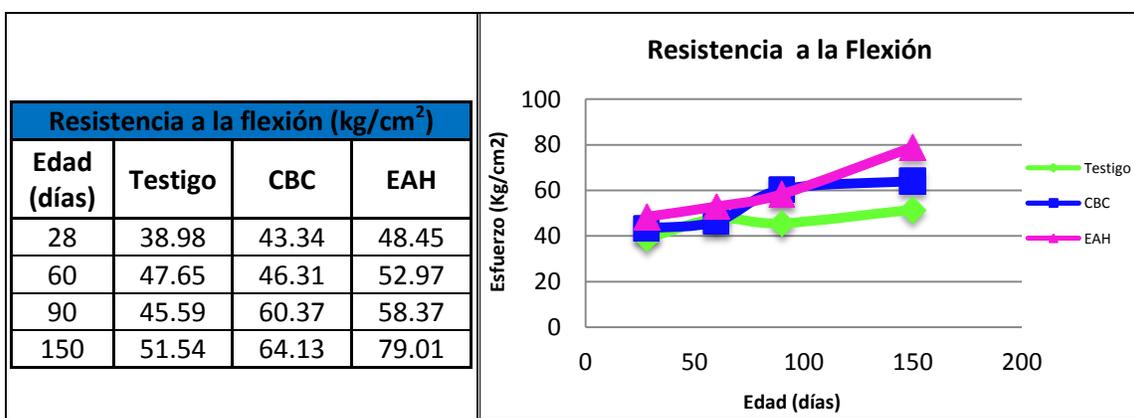


Figura 44. Resultados obtenidos de esfuerzo a la flexión en las diferentes mezclas en prismas de concreto. (Propia del autor)



Para los valores obtenidos de resistencia a la flexión en las diferentes mezclas de concreto con sustitución, se tiene que son muy favorables, puesto se puede observar que las mezclas con sustituciones incrementaron su MR en comparación con la mezcla testigo

El módulo de ruptura presenta valores que varían entre 10 – 20% de la resistencia a compresión, por lo tanto podemos ver que en la mezcla con sustitución de CBC se obtuvo un 16% de la resistencia (compresión) de proyecto, en la mezcla con sustitución de EAH se obtuvo aproximadamente un 20% de la resistencia de proyecto.

Por lo anterior, se puede decir que para esta prueba, nuestras mezclas de concreto con sustitución de puzolanas indican un muy buen comportamiento en comparación con la mezcla testigo y cumplen con los valores reportados en literatura, por lo tanto efectivamente las sustituciones realizadas son funcionales.

### 3.3.4 Resistencia al ataque por sulfatos

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas a los espécimenes después de 4 ciclos de inmersión en sulfatos, se presentan a continuación:

#### Resistividad eléctrica

La resistividad eléctrica se calculó con la ecuación (16), los resultados se presentan en la Figura 45.

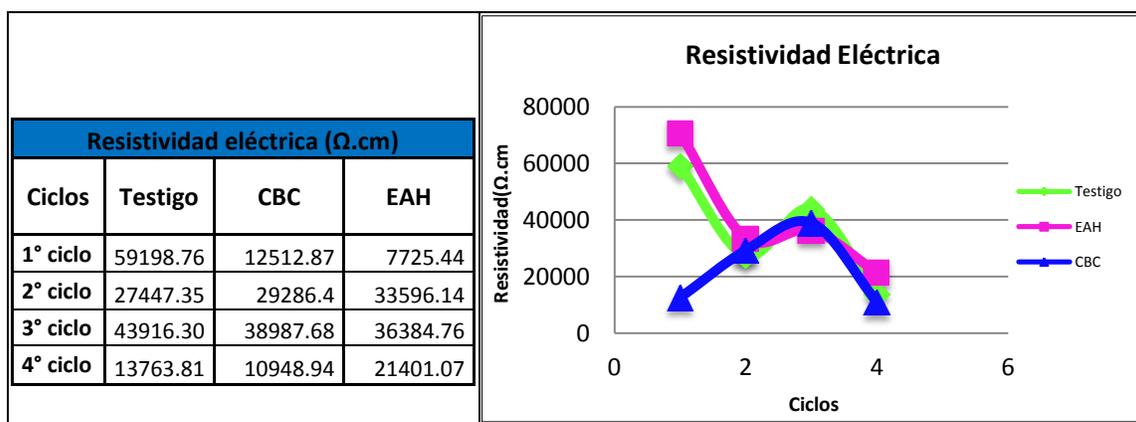


Figura 45. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas, después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)

En cuanto dicha pruebas, hubo una disminución en la resistividad debido a la formación de grietas internas producidas posiblemente por la transformación de monosulfatos aluminatos a etringita, lo cual genera expansiones internas en el concreto y estas expansiones producen fisuras o grietas. Estas grietas son llenadas por agua de saturación del concreto y por ello hay una disminución de resistividad eléctrica.



### Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico se calculó como se explicó en párrafos anteriores, los resultados de esta se presentan en la Figura 46.

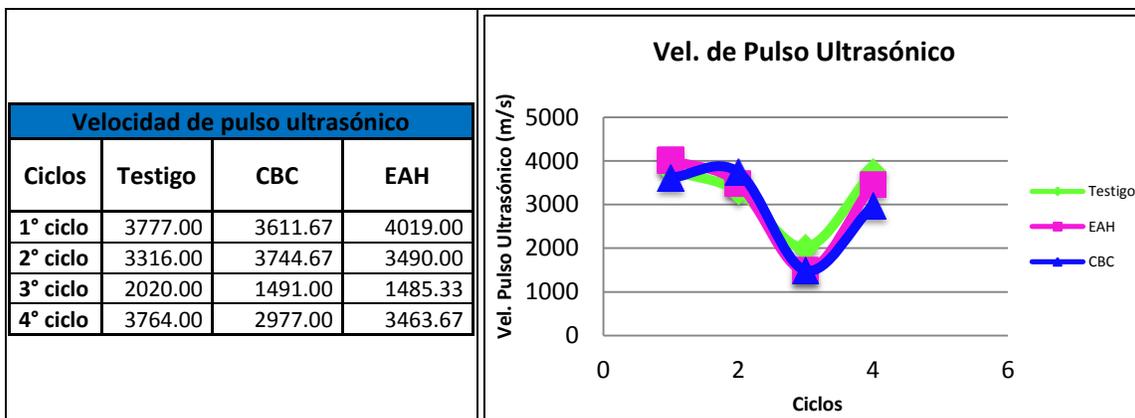


Figura 46. Velocidad de pulso ultrasónico en las diferentes mezclas obtenida después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)

### Calculo del módulo de elasticidad dinámico mediante el uso de la velocidad de pulso ultrasónico

El módulo de elasticidad dinámico (calculado mediante la velocidad de pulso ultrasónico), se calculó con la ecuación (17), los resultados se presentan en la Figura 47.

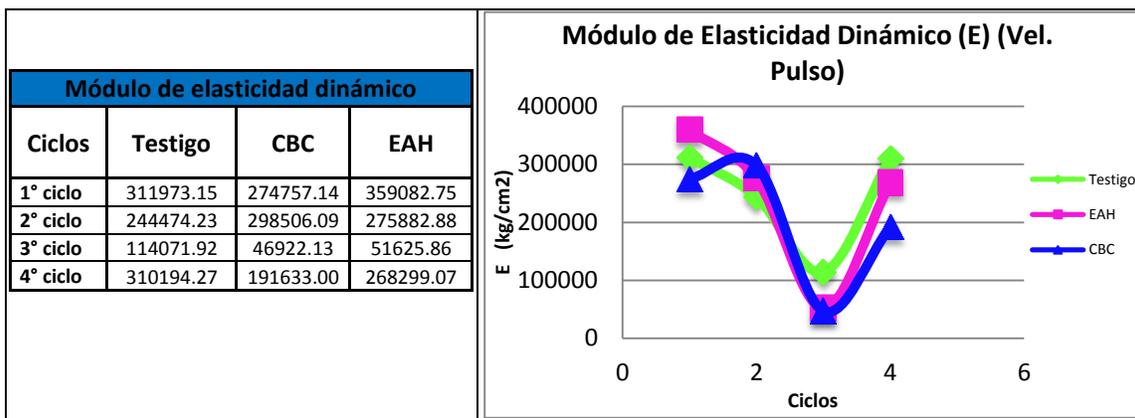


Figura 47. Módulo de elasticidad dinámico obtenida en las diferentes mezclas después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)

### Determinación de la resistencia a la compresión simple

La resistencia a la compresión simple efectuada en cilindros de concreto, se calculó mediante la ecuación (20), los resultados se presentan en la Figura 48.

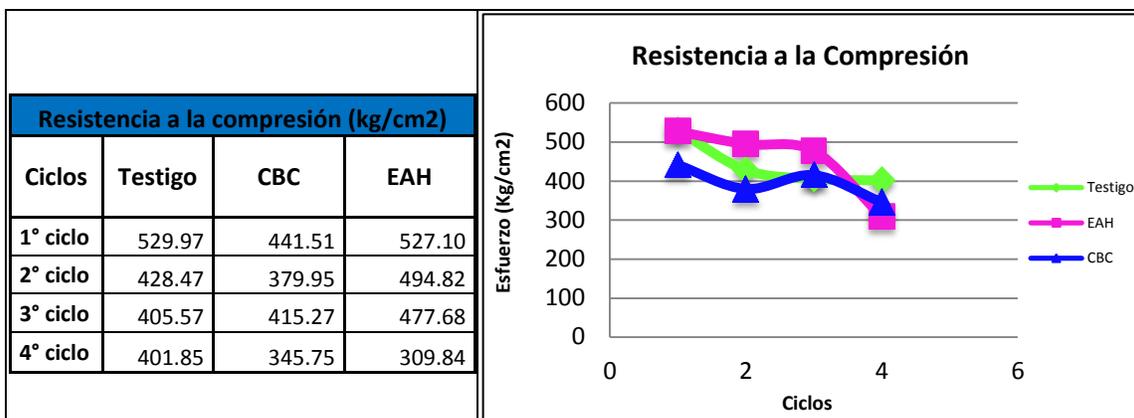


Figura 48. Resistencia a la compresión en las diferentes mezclas obtenida después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)

### Pérdida de masa en cilindros

La pérdida de masa se determinó obteniendo la masa de los especímenes cilíndricos de cada mezcla después de probarlos a compresión simple y posterior secado en el horno durante 24 horas, los resultados se presentan en la Figura 49.

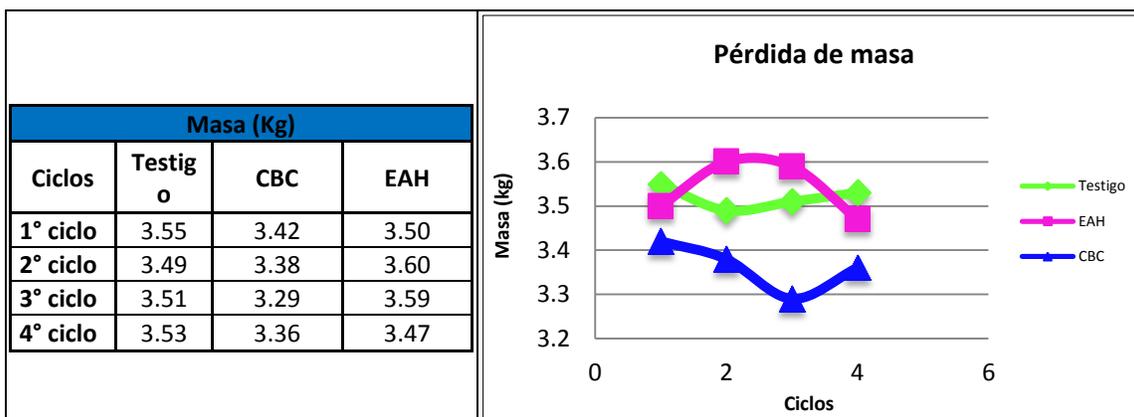


Figura 49. Masa obtenida en las diferentes mezclas después de realizar ataque por sulfatos. (Propia de autor)

En cuanto a esta prueba, nos permite medir la durabilidad y/o la estabilidad de un material ante el contacto con agentes químicos. En cuanto a los resultados obtenidos en las diferentes mezclas de concreto en nuestra investigación, la para la prueba de velocidad de pulso ultrasónico, se tiene que el comportamiento de las tres mezclas es muy similar, es decir se obtuvieron casi los mismos resultados en cada mezcla para los mismos ciclos, como se observa en la Figura 45, en cuanto a la clasificación del concreto en base a esta prueba y haciendo caso a la Tabla 34, se tiene que la mezcla Testigo después de 4° ciclos de inmersión se clasifica como: Bueno, para la mezcla con sustitución de CBC después de



4° ciclos de inmersión se clasifica como: Pobre, y para la mezcla con sustitución de EAH después de 4° ciclos de inmersión se tiene una clasificación como: cuestionable.

En cuanto a la prueba de compresión simple realizada después de 4 ciclos de inmersión en la solución de sulfato, se presentan resultados muy similares en las mezclas Testigo y la mezcla con sustitución de EAH para los primeros 3 ciclos, sin embargo para el 4° ciclo se puede observar una disminución en la resistencia de la mezcla con sustitución de EAH, mientras que la mezcla testigo supera dicha resistencia, en cuanto a la mezcla con sustitución de CBC, en los primeros 2 ciclos se obtuvieron resultados de esfuerzo menores en comparación con la mezcla testigo, pero en el 3° ciclo el esfuerzo se asemeja al de la mezcla testigo y la mezcla con sustitución de EAH, y por último para el 4° ciclo, el esfuerzo obtenido es inferior a la mezcla testigo, pero superior a la mezcla con sustitución de EAH.

En cuanto a la estabilidad de los especímenes de concreto, se obtuvo que la mezcla que presentó mayor desprendimiento de concreto, fuera la mezcla con sustitución de CBC, siguiéndole la Mezcla Testigo y por último la mezcla con sustitución de EAH como se observa en la Figura 50.



Figura 50. Especímenes cilíndricos de las diferentes mezclas de concreto después de 4 ciclos de inmersión en la solución de sulfato. (Propia del autor)

### 3.3.5 Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados

Como ya se explicó, para la prueba de congelamiento y deshielo acelerado no se siguió la norma oficial vigente, solo se sometieron especímenes cilíndricos (10 probetas por cada mezcla de concreto) a ciclos repetidos de congelamiento y deshielo, el número de ciclos a



que fueron sometidos los especímenes fue de 15 ciclos, con lo cual se observaron los siguientes resultados:

En los primeros 5 ciclos de congelamiento y posterior deshielo, no se observaron cambios aparentes en ningún espécimen cilíndrico de ninguna de las tres mezclas.

**6° ciclo.** Se observó que se presentaron pequeñas (no son muy visibles) fisuras o grietas en la superficie de 3 especímenes cilíndricos de la mezcla con sustitución de CBC, en los demás especímenes de las otras dos mezclas, no se observaron cambios.

