



**UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA: EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON  
CENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN  
ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN**

**TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA**

**TRANQUILINO FRANCISCO MARTÍNEZ**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN**

**COASESOR**

**DR. ANDRÉS ANTONIO TORRES ACOSTA**

**M.I CIPRIANO BERNABÉ REYES**

**Morelia Michoacán, Febrero 2017**



## Tabla de Contenido

INDICE DE ILUSTRACIONES.....	iv
INDICE DE TABLAS .....	xii
DEDICATORIA .....	xiii
AGRADECIMIENTOS.....	xiv
1 RESUMEN .....	1
2 ABSTRACT .....	3
3 INTRODUCCIÓN .....	5
4 JUSTIFICACION.....	7
4.1 Enfoque Estructural.....	7
4.2 Enfoque Ambiental.....	9
5 HIPÓTESIS .....	10
6 OBJETIVOS .....	10
6.1 General .....	10
6.2 Específicos .....	10
7 ANTECEDENTES .....	11
7.1 Fundamentos generales de un Mortero .....	11
7.1.1 Definición y antecedentes.....	11
7.1.2 Clasificación de los morteros.....	13
7.1.3 Componentes de un mortero.....	15
7.1.4 Tipos de mezclado .....	36
7.1.5 Morteros Adicionados con puzolanas en estudio .....	38
7.2 Patologías de elementos fabricados con CP: Concretos y morteros.....	50
7.2.1 Ataque por sulfatos .....	51
7.2.2 Reacción álcali-sílice (RAS) .....	52
7.2.3 Ataque por cloruros.....	54
7.3 Fenómeno de corrosión del acero .....	55
7.3.1 Teoría del fenómeno de corrosión.....	55
7.3.2 Corrosión del acero estructural.....	59
7.3.3 Técnicas para el cálculo de la velocidad de corrosión.....	61



8	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	69
8.1	Caracterización del material inerte (Arena) .....	69
8.2	Caracterización de la Arena Rio Huajúmbaro. ....	71
8.2.1	Humedad actual. ....	71
8.2.2	Humedad de absorción .....	72
8.2.3	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena MVSS. ....	72
8.2.4	Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV).....	73
8.2.5	Colorimetría.....	74
8.2.6	Sedimentación.....	75
8.2.7	Determinación del material fino .....	75
8.2.8	Prueba de terrones de arcilla. ....	75
8.2.9	Gravedad Específica .....	76
8.3	Caracterización de la Arena Rio Lerma. ....	77
8.3.1	Humedad actual .....	77
8.3.2	Humedad de absorción. ....	78
8.3.3	Masa volumétrica seca y suelta (MVSS).....	79
8.3.4	Masa volumétrica seca y varillada (MVSV) .....	80
8.3.5	Colorimetría.....	81
8.3.6	Sedimentación.....	82
8.3.7	Prueba de terrones de arcilla en arena.....	82
8.4	Análisis del agua .....	83
8.5	Materiales de estudio.....	84
8.5.1	Ceniza Elaboración de Ladrillo (CEL) .....	84
8.5.2	Ceniza de Carbón Vegetal (CCV).....	86
8.5.3	Fibras de Nopal (FN).....	89
8.5.4	Perlita Natural .....	90
8.6	Caracterización del cemento.....	91
8.6.1	Consistencia Normal y Tiempo de fraguado .....	91
8.6.2	Proporcionamiento .....	93
8.7	Prueba de Fluidez .....	94
8.8	Elaboración de especímenes.....	96
8.9	Pruebas Físico-Mecánicas y electroquímicas .....	102



8.9.1 Pruebas no destructivas .....	102
8.9.2 Pruebas Destructivas .....	111
8.9.3 Levantamiento de grietas.....	134
9 RESULTADOS.....	134
9.1 Caracterización del Material inerte: arena.....	134
9.2 Caracterización del agua de mezclado .....	136
9.3 Resultados de fluorescencia de Rayos X .....	137
9.4 Análisis de partícula de las cenizas de sustitución .....	138
9.4.1 Tamaño de la partícula .....	138
9.4.2 Morfología de partículas .....	139
9.5 Tiempos de fraguado y Consistencia Normal.....	142
9.6 Pruebas Físico-mecánicas.....	143
9.6.1 Índice de Actividad Puzolánica .....	143
9.6.2 Resistencia a compresión en cubos.....	147
9.6.3 Resistencia a la Flexión.....	151
9.6.4 Resistencia a la Tensión directa en briquetas .....	155
9.6.5 Adherencia .....	159
9.6.6 Resistividad eléctrica .....	162
9.6.7 Velocidad de pulso Ultrasónico.....	164
9.6.8 Resistividad Eléctrica en Prismas con barras de acero inmerso y no inmerso (Prueba húmeda y prueba seca).....	167
9.6.9 Ensayos electroquímicos .....	182
10 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	216
11 CONCLUSION Y RECOMENDACIONES.....	218
12. BIBLIOGRAFIA .....	220



## INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Distribución de puentes por tipo de material. Fuente: (IMT-pt-380, 2011). .....	9
Ilustración 2. Proceso de fabricación del cemento, Fuente: (Cementeras, 2013) .....	23
Ilustración 3. Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	27
Ilustración 4. Gráfica de estados productores de ladrillo. Fuente: (SERpro, 2012) .....	40
Ilustración 5. Nopal en su medio natural. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	46
Ilustración 6. Proceso de corrosión del acero de refuerzo en concreto. Fuente: (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013) .....	57
Ilustración 7. Tipos de ataque de corrosión en las armaduras de concreto. Fuente: (Paredes Cárdenas, 2016) .....	59
Ilustración 8. Representación del vector de impedancia en el plano complejo. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014).....	63
Ilustración 9. Señal de voltaje sinusoidal. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014).....	64
Ilustración 10. El circuito equivalente de Randles. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014).....	65
Ilustración 11. Diagrama de Nyquist o de Cole. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014) .....	66
Ilustración 12. Diagrama de Bode $ Z $ y diagrama de ángulo de fase para circuitos de la ilustración 9 a) (circuito de Randles). Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014) .....	68
Ilustración 13. Localización del lugar donde se obtuvo la arena, Huajúmbaro Michoacán. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	70
Ilustración 14. Lugar de obtención de la arena en estudio. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	70
Ilustración 15. Secado de la arena en parrilla para obtener la Masa seca (Ms). Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	71
Ilustración 16. Procedimiento para obtener el secado superficial (NMX-C-165-ONNCCE, 2004). Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	72
Ilustración 17. Equipo para realizar la prueba MVSS. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	73
Ilustración 18. Varillado de la arena en la prueba MVSV. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	74
Ilustración 19. Análisis de colorimetría. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	74
Ilustración 20. Análisis de contenido de finos. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	75
Ilustración 21. Calculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	76
Ilustración 22. Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	77
Ilustración 23. Secado del material, para la obtención de la Humedad actual. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	78
Ilustración 24. Determinación de la masa en estado superficialmente seco. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	79
Ilustración 25. Determinación de la MVSS. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	79
Ilustración 26. Determinación de la MVSV. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	80
Ilustración 27. Determinación de la colorimetría. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	81
Ilustración 28. Determinación de sedimentos en la arena. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)....	82



Ilustración 29. Prueba de terrones en arcilla en arena. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	83
Ilustración 30. Ubicación de tabiquerías. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	84
Ilustración 31. Horno de cocción de tabiques. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	85
Ilustración 32. Ubicación del lugar de obtención de la CCV. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)..	87
Ilustración 33. Producción de carbón: las chimeneas con la leña debajo de ramas y materia orgánica. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	88
Ilustración 34. Horno tipo parva o montículo. Fuente: (AMILCAR CANUL TUN, 2013) .....	89
Ilustración 35. Nopal deshidratado en polvo, producto CU-CU. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	90
Ilustración 36. Aparato de Vicat utilizado para realizar las pruebas de consistencia normal y tiempos de fraguado inicial y final. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	92
Ilustración 37. Aparato de Gillmore para la realización de los tiempos de fraguado. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	93
Ilustración 38. Método de mezclado de áridos mediante aspas de acero impulsado por el taladro. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	94
Ilustración 39. Llenado de molde sobre la mesa de fluidez. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	95
Ilustración 40. Medición del radio de expansión de la mezcla. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	96
Ilustración 41. Moldes de acrílico para la elaboración de las probetas, parte izquierda, acomodo del acero de refuerzo en los moldes, parte derecha, exhibición de las muestras que se han de emplear en las pruebas electroquímicas. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	97
Ilustración 42. Etapas de llenado del cubo de 5 cm x 5 cm x 5 cm. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) 98	
Ilustración 43. Llenado de moldes para cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	98
Ilustración 44. Llenado de especímenes prismáticos 4 cm x 4 cm x 16 cm. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	99
Ilustración 45. Elaboración de briquetas, utilizando molde y cristal previamente engrasado. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	100
Ilustración 46. Sangrado en briquetas después de un momento de elaboradas. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	101
Ilustración 47. Fabricación de especímenes cilíndricos de 10 cm de altura por 5 cm de diámetro. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	102
Ilustración 48. Medición de las dimensiones utilizando vernier. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .	103
Ilustración 49. Medición de la masa utilizando instrumentos eléctricos. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	104
Ilustración 50. Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico (a la izquierda) y espécimen prismático colocado sobre los transductores al ser realizada la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (a la derecha), (ASTM-C-597, 2009). Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	105
Ilustración 51. Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	106
Ilustración 52. Izquierdo, espécimen prismático colocado entre las dos placas de cobre para tomar la resistencia eléctrica. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	107
Ilustración 53. Cable conectado de C1 a P1. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	108



Ilustración 54. La figura A y B muestra cómo están conectados los cables del resistómetro a los electrodos y la fig. C muestra cómo se lleva a cabo la resistividad eléctrica en prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	109
Ilustración 55. La figura A muestra cómo están conectados los cables del resistómetro a los electrodos y la figura B y C muestra de cómo se lleva a cabo la resistividad eléctrica en prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	110
Ilustración 56. Prueba de Resistencia a compresión en cubos utilizando la máquina universal Tinius Olsen. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	112
Ilustración 57. Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	114
Ilustración 58. Ejemplo de la prueba de flexión estática en los prismas. a) Aplicación de la carga, b) Falla al centro del prisma. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	115
Ilustración 59. Máquina Michaelis para prueba a tensión en briquetas. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	115
Ilustración 60. Aplicación de la fuerza de tensión sobre la briqueta. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	117
Ilustración 61. Perforación de las losas para la prueba de adherencia. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	118
Ilustración 62. Elaboración de la mezcla del epóxico. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	118
Ilustración 63. Pegado de los discos de acero en el recubrimiento de mortero. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	119
Ilustración 64. Relación de dimensiones de las perforaciones y discos utilizados. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	119
Ilustración 65. Disco y perno de acero para realizar la prueba de adherencia. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	120
Ilustración 66. Equipo para prueba Pull off marca CONTROLS. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)....	120
Ilustración 67. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	121
Ilustración 68. Falla entre epóxico y el disco metálico. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	122
Ilustración 69. Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material MK. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	122
Ilustración 70. Falla en el revestimiento. Tipo 4. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	123
Ilustración 71. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	123
Ilustración 72. Electrodo de referencia de media celda tipo calomel. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	126
Ilustración 73. Placa de acero inoxidable AISI 316L/2B. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	127
Ilustración 74. Recipientes conteniendo probetas inmersas en cloruro de sodio (NaCl). Fuente: (T. Francisco Martínez).....	127
Ilustración 75. Potenciostato. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	128
Ilustración 76. Realización de la prueba electroquímica. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	129
Ilustración 77. Configuración del sistema electroquímico. Fuente: (ASTM-G59, 2003). .....	129



Ilustración 78. Realización de la técnica de resistencia a la polarización, prueba en seco. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	130
Ilustración 79. Los pasos para calcular la resistencia a la polarización, fig. A gráfica que da el equipo, fig. B trazo de la línea recta sobre la gráfica y fig. C muestra el valor calculado para la muestra. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	131
Ilustración 80. Distribución Granulométrica de las arenas empleadas en la experimentación: Huajúbaro y Lerma; límites de arenas para morteros ASTM C778-02. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015) .....	136
Ilustración 81. Forma de partícula de la PN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	140
Ilustración 82. Forma de partícula de la CCV. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	140
Ilustración 83. Forma de las partículas de la CEL. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	141
Ilustración 84. Forma de partícula de la FN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	141
Ilustración 85. Gráfica del IAP de la PN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	144
Ilustración 86. Gráfica del IAP de la CCV. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	145
Ilustración 87. Gráfica del IAP de la CEL. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	146
Ilustración 88. Gráfica del IAP de la FN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	147
Ilustración 89. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con PN a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	148
Ilustración 90. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con CCV a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	149
Ilustración 91. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con CEL a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	150
Ilustración 92. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con FN a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	151
Ilustración 93. Gráfica de resistencia a flexión en morteros de cemento parcialmente sustituido con PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	152
Ilustración 94. Gráfica de resistencia a flexión en prismas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013). 153	
Ilustración 95. Gráfica de resistencia a flexión en prismas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)..	154
Ilustración 96. Gráfica de resistencia a flexión en prismas de morteros de cemento parcialmente sustituido con FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)...	155
Ilustración 97. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	156
Ilustración 98. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	157



Ilustración 99. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	158
Ilustración 100. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	159
Ilustración 101. Gráfica de esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con PN a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	160
Ilustración 102. Gráfica de esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con CCV a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	160
Ilustración 103. Gráfica de Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con CEL a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	161
Ilustración 104. Gráfica de esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con FN a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	161
Ilustración 105. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	162
Ilustración 106. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	163
Ilustración 107. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	163
Ilustración 108. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	164
Ilustración 109. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	165
Ilustración 110. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	166
Ilustración 111. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	166
Ilustración 112. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013).....	167
Ilustración 113. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	169
Ilustración 114. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	170
Ilustración 115. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	170
Ilustración 116. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	171
Ilustración 117. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	171
Ilustración 118. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10% y 30% de CCV, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	172



Ilustración 119. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	172
Ilustración 120. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	173
Ilustración 121. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15% y 30% de CEL, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	173
Ilustración 122. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0 %, 1.5 % de FN, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	174
Ilustración 123. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0 %, 1.5 % de FN, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	174
Ilustración 124. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.5 % de FN, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	175
Ilustración 125. Gráfica de resistividad eléctrica en las sustituciones de FN1.5%, CCV10, 15%, PN5% y CEL5% más favorables de las ultimas 4 pruebas del total, prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	175
Ilustración 126. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	176
Ilustración 127. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	176
Ilustración 128. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	177
Ilustración 129. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	177
Ilustración 130. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	178
Ilustración 131. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 30% de CCV, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	178
Ilustración 132. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	179
Ilustración 133. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	179
Ilustración 134. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15% y 30% de CEL, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	180
Ilustración 135. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0%, 1.5% de FN, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	180
Ilustración 136. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0%, 1.5% de FN, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	181
Ilustración 137. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.5% de FN, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	181
Ilustración 138. Gráfica de resistividad eléctrica en las sustituciones de FN1.5%, CEL5%, PN10% y CCV10% más favorables de las ultimas 4 pruebas del total, prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez).....	182



Ilustración 139. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	185
Ilustración 140. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	185
Ilustración 141. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	186
Ilustración 142. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	186
Ilustración 143. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	187
Ilustración 144. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	187
Ilustración 145. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	188
Ilustración 146. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	188
Ilustración 147. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	189
Ilustración 148. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	189
Ilustración 149. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	190
Ilustración 150. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	190
Ilustración 151. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	192
Ilustración 152. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	192
Ilustración 153. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 3; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	193
Ilustración 154. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	193
Ilustración 155. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	194
Ilustración 156. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 3; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	194
Ilustración 157. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	195
Ilustración 158. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	195
Ilustración 159. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 3; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	196



Ilustración 160. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	196
Ilustración 161. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	197
Ilustración 162. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 3; prueba .....	197
Ilustración 163. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	199
Ilustración 164 Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	199
Ilustración 165. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	200
Ilustración 166. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	200
Ilustración 167. Gráfica de velocidad de corrosión en FN1.5%, CCV15%, PN20% y CEL20% más favorables, prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	201
Ilustración 168. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	202
Ilustración 169. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	203
Ilustración 170. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	203
Ilustración 171. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	204
Ilustración 172. Gráfica de velocidad de corrosión en CCV15%, PN15%, FN1.5% y CEL20% más favorables, prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	205
Ilustración 173. Levantamiento de grietas en PN5% en probetas 1, 2 y 3, PN10% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	207
Ilustración 174. Levantamiento de grietas en PN10% en probetas 2 y 3, PN15% en probetas 1 y 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	208
Ilustración 175. Levantamiento de grietas en PN15% en probeta 3, PN20% en probetas 1, 2 y 3. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	209
Ilustración 176. Levantamiento de grietas en PN30% en probetas 2 y 3, CCV10% en probetas 1 y 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	210
Ilustración 177. Levantamiento de grietas en CCV15% en probeta 1, CCV20% en probetas 1 y 2 y CCV30% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	211
Ilustración 178. Levantamiento de grietas en CCV30% en probetas 2 y 3, CEL5% en probetas 1 y 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	212
Ilustración 179. Levantamiento de grietas en CEL5% en probeta 3, CEL10% en probetas 1 y 2 y CEL15% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	213
Ilustración 180. Levantamiento de grietas en CEL15% en probeta 2, CEL20% en probeta 1 y 2 y CEL30% en probeta 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez) .....	214



Ilustración 181. Levantamiento de grietas en CEL30% en probeta 3 y FN1.5% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez)..... 215