**7° ciclo.** No se observaron cambios en ninguno de los especímenes cilíndricos de las diferentes mezclas.

**8° ciclo.** Se observan las mismas fisuras en los mismos 3 especímenes de la mezcla de CBC, también se observaron pequeñas y muy pocas fisuras en 2 especímenes de la mezcla de EAH.

**9° Ciclo.** Se observan las mismas fisuras en los mismos especímenes que en el ciclo anterior (3 especímenes de la mezcla de CBC y 2 especímenes de la mezcla de EAH).

**10° Ciclo.** Se observan fisuras en más de los especímenes de la mezcla de CBC (6 especímenes en total), también en la mezcla de EAH se observan fisuras en 3 especímenes en total, en los especímenes de la mezcla testigo no se observaron cambios aparentes.

**11° Ciclo.** Se observaron fisuras en 7 especímenes de la mezcla de CBC, en cuanto a la mezcla de EAH, se observan fisuras en 4 especímenes.

**12° Ciclo.** Se observan las mismas fisuras en los mismos especímenes que en el ciclo anterior (7 especímenes de la mezcla de CBC y 4 especímenes de la mezcla EAH).

**13° Ciclo.** No se observan cambios aparentes en los especímenes de las distintas mezclas, es decir se presentan las mismas fisuras en los mismos especímenes que en el ciclo anterior.

**14° Ciclo.** El número de especímenes que presentan fisuras son los mismos que en el ciclo anterior (7 especímenes de la mezcla de CBC y 4 especímenes de la mezcla EAH, en los especímenes de la mezcla testigo no se observan fisuras), cabe destacar que las fisuras no son muy visibles, es decir solo se observan a una distancia muy corta, dichas fisuras son muy pocas en cada cilindro (4 fisuras por mucho), la longitud de las fisuras es variable, la más larga observada es de aproximadamente 3 cm, también se observó un incremento en la cantidad de poros superficiales en los especímenes de las 3 mezclas, los especímenes que presentan mayor cantidad de poros son los de la mezcla de EAH, siguiéndole la mezcla de CBC y por último los de la mezcla testigo.



**15° Ciclo.** Las fisuras observadas son las mismas en los mismos espécimenes del ciclo anterior, la cantidad de poros que se observa también es similar a la del ciclo anterior (Figura 51).



**Figura 51.** Especímenes cilíndricos de las diferentes mezclas, después de 15 ciclos repetidos de congelamiento y deshielo. (Propia del autor)

El deterioro del concreto por el ciclo hielo–deshielo se da cuando al congelarse la masa de agua contenida en los poros (macroporos y poros capilares) del mismo se expande hasta aproximadamente un 9% de su volumen en estado líquido, lo cual genera grandes esfuerzos de tracción en la masa de concreto (pasta y agregados), haciendo que se fracture por su baja resistencia a la tracción, y origine grietas o fisuras para liberar las tensiones producidas.

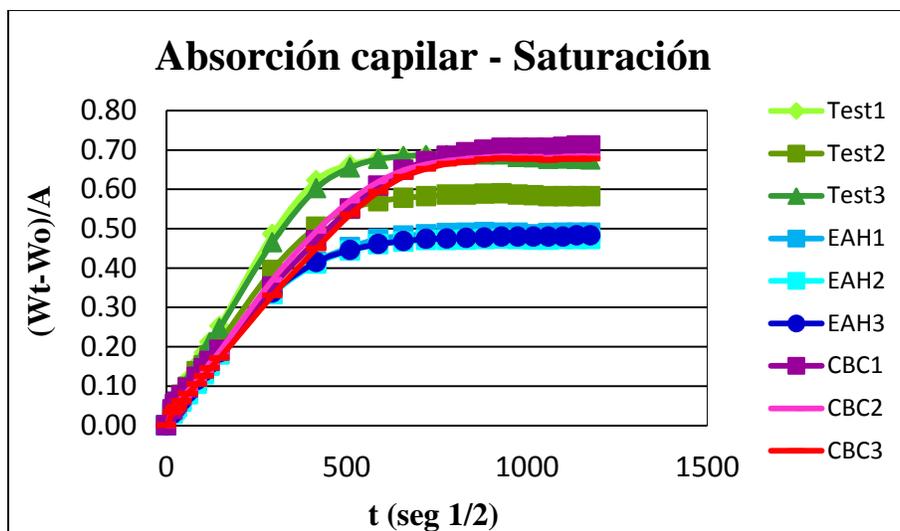
En cuanto a la prueba de congelamiento y deshielo acelerado, se obtuvieron mejores resultados en los espécimenes cilíndricos de la mezcla testigo, siguiéndole la mezcla con sustitución de CBC y por último la mezcla con sustitución de EAH, es decir que la mezcla con sustitución de CBC presento mayor cantidad de espécimenes con pequeñas fisuras debidas al congelamiento y por tanto expansión del agua atrapada en los poros que dicha mezcla pudiera tener, sin embargo también se puede suponer que si las mezclas de concreto con las diferentes sustituciones (CBC y EAH), presentaron fisuras y la mezcla testigo no presento, se puede deber a que las mezclas en cuestión tienen mayor densidad y menor cantidad de poros, por lo tanto si se tiene menor cantidad de poros en una mezcla que en otra, el agua atrapada se concentra en los poros y por lo tanto si se expande dentro de estos, no se presentan fisuras en el concreto.



### 3.3.6 Estimación indirecta de la Porosidad

#### Ensayo de absorción capilar

El ensayo de absorción capilar se realizó como se explicó en el capítulo anterior, para dicho ensayo se utilizaron 3 probetas cilíndricas por cada mezcla de concreto, los resultados de dichas probetas se presentan en la Gráfica 7.



Gráfica 7. Muestra la relación de la diferencia de las masas en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo, para cada mezcla de concreto. (Propia del autor)

La mezcla con sustitución de EAH, al absorber menos agua, indica que hay menos poros, se observa que la absorción de agua en la mezcla testigo fue más rápida que en la mezcla con sustitución de CBC, aunque al final ambas absorben la misma cantidad de agua, esto implicaría que la ceniza de bagazo de caña retiene un poco el agua durante su proceso de absorción pero al final llega a valores similares que en la mezcla testigo.

En cuanto a la Sorción capilar en las diferentes mezclas de concreto se tienen los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} \text{Mezcla testigo } S &= 0.000218 \text{ (m/s}^{1/2}\text{)} \\ \text{Mezcla con sustitución de EAH } S &= 0.000271 \text{ (m/s}^{1/2}\text{)} \\ \text{Mezcla con sustitución de CBC } S &= 0.000124 \text{ (m/s}^{1/2}\text{)} \end{aligned}$$

Y se tiene lo siguiente:



*Criterios de Evaluación.*

- Para espesor de recubrimiento de 30 mm en ambientes severos se recomiendan concretos con sorción capilar  $S \leq 3 \text{ mm/h}^{1/2}$  ( $5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2}$ ); en medios menos severos puede ser hasta de  $6 \text{ mm/h}^{1/2}$  ( $10^{-4} \text{ m/s}^{1/2}$ ). Si el espesor de la cubierta se incrementa, la sorción capilar puede modificarse proporcionalmente.

Por lo tanto haciendo caso de los criterios anteriores, se puede decir que las mezclas de concreto con las diferentes sustituciones (CBC y EAH) se podrían utilizar en ambientes no tan severos, debido a que el coeficiente de Sorción capilar es similar al recomendado para dichos ambientes.

**% de Absorción Total**

Para el cálculo del % de absorción total se utilizó la ecuación (28), los resultados se presentan en la Figura 52.

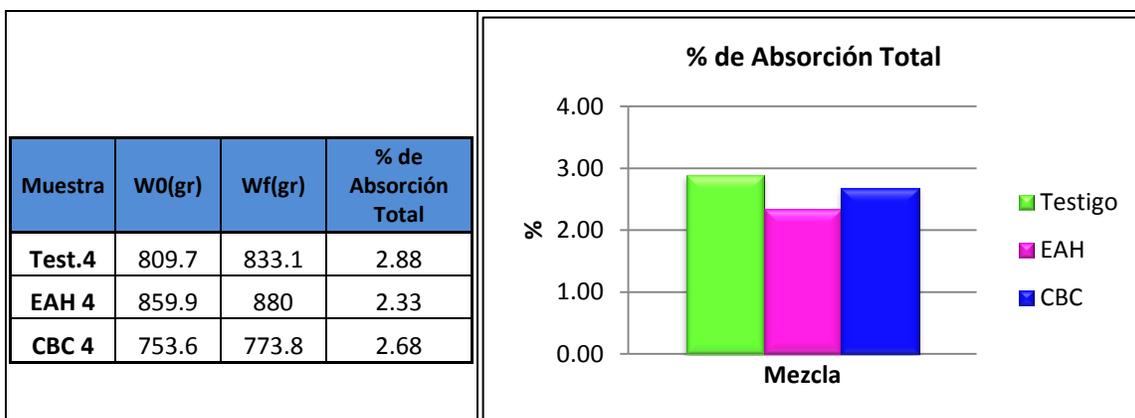


Figura 52. Porcentaje de absorción total obtenida para cada mezcla de concreto. (Propia del autor)

**Porosidad Total**

Para el cálculo del % de porosidad total se utilizó la ecuación (29), los resultados se presentan en la Figura 53.

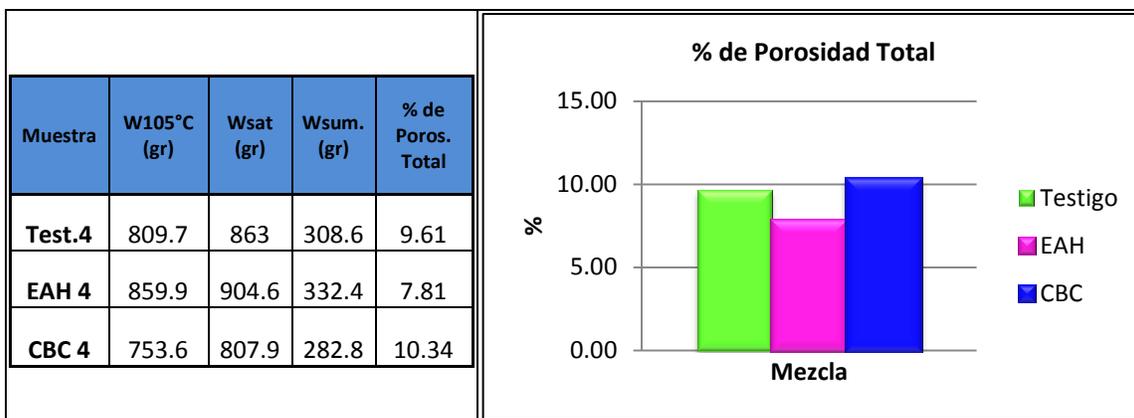


Figura 53. Porcentaje de porosidad total obtenida para cada mezcla de concreto. (Propia del autor)

En cuanto al porcentaje de porosidad total se tienen los siguientes criterios de evaluación

- ≤10% Indica un hormigón de buena calidad y compacidad
- 10% - 15% Indica un hormigón de moderada calidad
- >15% Indica un hormigón de durabilidad inadecuada

Por lo tanto, haciendo caso de los criterios anteriores, se tiene que la mezcla testigo y la mezcla con sustitución de EAH se pueden clasificar como un concreto de buena calidad y compacidad, mientras que la mezcla con sustitución de CBC se puede clasificar de la misma forma o en un modo más estricto como un concreto de moderada calidad.

### 3.4 Pruebas electroquímicas

#### 3.4.1 Resistividad eléctrica

Aunque la resistividad eléctrica no es una prueba electroquímica, esta también se realizó a los especímenes elaborados para realizarles las pruebas de velocidad de corrosión, dicha prueba se realizó para comparar cómo se comporta la resistividad respecto a la diferencia de potenciales y a la velocidad de corrosión.

La resistividad se calculó con la ecuación (16), los resultados se presentan en las Figuras 54 y 55.

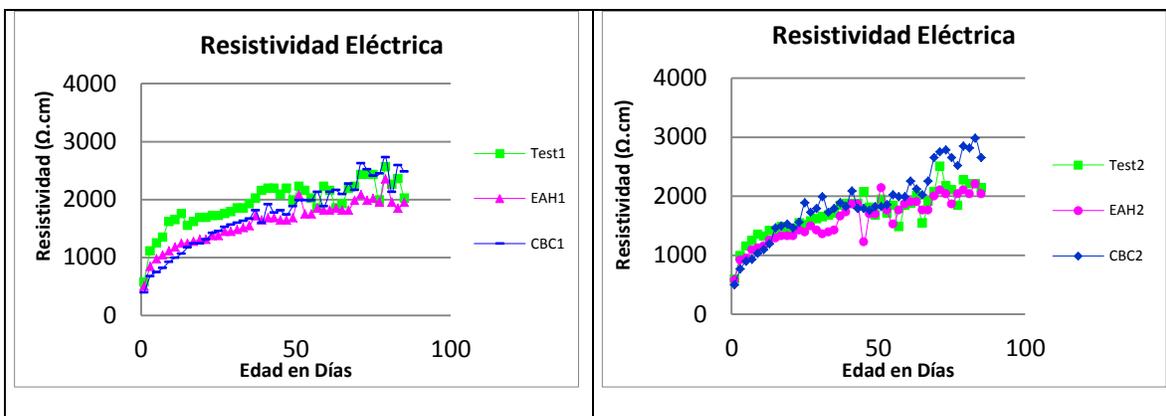


Figura 54. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas de concreto (espécimen 1 lado izquierdo, espécimen 2 lado derecho). (Propia del autor)

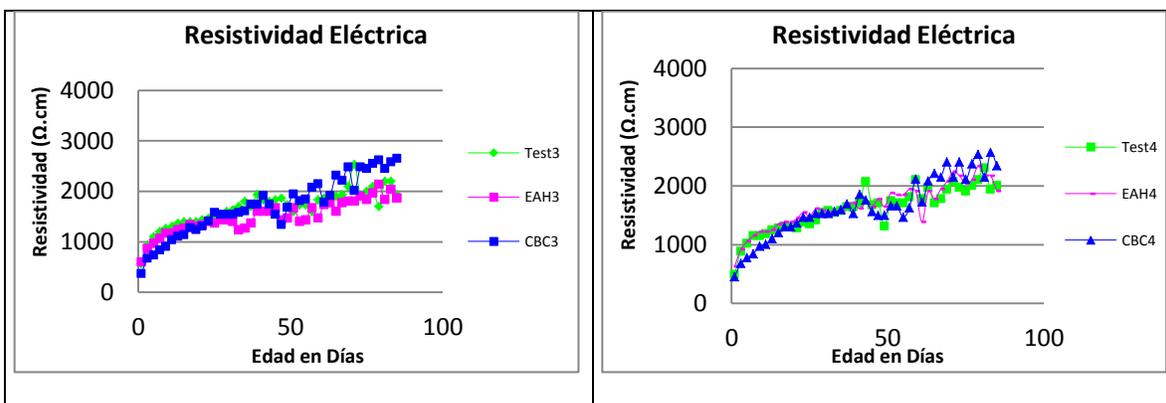


Figura 55. Resistividad eléctrica obtenida en las diferentes mezclas (espécimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor)

### 3.4.2 Medición de Potenciales

La prueba de diferencia de potencial se efectuó como se explicó en el procedimiento descrito en el capítulo anterior, los resultados obtenidos de la prueba se presentan en las Figuras 56 y 57.

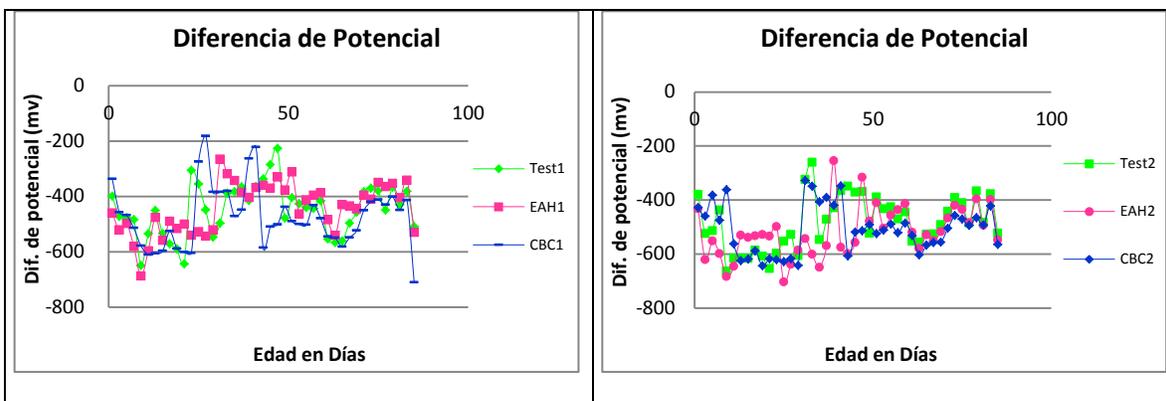


Figura 56. Diferencia de potencial eléctrica obtenida en las diferentes mezclas (especimen 1 lado izquierdo, espécimen 2 lado derecho). (Propia del autor)

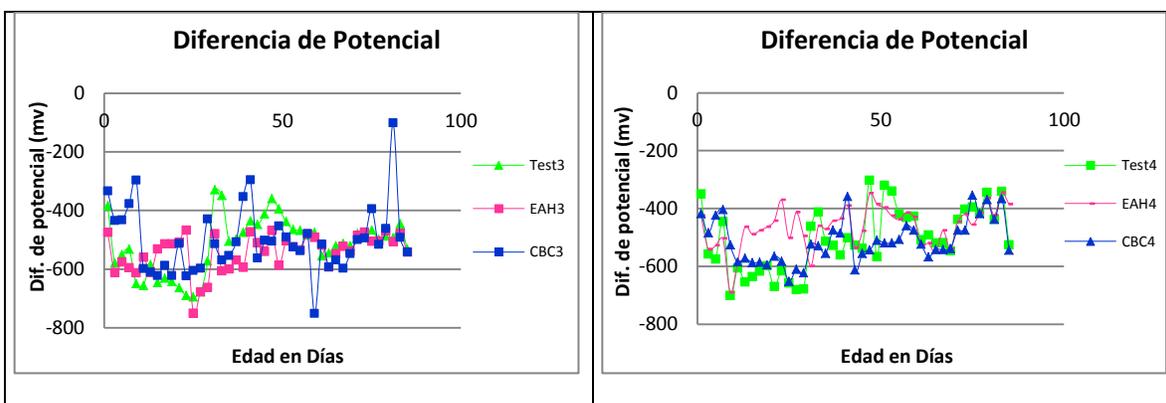


Figura 57. Diferencia de potencial eléctrica obtenida en las diferentes mezclas (especimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor)

La diferencia de potencial observada en las diferentes mezclas de concreto se presenta en los siguientes rangos:

- Mezcla testigo -0.227 a -0.700 V
- Mezcla con sustitución de EAH -0.255 a -0.704 V
- Mezcla con sustitución de CBC -0.222 a -0.751 V

### Criterios de Evaluación.

Las medidas de potencial informan sobre la probabilidad de corrosión de la armadura de una estructura de concreto, pero es esencial que los resultados sean correctamente interpretados a la luz de la información disponible sobre las condiciones de humedad, contaminación, calidad del concreto, etc.

Una guía referencial de las condiciones y riesgo asociados a valores de potencial se indica en la Tabla 36.



Tabla 36. Criterio de valoración de potenciales del acero en concreto Vs Cu/CuSO4. (DURAR, 1998)

| Condición            | Potencial (E) (ESC) | Observaciones                                                            | Riesgo de daño   |
|----------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------|
| Estado pasivo        | (+)0,200 a (-)0,200 | Ausencia de Cl<br>PH>12,5<br>H <sub>2</sub> O (HR↑)                      | Despreciable     |
| Corrosión localizada | (+)0,200 a (-)0,600 | Cl; O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O<br>(HR↑)                           | Alto             |
| Corrosión uniforme   | (-)0,150 a (-)0,600 | Carbonatado<br>O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O (HR↑)                   | Moderado<br>Alto |
|                      | (+)0,200 a (-)0,150 | Carbonatado<br>O <sub>2</sub> , seco (HR↓)                               | Bajo             |
|                      | (-)0,400 a (-)0,600 | Cl elevado, H <sub>2</sub> O<br>o Carbonatado<br>H <sub>2</sub> O, (HR↑) | Alto             |
| Corrosión uniforme   | < (-)0,600          | ↑Cl, ↑H <sub>2</sub> O<br>(Sin O <sub>2</sub> )                          | Despreciable     |

Por lo tanto tomando en cuenta los criterios de la Tabla 36, se puede decir que el acero embebido en nuestras mezclas de concreto tendría una condición de corrosión localizada en el caso de tomar en cuenta solo el valor inferior (para nuestro caso en las 3 mezclas la diferencia se encuentra en un valor de -0.200V) y por lo tanto el riesgo de daño sería alto.

En el caso contrario, si se toma nada más el valor de diferencia de potencial mayor presentado en las diferentes mezclas (el cual se encuentra alrededor de -0.700 V), se tendría una condición de corrosión uniforme y el riesgo de daño en el acero sería despreciable.

### 3.4.3 Densidad de corriente de Corrosión

La densidad de corriente de se calculó mediante la ecuación de Stern-Geary, utilizando los resultados de la prueba de resistencia a la polarización, como se explicó en el capítulo anterior, los resultados se presentan en las Figuras 58 y 59.

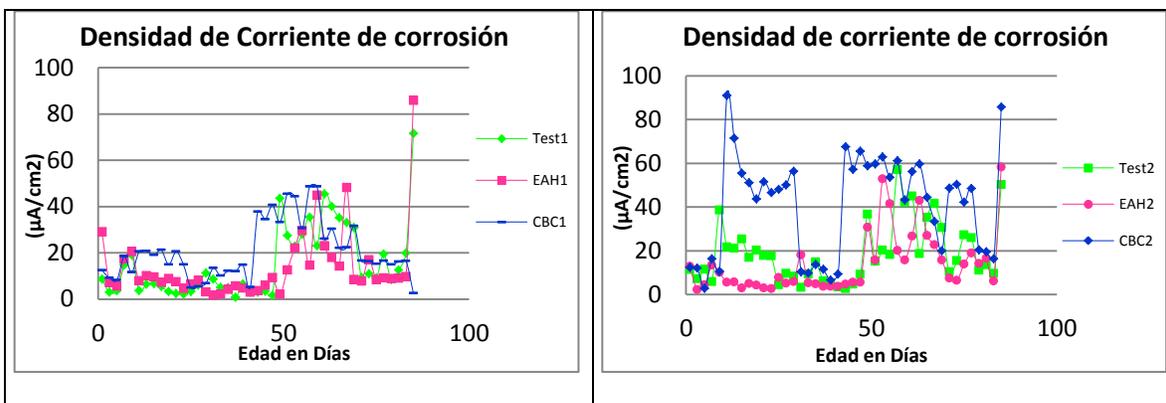


Figura 58. Densidad de corriente de corrosión obtenida en las diferentes mezclas (especimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor)

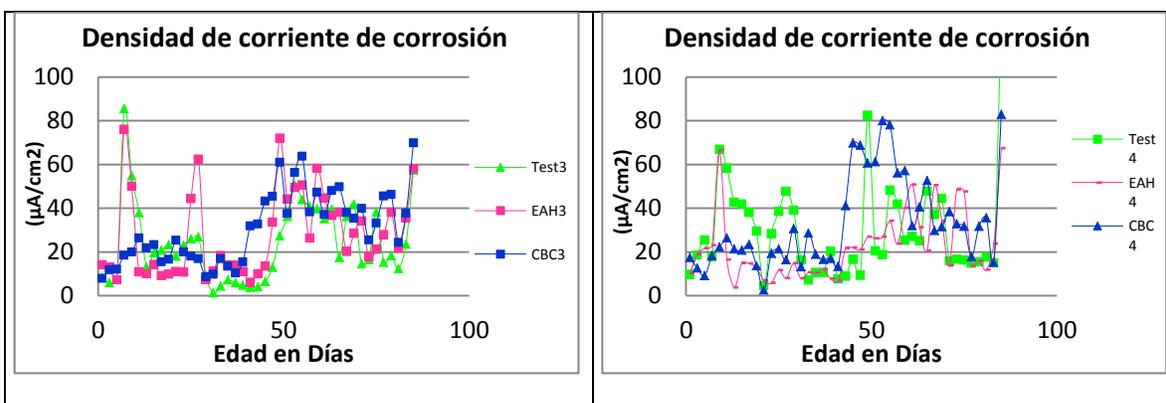


Figura 59. Densidad de corriente de corrosión obtenida en las diferentes mezclas (especimen 3 lado izquierdo, espécimen 4 lado derecho). (Propia del autor)

Los puntos más bajos indican densidades de corriente pequeñas, aun cuando están por encima de los criterios de evaluación de la red durar, estos valores indican que el material tiende a pasivarse, pero debido al medio en el cual se encuentran (agua de mar), el material no logra pasivarse, lo cual se refleja con densidades de corriente alta lo que supone que la velocidad de corrosión es alta, como se puede observar en las figuras anteriores.

### Criterios de Evaluación

El límite entre corrosión activa y pasiva se sitúa entre  $0,1 - 0,2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ , que en corrosión generalizada suponen  $1-2 \text{ mm/año}$ . Este límite se aplica cuando el proceso da lugar a la formación de herrumbre (óxidos expansivos que fisuran el recubrimiento). El caso de que el óxido sea invisible al ojo humano, velocidades incluso de  $0,5 - 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  no dan lugar a fisuración del recubrimiento, al no tener estos óxidos carácter expansivo.



Los valores máximos que se han detectado en ensayos de laboratorio son del orden de 100 – 200  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . A pie de obra valores por encima de 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  se detectan muy ocasionalmente y resultan valores ya elevados en términos de vida útil.

Una clasificación de los valores de  $i_{\text{corr}}$  en términos de vida útil sería la siguiente:

| $i_{\text{corr}}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) | Nivel de corrosión |
|-------------------------------------------------|--------------------|
| <0.1                                            | Despreciable       |
| 0.1– 0.5                                        | Moderado           |
| 0.5 – 1                                         | Elevada            |
| >1                                              | Muy elevada        |

Armaduras que se corroen a 0,1 – 0,2  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  produciendo óxidos expansivos provocaran en 10 – 20 años la fisuración del recubrimiento. Valores de 1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , la producirán en 1 – 2 años.

Por los valores obtenidos, y haciendo caso de los criterios anteriores, se puede observar que para nuestras diferentes mezclas de concreto se tiene una tendencia a sufrir algún daño de corrosión, el cual va del nivel despreciable hasta el moderado.

### 3.5 Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Una vez realizadas tanto las pruebas no destructivas como las destructivas en los espécimenes de concreto, se tomaron muestras de las mezclas de concreto (pequeños fragmentos de espécimenes cilíndricos) para realizarles la técnica de microscopia electrónica de barrido, esto para poder observar la microestructura que se presenta en cada una de las mezclas elaboradas, para lo cual fue necesario llevarlas Instituto de Investigaciones Metalúrgicas (IIM) de la UMSNH, donde se cuenta con un microscopio de barrido de emisión de campo JEOL JSM-7600F, el cual fue utilizado para tomar imágenes de la microestructura del concreto de las diferentes mezclas a diferentes aumentos, así como también de las puzolanas utilizadas en la investigación para determinar la forma y tamaño de la partícula de las mismas, además de realizar la técnica de Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS) en las muestras de concreto.

#### 3.5.1 Puzolanas

##### *Forma y tamaño de partícula*

Para conocer la forma y tamaño de la partícula de la puzolana en estudio, se utilizó la técnica de caracterización de Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).

## Escoria de alto horno

En la Figura 60 se observa la forma y el tamaño que tienen las partículas de la muestra de EAH.

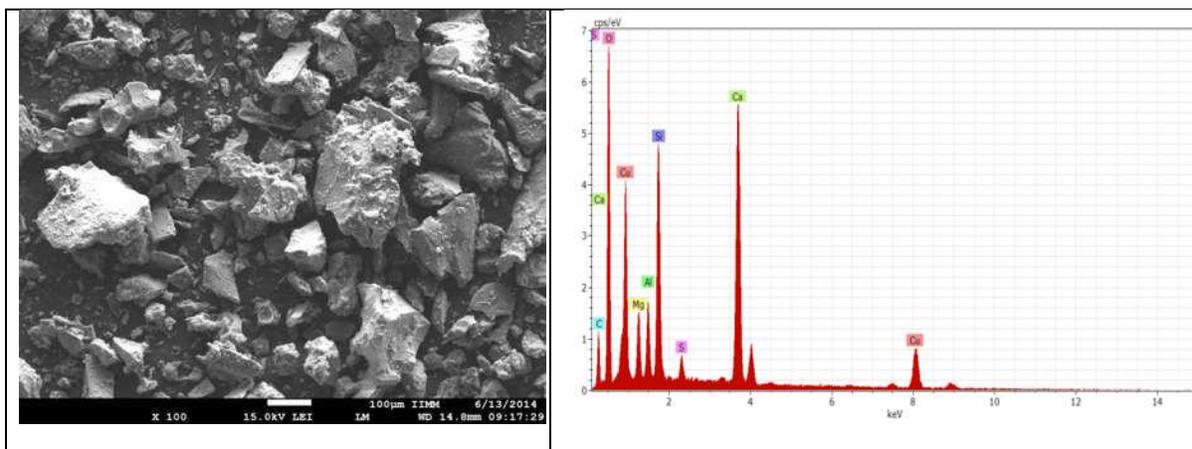


Figura 60. Forma de la partícula de la EAH (propia del autor).

La forma y el tamaño que tienen las partículas de la EAH, es angular como se observa en la figura anterior, en cuanto al tamaño de esta se puede ver que hay variedad de tamaños de partículas que conforman la muestra.

### *Composición*

La composición de la EAH fue obtenida mediante la técnica Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), el cual se muestra en la figura anterior del lado derecho, en la cual se puede observar un alto valor de silicio (Si), y también algo de aluminio (Al).