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero. Fuente: (ASTM-C270, 2014). .....	14
Tabla 2. Tipos de Morteros, clasificación SCT. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	15
Tabla 3. Producción y consumo de cemento en México en el periodo 2009-2014, Fuente: (CONACEM, 2016). .....	18
Tabla 4 Componentes principales del cemento. Fuente: (Abraham) .....	23
Tabla 5 Clasificación por tipos de cemento. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014). .....	25
Tabla 6 Clasificación por Tipos de Resistencia. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	25
Tabla 7. Clasificación por sus características. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014). .....	25
Tabla 8. Especificaciones físicas. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....	26
Tabla 9. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción. Fuente: (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). .....	30
Tabla 10. Clasificación de los aditivos minerales que pueden adicionarse a una mezcla, según el contenido de compuesto. Fuente: (ASTM-C-618, 2003).....	33
Tabla 11. Numero de ladrilleras en México. Fuente: (SERpro, 2012) .....	41
Tabla 12. Producción nacional de productos no metálicos (Dirección General de Minas, Secretaría de Economía, 2013; DURANGO). Fuente: (SGM, 2014) .....	50
Tabla 13 Rocas y Minerales potencialmente reactivos con los álcalis. Fuente: (Porto Quintián, 2005) .....	53
Tabla 14. Proporción de la mezcla con que se elaboró el mortero. ....	93
Tabla 15. Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión. Fuente: (ASTM-G102, 1999).....	133
Tabla 16. Resultados obtenidos de las pruebas de caracterización realizadas al material inerte. Fuente: (Arguello Hernández, 2012).....	134
Tabla 17 Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015).....	136
Tabla 18 Composición química en porcentaje de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por fluorescencia de rayos X, incluyendo el cemento CPC 30R RS. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013) .....	138
Tabla 19. Medidas de tamaño de partícula de los materiales de sustitución y el CPC 30R-RS. Fuente: (T. Francisco Martínez) .....	139
Tabla 20. Resultados de tiempo de fraguado y consistencia normal de las pastas de cemento con sustituciones de PN, CCV, CEL, FN y sin sustitución. Fuente: (Arguello Hernández, 2012) .....	142



Tabla 21 Especificaciones físicas que deben cumplir los morteros (NMX-C-O21-ONNCCE, 2004).	143
Tabla 22. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU. Fuente: (CYTED-DURAR, 1998).	164
Tabla 23. Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto. Fuente: (NMX-C514-ONNCCE, 2016).	167
Tabla 24. Relación entre el $E_{corr}$ y la actividad de corrosión. Fuente: (NMX-C-495-ONNCCE, 2015).	183
Tabla 25. Relación entre el $E_{corr}$ , factores diversos y la condición de corrosión del acero de refuerzo. Fuente: (NMX-C-495-ONNCCE, 2015).	183
Tabla 26. Clasificación de los valores de $i_{corr}$ en términos de vida útil. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)	198

## DEDICATORIA

Al creador de todas las cosas, por otorgarme la inteligencia, sabiduría, paciencia y salud para cursar esta etapa de mi vida, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer he estado, él está conmigo, por ello con toda la humildad de mi corazón que puede emanar, dedico primeramente mi trabajo a **Dios**.

Con todo mi cariño y mi amor a las persona que me dieron la vida mis padres” **Domingo Francisco Verónica y Elisa Martínez Cruz**” que hicieron toda en la vida para que yo pudiera lograr mis sueños, por motivarme y darme la mano cuando yo sentía que el camino se me terminaba, a ustedes por siempre mi corazón y mi agradecimiento.

Gracias a esas personas importantes en mi vida mis hermanos: **Claudio Francisco Martínez, David Francisco Martínez, Eucario Francisco Martínez, Sara Francisco Martínez y Joel Francisco Martínez** que siempre estuvieron al pendiente para brindarme toda su ayuda y consejos, con todo cariño este trabajo se las dedico a ustedes.



Gracias a esas personas que forman parte de la familia “**Francisco**”, mis cuñadas y cuñado: **Celia Bautista, Josefa Bautista, Yolanda Hernández y Julián Sánchez** por el gran apoyo y consejos, por eso también a ustedes se las dedico este trabajo.

**Sobrinos, sobrinas** quisiera nombrarlos a cada una de ustedes, pero son muchos, pero eso no quiere decir que no me acuerde de cada una de ustedes, tan profundamente las tengo en el corazón, a todas y todos los quiero; se las dedico con todo mi amor este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Todas aquellas personas que me conocen saben lo mucho que me ha costado terminar la tesis y lo mucho que me ha costado comenzar a escribir en este folio en blanco, el folio de los agradecimiento..., por ello me gustaría poder dejar reflejada toda la felicidad que siento en este momento y agradecer a cada una de las personas que de una manera o de otra me han ayudado a llegar al final de este largo camino.

En primer lugar me gustaría comenzar agradeciendo especialmente a mi directora de tesis, a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, su confianza, su paciencia y su forma de trabajar, sin ella esta tesis no hubiera salido adelante. También mis más sinceros agradecimiento al profesor Wilfrido Martínez Molina, a mis coasesores al Dr. Andrés Antonio Torres Acosta, al profesor Cipriano Bernabé Reyes, a la profesora Sandra del Carmen Arguello Hernández por estar ahí, aportando todo su conocimiento y dándome todo su apoyo.

Después, y no por ello menos importante, mi agradecimiento a mi familia, por haberme apoyado y por haber confiado en mí, permitiendo que me metiera al terreno del estudio.



También quiero agradecer a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas”, Sección de Resistencia de Materiales y Corrosión. A los profesores de este laboratorio, a los técnicos a mis compañeros y compañeras, en especial a todos aquellos con los que he compartido tan buenos momentos durante estos años.

Agradezco a mis amigos y amigas, su apoyo, su paciencia y su comprensión.

*"La gran belleza de nuestra ciencia estriba en que un descubrimiento, por grande o pequeño que sea, en lugar de agotar el tema de investigación, abre las puertas a otro conocimiento más profundo y más amplio en desbordante hermosura y utilidad".*

Michael Faraday (1791 - 1867)



## 1 RESUMEN

En el presente estudio se muestran los resultados correspondientes a la utilización de la Perlita Natural (PN), Ceniza de Carbón Vegetal (CCV), Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL) y Fibra de Nopal (FN) como sustitutos del cemento portland (CP) en la elaboración de morteros, con el objetivo de reducir la cantidad de cemento, aprovechar los residuos originados en los procesos agroindustriales de la región y evaluar su comportamiento ante un medio agresivo por cloruros. La PN se utilizó tal cual como fue proporcionada, para la CCV y CEL se utilizó la ceniza que pasa la malla Nro. 200; FN se utilizó como polvo deshidratado. Para las adiciones de PN, CCV y CEL, el mortero se preparó con la arena del río Huajúbaro y la adición de FN con la arena del río Lerma, utilizando el material que pasa la malla ASTM Nro.16 y se retiene en la malla ASTM Nro. 30. Las probetas en las que se evaluó la velocidad de corrosión fueron barras corrugadas de acero grado 60, inmersas en los morteros de CP con sustituciones del 5%, 10%, 15%, 20% y 30% para PN, CCV y CEL, 1.0%, 1.5% para FN. La técnica empleada para la evaluación de la velocidad de corrosión fue la resistencia a la polarización lineal (Rpl), utilizando un Potenciostato marca Gamry, un electrodo calomel saturado de media celda como electrodo de referencia y como contra-electrodo una placa de acero inoxidable AISI 316L. Una vez elaborados los especímenes no se sometieron a curado, a la edad de 36 meses las probetas fueron sometidas a un medio agresivo por cloruros en una solución con el 3.5% de NaCl en masa. Se realizaron pruebas húmedas a una semana de curado en la solución salina y pruebas secas a tres semanas de secado. En el desarrollo de la prueba se obtuvo el potencial de corrosión, parámetro que junto con la densidad de corriente confinan una idea del estado pasivo o activo del acero. Los valores de potencial de corrosión en la prueba húmeda se ubicaron entre -500 mV y -750 mV, los cuales indican un estado activo del acero. Los valores de potencial de corrosión en la prueba seca se ubicaron entre -100 mV y -550 mV. Los resultados de velocidades de corrosión que se presentan son de las 4 últimas pruebas (son las 4 pruebas realizadas a 3 semanas de secado). Las velocidades de corrosión



para la prueba húmeda en PN20% son del orden de 25 a 56  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , CCV15% del orden de 15 a 56  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , CEL20% del orden de 28 a 65  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y FN1.5% de 24 a 49  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Las velocidades de corrosión para la prueba seca en PN15% son del orden de 2.5 a 4.1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , CCV15% del orden de 0.7 a 4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , CEL20% del orden de 0.1 a 38  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y FN1.5% de 1.4 a 7  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Las adiciones que tuvieron menor velocidad de corrosión, se enumeran a continuación de la más favorable hasta la más desfavorable para la prueba húmeda: FN1.5%, CCV15%, PN20% y CEL20%. Las adiciones que tuvieron menor velocidad de corrosión, se enumeran a continuación de la más favorable hasta la más desfavorable para la prueba seca: CCV15%, PN15%, FN1.5% y CEL20%. También se incluyen los resultados de las pruebas físico-mecánicas para tener un mejor argumento sobre el comportamiento de los sustitutos del cemento. Estas pruebas físico-mecánicas corresponden a la compresión simple en cubos de 5 cm de arista, flexión, tensión en briquetas, adherencia, resistividad y velocidad de pulso ultrasónico.

**Palabras Clave:** Morteros, Sustitutos del cemento, Fibras orgánicas, Potencial de corrosión, Velocidad de Corrosión.



## 2 ABSTRACT

The present study shows the results corresponding to the use of Natural Perlite (PN), Charcoal Ash (CCV), Brick Elaboration Ash (CEL) and Nopal Fiber (FN) as substitutes for Portland cement (CP) In the preparation of mortars, with the aim of reducing the quantity of cement, taking advantage of the residues originated from the agroindustrial processes of the region and evaluating their behavior in an aggressive environment by chlorides. The PN was used as it was provided; For CCV and CEL was used the material that passes the mesh number 200; The FN was used as a powder dehydrated. For the additions of PN, CCV and CEL, the mortar was prepared with the sand of the Huajúmbaro River and the mortar with FN was prepared with sand of Lerma River, using the material that passes the mesh ASTM Nro.16 and retained in the mesh ASTM Nro. 30. The specimens in which the corrosion rate was evaluated were corrugated bars of 60 grade steel immersed in CP mortar with substitutions of 5%, 10%, 15%, 20% and 30% for PN, CCV and CEL and 1.0%, 1.5% for FN. The technique used for the evaluation of the corrosion rate was linear polarization resistance (Rpl), using a Gamry Potentiostat, a half-cell saturated calomel electrode was used as the reference electrode and as a counter-electrode a stainless steel plate AISI 316L. After the specimens had been prepared, they were not cured, at age of 36 months the specimens were subjected to an aggressive medium by chlorides in a solution with 3.5% NaCl in mass. Wet tests were performed at one week cure in the saline solution and dry tests at three weeks drying. In the development of the test the corrosion potential was obtained, parameter that together with the current density confines an idea of the passive or active state of the steel. The values of corrosion potential in the wet test were between -500 mV and -750 mV, which indicate an active state of the steel. The values of corrosion potential in the dry test were between -100 mV and -550 mV. The results of corrosion rates that are presented are the last 4 tests (the 4 tests performed at 3 weeks of drying). The corrosion rates for the wet test in PN20% are in the range from 25 to 56  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ , CCV15% on the order of 15 to 56  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ , CEL20% on the order of 28 to 65  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$  and FN1.5% of 24 to 49  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ . The corrosion rates for the dry test in PN15% are in the range from 2.5 to 4.1



$\mu\text{A} / \text{cm}^2$ , CCV15% on the order of 0.7 to 4  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ , CEL20% on the order of 0.1 to 38  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$  and FN1.5% from 1.4 to 7  $\mu\text{A} / \text{cm}^2$ . Additions that had the lowest corrosion rate are listed below the most favorable to the most unfavorable for the wet test: FN1.5%, CCV15%, PN20% and CEL20%. Additions that had lower corrosion rates are listed below the most favorable to the most unfavorable for the dry test: CCV15%, PN15%, FN1.5% and CEL20%. Also included are the results of the physical-mechanical tests to have a better argument about the behavior of the cement substitutes. These physical mechanical tests correspond to the simple compression in cubes of 5 cm of edge, flexion, Strain in briquettes, adhesion, resistivity and ultrasonic pulse velocity.

**Keywords:** Mortar, Cement substitutes, Organic fibers, Corrosion potential, Corrosion rate.



### 3 INTRODUCCIÓN

El concreto armado es uno de los materiales más importantes en el sector de la construcción; mientras el concreto es un material cerámico que soporta esfuerzos a compresión, su combinación con el acero estructural le aporta resistencia a la tracción, torsión, corte y flexión. El principal problema de este material compuesto es la corrosión de las armaduras de acero, que acorde a su avance ocasiona pérdidas en las propiedades mecánicas y puede conducir a la falla estructural. En general, la corrosión es causada por la interacción con ambientes agresivos, en su mayoría en presencia de iones cloruros y/o carbonatación (Peralta Muñoz, Aguirre, & Mejía de Gutiérrez, 2015).

Una característica del concreto que controla el ingreso de los agentes agresivos es su permeabilidad, en este sentido la incorporación de las adiciones puzolánicas al cemento han sido una estrategia exitosa para combatir el problema de la corrosión en materiales cementicios, debido particularmente a las modificaciones microestructurales que generan y la disminución de la permeabilidad, como consecuencia del refinamiento de poro y el incremento en la tortuosidad del sistema (Valencia, Mejía de Gutiérrez, Barrera, & Delvasto, 2012).

En este sentido, el presente trabajo estudia el desempeño de cenizas puzolánicas: Perlita Natural (PN), Ceniza de Carbón Vegetal (CCV), Ceniza de Elaboración de Ladrillo (CEL) y Fibra de Nopal (FN), con el fin de determinar el potencial de utilizarlas como adiciones puzolánicas al cemento en la preparación de morteros y mitigar la corrosión del acero de refuerzo en presencia de Cloruros y de  $CO_2$ .

Cabe mencionar, hay estudios relativos al tema de adiciones al concreto y modificación de sus propiedades. Dos son los trabajos realizados por la Universidad Marista de Querétaro A.C. en el uso de nopal y sábila deshidratada en la mejora de morteros base cemento. De los dos trabajos se pudo determinar que las adiciones de nopal incrementaban la resistencia a la compresión del mortero si se mantenía la relación agua/cemento constante. Por el contrario, al buscar una misma maniobrabilidad del mortero cambiando la relación agua/cemento de la



mezcla, se pudo observar que aunque se necesitaba más contenido de agua en las mezclas con mayor contenido de nopal o sábila deshidratada, la resistencia a la compresión se mantuvo constante. Resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ( $\leq 2\%$  en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado. Pero el papel de cómo tales adiciones incrementan la durabilidad del concreto no está todavía bien comprendido. Una posibilidad es que el mucílago actúa como un tapón de poros, disminuyendo la penetración de cloruros y del agua funcionando como una red en el concreto, gracias a la acción química entre las pectinas y las moléculas de cloruro o de agua. La otra podría ser que el mucílago actúe como inhibidor de la corrosión del acero en concretos contaminados con cloruros (IMT-PT-328., 2010).



## 4 JUSTIFICACION

### 4.1 Enfoque Estructural

La corrosión de las barras de acero es la principal causa de daño y deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado (Fernández, Aperador, Torres, Vera, & Mejía de Gutiérrez, 2011). El acero es el metal más usado en las construcciones de viviendas, edificios, puentes y demás estructuras. Ya sea que se utilicen perfiles estructurales del acero o varillas de acero de refuerzo en concreto. La corrosión es un fenómeno crítico, de no ser debidamente prevenido y controlado, podría ocasionar el colapso de las estructuras provocando la pérdida de vidas humanas en los casos extremos (Paredes, Prieto, & Santos, 2013).

El fenómeno de oxidación del refuerzo metálico afecta significativamente las características funcionales del concreto armado tales como la adherencia, además de inducir la formación de agrietamientos y desprendimientos de trozos de concreto, lo que compromete a la integridad estructural (IMT-PT-182., 2001). Todo esto requiere la atención de especialistas en el área de mantenimiento y rehabilitación.

Uno de los principales impactos causados por los fenómenos de corrosión es el factor económico. En países industrializados, evaluaciones llevadas a cabo por comités de expertos en corrosión y protección fijan pérdidas anuales causadas por la corrosión que representan el 3.5 por ciento del producto interno bruto (PIB), mientras que en los países en vías de desarrollo llegan al 6 por ciento (Genescá, 2015). Se calculan gastos en corrosión por 276 billones de dólares al año en E.U.A., según el estudio de CC Technologies for the Federal Highway Administration (**FHWA**), en el informe del 2001. En México no se han hecho estudios para estimar los gastos que representan las pérdidas por corrosión (Bernabé Reyes, 2015).

Actualmente hay una estimación de cifras sobre costos de corrosión que es más de 1 trillón de dólares de hoy (en comparación con el citado de 276 billones de dólares a partir de 1998), (G2MTLaboratories).



Los problemas actuales de corrosión en la infraestructura de concreto en el país causan no únicamente un gasto económico a las dependencias encargadas de rehabilitar las obras, sino también un problema social.

En México, como en muchos países del mundo, los recursos que los gobiernos invierten cada año en rehabilitación y mantenimiento de puentes carreteros por efectos ambientales son demasiado altos. Por ejemplo, según un estudio en los Estados Unidos se calcula que los costos por fallas en la infraestructura ascienden a más de 300,000 millones de dólares. Así mismo, se estima que de esa cantidad es posible evitar pérdidas por alrededor de 100,000 millones de dólares tomando medidas de prevención que sean oportunas contra la corrosión. El deterioro de las estructuras de concreto reforzado debido a la corrosión por efecto de la exposición a efectos ambientales, así como la falta de recursos para mitigarla (vía mantenimiento de cualquier tipo), es una de las principales causas que ocasionan la reducción de su durabilidad. Además de lo mencionado anteriormente existe otro factor muy importante el cual es la edad de la estructura. En México, el Sistema de Puentes de México, SIPUMEX, en un estudio realizado entre los años 2000 y 2005 (Torres et al., 2010), se encontró que del total de puentes evaluados en el sistema, el 61.75 % de ellos fueron construidos entre los años 1931 y 1980, es decir este porcentaje de puentes oscila entre los 30 y 80 años de vida de servicio a nivel nacional. Por lo dicho en los párrafos anteriores, muchos puentes importantes en México se encuentran expuestos al fenómeno de la corrosión, lo cual afecta su capacidad de servicio y pone en peligro la seguridad de los usuarios (De León & Carlos Honorato, 2015)

La publicación técnica No. 380 de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) contiene la clasificación y cuantificación de los 7,351 puentes existentes en nuestro país de acuerdo al tipo de material empleado en su construcción (IMT-pt-380, 2011). El 68% de los puentes están construidos de concreto reforzado, lo cual repercute en la aplicación de técnicas y metodologías de mantenimiento, reparación o reconstrucción, y con lo cual el presente estudio fortalece su justificación, ilustración 1.

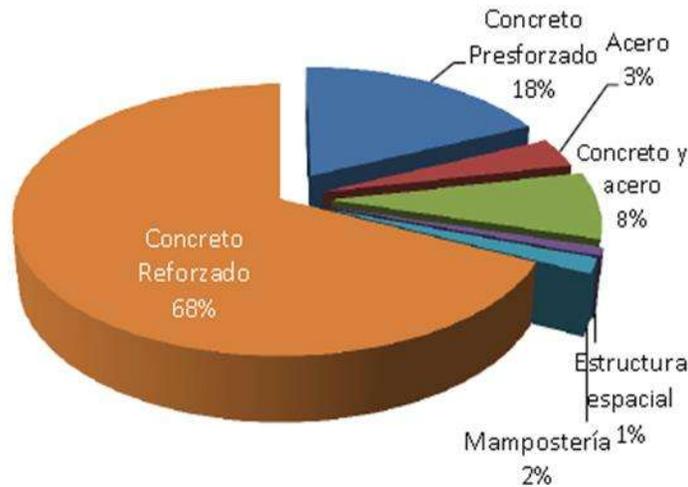


Ilustración 1 Distribución de puentes por tipo de material. Fuente: (IMT-pt-380, 2011).

## 4.2 Enfoque Ambiental

En este sentido y ante el gran desarrollo tecnológico en las diferentes áreas del conocimiento nos encontramos en una época en la cual el cuidado del ambiente es fundamental y prioritario (Herrera, Franco, Miranda, Hernández, Espinoza, & Fajardo, 2015). Actualmente muchas tecnologías están siendo utilizadas para el beneficio del medio ambiente, pero estos acontecimientos no pueden compensar todas las emisiones de  $\text{CO}_2$ , y las plantas de cemento contribuyen significativamente al cambio climático en todo el mundo, lo que representa alrededor del 5% del daño antropogénico (Una tonelada de cemento Portland (CP) genera aproximadamente una tonelada de  $\text{CO}_2$ ), que es preocupante, dado el negativo impacto asociado a los gases de efecto invernadero. El material más utilizado en la industria de la construcción es el concreto hidráulico (CH), cuya base es CP, y es debido a su gran escala de producción que se generan grandes cantidades de  $\text{CO}_2$  (Bernabé, y otros, 2015). Hoy en día, es una necesidad a nivel mundial la investigación de nuevas formas de reducir las cantidades de gases contaminantes generados por la producción de CP (Gómez, Iñiguez, & Lothenbach, 2015). Una alternativa que puede minimizar el daño al medio ambiente y el costo del CH es el uso de aditivos minerales, tales como polvo de



piedra caliza, puzolanas naturales y cenizas volantes, la adición de estos al CH como ingredientes separados antes o durante la mezcla (Bernabé, y otros, 2015).

## 5 HIPÓTESIS

Son las cenizas generadas de procesos agroindustriales e industriales sustitutos de cemento que confieren a los morteros mejoras en las propiedades mecánicas y de durabilidad, en comparación con los morteros convencionales.

## 6 OBJETIVOS

### 6.1 General

Determinar el porcentaje óptimo de sustitución puzolánica en morteros de cemento, utilizados como materiales de reparación, para su uso en la rehabilitación de estructuras de concreto armado, tales como puentes y muelles, que sujetas a la acción destructiva del medio ambiente, por consecuencia de la concentración de cloruros y sulfatos, disminuyan la degradación de las mismas.

### 6.2 Específicos

- A. Determinar las propiedades físicas y mecánicas del Mortero de cemento con sustituciones parciales de puzolanas.
- B. Evaluar el comportamiento electroquímico del acero embebido en morteros de cemento sustituidos parcialmente con puzolanas.
- C. Aprovechar residuos industriales generados en la región de Michoacán que tengan actividad puzolánica, para incluirlos en morteros y disminuir la contaminación del medio ambiente.



## 7 ANTECEDENTES

### 7.1 Fundamentos generales de un Mortero

#### 7.1.1 Definición y antecedentes

La definición que tiene la norma mexicana acerca de un mortero es la siguiente:

##### **Mortero**

Es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado, que, al agregarle agua y arena, tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo.

El cemento para albañilería (mortero) es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado que puede contener uno o más de los materiales siguientes: Clinker Portland, piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso; que al agregarle agua y arena tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo (NMX-C-O21-ONNCCE, 2004).

El origen de los morteros se remonta a la necesidad de un techo para el ser humano y sus primeros asentamientos fueron en la copa de los árboles, en cavernas o en la construcción de paredes a base de ramas de los árboles. En estos inicios el material aglomerante para fijar las ramas o piedras entre sí fue el barro en algunas ocasiones mezclado con algún material vegetal.

No le falta razón a Vitrubio, ya que parece claro que la utilización de los morteros se remonta a épocas prehistóricas, cuando mezclas de barro, áridos y materia vegetal se utilizaban como base en la construcción de viviendas o defensas. Este tipo de morteros presenta como aglomerante esencial material silicatado arcilloso más o menos refinado, además de componentes de Ca (calcio) naturales (carbonatos, sulfatos) o artificiales (cal, yeso) y Fe (OH)<sub>2</sub> (hidróxido de hierro). En general, el aglomerante responde a una composición natural o débilmente



modificada por la adición de otros componentes, si exceptuamos maderas, paja, y otros. No obstante, los morteros también se utilizaron desde un primer momento para cumplir otra de las necesidades constructivas básicas, consistente en conferir sentido estético a la obra al ser aplicado como revestimiento de paredes y otros elementos constructivos.

En Babilonia, había escasez de piedras pero la arcilla era abundante, por lo que las construcciones del lugar se hacían con ladrillos cocidos usando limo o breca como mortero. Se afirma que los primeros en usar una forma de mortero fueron los habitantes de Tappeh Sialk, Irán, en la construcción de los templos zigurates en el año 2900 a.C. En las primeras pirámides de Egipto, se usó un mortero de barro y arcilla para unir los bloques. En las siguientes pirámides usaron morteros de limo o aljez, una mezcla de yeso y arena. Los siguientes en usar mortero fueron los griegos y etruscos, que usaban una mezcla de limo con ceniza volcánica llamada puzolana.

Los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertas cenizas volcánicas mezcladas con caliza y arena producían un mortero muy fuerte capaz de resistir la acción del agua dulce o salada. Estas cenizas las encontraron en un lugar llamado Puteoli conocido hoy como Pozzuoli lo que dio su nombre al cemento de puzolana. Hasta el siglo XVIII solo se utilizan los morteros de cal, yesos y materiales puzolánicos. La civilización romana fue la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer. De esta forma uno de los mejores exponentes que podemos encontrar es el Partenón de Roma (mantiene records como el de ser la mayor construcción de concreto no armado que existe en el mundo). Para su construcción se mezcló cal, puzolana y agua; añadiendo en las partes inferiores ladrillos rotos a modo de los actuales áridos aligerando el peso en las capas superiores usando materiales más ligeros como piedra pómez y puzolana no triturada. Los romanos utilizaron estos morteros para solucionar problemas constructivos como bloquear infiltraciones de agua en cisternas, canales, cloacas, baños termales y acueductos, para estucar muros expuestos a la lluvia, para bloquear el ascenso capilar del agua en muros localizados en terrenos húmedos,



en pavimentación y en la soldadura de tejas. Soluciones constructivas audaces, como arcos y cúpulas (Termas de Caracalla, Panteón de Roma). Más adelante, los romanos mejoraron el uso del mortero puzolánico y finalmente lo cambiaron por mortero con terracota molida con agregado de  $Al_2O_3$  (óxido de aluminio) y  $SiO_2$  (óxido de silicio).

En la Edad Media, las catedrales se construían con mortero de limo, y muchas estructuras no resistieron el contacto con el agua. Durante toda la Edad Media y el comienzo de la Edad Moderna, incluyendo el Renacimiento, los morteros son de mala calidad, constituidos esencialmente de cal aérea por mezclas de cal aérea y yeso (morteros bastardos).

El aglomerante más utilizado fue la cal que experimentó un importante desarrollo en el Imperio Romano ya en esta época se presentaron los primeros testimonios del empleo de aditivos describiéndose las propiedades dispersantes de la clara de huevo y la sangre animal. También se describen fórmulas o recetas que incorporan refuerzos a base de fibra vegetal y animal.

La utilización de los morteros como material de unión entre las piezas de piedra o ladrillo para garantizar la estabilidad del edificio se convirtió, con el paso del tiempo, en práctica más habitual.

La invención del mortero de cal o mortero puzolánicos se debe posiblemente a los griegos o los etruscos, su desarrollo y utilización masiva en todo tipo de construcciones se dio en Roma donde fue utilizado para asegurar la unión o fijación de piezas en paredes y otros elementos constructivos como en revestimientos y como base para la fabricación de concretos (León, Vázquez, & Torres, 2012).

### **7.1.2 Clasificación de los morteros**

La norma ASTM C270 (ASTM-C270, 2014) menciona los diferentes tipos de morteros así como parámetros de resistencia y contenido de aire que deben cumplir; describe también la combinación entre ellos y algunas de las propiedades, tabla 1.



Tabla 1. Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero. Fuente: (ASTM-C270, 2014).

Mortero	Tipo	Esfuerzo a compresión promedio a 28 días, mínimo, psi (MPa)	Retención de agua, mínimo, %	Contenido de aire, máximo, %, b
Cemento-Cal	M	2500 (17.2)	75	12
	S	1800 (12.4)	75	12
	N	750 (5.2)	75	14c
	O	350 (2.4)	75	14c
Mortero Cemento	M	2500 (17.2)	75	12
	S	1800 (12.4)	75	12
	N	750 (5.2)	75	14c
	O	350 (2.4)	75	14c
De cemento para albañilería	M	2500 (17.2)	75	18
	S	1800 (12.4)	75	18
	N	750 (5.2)	75	20d
	O	350 (2.4)	75	20d

ESPECIFICACIONES:  
 Todas las especificaciones de la tabla deben ser obtenidas en laboratorio  
 b) El contenido de aire de morteros de CPC-cal sin inclusión de aire es generalmente menor que 8%.  
 c) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento-cal o mortero cemento, el contenido máximo de aire debe ser de 12%.  
 d) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento para albañilería, el contenido máximo de aire debe ser de 18%.

**MORTERO DE CEMENTO – CAL** este tipo de mortero presenta una gran trabajabilidad, una buena retención de agua y altas resistencias iniciales, normalmente usado para la pega de bloques de concreto en la mampostería estructural.

**MORTERO DE CEMENTO** es aquella, cuyo aglutinante es el cemento Portland. Es utilizado cuando se requiere de altas resistencias, este tipo de mortero es el más común en nuestro medio, ya que con él se realiza la mayoría de las obras de mampostería de ladrillo común. Su resistencia, como en la mayoría de las mezclas; depende de la dosificación que se trabaje.

**MORTERO DE CEMENTO PARA ALBAÑILERIA**, generalmente tiene una trabajabilidad excelente. Las burbujas microscópicas del aire incorporado



contribuyen a crear una acción similar a los de los cojinetes de bolas y proveen parte de esta trabajabilidad (ASTM-C270, 2014).

Al mezclarse con arena y agua, produce morteros con características especiales que son utilizados para el pegado de tabiques, enjarres, repellados, aplanados, trabajos decorativos etc. (NMX-C-O21-ONNCCE, 2004).

La norma ASTM C270 hace también una clasificación general, mencionando propiedades de morteros fluidos o plásticos y en estado endurecido.

La normativa de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) hace una clasificación de los morteros como se muestra en la tabla 2 (SCT, 2002), (Bernabé Reyes, 2015):

**Tabla 2. Tipos de Morteros, clasificación SCT. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena
I	1	0	0 a 0.25	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a 0.5	0	
II	1	0	0.25 a 0.5	
	1	0.5 a 1	0	
III	1	0	0.5 a 1.25	

Nota: Partes en volumen; medido en estado seco y suelto

### 7.1.3 Componentes de un mortero

El mortero está compuesto por la mezcla de los siguientes elementos: Cemento (gris o blanco) y otros cementantes como material aglutinante o pegante, arena fina o gruesa como agregado, agua y aditivos en algunas ocasiones para brindar al mortero características especiales.

Los morteros son ampliamente usados para la pega de piezas de mampostería, ladrillos y bloques estructurales, también se usa para la realización de repellos o revoques y resanes, se usa también para la prefabricación algunos elementos como las tejas y las baldosas para pisos (Notas Técnicas para la Construcción, 1997).



Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia (Bernabé Reyes, 2015).

### **7.1.3.1 Aglutinante**

Los aglutinantes son materiales capaces de unir fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto. Según la forma en que se lleva a cabo a la unión, se denomina aglomerantes o conglomerantes

En los aglomerantes la unión tiene lugar por procesos físicos. Ejemplos: el barro, la cola, el betún, etc.

En los conglomerantes la unión ocurre mediante transformaciones químicas. Ejemplos: el yeso, la cal y el cemento (Materiales).

Materiales aglutinantes Son aquellos que, en estado pastoso y de consistencia variable, tienen la propiedad de poderse moldear, de adherirse fácilmente a otros materiales, uniéndolos entre sí y/o protegiéndolos, endurecerse y alcanzar resistencias mecánicas considerables. Se clasifican en: Aglutinantes aéreos (yeso, cal), aglutinantes hidráulicos (cemento) y aglutinantes hidrocarbonados (alquitrán, betún).

El aglutinante que se utilizó en la realización de este proyecto fue un cemento CPC 30R-RS, por tanto se describe a continuación las características de los cementos Portland y una breve reseña de su utilización en nuestro país.

#### **7.1.3.1.1 Antecedentes del cemento portland**

Hasta el siglo XVIII puede decirse que los únicos conglomerantes empleados en la construcción fueron los yesos y las cales hidráulicas, sin embargo, es durante este siglo cuando se despierta un interés notable por el conocimiento de los cementos.

Puede decirse con acierto que el primer padre del cemento fue Vicat a él se debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad y que propuso en 1817. En 1824, Joseph Aspdin, un constructor de Leeds en Inglaterra, daba el nombre de cemento portland y patentaba un material pulverulento que amasado



con agua y con arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la isla de Portland. Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción.

Puede decirse que el prototipo del cemento moderno fue producido a escala industrial por Isaac Johnson quien en 1845 logra conseguir temperaturas suficientemente altas para clinkerizar a la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, diques, etc., en la segunda mitad del siglo XIX, da una importancia enorme al cemento y las fábricas de éste especialmente las de cemento natural, empiezan a extenderse por doquier. Es a partir de 1900 cuando los cementos portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz del consumo de cementos naturales (IECA, 2016).

En México CEMEX (cemento mexicano) fue fundada en 1906 en la ciudad de Monterrey con la apertura de la planta de Cementos Hidalgo. Durante sus primeros años, se enfrenta con diversos problemas dada la situación política del México de inicios de siglo XX, e incluso llega a cerrar su planta durante un lapso de la revolución mexicana

Para 1920 Cementos Portland Monterrey inicia operaciones con una capacidad de producción anual de 20.000 toneladas. El primer horno de la planta, de tipo largo de un solo paso y de proceso seco, utiliza la tecnología más moderna de su época.

Como empresa CEMEX se constituyó el 2 de febrero de 1931, nació de la fusión de dos plantas: Cementos Hidalgo (1906) y Cementos Portland Monterrey, S. A. (1920) (Bernabé Reyes, 2015) . En el año 1968 se integra Lorenzo H Zambrano a CEMEX, Zambrano murió en 2014.



Desde 1996 México se convierte en la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, con más de 43,000 empleados en el mundo y con una capacidad de producción de 94 millones de toneladas (CEMEX, 2013).

La producción y consumo de cemento en México se presenta en la Tabla 3 respectivamente.

Tabla 3. Producción y consumo de cemento en México en el periodo 2009-2014, Fuente: (CONACEM, 2016).