## Ceniza de bagazo de caña

Para conocer la forma y tamaño de la partícula de la puzolana en estudio, se utilizó la técnica de caracterización de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB), como se puede observar en la Figura 61.

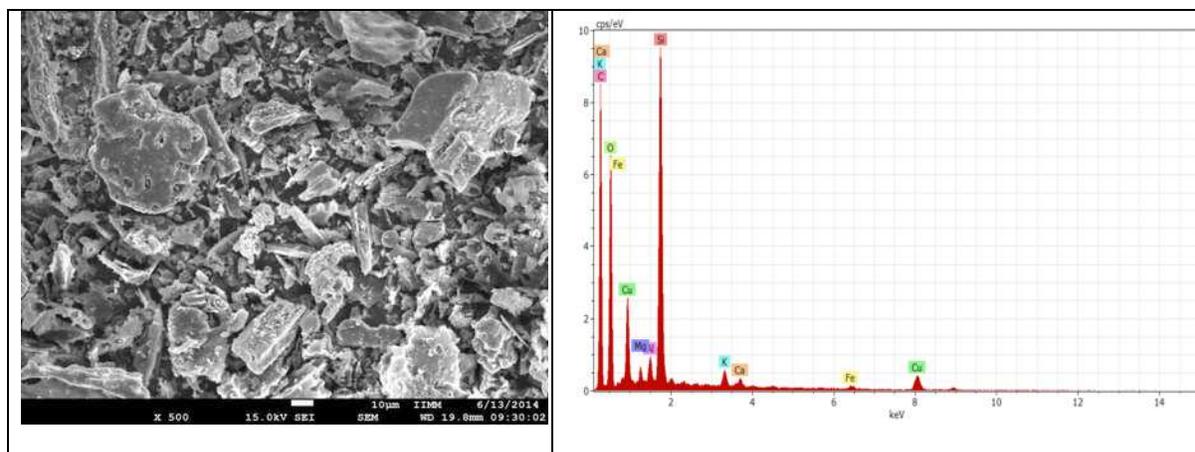


Figura 61. Forma y tamaño de partícula de la CBC (propia del autor).

La forma de las partículas de la CBC en forma laminar y alargada o en forma de fibras, lo anterior se puede deber a que esta ceniza es de origen orgánico y más en especial es producto de la quema de las fibras de la caña de azúcar, en cuanto al tamaño de la partícula, se observa que hay varios tamaños de esta.

### *Composición*

La composición de la EAH fue obtenida mediante la técnica Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), el cual se muestra en la figura anterior del lado derecho, en la cual se puede observar un alto contenido de Silicio (Si) pero un bajo contenido de Aluminio (Al).

### 3.5.2 Mezclas de concreto

A continuación se presenta la imagen de la Microscopia Electrónica de Barrido realizada a las diferentes mezclas de concreto elaboradas en nuestra experimentación.

#### **Mezcla Testigo (sin sustitución)**

En la figura 62 se observa la caracterización de la mezcla de concreto testigo.

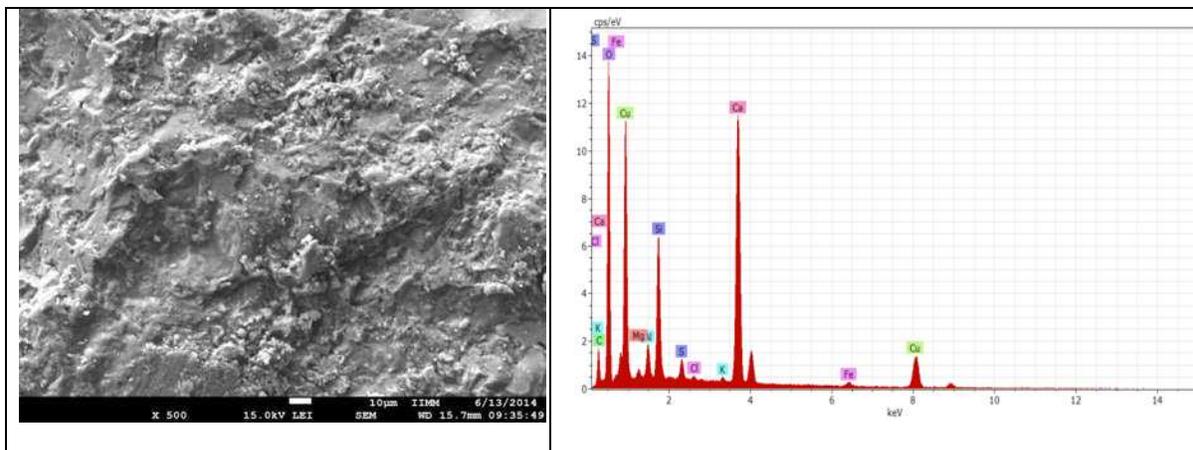


Figura 62. Microestructura de la mezcla de concreto Testigo. (Propia del autor)

En la figura anterior se observa la microestructura de la mezcla de concreto testigo (sin sustitución), se puede observar que la mezcla es homogénea.

### Composición

La composición de la mezcla testigo fue obtenida mediante la técnica Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), el cual se muestra en la figura anterior (lado derecho).

### Mezcla con sustitución de EAH

En la figura 63 se observa la caracterización de la mezcla de concreto con sustitución de EAH.

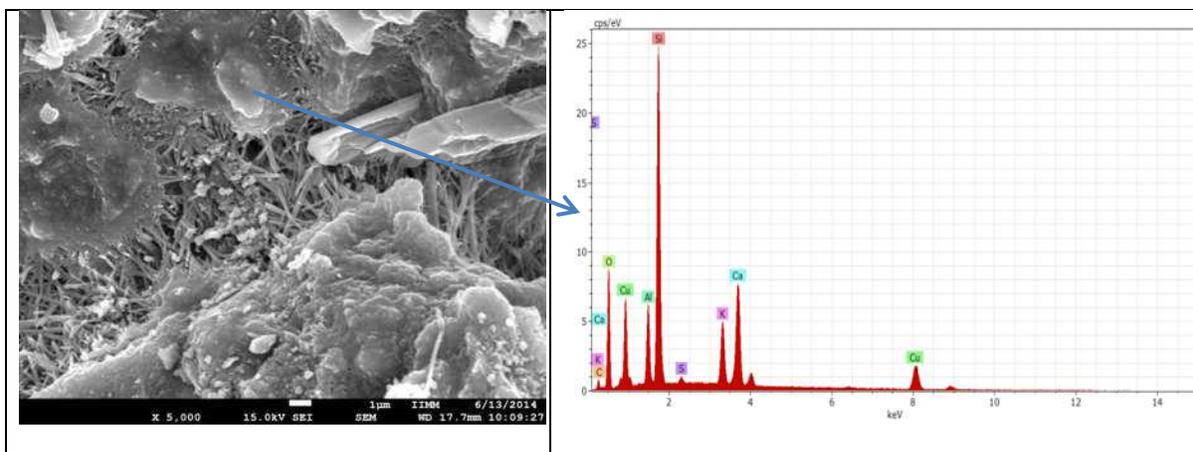


Figura 63. Microestructura de la mezcla de concreto con sustitución de EAH. (Propia del autor)



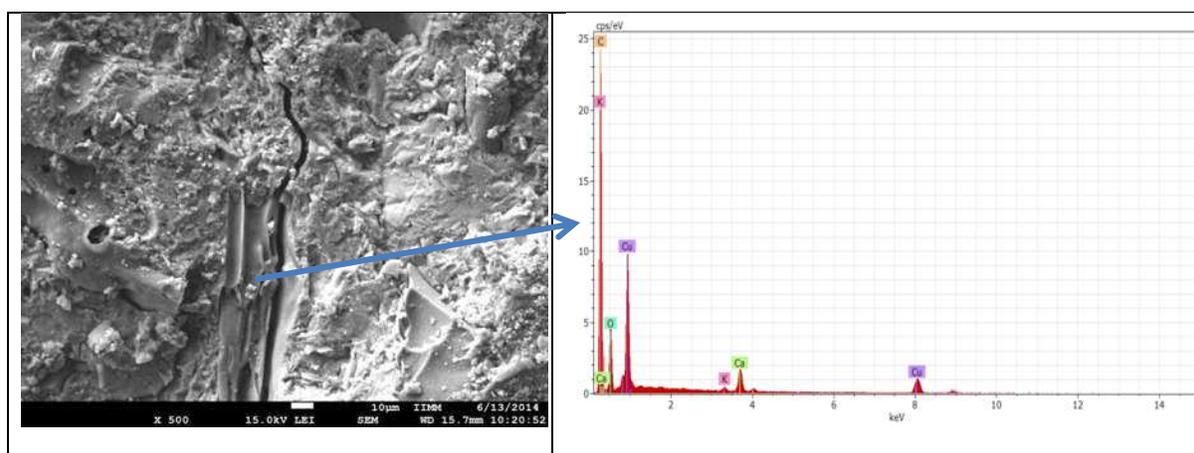
En la Figura 63 se puede observar el crecimiento de cristales en todas direcciones, lo cual nos hace suponer que la puzolana (EAH), efectivamente está reaccionando en nuestra mezcla de concreto, con lo cual le trae buenas propiedades como son: mayor densidad y por lo tanto mejores resistencias mecánicas ante las diferentes pruebas.

### *Composición*

La composición de la mezcla, la cual fue obtenida mediante la técnica Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), el cual se muestra en la figura anterior (lado derecho), se puede observar que se reportan mismos elementos que en el cemento portland, altos valores de contenido de Silicio (Si) y de Aluminio (Al) (inclusive superiores que en la mezcla testigo).

### **Mezcla con sustitución de CBC**

En la Figura 64 se observa la caracterización de la mezcla de concreto con sustitución de CBC.



**Figura 64. Microestructura de la mezcla de concreto con sustitución de CBC. (Propia del autor)**

La muestra de la mezcla con sustitución de CBC se observa como una mezcla homogénea, ya que en toda la matriz cerámica no hay aglomeraciones ni depósitos en los poros de esta.

### *Composición*

En cuanto a la composición de dicha mezcla, la cual fue obtenida mediante la técnica Espectrometría de dispersión de energía de rayos X (EDS), la cual se muestra en figura anterior (lado derecho), se puede observar que no se reporta aluminio (Al) ni silicio (Si).

### **Resumen de resultados**



**Tabla 37. Resumen de resultados para las diferentes pruebas realizadas a las diferentes mezclas de concreto.**  
(Propia del autor)

| Prueba                             | Mezcla  | Resultado o clasificación                                                 |
|------------------------------------|---------|---------------------------------------------------------------------------|
| Resistividad Eléctrica             | Testigo | Riesgo moderado a la corrosión del acero                                  |
|                                    | CBC     | Riesgo moderado a la corrosión del acero                                  |
|                                    | EAH     | Riesgo moderado a la corrosión del acero                                  |
| Velocidad De pulso Ultrasónico     | Testigo | Bueno                                                                     |
|                                    | CBC     | Bueno                                                                     |
|                                    | EAH     | Bueno                                                                     |
| Frecuencia de Resonancia           | Testigo | Dentro del rango aproximado reportado en literatura                       |
|                                    | CBC     | Dentro del rango aproximado reportado en literatura                       |
|                                    | EAH     | Dentro del rango aproximado reportado en literatura                       |
| Resistencia a la Compresión simple | Testigo | Aumento un 9.75% con respecto al f'c de proyecto                          |
|                                    | CBC     | Aumento un 2.5% con respecto al f'c de proyecto                           |
|                                    | EAH     | Aumento un 48% con respecto al f'c de proyecto                            |
| Resistencia a la Tensión indirecta | Testigo | 10.23% del f'c de proyecto                                                |
|                                    | CBC     | 9.69% del f'c de proyecto                                                 |
|                                    | EAH     | 12.13% del f'c de proyecto                                                |
| Resistencia a la Flexión           | Testigo | 12.88% del f'c de proyecto                                                |
|                                    | CBC     | 16% del f'c de proyecto                                                   |
|                                    | EAH     | 19.75% del f'c de proyecto                                                |
| Ataque por Sulfatos                | Testigo | Se obtuvo mayor estabilidad del concreto que en la mezcla CBC             |
|                                    | CBC     | Se obtuvo menor estabilidad del concreto que la mezcla Testigo            |
|                                    | EAH     | Se obtuvo mayor estabilidad del concreto que en las mezclas Test y CBC    |
| Congelamiento deshielo             | Testigo | No se observaron microfisuras                                             |
|                                    | CBC     | Se observó mayor cantidad de microfisuras que en la mezcla Test           |
|                                    | EAH     | Se observó mayor cantidad de microfisuras que en las mezclas Test y CBC   |
| Sorción Capilar                    | Testigo | Se puede utilizar en ambientes no tan severos                             |
|                                    | CBC     | Se puede utilizar en ambientes no tan severos                             |
|                                    | EAH     | Se puede utilizar en ambientes no tan severos                             |
| Porosidad Total                    | Testigo | Concreto de buena calidad y compacidad                                    |
|                                    | CBC     | Concreto con moderada calidad                                             |
|                                    | EAH     | Concreto de buena calidad y compacidad                                    |
| Diferencia de potencial            | Testigo | El riesgo de daño de corrosión va desde despreciable hasta alto           |
|                                    | CBC     | El riesgo de daño de corrosión va desde despreciable hasta alto           |
|                                    | EAH     | El riesgo de daño de corrosión va desde despreciable hasta alto           |
| Densidad de corriente de Corrosión | Testigo | Se obtuvieron valores inferiores que en la mezcla CBC                     |
|                                    | CBC     | Se obtuvieron valores mayores que en la mezcla testigo y la mezcla CBC    |
|                                    | EAH     | Se obtuvieron valores inferiores que en la mezcla testigo y la mezcla CBC |



## CONCLUSIONES

La velocidad de pulso ultrasónico, es una de las pruebas no destructivas con más consistencia en sus resultados, en esta prueba no influye la morfología o geometría de la muestra analizada, pero se deben tener en cuenta los factores que pueden afectar las lecturas de velocidad, como por ejemplo, el acoplamiento de los transductores, condiciones de humedad de la muestra, las dimensiones mínimas de especímenes requeridas para esta muestra, entre otros, en cuanto a la clasificación de nuestras diferentes mezclas de concreto tenemos que el concreto se clasifica como bueno de acuerdo a esta prueba.

La frecuencia de resonancia es la prueba más afectada por la morfología o geometría de las muestras analizadas. Por tanto, la frecuencia de resonancia debe ser empleada solamente si se tienen muestras prismáticas que cumplan con las dimensiones indicadas en la literatura, de otro modo será difícil obtener las frecuencias.

Debido a que las frecuencias de resonancia obtenidas en los cilindros no resultaron satisfactoriamente, por tanto los valores de los Módulos de Elasticidad Dinámicos obtenidos a partir de las frecuencias de resonancia de los cilindros son bajos en comparación de los Módulos de Elasticidad Dinámicos obtenidos de los prismas.

El módulo de elasticidad dinámico calculado a partir de la velocidad de pulso ultrasónico, presentan una tendencia ascendente respecto a la edad y son aproximadamente del mismo orden que los Módulos de Elasticidad Dinámico obtenido con la frecuencia de resonancia en los prismas.

Como se puede observar en la presente investigación, las dos mezclas de concreto elaboradas con las diferentes sustituciones de puzolanas, presentan excelente desempeño en las sollicitaciones mecánicas, sobre todo en edades superiores a los 90 días, la prueba en la que presentaron mejores resultados las dos mezclas con sustituciones fue la de resistencia a la flexión, en la cual como se observó, las resistencias obtenidas superaron al testigo, y obteniendo un valor del 16% de la resistencia a la compresión en la mezcla con sustitución de CBC, y un 20% aproximadamente en la mezcla de EAH, lo cual quiere decir que son excelentes resultados, por lo cual nuestras mezclas de concreto pueden ser tomadas en cuenta para realizar diseño de pavimentos de concreto hidráulico.

En cuanto a la durabilidad estudiada en las mezclas de concreto, se puede concluir que se presentaron buenos resultados, debido a que las mezclas con las diferentes sustituciones, presentan resultados muy similares a la mezcla testigo, e incluso se pudo observar que la mezcla testigo tuvo menor estabilidad que la mezcla con sustitución de EAH.

En cuanto a la prueba de congelamiento y deshielo se puede observar que las mezclas no funcionaron como se esperaba, es decir que resistieran más que la mezcla testigo, pero como se explicó anteriormente, esto se debe a que nuestras mezclas tiene una cantidad de poros inferior a la que tiene la mezcla testigo y como se sabe para sollicitaciones de



congelamiento y deshielo la cantidad de poros incluida en el concreto juega un papel muy importante.

En cuanto a los ensayos realizados para determinar la porosidad en las diferentes mezclas, se tiene que los mejores resultados (es decir menor cantidad de poros en los especímenes) se presentan en la mezcla con sustitución de EAH, lo cual también es se puede constatar con las pruebas mecánicas, es decir a menor cantidad de poros mayor resistencia mecánica.

En cuanto a la microestructura obtenida en las diferentes mezclas de concreto con sustitución de las diferentes puzolanas, se puede observar que la distribución de estas es homogénea en toda la matriz cerámica, es decir que no se presentan depósitos de las puzolanas en los poros, ni tampoco se muestran aglomeraciones de las mismas, lo cual es benéfico para el concreto y por lo tanto se presentan altas resistencia mecánicas en comparación con la mezcla testigo.

Cabe destacar que para la Escoria de Alto Horno, se tuvo que reducir su tamaño de partícula, pero no se pulverizo por completo, lo que implica que sin gastar tanta energía, con tan solo disminuir su tamaño se mejora la actividad puzolánica de esta, con lo cual se incrementan las resistencia mecánicas ante las diferentes sollicitaciones hasta en un 50% (en el caso de la resistencia a la compresión).

En cuanto a los objetivo planteados en esta investigación, se cumplen cabalmente, puesto que se diseñaron mezclas de concreto hidráulico con sustitución de puzolanas, a las cuales se les evaluaron propiedades físicas, mecánicas y químicas, además de que se logró disminuir el consumo de cemento portland en un 20% (en el caso de la mezcla con sustitución de CBC), esto sin sacrificar las propiedades mecánicas del concreto.

En base al análisis de resultados realizado para las diferentes pruebas efectuadas a las mezclas de concreto elaboradas en esta investigación, se puede concluir que las puzolanas artificiales utilizadas (CBC y EAH), efectivamente mejoran las propiedades físico-mecánicas del concreto hidráulico.

Es bueno tomar en cuenta las puzolanas artificiales de las cuales se hace mención en esta investigación para la elaboración del concreto, ya que como se explicó, estas son subproductos agroindustriales a los cuales no se les da ningún uso, así que se puede contribuir al cuidado del medio ambiente, ya que por un lado se da uso a estos desechos, por otro lado se está disminuyendo el consumo de cemento portland en la mezcla de concreto (en el caso de la mezcla con sustitución de CBC), por lo cual si disminuye su producción disminuiría la cantidad de contaminantes que son arrojados a la atmosfera durante el proceso de fabricación, además de que los costos de fabricación disminuyen, todo esto sin sacrificar la resistencia del concreto.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- ACI , C. (1998). *Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures*. Farmington Hills MI.: ACI 228.2R-98, American Concrete Institute.
- Águila, I., & Soso, M. (2008). Evaluación química de cenizas de cascarillas de arroz, bagazo de caña y hojas de maíz y su influencia en mezclas de mortero, como materiales puzolánicos.
- Alberto Ortiz Galán, S. (2010). *INFLUENCIA DEL PROCESO DE CURADO EN LA RESISTIVIDAD DEL CONCRETO A EDADES TEMPRANAS*. Xalapa, Veracruz: Universidad Veracruzana.
- Amoroch 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. (2011). *Generación de escorias en las acerías*. Lázaro Cárdenas.
- arquys.com. (2012). *ARQUYS ARCHITECTS SITE*. Retrieved OCTUBRE 11, 2012, from <http://www.arquys.com/construccion/mortero.html>
- Arreola Sánchez, M. (2013). TESIS PROFESIONAL “ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES (SUSTITUTOS PARCIALES DEL CEMENTO), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE MORTEROS PARA REPARACIÓN Y/O CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO”, UMSNH, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, MITRVT. Morelia, Michoacán.
- ASOCIACION NACIONAL DE FABRICANTES DE MORTERO. (2003). *MORTEROS: GUIA GENERAL*. MADRID: AFAM.
- ASTM C 215-02. (2003). *Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens*.
- ASTM C 39/C 39M –03. (n.d.). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- ASTM C 496/C 496M – 04. (n.d.). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- ASTM C 637. (n.d.). Standard Specification for Aggregates for Radiation-Shielding Concrete.
- ASTM C 638. (n.d.). Standard Descriptive Nomenclature of Constituents of Aggregates for Radiation-Shielding Concrete.
- ASTM C 78 – 02. (n.d.). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*.



ASTM C 876 – 09. (n.d.). *Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.*

ASTM C 88 - 99a. (n.d.). *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate.*

ASTM C150 / C150M. (12). *Standard Specification for Portland Cement.*

ASTM C187. (n.d.). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement.*

ASTM C-597-02. (2003). *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete.*

ASTM C618 - 12a. (n.d.). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.*

ASTM C-618. (n.d.). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete.*

ASTM C-876–91. (n.d.). *Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete.*

ASTM G 102 – 89. (n.d.). *Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements.*

ASTM G 3 – 89. (n.d.). *Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.*

ASTM G 5 – 94. (n.d.). *Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.*

ASTM G 59 – 97. (n.d.). *Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.*

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.

Brown, G. E. (1996). *Analysis and History of Cement (Análisis e historia del cemento)*, Gordon E. Brown Associates, 259 páginas. Keswick, Ontario.



- CANACEM. (n.d.). Retrieved ENERO 27, 2012, from [http://www.canacem.org.mx/tipos\\_de\\_cemento.htm](http://www.canacem.org.mx/tipos_de_cemento.htm)
- canacem. (2012). *industria del cemento*. Retrieved Mayo 2014, 23, from <http://www.canacem.org.mx/canacem.htm>
- Cardim de Carvalho Filho, A. (2001). *Análisis del Ciclo de Vida de Productos Derivados de Cemento-Aportaciones al Análisis de los Inventarios del Ciclo de Vida del Cemento*. Barcelona, España.
- Castellanos, G. (1985). *Aplicaciones del método de velocidad de pulso ultrasónico correlacionado con la resistencia a la compresión para la evaluación de la calidad del concreto hidráulico. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Yucatán*. Yucatán, Mexico.
- CEMEX. (n.d.). *cemex*. Retrieved junio 4, 2014, from [http://catalogocemexcr.com/pdfs/cemex/concretos\\_cemex.pdf](http://catalogocemexcr.com/pdfs/cemex/concretos_cemex.pdf),
- Charles, J. H. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Estados Unidos: McGraw-Hill.
- Chávez Garcia, H. L. (2011). *Analisis comparativo entre tecnicas no destructivas y destructivas aplicadas a la caracterizacion del concret hidraulico elaborado con agregados volcanicos locales y cemento CPC30R RS*. Morelia: CIDEM.
- concretonline.com. (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)
- Cordeiro G, Dias Toledo, F., & Rego Fairbairn, E. (2009). *“Caracterização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar para emprego como pozolana em materiais cimentícios”*, *Quim. Nova*, Vol. 32, No. 1, Pg. 82-86.
- CRUZ JIMÉNEZ, L. (2012). *Tesis de licenciatura "Comportamiento Mecánico del Carbón Mineral y de la Escoria de Alto Horno en morteros como sustituto parcial de cemento"*, *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil*. Morelia, Michoacán, Mexico.
- Daube, J., & Bakker, R. (1986). *“Portland Blast furnace slag cement: a review”*. In: Frohndsdorff G, editor. *Blended cements ASTM STP 897*. Philadelphia: American Society for Testing and Materials;
- Díaz, C., & Rincon, J. M. (1990). *“Tratamiento químico de la escoria de sílice de una planta geotérmica para su aplicación en cerámica y vidrio”*, *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 29.
- DURAR, R. T. (1998). *MANUAL DE INSPECCIÓN, EVALUACIÓN Y DIAGNÓSTICO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO* ISBN 980-296-541-3.



- economia.gob.mx. (n.d.). *comunidad\_negocios/industriaycomercio*. Retrieved 11 22, 2012, from [http://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/industriaycomercio](http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industriaycomercio)
- EHE-08. (n.d.). *Instrucción de Hormigón Estructural, TÍTULO 4º DURABILIDAD, CAPÍTULO VII*.
- Escalante, J. I., Navarro, A., & Gómez, L. (2011). "Caracterización de morteros de cemento portland sustituido por metacaolín de baja pureza", *Revista ALCONPAT*, Volumen 1, Número 2.
- Escalante, J., Gómez, L., Johal, K., Mendoza, G., Mancha, H., & Méndez, J. (2001). "Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions". *Cement and Concrete Research*.
- Escalante-García, J., Espinoza-Pérez, L., Gorokhovskiy, A., & Gómez-Zamorano, L. (2009). "Coarse blast furnace slag as a cementitious material, comparative study as a partial replacement of Portland cement and as an alkali activated cement". *Construction and Building Materials*.
- Estop Eugenia. (n.d.). "Difracción de rayos-X". *Modulo No.2 Materiales y técnicas de caracterización*. Trainmonher, Coordinator: Aureli Alvarez, UAB,. Barcelona, España.
- F. Puertas. (1993). *Escorias de Alto Horno: composición y comportamiento hidráulico*. CSIC Avierto, 37-47.
- Ferreira, R., Liu, G., Nilsson, L., & GjØrv, O. (2004.). *Blast-Furnace slag cements for concrete durability in marine environment*". *CONSEC 04, fourth international conference on concrete under severe conditions: environment and loading, Seoul, Korea, June 27-July 1, pp. 109–116*.
- Gaete, L. Y., & A., P. (2001). *medida de los parametros acusticos en el sonido II*. España: Jornada iberoamericana en ultrasonido e imagen ultrasonica.
- GIRALDO BOLIVAR, O. I. (2006). *DOSIFICACION DE MEZCLAS DE HORMIGÓN, UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. FACULTAD DE MINAS. ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL. MEDELLÍN, COLOMBIA*.
- GjØrv, O. (2004). "Durability design and construction quality of concretes tructures". In: *Oh BH, Sakai K, GjØrv OE, Banthia N, editors. Proceedings of fourth international conference on concrete under severe conditions—environment and loading, vol.1.*, Seoul, Korea: Seoul National University and Korea Concrete Institute;
- Gómez Zamorano, L. Y., & Escalante, J. I. (2009). "Hidratación y microestructura de cemento Portland sustituido parcialmente con sílice ultrafina". *Materiales de Construcción*, Vol. 59, ISSN: 0465-2746.
- Gomez-Zamorano, L. Y. (2004). Tesis doctoral: "Geothermal waste as areplacement material of Portland cement pastes", Cinvestav – Unidad Saltillo, . Mexico.