Año	Producción	Consumo Nacional (Millones Tons.)	Habitantes	Kgs/Habitante
2009	35.1	34.4	107,550,697	321
2010	34.5	33.9	112,336,538	301
2011	35.4	34.4	114,975,406	299
2012	36.2	34.6	116,901,761	95
2013	34.6	32.7	118,395,054	276
2014	36.6	35.2	119,713,203	294

#### 7.1.3.1.2 Proceso de fabricación del cemento

El cemento se fabrica a partir de una mezcla de Clinker y yeso que actúa como controlador de fraguado. Además se le pueden añadir otro tipo de adiciones activas como cenizas volantes, escorias de alto horno, caliza, humo de sílice o puzolanas.

El proceso de fabricación del cemento se explica a continuación

##### 1. Explotación de materias primas

De las canteras de piedra se extrae la caliza y la arcilla a través de barrenación y detonación con explosivos, cuyo impacto es mínimo gracias a la moderna tecnología empleada. En la mayoría de los casos, la cantera se encuentra cerca de la planta.

##### 2. Transportes de materias primas

Una vez que las grandes masas de piedra han sido fragmentadas, se transportan a la planta en camiones o bandas (CEMEX.)

##### 3. Producción del Clinker por diferentes vías

###### ➤ Vía seca



**Trituración:** consiste en la fragmentación de las materias primas a tamaños menores. Los métodos utilizados operan por presión o impacto. Las máquinas que operan por presión son trituradoras de mandíbulas, giratorias, de cono y de cilindro y las que trabajan por impacto se denominan de martillos y de impacto.

Dependiendo de la calidad, la dureza de las materias primas y las necesidades posteriores del proceso, se pueden tener entre una y tres etapas de trituración: primaria secundaria y terciaria. Las trituradoras se alimentan con tamaños que varían hasta 110 cm para producir tamaños finales de máximos de 10 cm.

**Pre homogenización** es la operación de mezcla de las materias primas trituradas, previa a la molienda. Se utiliza para compensar la variación de la granulometría y composición química y evitar segregaciones que generan desviaciones importantes del crudo respecto de los valores de diseño.

**Molienda de crudo:** el producto de la trituración, pre homogenizado, es llevado a la sección de molienda donde se pueden mezclar los diferentes tipos de materiales usados para la fabricación del Clinker. La molienda se realiza en equipos cuyo principio de funcionamiento es el choque y rozamiento de los minerales con cuerpos o rodillos con placas moledoras. Según el accionamiento se denominan de bolas, de placas y de rodillos. La fragmentación fina de los materiales puede alcanzar en promedio hasta un 80 % de tamaños que pasen por el tamiz de 0.10 milímetros. Los materiales ingresan al molino con humedades del 12%.

**Homogenización:** debido a los grandes volúmenes de materiales que requieren la fabricación del Clinker y la heterogeneidad de los yacimientos, la homogenización de la materia prima molida es indispensable para garantizar las condiciones de operación. Variaciones importantes en los



contenidos  $\text{CaCO}_3$  (carbonato cálcico) y otros óxidos menores, generan problemas en los procesos del horno y en el producto final. La homogenización se realiza en silos en donde se almacena el producto de la molienda y la mezcla se da por la combinación de mecanismos de alimentación a gravedad, ayudado por transporte neumático.

**Clinkerización:** es el proceso de los materiales de cocción homogenizados, siguiendo el flujo del material se identifican las siguientes zonas:

- Zona de precalentamiento, ubicada en la torre precalentadora, en donde los materiales molidos viajan en contraflujo con los gases calientes del horno ocurriendo un intercambio térmico.
- Zona de calcinación, se puede presentar según la tecnología, en los ciclones inferiores de la torre, en los precalcinadores y en el horno. La reacción de calcinación:  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ , se empieza a dar cuando el material alcanza temperaturas alrededor de los  $650\text{ }^\circ\text{C}$  y se completa a  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Zona de Sinterización o Clinkerización se da en el horno al alcanzar entre  $1400$  y  $1600\text{ }^\circ\text{C}$ , donde coexisten las fases sólidas y líquidas del Clinker.
- Zona de enfriamiento se presenta a la salida del horno. Mediante corriente de aire fresco, con diferentes tecnologías, donde se reduce la temperatura del producto hasta alcanzar entre  $200$  y  $80\text{ }^\circ\text{C}$ .

#### ➤ **Vía húmeda**

**Trituración:** esta operación es similar a la descrita anteriormente, para la fabricación de Clinker por vía seca.

**Molienda:** la molienda se realiza en equipos similares a los descritos para la fabricación del Clinker por vía seca, con la diferencia de que los cuerpos molidores se encuentran en medio acuosos. El producto de esta molienda



consiste en una suspensión acuosa denominada “pasta” con una humedad que varía entre 30 y 50 %. Los molinos descargan la pasta a unidades de bombeo que los impulsan a través de pastoductos u otros sistemas, hasta las unidades de homogenización, balsas o espesadores.

**Homogenización:** esta se realiza en las balsas que son tanques cilíndricos dotados con agitadores de baja velocidad, donde se mezclan con las materias primas correctoras, para garantizar una operación estable. En esta parte del proceso se inicia la reducción del volumen de agua en una operación conocida como de espesamiento. El transporte de la pasta se realiza por bombeo hasta los hornos.

**Clinkerización:** La Clinkerización por vía húmeda se realiza en el horno, y siguiendo el flujo del material se identifican las siguientes zonas:

1. Zona de secado, se efectúa en la primera parte de la entrada del horno rotatorio y para ello se disponen de intercambiadores de cadenas que ayudan a mejorar la eficiencia térmica.
2. Zona de calcinación, se empieza a dar cuando el material alcanza temperaturas alrededor de los 650 °C y se completa a 1200°C. La reacción es :  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
3. Zona de Sinterización o Clinkerización, se da al alcanzar entre 1400 a 1600°C, allí coexisten las fases sólidas y líquidas del Clinker.
4. Zona de enfriamiento, ocurre a la salida del horno, mediante corrientes de aire fresco, con la aplicación de diferentes tecnologías, que reducen la temperatura del producto hasta alcanzar entre 200 y 80°C.

#### ➤ **Vía semiseco**

**En el proceso semiseco**, la harina cruda seca se paletiza (granula) con agua y alimenta un precalentador de parrilla delante del horno o a un horno largo equipado con cadenas.



➤ **Vía semihumedo**

**En el proceso semihumedo**, la pasta de crudo y agua, es escurrida en filtros prensa. Las tortas del filtro son extruidas en forma de gránulos que alimentan bien aun precalentador de parrilla, o bien directamente a un secador de tortas de filtrado para la producción del crudo (ICPC, 2005).

#### **4. Molienda de cemento**

El cemento se fabrica a partir de la molienda del Clinker, yeso y adiciones (caliza, puzolanas, cenizas, escorias, entre otros). El yeso es indispensable para controlar el endurecimiento del cemento una vez que entra en contacto con el agua, porque cuando su cantidad es muy baja el endurecimiento puede ocurrir de manera instantánea (Arguello Hernández, 2012). La dosificación de cada una de los componentes y su calidad individual define el tipo de cemento.

La molienda es una reacción exotérmica de manera que se requiere enfriamiento de los equipos. Los métodos de enfriamiento pueden ser aireación, por inyección de agua o combinados. El enfriamiento se efectúa en la chapa del molino (ICPC, 2005).

#### **5. Envase y embarque del cemento**

El cemento es enviado a los silos de almacenamiento; de los que se extrae por sistemas neumáticos o mecánicos, siendo transportado a donde será envasado en sacos de papel, o surtido directamente a granel. En ambos casos se puede despachar en camiones, tolvas de ferrocarril o barcos (CEMEX.).

La ilustración siguiente muestra el proceso general de la producción del cemento

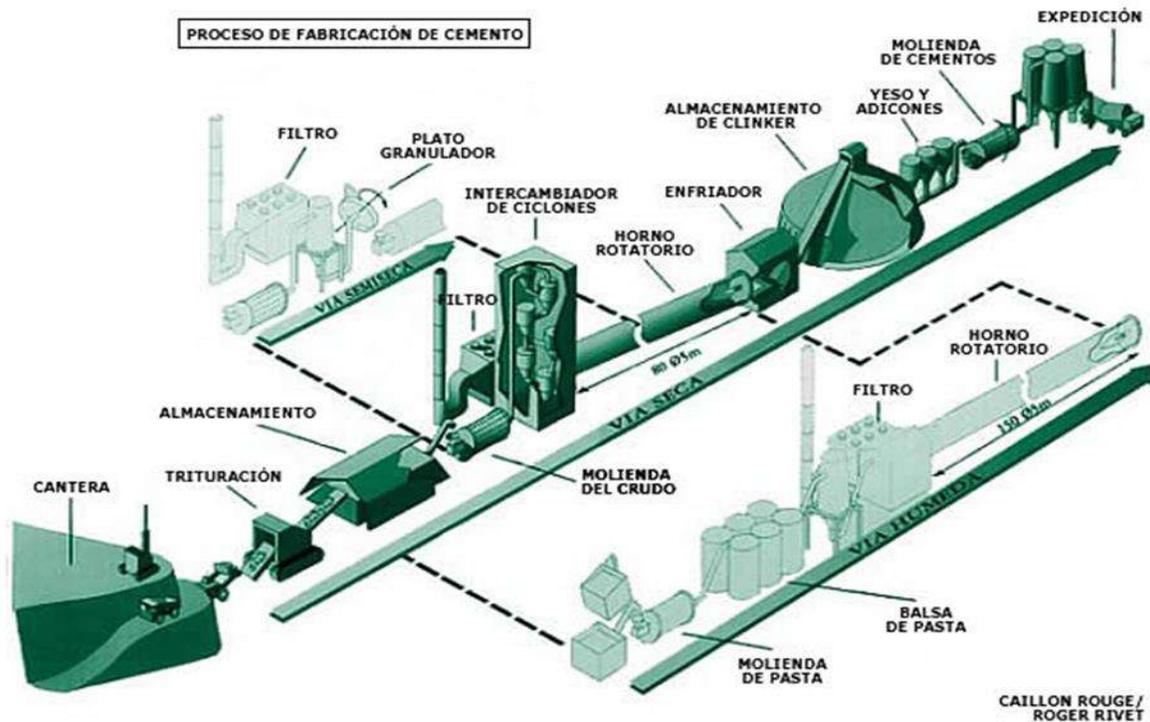


Ilustración 2. Proceso de fabricación del cemento, Fuente: (Cementeras, 2013)

Son 4 los compuestos principales presentes en el cemento portland, ellos le imparten las propiedades fisicoquímicas al concreto (García Chowell, 2005).

Tabla 4 Componentes principales del cemento. Fuente: (Abraham)

Componente	Fórmula	Fórmula Abreviada
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	$\text{C}_2\text{S}$
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$

Las cuatro fases mayoritarias del cemento son el **C<sub>3</sub>S**, **C<sub>2</sub>S**, **C<sub>3</sub>A** y **C<sub>4</sub>AF**. La composición mineralógica del Clinker es muy importante por su influencia en las propiedades del material endurecido.

**El Silicato Tricálcico. Alita (C<sub>3</sub>S)** es un compuesto que se presenta en la fase solida formando una red cristalina con impurezas en forma de sustituciones por iones de magnesio, hierro y aluminio, razones por la que recibe el nombre de **alita**.



Se caracteriza por poseer un alto calor de hidratación (120cal/g) y una velocidad de hidratación rápida, lo que se traduce en altas resistencias mecánicas a edades cortas; determina en gran medida la dinámica de hidratación del cemento (Monteagudo Viera, 2014).

**El Silicato Dicálcico. Belita ( $C_2S$ )** suele contener iones de magnesio, aluminio y óxido de potasio por lo que recibe el nombre de belita. Se caracteriza por poseer un calor de hidratación bajo (62cal/g) y una velocidad de hidratación lenta. Presenta buenas resistencias mecánicas a largo plazo (Monteagudo Viera, 2014).

**Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ )** el calor de hidratación del  $C_3A$  es muy elevado (207cal/g) y su velocidad de hidratación es muy rápida. Su reactividad produce un fraguado “relámpago” en ausencia de sulfato de calcio porque desarrolla grandes resistencias a edades muy cortas, lo que contribuye negativamente a la hidratación del cemento (Taylor, 2003). En presencia de yeso reacciona y forma la etringita ( $C_3A.C_3S_3H_{32}$ ). Este paso disminuye la velocidad de reacción  $C_3A$ . La hidratación de  $C_3A$  en presencia de etringita se obtiene un sulfoaluminato de calcio hidratado ( $C_4A\bar{S}H_{12}$ ) que aumenta a medida que disminuye la etringita.

**Ferrito Aluminato Tetracálcico. Ferrito ( $C_4AF$ )** es de hidratación lenta y regular, apenas contribuye al desarrollo de resistencias, con calor de hidratación moderado, tiene un color pardo oscuro, que junto con la magnesia (MgO), da un color verde grisáceo oscuro, siendo por tanto responsable del color característico del CP. Es la fase que menos importancia tiene en las propiedades del cemento, variando según la proporción de aluminio o hierro disponible, entre fases que van  $C_2A$  al  $C_2F$  pasando por la siguiente gama  $C_2A$ ,  $C_6A_2F$ ,  $C_4AF$ ,  $C_6AF_2$  y  $C_2F$  (Sepulcre Aguilar, 2005).

#### 7.1.3.1.3 Clasificación del cemento

La norma mexicana clasifica a los cementos por sus componentes de acuerdo a tres aspectos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014):

1. Tipos de cemento.
2. Tipos de resistencia.



### 3. Características.

La clasificación que hace la norma mexicana se muestra en las tablas 5, 6 y 7

**Tabla 5 Clasificación por tipos de cemento. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).**

Tipo	Denominación
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario
<b>CCP</b>	Cemento Portland Puzolánico
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto
<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de Sílice
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno

**Tabla 6 Clasificación por Tipos de Resistencia. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).**

Clase Resistente
20
30
30R
40
40R

**Tabla 7. Clasificación por sus características. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).**

Clase Resistente	
<b>R</b>	Alta Resistencia inicial
<b>RS</b>	Resistente a los sulfatos
<b>BRA</b>	Baja Reactividad Alkali Agregado
<b>BCH</b>	Bajo Calor de Hidratación
<b>B</b>	Blanco



### **Especificaciones físicas**

**Resistencia a 28 días:** La resistencia mecánica a la compresión a los 28 debe cumplir con lo establecido en la Tabla 8.

**Resistencia a 3 días:** La resistencia mecánica a la compresión a los 3 días para los cementos 30 R Y 40 R, debe cumplir con lo establecido en la Tabla 8. Se verifica con la (NMX-C-061-ONNCCE, 2010).

**Tiempo de fraguado:** Para todos los tipos de cemento y todas las clases resistentes se debe cumplir con las especificaciones de tiempo de fraguado indicados en la Tabla 8. Se verifica con la (NMX-C-059-ONNCCE, 2010).

**Estabilidad de volumen:** Para todos los tipos de cemento y todas las clases resistentes se debe cumplir con las especificaciones de expansión/ contracción de la Tabla 8. Se verifica con la (NMX-C- 062-ONNCCE, 2010).

**Tabla 8. Especificaciones físicas. Fuente: (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).**

Clase Resistente	Resistencia a la Compresión N/mm <sup>2</sup>			Tiempo de Fraguado (min)		Estabilidad de volumen en autoclave (%)	
	3 días	28 días		Inicial Mínimo	Inicial Máximo	Expansión Máximo	Contracción Máximo
	Mínimo	Mínimo	Máximo				
20	-	20	40	45	600	0.80	0.20
30	-	30	50	45	600	0.80	0.20
30 R	20	30	50	45	600	0.80	0.20
40	-	40	-	45	600	0.80	0.20
40 R	30	40	-	45	600	0.80	0.20

El cemento utilizado en este trabajo fue un Cemento Tolteca gris CPC 30R-RS, ver ilustración 3.



**Ilustración 3. Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

#### 7.1.3.1.4 El cemento en los últimos años

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

En la actualidad, la importancia del sector de la construcción en todos los países, desde el punto de vista económico y social, junto con la menor disponibilidad de los recursos naturales y artificiales necesarios, y su desarrollo sostenible, han provocado que desde hace varias décadas a esta parte, se haya tenido que aumentar, en cantidad y tipos, la incorporación de adiciones minerales naturales y/o artificiales al cemento Portland (Bernabé Reyes, 2015).

El cemento Portland ha contribuido sustancialmente al desarrollo económico de la sociedad moderna. Pero su fabricación, sustentada en el uso de recursos no renovables, ha generado la producción de grandes cantidades de gases efecto invernadero. Las medidas a tomar para disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la producción de cemento pueden ser clasificadas en dos grandes grupos: el primero se encamina hacia una mejora de la eficiencia del proceso de producción, disminuyendo los consumos de energía; y el segundo, reduciendo la producción de Clinker, a través de la incorporación de las adiciones minerales durante el



proceso de fabricación del cemento o sustituyendo parte de éste en la manufactura del concreto.

Los progresos alcanzados en el conocimiento de la ciencia del concreto, el uso de modernas técnicas en la investigación de la química y microestructura del concreto, así como del desarrollo de la industria de los aditivos químicos, han abierto nuevas perspectivas para el uso del concreto como un material de construcción moderno. Estos resultados han revelado nuevos caminos hacia el desarrollo de concretos de alta resistencia y mejor durabilidad con menores proporciones de cemento Portland. El uso de pequeñas cantidades de cemento Portland y grandes cantidades de adiciones puzolánicas y otros subproductos combinados con aditivos de alto poder dispersante, se ven como una buena alternativa para reducir las emisiones producidas en la fabricación del cemento Portland (Lorca Aranda, 2014).

Hace 50 años nadie imaginaba que un día hablaríamos de sustentabilidad y de la necesidad de establecer medidas específicas a favor del medio ambiente y la preservación de nuestro planeta. En la actualidad, se invierte una gran cantidad de recursos en este rubro, más de 300 millones de dólares en la última década, que han servido para disminuir notablemente la cantidad de emisiones contaminantes ( $\text{CO}_2$ , principalmente) a la atmósfera, mediante la instauración de programas de reciclamiento, co-procesamiento de aproximadamente 7.5 millones de llantas de desecho y la adición de residuos industriales en el proceso de elaboración del cemento.

La estrategia sustentable de las cementeras mexicanas va más allá, ya que existen acciones específicas para la regeneración y reforestación de las canteras, el correcto uso del agua y la energía eléctrica, la creación de viveros y, en general, un respeto irrestricto por la flora y la fauna de las regiones donde se localizan las plantas productoras de cemento (González G., 2012).



### **7.1.3.2 Material inerte**

Los áridos son una materia prima imprescindible en la construcción de edificios e infraestructuras de un país. Son la segunda materia prima más consumida, después del agua. La industria del árido representa un negocio de aprox. 150 MMUS\$/año, con un volumen de ventas anual de 22 millones de m<sup>3</sup>, equivalente a un consumo de 1.1 ton/hab. X año (Sotomayor Fontealba, 2009).

Los áridos se conocen normalmente como materiales que, formando parte de la composición de los concretos, no intervienen o intervienen de un modo mínimo en las reacciones de hidratación que se dan. Por lo tanto una de sus características es que es inerte.

Su segunda característica fundamental en los concretos normales es su resistencia. Por lo que su misión es bajar la dosificación de cemento y cooperar con él en la resistencia final del concreto (Navarro Calderón, 2014).

La importancia de utilizar el tipo y calidad de los agregados no debe ser subestimada pues los agregados finos y gruesos ocupan comúnmente de 60 a 70% del volumen de concreto, e influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclados y en la durabilidad del concreto endurecido. Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o material triturado siendo la mayoría de sus partículas menores que 5 mm. Los agregados gruesos consisten en grava o una combinación de gravas o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm (GCC).

Agregado bien graduado reduce la separación de materiales en mortero plástico, que reduce el sangrado y mejora la trabajabilidad. Arenas deficientes de finos producen morteros ásperos, mientras que arenas con finos excesivos producen morteros débiles y aumentan la contracción (ASTM-C270, 2014).

### **7.1.3.3 AGUA**

Resulta obvio decir que sin agua no se puede elaborar concreto o morteros, más aún, ni siquiera puede elaborarse una pasta de cemento. Por otra parte, se debe



tener en cuenta que el agua y el concreto son dos de los materiales más utilizados por la humanidad, el agua ocupa el primer lugar y el concreto el segundo (Fernanda Carrasco, 2013).

El agua desarrolla tres funciones: contribuye a la trabajabilidad, hidrata el cemento y facilita la carbonatación de la cal. La cantidad de agua necesaria depende principalmente de los ingredientes del mortero. El agua debe estar limpia y libre de cantidades nocivas de sustancias que puedan ser perjudiciales para el mortero o el refuerzo. Usualmente el agua potable es aceptable.

Los requisitos de agua del mortero son bastante diferentes de aquellos para el concreto, en donde es deseable una relación agua/cemento baja. El mortero debe contener la cantidad máxima de agua compatible con una óptima trabajabilidad. El mortero debe también ser reemplazado para reemplazar el agua perdida por evaporación (ASTM-C270, 2014).

Las aguas a las que se refiere la norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2004), que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la tabla 9.

**Tabla 9. Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas para el agua a utilizarse en la construcción. Fuente: (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).**

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio Límites en ppm.	Cementos sulfuresistentes Límites en ppm.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como $SO_4=$ (a)	3000	3500
Magnesio como $Mg^{++}$ (a)	100	150



Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	3
Álcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5
<p>(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.</p> <p>(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX -C-088.</p> <p>(c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl<sub>2</sub> como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.</p>		

Las impurezas del agua pueden presentarse disueltas o en forma de suspensión y pueden ser: carbonatos o bicarbonatos, cloruros, sulfatos, sales de hierro, sales inorgánicas, ácidos, materia orgánica, aceites, o sedimentos y pueden interferir en la hidratación del cemento, producir modificaciones del tiempo de fraguado, reducir la resistencia mecánica, causar manchas en la superficie del concreto y aumentar el riesgo de corrosión de las armaduras (Fernanda Carrasco, 2013).

#### 7.1.3.4 PUZOLANAS

El término puzolana abarca muchos tipos de materiales; por lo cual se debe conocer el origen del término y las distintas propiedades que debe tener para ser considerado como tal.

El término “Puzolana” viene de una ceniza volcánica extraída en Puzzuoli, un pueblo de Nápoles, Italia. Esta ceniza fue resultado de la erupción del monte Vesubio, en 79 DC. Sin embargo, el empleo de la ceniza volcánica y de la arcilla calcinada en otras culturas data de 2000 AC o tal vez antes. Muchas de las estructuras romanas, griegas, indianas y egipcias, producidas con concreto de puzolana, se les puede visitar hoy en día, comprobando la durabilidad de estos materiales (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).



El desarrollo del cemento hidráulico basado en una mezcla de puzolana y cal significó cambios radicales en el arte de la construcción de la era romana. El incremento de resistencia, sus propiedades hidráulicas y resistencia al agua del mar permitieron la construcción no solo de arcos y bóvedas, sino también de estructuras marítimas. Mezclas de puzolana y cal sirvieron para dar impermeabilidad a baños, tanques y acueductos. Testimonio de su durabilidad la dan las muchas estructuras que están de pie hasta hoy (FICHA, 2012).

#### 7.1.3.4.1 Definición

Una puzolana se define generalmente en la norma ASTM C618 como un material silíceo o silíceo y aluminoso que, en sí mismo, posee poco o ningún valor cementoso, pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio (cal) a temperatura ordinaria para formar compuestos que poseen propiedades cementosas (Snellings, Mertens, & Elsen, 2012).

De acuerdo a la norma para cementos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014) define a la puzolana de la siguiente manera:

**Puzolanas:** Sustancias naturales, artificiales o subproductos industriales, silíceo o silicoaluminosos o combinación de ambas, las cuales no endurecen por su mismas cuando se mezclan con el agua, pero finamente molidos, reaccionan con el agua a temperatura ambiente.

Las puzolanas son materiales de adición de suma importancia en la industria del cemento, por su capacidad de atrapar la cal libre que queda en el Clínter después del proceso de Sinterización de las materias primas, reduciendo el calor de hidratación y los costos de producción. Dicho de otra manera, se consideran generalmente como puzolanas los materiales que, carentes de propiedades cementicias y de actividad hidráulica por sí solos, contienen constituyentes que se combinan con cal a temperaturas ordinarias y en presencia de agua, dando lugar a compuestos permanentemente insolubles y estables que se comportan como conglomerantes hidráulicos (Rosales Rivas, 2012).



#### 7.1.3.4.2 Clasificación de las puzolanas

Hacer una clasificación precisa de puzolanas es difícil, puesto que, hoy día, con este término se abarcan materiales muy diversos en su origen y en su composición, tanto química como mineralógica.

La (ASTM-C-618, 2003) clasifica a las puzolanas como:

**Puzolanas naturales (N)**, crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase como lo indica la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 10, tales como algunas diatomeas; sílex opalinos y lutitas; tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinado o sin calcinar; y diversos materiales que requieran calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarras.

**Puzolanas Clase F**, Dentro de esta clase se encuentran las cenizas volantes, por ejemplo las cenizas volantes de centrales eléctricas; normalmente se producen de la quema de antracita o carbón bituminoso que cumple con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 10.

**Puzolanas Clase C**, Cenizas volantes normalmente producidas a partir de lignito o carbón sub-bituminoso que cumple con los requisitos aplicables para esta clase como se indica en la norma ASTM C-618, indicados en la tabla 10. Esta clase de ceniza, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

**Tabla 10. Clasificación de los aditivos minerales que pueden adicionarse a una mezcla, según el contenido de compuesto. Fuente: (ASTM-C-618, 2003).**

CLASE DE ADITIVO MINERAL	NORMA ASTM C618			NORMA ASTM C1240
	N	F	C	Humo de Sílice
Especificaciones Químicas y Físicas				
SiO <sub>2</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , min. %	70	70	50	85+
SiO <sub>3</sub> , % max.	4	5	5	-

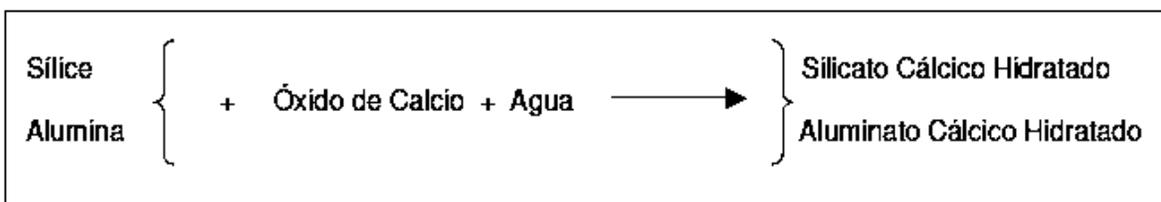


Humedad, % max.				
Perdidas por ignición, % max.	10	6 a 12	6	6
Álcalis, N <sub>2</sub> O, % max. opcional	1.5	1.5	1.5	1.5
Retenido Tamiz N°325, % max	34	34	34	10
Índice de Act. Puz. Con Cemento Pórtland 28 días, % min. respecto al del control	75	75	75	85 7d.
Requerimiento de agua, % max. Vs. Control	115	105	105	-

referido a SiO<sub>2</sub>

La evaluación de la actividad puzolánica es esencial para evaluar el material como una puzolana. De acuerdo con ASTM C-618, para utilizarse como aditivo mineral en el cemento portland las puzolanas naturales deben cumplir con ciertos requerimientos físicos y químicos. Por ejemplo, los aditivos minerales clase N deben cumplir con un mínimo de 70 por ciento en la suma de SiO<sub>2</sub> + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Rodríguez, Dámazo, & Afif, 2000).

La reacción puzolánica consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos di cálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento portland. Es decir que es un proceso natural de formación de cemento (Quintana Crespo, 2005). Esta reacción es irreversible y se escribirse esquemáticamente del siguiente modo:





La reacción Puzolánica favorece los concretos adicionados, pues incrementa las resistencias mecánicas (compresión y flexión), reduce la permeabilidad y la porosidad capilar, aumenta resistencias frente al ataque químico y la posibilidad de prevenir la reacción árido-álcali (Bernabé Reyes, 2015).

Actualmente se elaboran cementos puzolánicos de los llamados eco materiales por el hecho de contener puzolana.

El cemento puzolánico es una mezcla de cemento portland y puzolanas naturales o artificiales en proporción de 15 a 40 %, según sea la más conveniente (CONSTRUMATICA).

Las ventajas que ofrece el cemento puzolánico sobre el resto se describen a continuación (Bernabé Reyes, 2015):

- Fraguado rápido.
- Mayor defensa frente a los sulfatos y cloruros.
- Resistencia a la reacción álcali agregado.
- Mayor resistencia frente al agua de mar.
- Aumento de la impermeabilidad ante la reducción de grietas en el fraguado.
- Reducción del calor de Hidratación.
- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Incrementa la resistencia del acero a la corrosión.
- Aumenta la resistencia a la Abrasión.
- Aumento en la durabilidad del concreto.
- Disminuye la necesidad de agua.
- Menor tiempo para el descimbrado.

La base de todas estas mejoras es el denominado “Efecto puzolánico” en el cemento.

Los cementos Pórtland puzolánicos son idóneos para obras de concreto en contacto con aguas agresivas de cualquier naturaleza, pero en particular puro, carbónico y ligeramente ácido. Son asimismo, aptos para concreto en grandes



masas en que interese evitar una gran elevación de temperatura y con ello la retracción y fisuración de origen térmico. Por ambas circunstancias son especialmente indicados para concreto de presas y cimentaciones masivas. No son en cambio, los más adecuados para concreto pretensado, particularmente con escasos recubrimientos (MANUAL, 2012).

El uso de adiciones minerales contribuye al desarrollo sostenible de la industria del cemento y del concreto, su empleo implica una disminución de la erosión y la deforestación del suelo, una reducción del uso de recursos naturales (materias primas y combustibles) y una menor emisión de gases que favorecen el efecto invernadero. Consecuentemente, el reemplazo de cemento por adiciones constituye no sólo una solución adecuada a algunos problemas de índole tecnológicos, sino también a cuestiones económicas y de protección del medio ambiente (Menéndez, Bonavetti, & Irassar, 2006).

#### 7.1.4 Tipos de mezclado

Una clasificación que se le hace a los morteros es por su fabricación, dentro de esta se encuentra: hecho en obra e industrializado.

La clasificación por su fabricación hecho en obra son: hechos en obra, mezclados por medios manuales y por medios mecánicos (PÉREZ GÓMEZ, 2015).

El mezclado de morteros es distinto al mezclado de concreto ya que al no tener agregado grueso tiene una consistencia.

#### **Hecho en obra**

Para los morteros hechos en obra, el responsable de que se cumplan las especificaciones es el constructor. Con ese fin debe realizar un diseño o Proporcionamiento del mortero avalado por un laboratorio, preferentemente acreditado, el cual ha diseñado y evaluado la mezcla con materiales representativos (agregados y cementantes) de la obra. En caso de que el constructor deba cambiar de proveedor de alguno de los componentes de la mezcla (agregados o cementantes) debe realizar una nueva evaluación del diseño



de la mezcla para asegurar la continuidad en el cumplimiento de las especificaciones de esta norma (NMX-C-486-ONNCCE., 2014).

### **Por medio manual**

Puede permitirse el mezclado a mano, con la aprobación por escrito de un especialista que indique el procedimiento apropiado (ASTM-C270, 2014).

#### Procedimiento por medio manual

Primeramente se mezclarán en seco la arena y el o los aglutinantes hasta alcanzar una mezcla homogénea la cual se distinguirá visualmente ya que su coloración se torna uniforme. Posteriormente se agrega el agua hasta lograr la consistencia deseada pero sin descuidar la dosificación respectiva (Bernabé Reyes, 2015).

### **Por medios mecánicos**

Para la mezcla mecánica de morteros, esto se lleva a cabo en una mezcladora (ASTM-C-305, 2013).

Mezcladora: La mezcladora debe ser del tipo epicíclico, accionada por un motor mecánico eléctrico, capaz de impartir movimientos de rotación y traslación circular, simultáneamente a la paleta mezcladora. La mezcladora debe tener un mínimo de dos velocidades controladas por medios mecánicos (No es aceptable el uso de un reóstato para el ajuste de velocidad). La primera velocidad o velocidad lenta debe impartir a la paleta mezcladora una velocidad de rotación de  $140 \pm 5$  r/min, con un movimiento de traslación circular de aproximadamente 62 rpm. La segunda velocidad debe impartir a la paleta una velocidad de rotación de  $285 \pm 10$  r/min, con un movimiento de traslación circular de aproximadamente 125 r/min. El motor eléctrico debe ser de por lo menos 124W (1/6 hp).

A continuación se da el procedimiento de mezcla mecánica en morteros según la (ASTM-C-305, 2013)

## **PROCEDIMIENTO PARA LA MEZCLA DE MORTEROS**



- Se coloca la paleta mezcladora y el recipiente de mezclado secos en su posición de trabajo en la mezcladora. Luego se introducen los materiales para una amasada en el recipiente y se mezclan en la siguiente forma:
- Se vierte toda el agua de mezclado en el recipiente.
- Se agrega el cemento al agua y se mezcla durante 30s a la velocidad lenta ( $140 \pm 5$  r/min).
- Se agrega lentamente la totalidad de la arena en un periodo de 30s, mientras se mezcla a velocidad lenta.
- Se detiene la mezcladora, se cambia a velocidad media ( $285 \pm 10$  r/min) y se mezcla durante 30s.
- Se detiene la mezcladora y se deja reposar el mortero durante 90s. Durante los primeros 15s de este intervalo, se arrastra hacia el fondo con el raspador, el mortero adherido a la pared del recipiente. Durante el resto del intervalo, se tapa el recipiente.
- Se mezcla durante 60s a velocidad media ( $285 \pm 10$  r/min).
- En caso de que el mortero requiera de un nuevo período de mezclado, el material adherido a la pared del recipiente debe ser rápidamente arrastrado hacia el fondo con el raspador, antes de iniciar el mezclado adicional.

Todos los materiales cementantes y los agregados, deben mezclarse entre 3 y 5 minutos en una mezcladora mecánica, con la máxima cantidad de agua para producir un mortero con una consistencia trabajable (ASTM-C270, 2014).

#### **7.1.5 Morteros Adicionados con puzolanas en estudio**

El uso de puzolanas en la preparación de morteros y concretos es una práctica habitual porque mejoran las propiedades mecánicas y aumentan su durabilidad en ambientes con agentes agresivos (Cruz, Paya, Lalinde, & Fita, 2011).

. Estas mejoras se atribuyen a dos procesos:



- La formación de productos hidratados adicionales debido a la reacción de la puzolana con el hidróxido cálcico derivado de la hidratación del cemento.
- La reducción de la permeabilidad por el efecto del llenado de los poros con los productos formados en la reacción puzolánica.