- Gómez-Zamorano, L. Y., Escalante-García, J. I., & Mendoza-Suárez, G. (2004). "Geothermal waste: An alternative replacement material of Portland cement". *Journal of materials science* 39.
- 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)
- González Benito, F. J. (2008). *Open Course Ware*. from Universida Carlos III de Madrid.
- Guidebook on non-destructive testing of concrete structures. (2002). *International atomic Energy Agency, Printed by the IAEA in Vienna, Austria, ISSN 1018–5518*.
- 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.
- Hamid, R., Yusof, M, K., & Zain M, F. M. (2009). *A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume, Construction and Building Materials, Elsevier Science, No. 24, September, pp 94-98*.
- Helene, P., & Pereira, F. (2003). "Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón. Reparación, refuerzo y protección"., Versión electrónica en CD. ISBN 85-903707-1-2. Sao Paulo, Brasil.
- Hernández Toledo, U. I. ( 2010.). "Efecto de una puzolana de desperdicio agrícola y el tiempo de curado en la corrosión del ferrocemento"., Instituto Politécnico Nacional, centro interdisciplinario de investigación para el desarrollo integral regional, unidad Oaxaca., Maestría en Ciencias. Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, México.,.
- Hernández-Toledo, U., Montes-García, P., & Caballero-Aquino, T. (2010). *Efecto de la ceniza de bagazo de caña y el tiempo de curado en las propiedades de morteros*». Oaxaca, México.,.
- Hornibrook, F. (1939). Aplication of Sonic Method to Freezing and Thawing Studies of Concrete. *ASTM Bull*(101), 5.
- I.del concreto. (1997). "Manual Tecnología y Propiedades". Tercera reimpresión. Asociación colombiana de productores de concreto ASOCRETO. Colombia.
- IMCYC. (2012). *imcyc.com*. Retrieved marzo 11, 2014, from <http://www.imcyc.com/normas/414%20cemento%20hidraulico2.pdf>
- IMCYC. (n.d.). *imcyc.com*. Retrieved marzo 11, 2014, from <http://www.imcyc.com/normas/414%20cemento%20hidraulico2.pdf>
- imcyc.com. (2003, Diciembre). *IMCYC*. Retrieved OCTUBRE 8, 2012, from <http://www.imcyc.com/normas/414%20cemento%20hidraulico2.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: Asociación colombiana de productores de concreto ASOCRETO.
- Instituto del concreto. (1997). "Manual Tecnología y Propiedades". Tercera reimpresión. Asociación colombiana de productores de concreto ASOCRETO. Colombia.
- 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-%20Spanish.pdf](http://www.germann.org/Articles/download_files/Spanish%20catalogs/LOK,%20CAPO%20&%20BOND%20-%20Spanish.pdf)
- Jones, R. (1962). *Non-Destructive Testing of Concrete*. London.: Cambridge University Press.
- Kaplan, M. F. (1958). *Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns, ACI J., Vol. 29, No. 54-37, p. 675.*
- Kewalramani, M. A., & Gupta, R. (2005). Concrete compressive strength prediction using ultrasonic velocity through artificial neural networks,. *Automat Construction, 15*(3), 374-9.
- Kosmatka, & S. H. (2004). "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5. Mexico.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", boletín de ingeniería EB201., Portland Cement Association, PCA Serial No. 2797. ISBN 0-89312-233-5. Mexico.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Mexico: Portland Cement Association.
- Lang E. Blast, f. c. (2002.). "Structure and performance of cements". New York: Spon Press;. In: Bensted J, Barnes P, editors.
- Lee, W., & Van Deventer, J. (2002). "Effects of Anions on the Formation of Aluminosilicate Gel in Geopolymers". *Ind. Eng.Chem.Res.*, Vol.41.
- Leslie, J. R., & Cheesman, W. J. (1949). *An Ultrasonic Method of Studying Deterioration and Cracking in Concrete Structures, ACI J. Proc., 46* (1), p. 17.
- 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. (1985). *Nondestructive methods for testing concrete, Department of Energy, Mines and Resources*. Ottawa, Canada.
- Malhotra, V. M., & Carino, C. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton, U.S.A.: CRC Press.
- Malhotra, V., & Mehta, P. (1996.). "Puzzolanic and cementitious materials", *Advances in Concrete Technology*. Edit. Gordon and Brach Publishers.
- Mamlouk, M. s., & Zaniewski, J. P. (2009). *MATERIALES PARA INGENIERIA CIVIL*. MADRID (ESPAÑA): PEARSON EDUCATION.
- Manjón Miguel, j. L., & Martínez Martínez, J. A. (2007). "Evolución de la composición de los morteros en los puentes de fábrica". *Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, (pp. 623-630). Burgos,.
- Manjón Miguel, j. L., & Martínez Martínez, J. A. (2007). Evolucion de la composición de los morteros en los puentes de fábrica. *Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, (pp. 623-630). Burgos.
- Martinez Reyes, J., Alavez Ramírez, R., Montes García, P., & Jiménez Quero, V. (2010.). "Determinación microestructural del efecto puzolánico de una arcilla tratada térmicamente en la zona de interface-matriz en morteros". *X Congreso Nacional de Microscopía-Morelia*. Morelia, México,.
- Martirena, J. F., & Et Al. (1998). "Use of wastes of the sugar industry as pozzolana in lime-pozzolana".
- Materiales de Construcción*. (n.d.). Retrieved Octubre 11, 2012, from <https://sites.google.com/site/materialesdeconstrucion/>
- 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.
- Neville A. M. (1998.). "Tecnología del Concreto". Primera edición. México,.; Ed. Trillas,.
- Neville, A. (1995). "Properties of Concrete", *Longmen, Essex*,.
- Neville, A. (1997). "Properties of concrete". New York: Wiley.
- Neville, A. M. (1999). "Tecnología del concreto". Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México DF.
- Neville, A. M. (1999). *Tecnología del concreto*. México DF.: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.



Neville, A. M., & Brooks, J. (2010). "Concrete Technology", second edition, ISBN 978-0-273-73219-8. England.: ED. Pearson.

Neville, A., & Brooks, J. (1988). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO*. MEXICO D.F.: TRILLAS.

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

nitcharacter.com. (n.d.). Retrieved 07 09, 2014, from <http://www.nitcharacter.com/es/servicios/tamano-y-distribucion-de-tamanos-de-particula/dls.html>

NMX C-414-ONNCCE. (2004). "Industria de la construcción Cementos Hidráulicos -Especificaciones y métodos de prueba".

NMX-C-057-ONNCCE-. (2010). Industria de la construcción - Cementantes hidráulicos - Determinación de la consistencia normal.

NMX-C-061-ONNCCE-2010. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CEMENTO HIDRAULICO-DETRMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CEMENTATES HIDRAULICOS*. MÉXICO: ONNCCE.

NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS- MASA VOLUMÉTRICA- MÉTODO DE PRUEBA*.

NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS PARA CONCRETO- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO*.

NMX-C-109-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CONCRETO HIDRÁULICO-DETRMINACIÓN DEL CABECEO DE ESPÉCIMENES*.

NMX-C-156-ONNCCE. (2010). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CONCRETO HIDRÁULICO-DETERMINACIÓN DEL REVENIMIENTO EN EL CONCRETO FRESCO*.

NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- CONCRETO HIDRÁULICO-ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPÉCIMENES EN EL LABORATORIO*.

NMX-C-164-ONNCCE. (2002). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS- DETRMINACIÓN DE LA MASA ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO GRUESO*.

NMX-C-165-ONNCCE. (2004). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN- AGREGADOS- DETRMINACIÓN DE LA MASA ESPECIFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO- MÉTODO DE PRUEBA*.

NMX-C-166-ONNCCE. (2006). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCUCCÓN- AGREGADOS- CONTENIDO DE AGUA POR SECADO- MÉTODO DE PRUEBA*.



- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-REDUCCIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGREGADOS OBTENIDAS EN EL CAMPO AL TAMAÑO REQUERIDO PARA LAS PRUEBAS.*
- NMX-C-205-ONNCCE. (2005). *Determinación de la resistencia del concreto a la congelación y deshielo acelerados.*
- NMX-C-275-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción- concreto- determinación de la velocidad de pulso a través del concreto- método de ultrasonido.*
- Obert, L. (1938). Sonic Method of Determining the Modulus of Elasticity of Building Materials Under Pressure. *Proc. ASTM*(39), 987.
- Obert, L., & Duvall, W. I. (1941). *Discussion of Dynamic Methods of Testing Concrete with Suggestions for Standardization, Proc. ASTM, Vol. 41, p. 1053.*
- Pacífica, R. m. (2008). “Evolución reciente de la industria de cemento”., PORTES, Revista mexicana de estudios sobre la Cuenca del Pacífico., Tercera Época • Volumen 2 • Número 3 • Enero / Junio 2008 • Págs. 165-202. Colima, México.
- Pacífica, R. M. (2008). Evolucion reciente de la industria del cemento. *Portes*, 165-202.
- Polder, R. (2001). “*Test methods on site measurement of resistivity of concrete—a RILEM TC 154 technical recommendation*”. *Construction and Building Materials*;V(15):125–31.
- Polder, R., Andrade, C., Elsener, B., Vennesland, J., Gulikers, J., & Weidert, R. (2000). *RILEM TC 154-EMC: electrochemical techniques for measuring metallic corrosion*”. *Materials and Structures*.
- Powers, T. C. (1938). *Measuring Young’s Modulus of Elasticity by Means of Sonic Vibrations, Proc. ASTM, 38, Part II, p.460.*
- 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.
- Rangel López, C., Pérez Quiroz, J. T., Torres Acosta, A. A., Martínez Madrid, M., Wilfrido, M. M., Ariza Aguilar, L. E., et al. (2006). *Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesto a Diferentes Ambientes Urbanos de México*. SCT; IMT, Sanfandila, Querétaro, México.
- Rayleigh, J. W. (1945). *Theory of Sound, 2nd ed.*Dover Press,. New York.



- Rick, M. ( 2000). “La Carbonatación, Enemigo olvidado del Concreto”, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., Revista Construcción y Tecnología,. México.
- RILEM. (1972). *Recommendations NDT 1, Testing of concrete by the ultrasonic pulse method*, Paris, Dec.
- Rivera Flores., E. (n.d.). “Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja”. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22. In “*Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja*”. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22.
- Rivera Flores., E. (2002). “Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja”. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, págs. 5-22. In “*Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja*”. s.l. : Facultad de Ingeniería Civil, págs. 5-22. Morelia, Michoacán, México.
- Rodríguez Bucio, J. L. (2012). *Tesis de licenciatura; "Ceniza de origen orgánico: su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento"*, Universidad Michoacana de san Nicolás de Hidalgo, Facultad de ingeniería Civil. Morelia, Michoacán, México.
- S. Marquez-Montero Et Al. (2010). Efecto de la sustitución parcial del cemento portland por CBC en la durabilidad de concretos expuestos a cloruros y sulfatos.
- Sánchez de Guzmán, D. (2006). *CONCRETOS Y MORTEROS*. COLOMBIA: INSTITUTO DEL CONCRETO.
- Santamaría, N., Yamín, N., & Arcila, C. (2006). “Resistencia a los cloruros en el concreto adicionado con escoria de alto horno”. *Ingeniería*, núm. 23, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, ISSN 0121-4993.
- Segarra Foradada, J. (2005). “Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en hormigón”, Universidad Politécnica de Cataluña,. España.
- Sengul, O., & Gjörv, O. (2008). *Electrical resistivity measurements for quality control during concrete construction. ACI Materials Journal*.
- Shetty, M. (2005). *Concrete Technology Theory and Practice*. Ram Nagar, New Dheli, India: S. Chand Companu LTD.
- Solis Carcano, R., & Baeza Pereyra. (2003). *Influencia de las propiedades físicas de los agregados en la técnica de pulso ultrasónico para predecir la resistencia a la compresión del concreto*, Revista Técnica de Ingeniería, Universidad del Zulia, Abril, Vol. 26, No.1, p. 45-55. issn 0254-0770. Venezuela.
- 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.



- Sturup, V. R., Vecchio, J. F., & Caratin, H. (1984). "Pulse velocity as a measure of concrete compressive strengths", *Nondestructive testing of concrete ACI SP 82-11*, V.M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Detroit, U.S.A., pp 201-227.
- Torres Acosta, A. A., Martínez Molina, W., Lomelí González, M. G., & Pérez Gallardo, A. (2010). *Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto, Publicación Técnica No. 328, Secretaría de Comunicaciones y Transportes Instituto Mexicano del Transporte*. Queretaro, México.
- uclm.es. (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)
- Unión Nacional de Cañeros, A.-C. (2009). *Comité Ejecutivo Nacional 2007-2010, "Estadísticas de la Caña de Azúcar - Consolidado Nacional 2000-2009"*.
- UNIOVI.com. (2011, enero 1). *Universidad de Oviedo*. Retrieved diciembre 8, 2012, from <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion3.ComponentesMINORITARIOS.pdf>
- 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.
- Whitehurst, E. A. (1966). *Evaluation of Concrete Properties from Sonic Test, ACI Monograph 2, American Concrete Institute, Detroit, MI, p. 94.*
- Whitescarver, O. D., Wells, I., & T. Kwan, J. (1990). Patente: "Process for using sludge from geothermal brine to make concrete and concrete composition". Numero de patente: 4900360.
- www.canacem.org.mx. (2010). *CANACEM*. Retrieved OCTUBRE 8, 2012, from <http://www.canacem.org.mx/canacem.htm>
- Zhang, S., Gong, K., & Lu, J. (n.d.). 2004). "Novel Modification Method for Inorganic Geopolymer by Using Water Soluble Organic Polymers". *Materials Letters.*, Vol.58.



## 6. ANEXOS

A continuación se presentan algunos resultados de algunas pruebas realizadas a las diferentes mezclas de concreto.

### 7.1 Porosidad

#### 7.1.1 Ensayo de absorción capilar

Tabla 38. Relación de la diferencia de las masas en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo, para cada mezcla de concreto

| t(seg 1/2) | (Wt-Wo)/A |        |        |       |       |       | CBC1  | CBC2  | CBC3  |
|------------|-----------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|            | Test.1    | Test.2 | Test.3 | EAH1  | EAH2  | EAH3  |       |       |       |
| 0.000      | 0.000     | 0.000  | 0.000  | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 17.321     | 0.040     | 0.036  | 0.040  | 0.030 | 0.029 | 0.029 | 0.041 | 0.038 | 0.033 |
| 24.495     | 0.059     | 0.052  | 0.056  | 0.044 | 0.041 | 0.041 | 0.055 | 0.048 | 0.043 |
| 30.000     | 0.068     | 0.059  | 0.065  | 0.050 | 0.046 | 0.046 | 0.060 | 0.054 | 0.048 |
| 42.426     | 0.091     | 0.078  | 0.086  | 0.065 | 0.060 | 0.063 | 0.076 | 0.071 | 0.062 |
| 60.000     | 0.116     | 0.098  | 0.112  | 0.084 | 0.079 | 0.084 | 0.095 | 0.089 | 0.081 |
| 84.853     | 0.153     | 0.138  | 0.150  | 0.111 | 0.105 | 0.115 | 0.123 | 0.115 | 0.105 |
| 103.923    | 0.184     | 0.153  | 0.180  | 0.133 | 0.130 | 0.137 | 0.145 | 0.138 | 0.125 |
| 120.000    | 0.212     | 0.178  | 0.209  | 0.154 | 0.151 | 0.157 | 0.164 | 0.158 | 0.145 |
| 146.969    | 0.252     | 0.210  | 0.246  | 0.182 | 0.179 | 0.185 | 0.191 | 0.187 | 0.171 |
| 293.939    | 0.486     | 0.395  | 0.465  | 0.334 | 0.333 | 0.337 | 0.353 | 0.370 | 0.330 |
| 415.692    | 0.623     | 0.504  | 0.602  | 0.416 | 0.410 | 0.415 | 0.470 | 0.494 | 0.450 |
| 509.117    | 0.662     | 0.550  | 0.655  | 0.452 | 0.443 | 0.445 | 0.550 | 0.571 | 0.536 |
| 587.878    | 0.676     | 0.569  | 0.676  | 0.474 | 0.460 | 0.461 | 0.609 | 0.619 | 0.594 |
| 657.267    | 0.683     | 0.578  | 0.684  | 0.482 | 0.466 | 0.468 | 0.649 | 0.648 | 0.632 |
| 720.000    | 0.685     | 0.582  | 0.687  | 0.485 | 0.470 | 0.473 | 0.671 | 0.663 | 0.652 |
| 777.689    | 0.686     | 0.586  | 0.687  | 0.488 | 0.470 | 0.475 | 0.685 | 0.672 | 0.664 |
| 831.384    | 0.689     | 0.586  | 0.688  | 0.489 | 0.471 | 0.476 | 0.694 | 0.677 | 0.669 |
| 881.816    | 0.692     | 0.588  | 0.688  | 0.490 | 0.473 | 0.477 | 0.700 | 0.681 | 0.676 |
| 929.516    | 0.694     | 0.590  | 0.688  | 0.489 | 0.474 | 0.480 | 0.705 | 0.683 | 0.678 |
| 974.885    | 0.692     | 0.586  | 0.682  | 0.489 | 0.473 | 0.480 | 0.705 | 0.682 | 0.677 |
| 1018.234   | 0.688     | 0.584  | 0.680  | 0.485 | 0.471 | 0.480 | 0.705 | 0.682 | 0.677 |
| 1059.811   | 0.685     | 0.582  | 0.676  | 0.488 | 0.471 | 0.480 | 0.705 | 0.680 | 0.675 |
| 1099.818   | 0.686     | 0.582  | 0.678  | 0.489 | 0.473 | 0.480 | 0.708 | 0.682 | 0.677 |
| 1138.420   | 0.686     | 0.582  | 0.676  | 0.489 | 0.473 | 0.482 | 0.710 | 0.683 | 0.677 |
| 1175.755   | 0.686     | 0.582  | 0.675  | 0.489 | 0.473 | 0.482 | 0.710 | 0.683 | 0.677 |