#### *7.1.5.1 Morteros con Ceniza Elaboración de Ladrillos (CEL)*

La fabricación de ladrillo en México desde sus inicios se ha caracterizado por ser una actividad artesanal y familiar. La mayor parte de las ladrilleras que existen se caracteriza por ser un sector informal, por lo cual no cuentan con un esquema regulatorio y no pagan impuestos.

El sector ladrillero artesanal en México es importante por la generación de empleo e ingreso para las familias productoras de este bien, de acuerdo a INEGI (2011) señala que se crean anualmente alrededor de 35,483 empleos y se logra un valor de la producción de 3,117 millones de pesos. Sin esta actividad miles de familias se quedarían sin el sustento diario, lo cual representaría un enorme problema social para el gobierno de México, ya que no habría otro oficio en donde se pudieran desempeñar esto se deriva a que toda su vida la han dedicado a esta actividad (Gordillo, Domínguez, & Riveros, 2014).

La producción de ladrillos en México se lleva acabo de forma tecnificada y de forma manual.

Según la información que brinda el INEGI, la producción de ladrillos tiene una influencia en todo el territorio nacional excepto en el estado de Campeche donde no se registra información alguna de actividades de producción de ladrillos.

El Censo Económico de 2009 reporta un total de 10,159 unidades económicas dedicadas a la fabricación de ladrillos no refractarios en el país y un valor de la producción por 3,117 millones de pesos. De las ocho regiones económicas en la que se integran todos los estados del país, la zona que tiene una mayor participación en cuanto al número de unidades económicas ladrilleras es la zona



oriente con 3100 unidades (31%) y está integrada por los estados de Hidalgo, Puebla, Tlaxcala y Veracruz, sin embargo, el estado con mayor relevancia dentro de esta región es Puebla. La segunda región es la occidente que representa el 26% de las unidades económicas totales y está representado en orden de importancia por los estados de Jalisco, Michoacán, Nayarit y Colima.

De acuerdo con datos del Instituto Nacional de Ecología (INE) y de estadísticas generadas en los estados, en México existen aproximadamente 16,953 ladrilleras inventariadas, cuya producción estimada en número de piezas es de 4,933 millones de ladrillos al año.

El principal Estado productor de ladrillo artesanal es Puebla, que anualmente produce cerca de 8 millones 460 mil toneladas. Otros estados que guardan importancia en la producción artesanal de ladrillo son: Jalisco, Guanajuato, Estado de México, San Luis Potosí, Querétaro, Michoacán, Durango y Zacatecas.

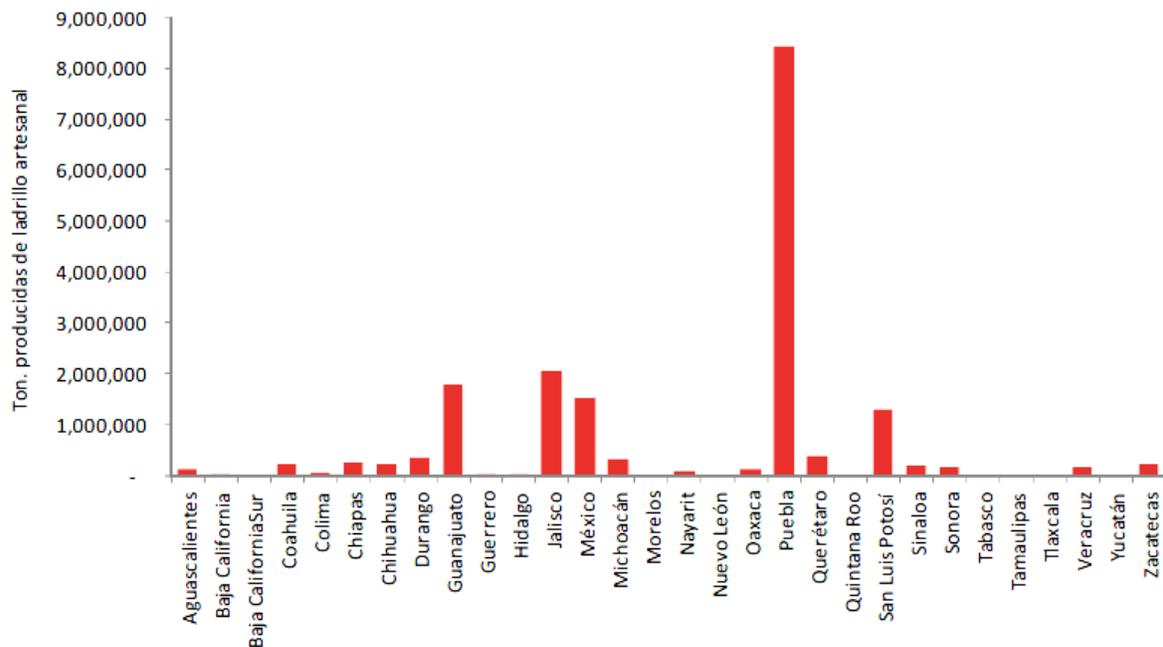


Ilustración 4. Gráfica de estados productores de ladrillo. Fuente: (SERpro, 2012)



En el estado de Michoacán la cantidad de ladrilleras que se reporta de acuerdo con datos del Instituto Nacional de Ecología (INE) es como se muestra en la tabla 11.

**Tabla 11. Numero de ladrilleras en México. Fuente: (SERpro, 2012)**

ESTADO	LADRILLERAS INVENTARIADAS	CAPACIDAD PROMEDIA DE LOS HORNOS LADRILLEROS	# DE QUEMAS AL AÑO	MASA TOTAL DE LADRILLOS (Kg)	# DE LADRILLOS PRODUCIDOS EN 2006
Michoacán	769	13,760	9	345,695,645	224,257,928

El proceso de fabricación de los ladrillos es manual, no existe un proceso de control ni de calidad estricto, por lo general el personal que participa son los miembros de la familia. La materia prima para la elaboración del ladrillo, es tomada con frecuencia de los cauces de los ríos y arroyos sin ningún control, siendo también aprovechadas las tierras y arcillas de los lugares donde decidan asentarse los ladrilleros, sin importar si se trata de un banco de materiales adecuados, ya que no existe un estudio de impacto ambiental. La preparación de la pasta y el moldeo se realizan directamente sobre el suelo. El secado es natural, tardando según los ladrilleros hasta seis días. La cocción dura entre 48 y 72 horas. Los combustibles empleados con mayor frecuencia a nivel nacional son la madera, aserrín, combustóleo y aceites gastados, además de diesel, basura doméstica y algunos hornos más modernos emplean gas natural o gas LP.

La actividad de elaboración artesanal de ladrillo se ha desarrollado por costumbre con las mismas etapas de producción: preparación de la pasta, moldeo, secado y cocción en hornos ladrilleros, contaminando con todo esto la atmósfera, cuerpos de agua y suelos. Los hornos utilizados en las principales zonas productoras del país son rudimentarios, con baja eficiencia energética. De acuerdo con GAMATEK un 55% de los hornos para producir ladrillo son de tipo campaña y 45% son fijos (SERpro, 2012).



Dentro de los materiales puzolánicos podemos encontrar las puzolanas artificiales usadas como adiciones activas, estas pueden ser arcillas activas o calcinadas artificialmente y cenizas de residuos agrícolas como la cascara de arroz o la caña de azúcar (Alonso, Puertas, & Palacios, 2009).

Un ejemplo de arcillas activas o calcinadas artificialmente son los residuos de la quema de ladrillos de arcilla y otros tipos de arcilla que hayan estado sometidas a temperaturas superiores a los 800 °C.

La temperatura de calcinación de las arcillas influye en las propiedades puzolánicas del material resultante. La mayor reactividad se alcanza cuando el proceso de calcinación provoca la deshidroxilación, dejando como resultado una estructura de arcilla colapsada y desordenada. La temperatura optima de activación parece depender de la pureza del material y sus minerales acompañantes (Castillo, Fernández, Antoni, Scrivener, Alujas, & Martirena, 2010).

#### *7.1.5.2 Morteros con Ceniza de carbón vegetal (CCV)*

El carbón vegetal representa una fuente importante de energía a nivel mundial y en México se utiliza principalmente en el sector residencial y restaurantero. Esfuerzos importantes han surgido en México por tratar de calcular el consumo carbón vegetal y con ello no solo determinar su aporte en cuanto a la demanda energética se refiere sino también derivar así estrategias para su producción sustentable.

La producción de carbón vegetal (CV), representa alrededor del 8% de la extracción mundial global de madera (FAO, 2005,2006). En términos de la oferta y demanda mundial, Brasil es el principal consumidor de CV para la industria del acero (Muylaert et al., 1999) al mismo tiempo que es el principal productor (FAO, 2006). La secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT) reporto que en 2004 se utilizaron 403,231 m<sup>3</sup> de madera con procedencia legal para producir carbón vegetal (SEMARNAT, 2004).

La producción y comercialización de carbón vegetal en México se regula por la Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (Gobierno de México, 2005a).



De acuerdo con Serrano-Medrano y colaboradores (2013), la leña conjuntamente con el CV (que tiene a la leña como materia prima) seguirán teniendo un consumo sostenido considerable por lo menos hasta el 2030, donde el consumo de leña alcanzará alrededor de los 281 PJ/año (18.7 millones ton/año) y el CV cerca de 840,000 toneladas (4.7 Mt de madera seca equivalente).

La práctica común de la producción de CV, identificada de manera preliminar implica: 1) la compra de madera en pie, 2) la realización de una tala rasa, 3) la producción de carbón *in situ* en hornos de tierra pequeños bajo condiciones de trabajo rudimentarias y 4) la venta del producto a transportistas (*i.e.* intermediarios) o eventualmente su transportación hasta la ciudad.

De acuerdo a las entrevistas realizadas se documentó que el tiempo de elaboración de CV (días/hombre) desde la corta de la madera hasta el encostado es de un mes (Camou, y otros, 2014).

Existen evidencias de que las maderas ricas en carbohidratos son las que dan menos carbón y más piroleñosos. A la inversa la madera que contiene mucha lignina y extractivos tienen mejor rendimiento en carbón. Asimismo, se ha determinado que una fuerte correlación positiva entre la madera y el carbón en cuanto el contenido de cenizas (Aguimelio y Batista, 1980; Martins, 1980; Petroff y Doat, 1978).

Briane y Doat (1985) sostienen que la composición del carbón depende de la técnica de carbonización y, en particular de la temperatura aplicada y el tiempo de carbonización. Además señalan que el carbón está principalmente constituido por carbono; materias volátiles (carbono, hidrogeno y oxígeno en cantidades más o menos importantes); materias minerales (sílice, fierro, calcio, metales alcalinos, a veces fosforo, un poco de nitrógeno y en general un poco de azufre), todos estos minerales que existen en la madera inicial y subsisten en su totalidad en el carbón resultante; a causa del rendimiento de la carbonización, el porcentaje contenido en el carbón es triple o cuádruple que el de la madera (Rivera & Uceda, 1987).



### 7.1.5.3 Morteros con fibra de nopal (FN)

#### 7.1.5.3.1 Definición y Antecedentes del nopal

La 'Opuntia Ficus-Índica que se denomina así de acuerdo con su nomenclatura binomial, es la llamada **nopal**, tuna o chumbera; pertenece al género Opuntia, de la familia de las cactáceas (IMT-pt-326, 2010).

El nopal es una planta arbustiva con tronco leñoso y ramas que se forman por cladidos, estos últimos reciben el nombre de nopalitos, si son frescos, y de pencas si son adultos. La epidermis del nopal tiene dos capas, una de células verdes, llamada clorénquima y otra capa interna que está formada por un cilindro de células blancas, conocida como parénquima, dentro de estos tejidos existen células mucilaginosas que almacenan mucílago (González-González, 2011).

México es uno de los centros de origen del nopal (*Opuntia* spp.), (Maki Díaz et. al, 2015). El nopal pertenece a la familia de las cactáceas, término que se deriva de Cactus, nombre latino del vocablo "griego "káctos", utilizado para nombrar a una especie de cardo espinoso, posiblemente el cardo *Cynara cardunculus* (*Asteraceae*) y usado como nombre genérico cactus por Carlos Linneo en 1753, para agrupar plantas que hoy se consideran dentro de géneros diversos de la familia Cactácea.

En México las cactáceas son conocidas por nombres comunes como órganos, nopales, pitayos, garambullos, biznagas, peyotes, candelabros, cardones, cardenches y juncos.

Se remonta a 25, 000 años, cuando llegó el hombre al territorio que hoy se conoce como México. Estos primeros habitantes eran cazadores y recolectores, y seguramente utilizaron al nopal (sus tunas, los nopalitos y las pencas) en su dieta.

Los primeros datos que se tienen registrados acerca del uso del nopal en México provienen de la región de Tehuacán Puebla, y son de hace 6 500 a 10 000 años, según Lauro González Quintero, quien comenta haber encontrado en cuevas cercanas a Tehuacán, tallos y frutos de nopales semifosilizados.



Con el paso del tiempo, el nopal se convirtió en una planta muy importante en el desarrollo de las culturas del norte, centro y sur del país, su destino fue básicamente para consumo humano, en forma de fruto y verdura, tal es el caso de los chichimecas, aztecas, mixtecos y zapotecos en Oaxaca.

Posteriormente el cultivo del nopal empieza a prosperar en las haciendas, ranchos y casas de los peones, adquiriendo importancia por el aprovechamiento como fruta, verdura y forraje en época de sequía.

Después de la conquista de México, los españoles también dieron un gran valor al nopal, principalmente como forraje para ganado, y lo diseminaron en América, España, Francia e Italia. Los moros lo llevaron al norte de África y los portugueses lo introdujeron a Brasil, Angola y la India (Censo, 2007).

#### 7.1.5.3.2 Características del nopal

Las funciones básicas de estas plantas se realizan por los tallos con forma de segmentos elípticos aplanados y sin ó con espinas como se observa en la ilustración 5. En sus bordes aparecen las flores en forma de corona que se transforman en frutos denominados tunos; mismos que poseen una cáscara gruesa, espinosa, y con una pulpa abundante en semillas.

Los nopales llegan a medir hasta 4m de altura y a tener un tronco leñoso, segregan una sustancia viscosa llamada mucílago o comúnmente “baba de nopal”, cuya función es cicatrizar las heridas de la propia planta. El contenido nutricional de esta planta comprende minerales como calcio, hierro, aluminio, magnesio, sulfatos, fosfato, potasio, sílice, sodio, carbohidratos, componentes nitrogenados, además de vitaminas A, B1, B2 y C. Las semillas de la tuna tienen un alto contenido de sustancias grasas y proteínas. Una característica importante del nopal es su alto contenido de carbohidratos (glucosa), que agrupados en grandes cadenas forman el almidón, considerado también como aditivo en la elaboración de morteros, para retener agua de amasado y favorecer el fraguado (Arguello Hernández, 2012).



Ilustración 5. Nopal en su medio natural. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Los nopales han desarrollado características que les permiten adaptarse a zonas con poca disponibilidad de agua y temperaturas extremas. Entre otras, la succulencia es su principal característica morfológica, acumula grandes cantidades de agua en períodos cortos de tiempo y la cutícula gruesa que poseen las hace más eficientes para evitar la evapotranspiración. Debido a su metabolismo ácido crasuláceo (MAC), efectúa un proceso fotosintético mediante el cual las estomas están cerrados durante el día y abiertos durante la noche, evitando la pérdida de agua por transpiración. Características morfológicas del nopal, referidas a partes específicas de la planta son: raíz, cladodios, areolas, flor y fruto (Censo, 2007).

#### 7.1.5.3.3 Usos comunes en México

Los usos de las especies y variedades son diversos: para la obtención de fruta, hortaliza y forraje, como planta medicinal y como fuente de materia prima para la industria de cosméticos (Censo, 2007).

El OFI (*Opuntia Ficus-indica*) se ha utilizado en todo el mundo con éxito por siglos de varias maneras. Los aztecas ya cultivaban la planta en México antes de que los españoles llegaran en el siglo dieciséis. También lo utilizaban con propósitos medicinales según lo descrito en el herbario azteca de 1552 (Bishop y Funhauser,



1998; Torres-Montes, 2005). Su nombre genérico fue nohpalli y actualmente se sigue llamando comúnmente nopal. Ellos extrajeron el jugo lechoso de la planta y lo mezclaron con miel y yema de huevo para crear una pomada para las quemaduras.

En la medicina tradicional mexicana el nopal también se utiliza para el tratamiento de diabetes y contra altas concentraciones de colesterol. Su acción baja el azúcar de la sangre documentado ya en algunos estudios.

Diversas especies del cactus de nopal se han empleado como fuente de aditivos a la producción de cal y la conservación de la arquitectura en América Latina. Por ejemplo, una de las prácticas actualmente extensas de conservación es utilizar el residuo de agua hervida con cactus de nopal (*Opuntia spp*) comúnmente disponible en la producción de masilla de cal que se emplea como una capa para proteger o reparar las iglesias o misiones de adobe en México y suroeste de América del Sur (IMT-PT-328., 2010).

A partir del jugo de nopal, se puede fabricar pintura que actúa como impermeabilizante, la cual puede ser aplicado a cualquier construcción para protegerla. En caso de aplicarse a una vivienda, este impermeabilizante hecho a base de nopal, protege la construcción del frío, la humedad del ambiente, del agua y de los insectos (IMT-pt-326, 2010).

Resultados preliminares sugieren que agregar nopal o aloe vera deshidratados en pequeñas concentraciones ( $\leq 2\%$  en peso, como reemplazo del cemento) puede ser conveniente para incrementar la resistencia a la corrosión en elementos de concreto reforzado. Pero el papel de cómo tales adiciones incrementan la durabilidad del concreto no está todavía bien comprendido. Una posibilidad es que el mucílago actúa como un tapón de poros, disminuyendo la penetración de cloruros y del agua funcionando como una red en el concreto, gracias a la acción química entre las pectinas y las moléculas de cloruro o de agua. La otra podría ser que el mucílago actúe como inhibidor de la corrosión del acero en concretos contaminados con cloruros (IMT-PT-328., 2010).



En México hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal: aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua.

El mortero de cal adicionado con baba de nopal se utiliza también para restaurar y proteger edificios históricos debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración del agua y agrietamientos. Se sabe que el uso del cemento en la restauración de edificios históricos tiene efectos perjudiciales porque es demasiado duro e incompatible con el adobe. El empleo de este material restringe la transpiración, aumentando el riesgo del daño causado en humedad.

Por tanto, los morteros para el uso en edificios históricos o los monumentos se derivan de la masilla de la cal y revestimiento de sal que incorporan generalmente materiales puzolánicos. Estos morteros tienen una alta resistencia mecánica, una protección impermeable creciente, y características antihongos.

La baba del nopal se agrega como adherente orgánico para que evite que el mortero se seque demasiado rápido, y ayuda a retener la humedad que la mezcla necesita para fijar correctamente, transportando el CO<sub>2</sub> de la atmósfera que combinado con la cal, forma una piedra caliza artificial (Cárdenas, *et al.* 2002), (IMT-pt-326, 2010).

#### 7.1.5.3.4 Producción de nopal

El cultivo de Nopal se encuentra establecido en veintiséis estados del país, pero su producción importante la encontramos en seis estados de la república que son: Morelos, Distrito Federal, Estado de México, Jalisco, San Luis Potosí y Michoacán.

En el estado de Michoacán el cultivo de Nopal en el año 2014, alcanzó una superficie establecida de 376 hectáreas, con una producción de 10 mil 970 toneladas en una superficie cosechada de 352 hectáreas, lo que provocó un rendimiento promedio de 31.21 toneladas por hectárea y un precio promedio de 4 mil 553 pesos por tonelada de Nopal, por lo que el valor total de la producción fue de 49 millones 944 mil 560 pesos (SAGARPA, 2015).



#### **7.1.5.4 Morteros con Perlita Natural (PN)**

La perlita es una roca volcánica compuesta de un 65 a un 75 % con dióxido de silicio, 10 a 20 % de óxido de aluminio, 2 a 5 % de agua y pequeñas cantidades de sosa, potasa y cal. Se caracteriza por una pequeña estructura globular y su alto porcentaje de agua combinada ligeramente.

El mineral extraído de la cantera se tritura y se les somete a un proceso de calentamiento a unos 1200°C. En este proceso, la perlita se ablanda y el agua atrapada se transforma en vapor y se expande en el interior formando microceldas esponjosas, aumentando 20 veces su volumen y adquiriendo un color blanquecino (Esquerdo Lloret, 2015).

El proceso de expansión también produce una de las características más distintivas de la perlita: su color blanco. Mientras que el color de la roca en estado natural puede situarse entre un gris claro transparente y un negro brillante, el color de la perlita expandida se sitúa entre un blanco nieve y un blanco grisáceo (Berna Serna, 2013).

Los principales productores del mundo fueron, en orden de la producción, Turquía, Grecia y los Estados Unidos que desciende con el 41%, 26% y 18% de la producción mundial, respectivamente. A pesar de que China fue el país de origen de casi del 15% de las exportaciones de crudo procesados de perlita del mundo, los datos de producción insuficientes para China y otros países no están disponibles para hacer estimaciones fiables de su producción (USGS, 2016).

En México existen varios yacimientos, como en Durango. Termolita es una de las principales empresas procesadoras en México, exportando al mundo.



Tabla 12. Producción nacional de productos no metálicos (Dirección General de Minas, Secretaría de Economía, 2013; DURANGO). Fuente: (SGM, 2014)

POSICIÓN QUE OCUPA EL ESTADO DE DURANGO EN LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE PRODUCTOS NO METÁLICOS 2013		
PRODUCTOS NO METÁLICOS	VOLUMEN (Toneladas)	POSICIÓN
PERLITA	9200	2
ROCAS DIMENSIONABLES	1,757,816	1
YESO	232,500	7

Cuando se utiliza la perlita como añadido del concreto, se obtiene un concreto de peso ligero, resistente al fuego y aislante, ideal para las cubiertas de los tejados entre otras aplicaciones.

La perlita también puede usarse como un agregado del cemento Portland y del yeso para aplicaciones exteriores y para la protección al fuego de vigas y columnas (Berna Serna, 2013).

Debido a su baja densidad es también utilizado para reducir el peso en los morteros.

## 7.2 Patologías de elementos fabricados con CP: Concretos y morteros

Aunque el concreto pueda ser considerado como un material de construcción muy utilizado en escala mundial, está sujeto a manifestaciones patológicas provenientes de los materiales que lo constituyen y del ambiente en el cual se encuentra expuestos. Esas patologías comprometen la durabilidad de las estructuras de concreto, interfiriendo en su vida útil (Cavalcante, Barreto, & Duarte, 2011).

La durabilidad de una estructura de concreto o sea “su variación en el tiempo sin modificaciones esenciales en su comportamiento” es definida por el Comité 201 del American Concrete Institute (ACI) como “la habilidad del concreto para resistir



la acción del intemperismo, ataques químicos, abrasión, o cualquier otro tipo de deterioro”.

En resumen, en este trabajo se entiende por Patología a aquella parte de la Durabilidad que se refiere a los signos, causas posibles y diagnóstico del deterioro que experimentan las estructuras del concreto (Enrique Rivva, 2006).

No existe una mezcla particular que satisfaga todas las exigencias del mercado con el tema del mortero, únicamente un buen conocimiento sobre los materiales que lo componen y sus propiedades permite seleccionar un mortero que cumpla unas especificaciones específicas de un proyecto.

### 7.2.1 Ataque por sulfatos

El ataque por agentes químicos al concreto es el que mayores daños ocasionan en las estructuras, y también el que presenta mayores dificultades a la hora de solucionarlo. Generalmente el ataque lo sufren los áridos y sobre todo el cemento, de ahí la importancia de su elección en función del ambiente al que va estar sometido (Porto Quintián, 2005).

Algunas sustancias químicas que atacan la superficie del concreto son los iones de sulfatos del suelo, del agua de mar o del agua freática (Bernabé Reyes, 2015)

El ataque por sulfatos es el ataque más perjudicial de los diferentes ataques que pueden desarrollar los aniones que componen las sales. Los sulfatos centran su ataque en el cemento creando unos componentes fuertemente expansivos que provocan la destrucción del concreto (Porto Quintián, 2005).

Los sulfatos más abundantes en los suelos son: sulfatos de calcio, de magnesio, de sodio y calcio y de sodio, todos ellos de diferente solubilidad.

La acción de los sulfatos se produce sobre el hidróxido de calcio y fundamentalmente sobre el aluminato de calcio  $C_3A$  y el ferroaluminato tetracálcico  $C_3FA$ .



El ataque del sulfato se manifiesta con una exudación de apariencia blanquecina y agrietamiento progresivo que reduce al concreto a un estado quebradizo y hasta suave.

La acción del sulfato de calcio es relativamente simple, ataca al aluminato tricálcico y en menor medida al ferroaluminato tetracálcico, produciendo sulfo aluminato tricálcico (etringita) e hidróxido de calcio (portlandita).

La acción del sulfato de sodio es doble, reacciona primero con el hidróxido de calcio generando durante la hidratación del cemento, formando sulfato de calcio e hidróxido de sodio. A su vez el sulfato de calcio ataca al aluminato tricálcico formando etringita.

La acción del sulfato de magnesio es la que produce un mayor daño, en cuanto actúa sobre las fases de la pasta de cemento, como son los silicatos cálcicos, mediante una serie de acciones complejas que modifican el PH de las pastas de cemento (González de la Cotera, 1991).

El Ataque de los sulfatos se puede manifestar en forma de expansión y el agrietamiento del concreto. Cuando las grietas de concreto, aumenta su permeabilidad y el agua agresiva penetra más fácilmente en el interior, acelerando así el proceso de deterioro. El Ataque de los sulfatos también puede tomar la forma de una disminución progresiva de la fuerza y la pérdida de masa debido a la pérdida de la cohesión de los productos de hidratación del cemento (Kumar & Monteiro, 2006).

### **7.2.2 Reacción álcali-sílice (RAS)**

La reacción álcali-agregado, designada más correctamente como reacción álcali-sílice, fue primeramente reconocida en pavimentos de concreto en California por el investigador Thomas E. Stanton (1940, 1942) en la División Estatal de Carreteras de California (Cenzano, Ramos, & Ulo, 2011).

La reacción álcali-sílice (RAS) afecta la durabilidad de estructuras de concreto, ocasionando deterioros prematuros del concreto construido con agregados



reactivos. La (RAS) en concretos de cemento portland ocurre cuando los álcalis del cemento reaccionan con la sílice de los agregados, produciendo un gel que en presencia de humedad se expande, causando un agrietamiento en forma de piel de cocodrilo característico de la reacción.

El gel en presencia de humedad da lugar a un incremento en la presión interna en regiones localizadas de la matriz cementosa, esto induce deformaciones y puede iniciar un micro o macro fracturamiento, expansión excesiva y desalineamiento de la estructura (Olague, Wenglas, & Astorga, 2011).

Las condiciones necesarias para que se dé la reacción álcali-árido son: la presencia de álcali ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ) en proporción suficiente en el concreto para que reaccione con los áridos, estos álcalis pueden encontrarse en el cemento, agua o medio de exposición; un árido reactivo; la presencia de humedad en ordenes entre el 80-85% (estructuras expuestas a lluvias permanentes, concretos en contacto con terrenos húmedos, presas, etc.); y por último la temperatura, particularmente en el caso de cementos de fraguado rápido que desarrollan calor de hidratación elevado (3). Cabe anotar que el límite máximo de álcalis para el concreto es de  $3 \text{ Kg/m}^3$  y para cementos es 0,6% expresado como  $\text{Na}_2\text{O}$ .

De los tipos de reacción álcali-árido, la más común y ampliamente estudiada es la reacción álcali-sílice. Aquí los iones hidroxilo causan la destrucción de los enlaces atómicos de los compuestos de silicio, los iones álcali reaccionan con  $\text{Si}(\text{OH})_4$  y forman un gel (Na, K) -Si-OH, en el cual se intercambian Na y K por Ca hasta que el gel se solidifica; posteriormente este absorbe agua hasta expandirse, lo cual genera esfuerzos de tensión dentro del concreto y conduce al agrietamiento (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013). En la tabla 13 se muestran las rocas y minerales potencialmente reactivos con los álcalis del cemento.

Tabla 13 Rocas y Minerales potencialmente reactivos con los álcalis. Fuente: (Porto Quintián, 2005)

Rocas/ Minerales	Composición Química	Características Físicas
Opalo	$\text{SiO}_2 \cdot \text{NH}_2 \cdot \text{O}$	• Amorfa



Calcedonia	SiO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desde microcristalina hasta criptocristalina; comunmente fibrosa</li></ul>
Algunas formas de Cuarzo	SiO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desde microcristalina hasta criptocristalina</li><li>• cristalina pero intensamente fracturada, pensionada pero y / o con gran numero de inclusiones</li></ul>
Cristobalita	SiO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>• cristales</li></ul>
Tridomita	SiO <sub>2</sub>	
Cristales Rioliticos, didacticos y latiticos	Silíceos con pequeñas cantidades de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> y Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>• cristales</li></ul>
Cristales Silicios Sintéticos	Silíceos con pequeñas cantidades de álcalis, aluminio y / otras minerales	<ul style="list-style-type: none"><li>• cristales</li></ul>

Sin embargo, existen algunos materiales que, introducidos en la mezcla del concreto, o en algunos casos, en estructuras afectadas por (RAS), pueden mitigar estas reacciones (Barreto, De Brito, & Santos, 2011). En general, las adiciones tipo puzolanas ayudan a mitigar este ataque, siendo considerada como más eficiente el humo de sílice para reducir las expansiones de las reacciones álcali-sílice; el porcentaje óptimo de SF recomendado está entre el 8 - 10% (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

### 7.2.3 Ataque por cloruros

El ataque por cloruros al concreto puede provenir de dos fuentes principales: en la primera, los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla del concreto (p.e. áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o



aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda, los cloruros ingresan desde el exterior. Los iones cloruros una vez penetran el concreto se distribuyen como cloruros enlazados y cloruros libres. Los primeros corresponden a aquellos que se enlazan químicamente al reaccionar con el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) presente en la pasta para así formar cloroaluminatos cálcicos, compuesto conocido como “Sal de Friedel” ( $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCl_2 \cdot 10H_2O$ ); por el contrario, los cloruros libres se difunden hasta alcanzar el acero de refuerzo donde se acumulan hasta lograr una concentración crítica, la cual tiene la capacidad de destruir la capa pasiva del acero e iniciar el proceso corrosivo.

En general la movilidad de los iones cloruro dentro del concreto está relacionada con su permeabilidad; por ello algunos factores importantes a tener en cuenta en el diseño y colocación del concreto son: la relación agua/cemento, el tipo y proporción de cemento a utilizar y el proceso de curado. Además, la presencia de adiciones (puzolánicas y siderúrgicas) en el concreto, tales como metacaolín (MK) y humo de sílice (SF), modifican la porosidad y reducen la permeabilidad, mejorando por tanto la resistencia a la penetración de los cloruros en el concreto, aunque existen porcentajes límites de adición por encima del cual el incremento en la demanda de agua podría afectar los resultados (Peralta, Aguirre, & Mejía de Gutiérrez, 2015).

El límite de cloruros para despasivar una estructura de concreto armado debe ser más elevado que el que consideran las normas, que es de 0.4% respecto del peso del cemento (Bernabé Reyes, 2015).

## 7.3 Fenómeno de corrosión del acero

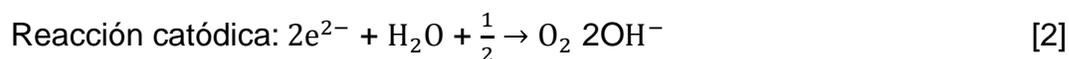
### 7.3.1 Teoría del fenómeno de corrosión

La terminología de la ASTM define la corrosión como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del metal y de sus propiedades. La corrosión da como resultado la formación de óxido que tiene 2 a 4 veces el volumen del acero original y la pérdida de sus óptimas propiedades mecánicas. La corrosión produce

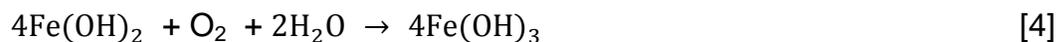


también hoyos o agujeros en la superficie del acero de refuerzo, reduciendo la capacidad resistente como resultado de la reducción de la sección transversal (NRMCA, 2014).

La corrosión del acero de refuerzo embebido en concreto obedece a un proceso electroquímico. Para que se dé lugar a la corrosión se requiere la presencia de zonas anódicas, catódicas y un electrolito para formar una celda de corrosión. En esta se da un proceso de óxido-reducción; la zona anódica corresponde al proceso de oxidación, donde hay una pérdida de electrones [1]; a su vez la reacción catódica corresponde al proceso de reducción, donde los electrones producidos en el ánodo se combinan con determinados iones del electrolito, y se produce una ganancia de electrones [2].



Los iones hidroxilo presentes en la reacción catódica reaccionan con  $\text{Fe}^{2+}$  y producen hidróxido ferroso [3], el cual a su vez reacciona con el oxígeno y el agua presente en el concreto produciendo hidróxido férrico [4]; el último componente corresponde al óxido de hierro hidratado [5].



Estos productos férricos contribuyen al deterioro del concreto. El hidróxido férrico incrementa el volumen del acero del refuerzo embebido (2 veces o más) y, por tanto, genera esfuerzos de tensión que producen agrietamientos en el concreto. Cuando se produce el óxido férrico hidratado su volumen aumenta aún más, hasta 10 veces del volumen original. En esta etapa el concreto se agrieta hasta que hay delaminación y deja expuesto el acero de refuerzo, ver ilustración 6, (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

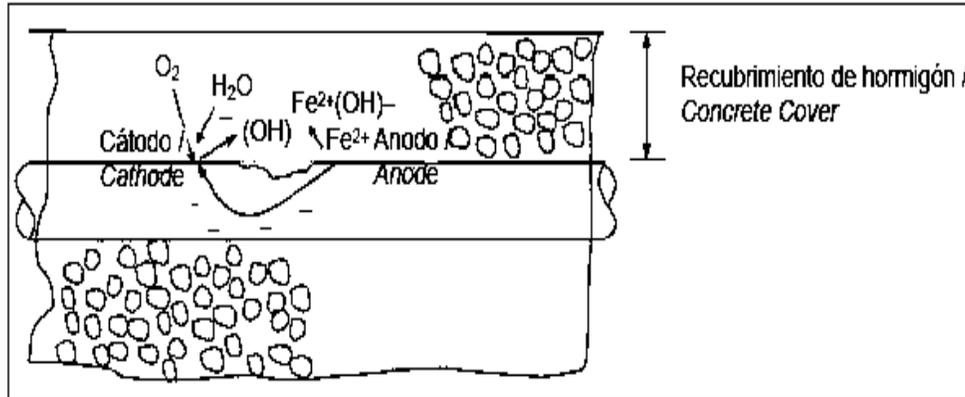


Ilustración 6. Proceso de corrosión del acero de refuerzo en concreto. Fuente: (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013)

### 7.3.1.1 Tipos de corrosión del acero

Los tipos de corrosión pueden ser clasificados de acuerdo a tres factores:

1. Naturaleza del electrolito: la corrosión se puede clasificar como “húmeda” o “seca”. Es necesaria una solución líquida o una mezcla para la corrosión húmeda, y la corrosión seca implica por lo regular la reacción con gases a alta temperatura.
2. Mecanismo de corrosión: implica reacciones electroquímicas o químicas directas.
3. Apariencia del metal corroído: la corrosión puede ser uniforme y el metal se corroe a la misma velocidad a lo largo de la superficie, o puede ser localizada, en cuyo caso solamente se ven afectadas pequeñas áreas.