## 7.2 Pruebas electroquímicas

### 7.2.1 Resistividad eléctrica

Tabla 39. Resultados de resistividad eléctrica obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 1 y 2. (Propia del autor)

| Resistividad eléctrica ( $\Omega.cm$ ) |           |         |         |           |         |         |
|----------------------------------------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Edad (días)                            | Espécimen |         |         | Espécimen |         |         |
|                                        | Test.1    | EAH1    | CBC1    | Test.2    | EAH2    | CBC2    |
| 1                                      | 573.03    | 504.00  | 389.78  | 592.80    | 576.48  | 496.67  |
| 3                                      | 1112.36   | 840.00  | 673.25  | 988.00    | 915.59  | 761.56  |
| 5                                      | 1247.19   | 974.40  | 744.12  | 1152.67   | 949.50  | 894.00  |
| 7                                      | 1348.31   | 1041.60 | 814.99  | 1251.47   | 1085.14 | 927.11  |
| 9                                      | 1617.98   | 1108.80 | 921.29  | 1350.27   | 1119.05 | 1026.44 |
| 11                                     | 1651.69   | 1176.00 | 992.16  | 1317.33   | 1152.96 | 1092.67 |
| 13                                     | 1752.81   | 1243.20 | 1063.03 | 1416.13   | 1254.70 | 1192.00 |
| 15                                     | 1550.56   | 1243.20 | 1169.33 | 1416.13   | 1288.61 | 1456.89 |
| 17                                     | 1617.98   | 1276.80 | 1240.20 | 1482.00   | 1322.52 | 1490.00 |
| 19                                     | 1685.39   | 1310.40 | 1240.20 | 1449.07   | 1322.52 | 1523.11 |
| 21                                     | 1685.39   | 1310.40 | 1311.07 | 1449.07   | 1322.52 | 1456.89 |
| 23                                     | 1719.10   | 1377.60 | 1417.37 | 1547.87   | 1424.25 | 1556.22 |
| 25                                     | 1719.10   | 1377.60 | 1452.81 | 1514.93   | 1390.34 | 1887.33 |
| 27                                     | 1752.81   | 1444.80 | 1523.67 | 1580.80   | 1492.07 | 1721.78 |
| 29                                     | 1786.52   | 1444.80 | 1559.11 | 1613.73   | 1424.25 | 1788.00 |
| 31                                     | 1853.93   | 1478.40 | 1594.54 | 1646.67   | 1356.43 | 1986.67 |
| 33                                     | 1853.93   | 1512.00 | 1629.98 | 1679.60   | 1390.34 | 1721.78 |
| 35                                     | 1921.35   | 1545.60 | 1665.41 | 1712.53   | 1424.25 | 1788.00 |
| 37                                     | 2022.47   | 1713.60 | 1807.15 | 1844.27   | 1661.63 | 1887.33 |
| 39                                     | 2157.30   | 1646.40 | 1594.54 | 1877.20   | 1729.45 | 1821.11 |
| 41                                     | 2191.01   | 1680.00 | 1913.45 | 1877.20   | 1865.09 | 2086.00 |
| 43                                     | 2191.01   | 1680.00 | 1771.71 | 1877.20   | 1865.09 | 1788.00 |
| 45                                     | 2089.89   | 1646.40 | 1807.15 | 2074.80   | 1220.79 | 1788.00 |
| 47                                     | 2191.01   | 1646.40 | 1736.28 | 1811.33   | 1695.54 | 1754.89 |
| 49                                     | 1988.76   | 1680.00 | 1878.02 | 1679.60   | 1695.54 | 1821.11 |
| 51                                     | 2224.72   | 2083.20 | 1984.32 | 1943.07   | 2136.38 | 1821.11 |
| 53                                     | 2157.30   | 1747.20 | 1984.32 | 1712.53   | 1763.36 | 1854.22 |
| 55                                     | 2022.47   | 1747.20 | 1984.32 | 1844.27   | 1525.98 | 2019.78 |
| 57                                     | 1853.93   | 1848.00 | 2126.06 | 1482.00   | 1763.36 | 1986.67 |
| 59                                     | 2224.72   | 1814.40 | 1878.02 | 1844.27   | 1865.09 | 1986.67 |
| 61                                     | 2157.30   | 1814.40 | 2126.06 | 1877.20   | 1899.00 | 2251.56 |



|    |         |         |         |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 63 | 1853.93 | 1848.00 | 2161.49 | 2008.93 | 1899.00 | 2119.11 |
| 65 | 1921.35 | 1814.40 | 2090.62 | 1547.87 | 1763.36 | 2019.78 |
| 67 | 2191.01 | 1814.40 | 2267.80 | 1910.13 | 1763.36 | 2251.56 |
| 69 | 2224.72 | 1982.40 | 2161.49 | 2074.80 | 2000.73 | 2648.89 |
| 71 | 2426.97 | 2083.20 | 2622.14 | 2502.93 | 2102.46 | 2748.22 |
| 73 | 2426.97 | 1982.40 | 2515.84 | 2173.60 | 2034.64 | 2781.33 |
| 75 | 2426.97 | 2016.00 | 2409.53 | 2107.73 | 1865.09 | 2648.89 |
| 77 | 1988.76 | 1948.80 | 2444.97 | 1844.27 | 2034.64 | 2516.44 |
| 79 | 2561.80 | 2352.00 | 2728.44 | 2272.40 | 2102.46 | 2847.56 |
| 81 | 2258.43 | 1948.80 | 2126.06 | 2206.53 | 2034.64 | 2814.44 |
| 83 | 2359.55 | 1848.00 | 2586.70 | 2206.53 | 2204.20 | 2980.00 |
| 85 | 2022.47 | 1948.80 | 2480.40 | 2140.67 | 2034.64 | 2648.89 |

Tabla 40. Resultados de resistividad eléctrica obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 3 y 4. (Propia del autor)

| Resistividad eléctrica ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ) |           |         |         |           |         |         |
|-----------------------------------------------------|-----------|---------|---------|-----------|---------|---------|
| Edad (días)                                         | Espécimen |         |         | Espécimen |         |         |
|                                                     | Test.3    | EAH3    | CBC3    | Test.4    | EAH4    | CBC4    |
| 1                                                   | 566.67    | 602.12  | 369.29  | 494.00    | 625.49  | 455.47  |
| 3                                                   | 933.33    | 869.73  | 671.43  | 889.20    | 921.77  | 683.20  |
| 5                                                   | 1100.00   | 970.09  | 738.57  | 1020.93   | 1053.45 | 780.80  |
| 7                                                   | 1200.00   | 1070.44 | 839.29  | 1152.67   | 1152.21 | 845.87  |
| 9                                                   | 1266.67   | 1170.80 | 906.43  | 1152.67   | 1218.05 | 976.00  |
| 11                                                  | 1300.00   | 1170.80 | 1040.71 | 1185.60   | 1218.05 | 1008.53 |
| 13                                                  | 1366.67   | 1237.70 | 1107.86 | 1251.47   | 1250.97 | 1106.13 |
| 15                                                  | 1400.00   | 1271.15 | 1141.43 | 1284.40   | 1349.73 | 1203.73 |
| 17                                                  | 1400.00   | 1338.05 | 1275.71 | 1317.33   | 1382.65 | 1301.33 |
| 19                                                  | 1400.00   | 1304.60 | 1242.14 | 1317.33   | 1382.65 | 1301.33 |
| 21                                                  | 1433.33   | 1338.05 | 1309.29 | 1284.40   | 1448.50 | 1366.40 |
| 23                                                  | 1466.67   | 1404.96 | 1410.00 | 1383.20   | 1547.26 | 1464.00 |
| 25                                                  | 1466.67   | 1371.50 | 1577.86 | 1350.27   | 1481.42 | 1464.00 |
| 27                                                  | 1533.33   | 1438.41 | 1544.29 | 1416.13   | 1613.10 | 1529.07 |
| 29                                                  | 1600.00   | 1438.41 | 1544.29 | 1547.87   | 1580.18 | 1529.07 |
| 31                                                  | 1633.33   | 1404.96 | 1544.29 | 1580.80   | 1547.26 | 1529.07 |
| 33                                                  | 1700.00   | 1237.70 | 1577.86 | 1547.87   | 1547.26 | 1561.60 |
| 35                                                  | 1800.00   | 1271.15 | 1611.43 | 1580.80   | 1580.18 | 1594.13 |
| 37                                                  | 1700.00   | 1371.50 | 1745.71 | 1646.67   | 1678.94 | 1691.73 |
| 39                                                  | 1933.33   | 1605.66 | 1745.71 | 1646.67   | 1711.86 | 1529.07 |
| 41                                                  | 1833.33   | 1605.66 | 1913.57 | 1712.53   | 1613.10 | 1854.40 |
| 43                                                  | 1800.00   | 1605.66 | 1745.71 | 2074.80   | 1711.86 | 1756.80 |
| 45                                                  | 1833.33   | 1672.57 | 1544.29 | 1679.60   | 1646.02 | 1561.60 |



|    |         |         |         |         |         |         |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 47 | 1866.67 | 1438.41 | 1342.86 | 1712.53 | 1777.70 | 1496.53 |
| 49 | 1733.33 | 1471.86 | 1678.57 | 1317.33 | 1646.02 | 1496.53 |
| 51 | 1600.00 | 1672.57 | 1947.14 | 1745.47 | 1876.46 | 1659.20 |
| 53 | 1733.33 | 1404.96 | 1812.86 | 1712.53 | 1843.54 | 1659.20 |
| 55 | 1733.33 | 1438.41 | 1846.43 | 1712.53 | 1843.54 | 1464.00 |
| 57 | 1600.00 | 1672.57 | 2081.43 | 1811.33 | 1942.30 | 1626.67 |
| 59 | 1833.33 | 1471.86 | 2148.57 | 2107.73 | 1909.38 | 2114.67 |
| 61 | 1866.67 | 1739.47 | 1779.29 | 1778.40 | 1382.65 | 1724.27 |
| 63 | 1833.33 | 1772.92 | 1913.57 | 1976.00 | 1909.38 | 2082.13 |
| 65 | 1900.00 | 1605.66 | 2316.43 | 1712.53 | 1777.70 | 2212.27 |
| 67 | 1933.33 | 1772.92 | 2215.71 | 1778.40 | 1942.30 | 2147.20 |
| 69 | 2100.00 | 1806.37 | 2484.29 | 1943.07 | 2073.98 | 2407.47 |
| 71 | 2533.33 | 1806.37 | 2014.29 | 2074.80 | 2238.58 | 2147.20 |
| 73 | 1900.00 | 1906.73 | 2484.29 | 1976.00 | 2172.74 | 2407.47 |
| 75 | 2000.00 | 1839.82 | 2450.71 | 1910.13 | 2041.06 | 2114.67 |
| 77 | 2100.00 | 1973.63 | 2551.43 | 2008.93 | 2106.90 | 2374.93 |
| 79 | 1700.00 | 2140.88 | 2618.57 | 2107.73 | 2337.35 | 2537.60 |
| 81 | 2200.00 | 1839.82 | 2450.71 | 2305.33 | 2172.74 | 2147.20 |
| 83 | 2200.00 | 2040.53 | 2585.00 | 1943.07 | 2172.74 | 2570.13 |
| 85 | 1933.33 | 1873.27 | 2652.14 | 2008.93 | 1909.38 | 2342.40 |

### 7.2.2 Diferencia de potencial

Tabla 41. Resultados de diferencia de potencial obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 1 y 2. (Propia del autor)

| Diferencia de potencial (-mv) |           |      |      |           |       |      |
|-------------------------------|-----------|------|------|-----------|-------|------|
| Edad (días)                   | Espécimen |      |      | Espécimen |       |      |
|                               | Test.1    | EAH1 | CBC1 | Test.2    | EAH2  | CBC2 |
| 1                             | 400.00    | 460  | 337  | 380       | 433   | 428  |
| 3                             | 473.00    | 522  | 458  | 525       | 622   | 460  |
| 5                             | 478.00    | 499  | 469  | 514       | 552   | 383  |
| 7                             | 485.00    | 581  | 515  | 438       | 599   | 476  |
| 9                             | 650.00    | 688  | 579  | 664       | 684.6 | 363  |
| 11                            | 535.00    | 597  | 611  | 616       | 646   | 563  |
| 13                            | 451.00    | 477  | 607  | 616       | 531   | 625  |
| 15                            | 534.00    | 560  | 598  | 617       | 539   | 619  |
| 17                            | 572.00    | 490  | 526  | 586       | 533   | 589  |
| 19                            | 591.00    | 517  | 589  | 609       | 529   | 644  |
| 21                            | 645.00    | 501  | 602  | 655       | 534   | 618  |
| 23                            | 306.00    | 541  | 605  | 598       | 499   | 622  |



|    |        |       |       |       |       |       |
|----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 25 | 356.00 | 528   | 275   | 554   | 704   | 629   |
| 27 | 449.00 | 545   | 182   | 529   | 639   | 618   |
| 29 | 548.00 | 522   | 385   | 606   | 586   | 643   |
| 31 | 497.00 | 266   | 385   | 325   | 544   | 329   |
| 33 | 389.00 | 319   | 381   | 261   | 602   | 350   |
| 35 | 384.00 | 343   | 472   | 547   | 650   | 407   |
| 37 | 366.00 | 386   | 449   | 472   | 570   | 391   |
| 39 | 416.00 | 404   | 264   | 430   | 255   | 420   |
| 41 | 365.00 | 368   | 222   | 366   | 576   | 349   |
| 43 | 338.00 | 360   | 586   | 350   | 599   | 608   |
| 45 | 285.10 | 370.9 | 510.5 | 372   | 558.2 | 519.5 |
| 47 | 227.30 | 330.4 | 502.2 | 369.4 | 317   | 514.6 |
| 49 | 479.30 | 377.3 | 438.2 | 523.6 | 479.6 | 492.5 |
| 51 | 405.70 | 312.4 | 490.5 | 389.8 | 410.4 | 525.2 |
| 53 | 427.00 | 463.6 | 501.1 | 433.4 | 505.1 | 512.1 |
| 55 | 440.70 | 413.7 | 503.4 | 425.7 | 456.7 | 489.6 |
| 57 | 444.50 | 396.3 | 432.5 | 471.2 | 437.2 | 521.4 |
| 59 | 417.20 | 386.6 | 480.3 | 445.2 | 414.5 | 486.1 |
| 61 | 555.00 | 485   | 546   | 554   | 520   | 532   |
| 63 | 568.00 | 541   | 550   | 557   | 581   | 604   |
| 65 | 562.00 | 431   | 582   | 527   | 530   | 568   |
| 67 | 497.00 | 435   | 549   | 526   | 551   | 558   |
| 69 | 458.00 | 446   | 524   | 492   | 518   | 557   |
| 71 | 383.70 | 395.7 | 450.8 | 442.9 | 467.5 | 505.1 |
| 73 | 371.00 | 411.1 | 420   | 392.6 | 420   | 458.2 |
| 75 | 379.70 | 350.2 | 412.1 | 411.1 | 435.2 | 470.8 |
| 77 | 449.90 | 365.5 | 430.7 | 485.7 | 485.2 | 495   |
| 79 | 367.80 | 353.6 | 401.9 | 367   | 396.9 | 466.5 |
| 81 | 430.90 | 405.1 | 450.7 | 484.1 | 494.5 | 493.3 |
| 83 | 381.90 | 342.4 | 414.1 | 377.5 | 399   | 423.2 |
| 85 | 509.50 | 530.4 | 711.3 | 524.4 | 549.2 | 565.5 |

Tabla 42. Resultados de diferencia de potencial obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas elaborados para pruebas de velocidad de corrosión, espécimen 3 y 4. (Propia del autor)

| Diferencia de potencial (-mv) |           |      |      |           |      |      |
|-------------------------------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| Edad (días)                   | Espécimen |      |      | Espécimen |      |      |
|                               | Test.3    | EAH3 | CBC3 | Test.4    | EAH4 | CBC4 |
| 1                             | 384       | 475  | 334  | 350       | 425  | 418  |
| 3                             | 579       | 612  | 435  | 558       | 541  | 484  |
| 5                             | 551       | 576  | 433  | 575       | 528  | 423  |
| 7                             | 532       | 595  | 377  | 445       | 504  | 404  |



|    |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 9  | 650   | 613   | 297   | 700   | 691   | 526   |
| 11 | 656   | 559   | 599   | 606   | 585   | 585   |
| 13 | 585   | 612   | 611   | 654   | 464   | 572   |
| 15 | 646   | 531   | 622   | 636   | 489   | 587   |
| 17 | 631   | 514   | 588   | 617   | 476   | 586   |
| 19 | 643   | 514   | 622   | 598   | 464   | 595   |
| 21 | 664   | 508   | 513   | 670   | 443   | 565   |
| 23 | 690   | 467   | 624   | 616   | 371   | 583   |
| 25 | 695   | 750   | 605   | 658   | 503   | 652   |
| 27 | 678   | 678   | 597   | 681   | 414   | 610   |
| 29 | 573   | 663   | 429   | 678   | 496   | 622   |
| 31 | 330   | 479   | 514   | 462   | 599   | 524   |
| 33 | 349   | 606   | 569   | 412   | 461   | 529   |
| 35 | 505   | 600   | 554   | 514   | 472   | 555   |
| 37 | 498   | 569   | 507   | 528   | 443   | 475   |
| 39 | 475   | 594   | 353   | 561   | 435   | 485   |
| 41 | 436   | 473   | 296   | 501   | 390   | 358   |
| 43 | 448   | 510   | 563   | 527   | 537   | 612   |
| 45 | 411.6 | 539.6 | 501.6 | 537.4 | 477.9 | 555   |
| 47 | 360.4 | 468.6 | 505.5 | 302.7 | 348   | 543.6 |
| 49 | 395   | 587.1 | 453.4 | 566.6 | 386.2 | 510.3 |
| 51 | 437.8 | 504   | 491.2 | 320.4 | 396.9 | 519.2 |
| 53 | 464.8 | 523.4 | 525   | 339.3 | 425.1 | 518.8 |
| 55 | 468   | 534.5 | 537.3 | 418.6 | 438.2 | 507.1 |
| 57 | 484.1 | 480.4 | 478.9 | 431.5 | 414.2 | 459.2 |
| 59 | 474.8 | 492   | 751.6 | 427.1 | 430.3 | 475.5 |
| 61 | 555   | 518   | 515   | 508   | 527   | 523   |
| 63 | 545   | 593   | 593   | 492   | 520   | 567   |
| 65 | 520   | 548   | 569   | 519   | 552   | 542   |
| 67 | 513   | 523   | 598   | 518   | 476   | 542   |
| 69 | 520   | 539   | 548   | 547   | 540   | 539   |
| 71 | 479.7 | 485.5 | 500   | 437.3 | 446.2 | 475.2 |
| 73 | 485.7 | 474.2 | 494.8 | 402.7 | 420.5 | 474.9 |
| 75 | 467.8 | 505.4 | 394.5 | 394.5 | 456.5 | 354.5 |
| 77 | 498.7 | 504.6 | 516.3 | 414.3 | 416.1 | 417.6 |
| 79 | 487.5 | 469   | 462.4 | 344.7 | 365.1 | 369.8 |
| 81 | 492.9 | 506.2 | 101.6 | 437.9 | 423.4 | 437.5 |
| 83 | 445.1 | 477.8 | 492.1 | 341.4 | 345   | 366.7 |
| 85 | 532.9 | 542.3 | 542.7 | 525.2 | 386.1 | 544.6 |



### 7.2.3 Velocidad de Corrosión

Tabla 43. Resultados de intensidad de corriente de corrosión obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas, espécimen 1 y 2. (Propia del autor)

| Intensidad de corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) |           |       |       |           |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Edad (días)                                                        | Espécimen |       |       | Espécimen |       |       |
|                                                                    | Test.1    | EAH1  | CBC1  | Test.2    | EAH2  | CBC2  |
| 1                                                                  | 8.66      | 29.09 | 12.47 | 11.34     | 12.67 | 12.28 |
| 3                                                                  | 2.98      | 7.06  | 9.18  | 7.04      | 2.17  | 11.95 |
| 5                                                                  | 3.50      | 5.57  | 8.15  | 11.40     | 4.24  | 2.66  |
| 7                                                                  | 14.64     | 17.22 | 18.43 | 5.78      | 13.37 | 16.20 |
| 9                                                                  | 18.99     | 20.52 | 11.61 | 38.54     | 9.99  | 10.37 |
| 11                                                                 | 3.69      | 7.92  | 20.57 | 21.58     | 5.50  | 90.94 |
| 13                                                                 | 6.42      | 10.05 | 20.65 | 20.97     | 5.65  | 71.37 |
| 15                                                                 | 6.62      | 9.50  | 19.10 | 25.32     | 2.88  | 55.34 |
| 17                                                                 | 5.37      | 7.18  | 21.17 | 16.85     | 4.84  | 50.97 |
| 19                                                                 | 3.19      | 8.86  | 14.90 | 20.14     | 4.13  | 43.57 |
| 21                                                                 | 2.36      | 7.44  | 20.50 | 17.75     | 2.87  | 51.42 |
| 23                                                                 | 2.16      | 4.63  | 14.85 | 17.53     | 2.59  | 46.50 |
| 25                                                                 | 3.27      | 6.54  | 4.95  | 4.35      | 7.62  | 47.97 |
| 27                                                                 | 5.99      | 8.06  | 5.49  | 9.48      | 5.08  | 49.96 |
| 29                                                                 | 11.19     | 3.08  | 6.77  | 8.21      | 5.82  | 56.19 |
| 31                                                                 | 8.56      | 1.73  | 13.39 | 3.14      | 17.98 | 10.22 |
| 33                                                                 | 5.09      | 2.15  | 10.10 | 9.29      | 5.10  | 9.73  |
| 35                                                                 | 4.85      | 4.20  | 12.15 | 14.76     | 4.76  | 13.56 |
| 37                                                                 | 0.74      | 5.76  | 11.99 | 6.03      | 3.61  | 11.36 |
| 39                                                                 | 6.51      | 4.78  | 14.76 | 4.80      | 3.53  | 6.42  |
| 41                                                                 | 3.01      | 3.01  | 5.13  | 3.26      | 3.50  | 9.24  |
| 43                                                                 | 2.97      | 3.65  | 37.77 | 2.59      | 4.56  | 67.51 |
| 45                                                                 | 3.37      | 6.01  | 34.44 | 4.59      | 5.40  | 57.09 |
| 47                                                                 | 1.52      | 9.24  | 40.61 | 9.08      | 5.41  | 65.44 |
| 49                                                                 | 43.47     | 2.16  | 33.23 | 36.59     | 30.64 | 58.72 |
| 51                                                                 | 27.48     | 12.55 | 45.48 | 15.08     | 15.65 | 59.67 |
| 53                                                                 | 22.79     | 22.13 | 44.29 | 20.11     | 52.71 | 62.86 |
| 55                                                                 | 27.99     | 29.68 | 30.61 | 18.11     | 41.46 | 53.48 |
| 57                                                                 | 35.37     | 14.71 | 48.63 | 56.97     | 20.03 | 61.10 |
| 59                                                                 | 22.97     | 44.93 | 48.63 | 41.95     | 15.69 | 43.14 |
| 61                                                                 | 45.48     | 23.01 | 26.02 | 44.89     | 26.56 | 56.08 |
| 63                                                                 | 40.02     | 17.91 | 30.33 | 18.56     | 42.92 | 59.62 |
| 65                                                                 | 35.05     | 14.23 | 22.07 | 35.14     | 26.92 | 44.34 |



|    |       |       |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 67 | 33.05 | 48.11 | 22.34 | 41.55 | 22.67 | 33.26 |
| 69 | 30.80 | 8.41  | 31.56 | 30.54 | 15.67 | 19.92 |
| 71 | 9.24  | 7.72  | 16.62 | 10.20 | 7.29  | 48.56 |
| 73 | 10.99 | 17.02 | 16.25 | 15.30 | 6.26  | 50.32 |
| 75 | 9.04  | 8.41  | 15.20 | 27.16 | 13.80 | 42.07 |
| 77 | 19.46 | 9.19  | 16.59 | 25.79 | 18.90 | 48.43 |
| 79 | 8.40  | 8.93  | 14.88 | 10.96 | 14.01 | 20.30 |
| 81 | 12.52 | 9.06  | 16.17 | 13.50 | 16.32 | 19.49 |
| 83 | 19.91 | 9.74  | 16.48 | 9.60  | 6.09  | 16.17 |
| 85 | 71.53 | 85.89 | 2.59  | 50.20 | 58.22 | 85.61 |

Tabla 44. Resultados de velocidad de corrosión obtenidos en cilindros de las diferentes mezclas, espécimen 3 y 4. (Propia del autor)

| Intensidad de corriente de corrosión ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) |           |       |       |           |       |       |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|-------|-------|-----------|-------|-------|
| Edad (días)                                                        | Espécimen |       |       | Espécimen |       |       |
|                                                                    | Test.3    | EAH3  | CBC3  | Test.4    | EAH4  | CBC4  |
| 1                                                                  | 8.24      | 14.03 | 7.76  | 9.74      | 10.09 | 17.36 |
| 3                                                                  | 5.88      | 13.05 | 11.76 | 18.49     | 18.95 | 12.62 |
| 5                                                                  | 7.33      | 7.27  | 12.03 | 25.47     | 21.63 | 9.06  |
| 7                                                                  | 85.47     | 76.09 | 18.47 | 17.64     | 22.97 | 18.26 |
| 9                                                                  | 54.88     | 50.05 | 19.86 | 66.84     | 66.41 | 22.13 |
| 11                                                                 | 37.91     | 10.79 | 26.23 | 58.30     | 16.39 | 26.38 |
| 13                                                                 | 13.14     | 9.96  | 21.78 | 42.76     | 3.60  | 21.35 |
| 15                                                                 | 19.64     | 14.23 | 23.28 | 41.92     | 14.83 | 20.78 |
| 17                                                                 | 20.80     | 9.06  | 15.29 | 38.03     | 14.66 | 23.34 |
| 19                                                                 | 23.28     | 9.75  | 16.51 | 29.49     | 12.77 | 13.59 |
| 21                                                                 | 17.98     | 11.05 | 25.27 | 4.45      | 6.90  | 2.60  |
| 23                                                                 | 23.11     | 10.66 | 19.88 | 28.34     | 5.74  | 19.27 |
| 25                                                                 | 25.87     | 44.30 | 18.01 | 38.47     | 11.58 | 21.35 |
| 27                                                                 | 26.80     | 62.37 | 16.80 | 47.67     | 7.91  | 16.45 |
| 29                                                                 | 9.11      | 7.35  | 8.52  | 39.05     | 14.77 | 30.57 |
| 31                                                                 | 1.23      | 11.27 | 9.68  | 16.27     | 7.81  | 13.20 |
| 33                                                                 | 4.24      | 18.25 | 16.84 | 7.08      | 10.50 | 28.57 |
| 35                                                                 | 7.22      | 13.83 | 13.32 | 10.60     | 10.39 | 18.90 |
| 37                                                                 | 5.93      | 13.92 | 10.21 | 10.55     | 12.04 | 16.47 |
| 39                                                                 | 4.78      | 10.94 | 15.37 | 20.11     | 7.60  | 17.03 |
| 41                                                                 | 3.76      | 6.07  | 31.82 | 7.70      | 6.71  | 13.31 |
| 43                                                                 | 4.06      | 10.01 | 32.65 | 8.77      | 21.65 | 41.11 |
| 45                                                                 | 6.42      | 13.44 | 43.22 | 16.52     | 21.90 | 69.78 |
| 47                                                                 | 12.93     | 33.51 | 45.40 | 9.19      | 20.97 | 68.71 |



|    |       |       |       |        |       |       |
|----|-------|-------|-------|--------|-------|-------|
| 49 | 27.28 | 72.02 | 60.90 | 82.41  | 26.88 | 60.68 |
| 51 | 36.12 | 44.23 | 37.55 | 20.52  | 26.13 | 61.28 |
| 53 | 50.54 | 49.37 | 56.19 | 18.64  | 26.82 | 79.98 |
| 55 | 43.94 | 50.51 | 63.71 | 48.32  | 34.10 | 78.15 |
| 57 | 40.74 | 26.33 | 38.24 | 41.88  | 23.61 | 56.17 |
| 59 | 39.68 | 58.20 | 47.19 | 25.22  | 40.13 | 57.17 |
| 61 | 35.14 | 44.57 | 37.04 | 26.93  | 50.75 | 31.93 |
| 63 | 39.46 | 36.65 | 48.03 | 25.15  | 31.27 | 40.50 |
| 65 | 17.36 | 38.00 | 49.65 | 47.86  | 20.52 | 52.70 |
| 67 | 36.19 | 20.14 | 37.91 | 37.01  | 50.49 | 29.76 |
| 69 | 41.74 | 28.41 | 35.34 | 44.46  | 34.02 | 31.45 |
| 71 | 14.53 | 34.18 | 39.82 | 15.81  | 13.61 | 38.29 |
| 73 | 16.41 | 17.66 | 25.39 | 16.73  | 48.36 | 32.84 |
| 75 | 38.20 | 21.19 | 33.16 | 16.21  | 47.53 | 31.68 |
| 77 | 15.18 | 27.82 | 45.49 | 14.81  | 13.65 | 17.82 |
| 79 | 18.32 | 38.13 | 46.26 | 15.53  | 15.84 | 31.66 |
| 81 | 12.33 | 21.61 | 24.16 | 17.52  | 11.71 | 35.62 |
| 83 | 23.57 | 35.66 | 37.58 | 14.94  | 23.70 | 15.21 |
| 85 | 57.42 | 58.02 | 69.84 | 125.54 | 67.27 | 82.93 |