La clasificación más común de la corrosión que se puede encontrar es la húmeda o acuosa, y este tipo de fenómeno se puede identificar en ocho formas basada en la apariencia del metal: corrosión uniforme o general; corrosión por picadura; corrosión en resquicios; corrosión galvánica; corrosión-erosión, que incluye la cavitación-erosión; corrosión intergranular, que incluye la sensibilización y exfoliación; de aleación, que incluye la deszincificación, y agrietamiento asistido ambientalmente, que incluye la corrosión bajo esfuerzo, la corrosión por fatiga y



los daños por evolución de hidrógeno (Ciencia, 2007). A continuación se presentan dos de los tipos más importantes presentes en la corrosión del acero de refuerzo, particularmente ante la exposición a cloruros y/o carbonatación (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

### **Corrosión uniforme**

En la corrosión uniforme el ataque se extiende en forma homogénea sobre toda la superficie metálica, y la penetración media es igual en todos los puntos. Esta es la forma más benigna de corrosión pues permite calcular fácilmente la vida útil de los materiales corroídos (IMCyC, 2011). Este tipo de corrosión, denominada corrosión uniforme, se observa usualmente en estructuras expuestas a carbonatación (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013)

### **Corrosión por picado**

Respecto a la corrosión por picado se refiere a que el ataque se localiza en puntos aislados de superficies metálicas pasivas, propagándose hacia el interior del metal en forma de canales cilíndricos. Tanto este tipo de ataque, como el intergranular y el fisurante, son las formas más peligrosas bajo las cuales se puede presentar la corrosión (IMCyC, 2011). Este tipo de corrosión se observa principalmente en el ataque por cloruros. Los iones cloruros alcanzan áreas particulares de la capa pasiva del acero, esta se destruye y como consecuencia hay una rápida disolución anódica en esos sitios. Durante la corrosión por picado, los iones cloruros tienden a acumularse en las “picaduras”, el pH de la solución disminuye, por lo tanto se genera un ambiente altamente agresivo. Este es uno de los ataques más severos al acero de refuerzo, se pierde masa localizada y resistencia (Aguirre & Mejía de Gutiérrez, 2013).

En la ilustración 7. Se presentan dos de los tipos más importantes presentes en la corrosión del acero de refuerzo.

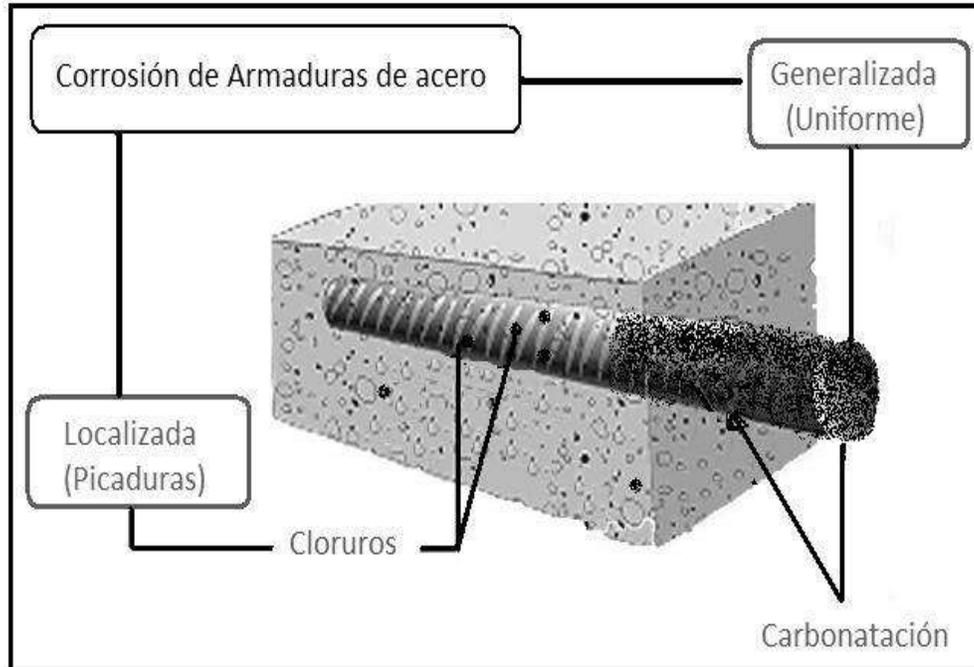


Ilustración 7. Tipos de ataque de corrosión en las armaduras de concreto. Fuente: (Paredes Cárdenas, 2016)

### 7.3.2 Corrosión del acero estructural

La corrosión de las barras de acero es la principal causa de daño y deterioro prematuro de las estructuras de concreto reforzado. El acero embebido en un concreto de buena calidad es protegido del ambiente atmosférico por la alta alcalinidad de la solución del poro ( $\text{pH} > 12.5$ ) el cual, en la presencia de oxígeno, pasiva el acero. La protección puede perderse debido al ingreso de iones agresivos de cloruros “en ambientes marinos” o a la neutralización de la solución del poro, proceso mejor conocido como carbonatación (Fernández, Aperador, Torres, Vera, & Mejía de Gutiérrez, 2011)

El proceso de corrosión de las estructuras de concreto armado con frecuencia causa graves daños que terminan con la vida útil de una estructura, especialmente los ubicados en ambientes agresivos marinos. Cuando se da el proceso de corrosión en el concreto, la sección transversal de la barra de refuerzo se hace más pequeña, reduciendo así la capacidad de carga del elemento de concreto armado. En el ambiente marino, el acero de refuerzo a la corrosión es el resultado natural de la penetración de cloruros en el concreto, bajo estas condiciones, la



despasivación de barras de acero puede conducir a la formación localizada de capas de óxido porosas en la interface acero / concreto. Como las capas de óxidos de hierro tienen un volumen dos o cuatro veces mayor que el volumen de hierro, se pueden generar tensiones en el concreto y crear fisuras que pueden causar una aceleración del proceso de corrosión en cuanto a las condiciones electroquímica en el cambio de interfaz (Villabona Ortiz, Tejeda, & Villabona Durán, 2013).

En el interior del concreto la armadura está protegida frente a la corrosión. Esto es el resultado natural de la acción protectora de doble naturaleza que el concreto ejerce sobre el acero. Por un lado el recubrimiento es una barrera física que aísla el acero del exterior. Por otro lado, la elevada alcalinidad (pH 12-13) de la fase acuosa supone una barrera química que causa la formación de una capa microscópica y transparente de óxido que mantiene inalterado el acero por tiempo indefinido, proceso denominado pasivado, mientras no cambien las condiciones de servicio. Este efecto protector del concreto hacia el acero es una de las razones que ha hecho posible que el concreto armado sea el material de construcción por excelencia en las sociedades industrializadas (León Brito, 2015).

### **Evaluación y diagnóstico de Estructuras**

Actualmente existen técnicas electroquímicas que permiten determinar de forma cuantitativa y no destructiva la velocidad de corrosión instantánea de la barra de refuerzo del concreto armado. Así es posible con mayor certeza pronosticar el estado de la estructura del acero de refuerzo (Castañeda, Corvo, & O'Really, 2003).

La evaluación del comportamiento de adición de materiales sustitutos de cemento en la elaboración de morteros y/o concretos y su efecto en la resistencia a la corrosión puede determinarse por medio de técnicas electroquímicas, tales como Resistencia a la polarización Lineal ( (ASTM-G3, 2004) (ASTM-G5, 2004) (ASTM-G59, 2003)), Extraplación de Tafel ( (ASTM-G3, 2004) (ASTM-G5, 2004) (ASTM-



G59, 2003)) y espectroscopía de Impedancia Electroquímica (ASTM-G106, 2004), (Bernabé Reyes, 2015).

La determinación de la velocidad de corrosión por diferentes técnicas electroquímicas, tanto de corriente directa (Tafel, Resistencia de polarización como alterna (Espectroscopia de impedancia Electroquímica), así como ruido electroquímico que es una técnica no perturbadora, o sea solo estudia las variaciones de potencial y corriente que genera un metal en un electrolito. Estas cuatro técnicas tienen diferentes bases pero todas permiten calcular la velocidad de corrosión de los metales en un electrolito.

En 1997, Videm y Myrdal establecen utilizando técnicas electroquímicas de corriente directa diferencia entre el pronóstico de corrosión basado en la norma de la ASTM con respecto al comportamiento cinético. Igualmente, Elsener y Bohni encontraron diferencias al determinar la corrosión mediante pulsos galvanostáticos y la medición de potenciales. Estos antecedentes ya nos indicaban la posibilidad de existencias de diferencias entre el pronóstico de corrosión de la norma ASTM y lo determinado mediante técnicas electroquímicas más cuantitativas (Castañeda, Corvo, & O'Really, 2003).

### **7.3.3 Técnicas para el cálculo de la velocidad de corrosión**

#### **7.3.3.1 Espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS).**

Es una técnica electroquímica no-destruktiva, ya que se aplican pequeñas perturbaciones sinusoidales de pequeña amplitud en torno al  $E_{corr}$ , a lo largo de un amplio rango de frecuencias. Para cada una de estas señales, se recoge una respuesta de corriente también sinusoidal, que ha de presentar una amplitud y un desfase diferente respecto a la señal de voltaje introducido. Con estos dos parámetros, se puede calcular la impedancia que presenta el sistema material-medio (Paredes Cárdenas, 2016).

Las representaciones más usuales de frecuencia de un sistema lineal son:

1. Diagrama de Nyquist.



## 2. Diagrama de Bode.

### Diagrama de Nyquist

La impedancia es un término usado para describir en la corriente alterna el equivalente a una resistencia en la corriente directa. Para la corriente directa la relación entre el voltaje y la corriente está dada por la ley de Ohm.

$$V=RI \quad [6]$$

Donde **V** es el voltaje en Volts, el cual pasa a través de una resistencia **R**, dada en Ohms y la corriente **I** está dada en amperes.

Cuando se estudian señales de corriente alterna se expresa de la siguiente manera:

$$V=IZ \quad [7]$$

Donde **Z** es la impedancia del circuito, con unidades de Ohm. La diferencia entre la impedancia y la resistencia, es que la impedancia de un circuito puede depender de la frecuencia (**f**) de una señal aplicada, dada en Hertz siendo el número de ciclos por segundo ( $s^{-1}$ ).

La admitancia (**Y**) de un circuito es el recíproco de la impedancia y es un parámetro de importancia en los cálculos matemáticos que involucra la técnica y por otra parte, los equipos usados en estudios de EIS miden en realidad la admitancia, de igual manera, la conductancia es el recíproco de la resistencia, así se obtiene:

$$Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{V} \quad [8]$$

La impedancia es un número complejo pero no un fasor, no varía con el tiempo y su representación en el plano complejo permanece estacionaria (el factor  $e^{j\omega t}$ , implícito en un fasor y causante de la rotación en un sentido contrario a las manecillas del reloj, se suprime cuando toma dicha razón. Esta relación, junto con el ángulo de fase  $\theta$ , define totalmente al factor de impedancia.

$$\frac{v_0}{I_0} = \frac{(\text{fasor} - \text{voltaje})}{(\text{Fasor} - \text{corriente})} = |z| = \text{Módulo de Impedancia} \quad [9]$$

Cada par de valores de  $|z|$  y  $\theta$ , determinan el valor de Impedancia en coordenadas polares, ilustración 8. En el plano se representa mediante el número complejo  $Z = Z' + j Z''$  (coordenadas cartesianas), teniendo en cuenta que:

$$Z'' = |Z| \cos \theta \text{ (componente real)} \quad Z' = |Z| \sin \theta \text{ (componente imaginario)}$$
$$|Z| = \sqrt{(Z')^2 + (Z'')^2} \quad \theta = \tan^{-1} \left( \frac{Z'}{Z''} \right)$$

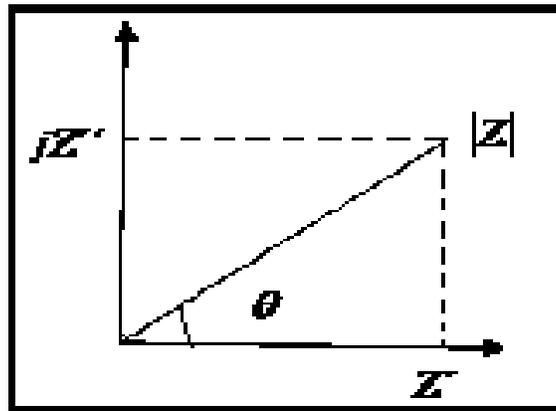


Ilustración 8. Representación del vector de impedancia en el plano complejo. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014)

La corrosión es un fenómeno de superficie, que tiene lugar en la interfase metal-electrolito por la acción del electrolito sobre el metal, como consecuencia de la formación y movimiento de partículas de carga eléctrica y en cantidad proporcional al flujo de corriente y de cantidad o de cargas suscitado por el fenómeno, la corrosión se puede medir y controlar a través del uso de parámetros eléctricos. La electro-neutralidad de la materia, que ante una disposición de cargas eléctricas sobre una superficie, fuerza la imagen de signo contrario en la otra carga de la misma interfase, haciendo que la doble capa entorno a los electrodos, las películas pasivantes y otras capas superficiales, se comporten como condensadores, o circuitos eléctricos más complejos que contienen los condensadores. La transferencia de cargas, es un proceso que limita el flujo de corriente o intensidad y actúa como si se tratara de resistencias eléctricas.

Cuando se aplica una señal de corriente alterna a un sistema de corrosión muy sencillo el resultado es un comportamiento más complejo que el de una resistencia. También está presente la capacitancia de la doble capa  $C_{dl}$ , la cual separa o encierra las cargas dentro o sobre la superficie, y se presenta en todos los sistemas de corrosión. De igual manera se tiene la resistencia de la solución  $R_s$ .

Con la combinación de estos tres elementos se presenta un circuito equivalente simple. Los circuitos equivalentes son la combinación de elementos eléctricos, tales como resistores y capacitores, los cuales se dan por la misma señal de respuesta para señales eléctricas como la corrosión de los metales.

La respuesta en la corriente alterna cuando se tiene un potencial de entrada es una señal sinusoidal y generalmente se aplica una señal de voltaje a una frecuencia y un tiempo determinado como se muestra en la ilustración 9.

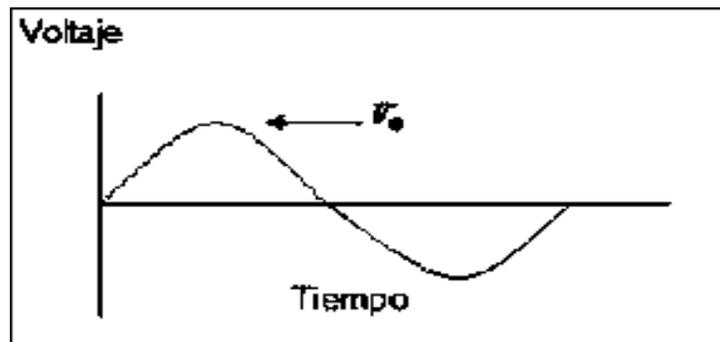


Ilustración 9. Señal de voltaje sinusoidal. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014)

Los sistemas electroquímicos se pueden simular por una combinación de resistencias, condensadores y bobinas que, ante una señal eléctrica, reproducen su respuesta con una aproximación aceptable. Un modelo de circuito equivalente que reproduce muy bien la respuesta de muchos sistemas electroquímicos es el propuesto por Randles, ilustración 10:

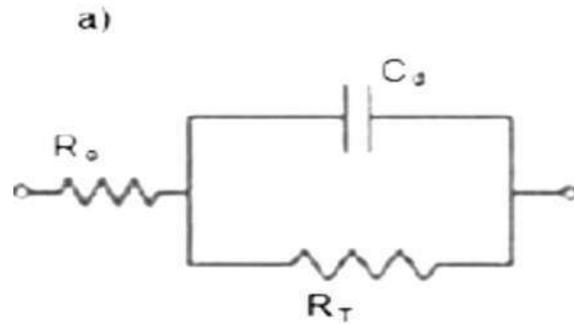


Ilustración 10. El circuito equivalente de Randles. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014)

La resistencia de transferencia de carga  $R_T$ , determina la velocidad de reacción de la corrosión y es una medida de la transferencia de electrones a través de la interfase. En un sistema de activación,  $R_T$  es la magnitud medida como resistencia de polarización,  $R_p$ , con las técnicas de corriente continua y puede utilizarse en la fórmula de Stern y Geary para estimar la  $i_{corr}$ .

El cálculo de la  $i_{corr}$  es también el principal objetivo de las técnicas de corriente alterna, hasta el punto de que, como en el método de resistencia de polarización, la amplitud de señal impuesta es muy pequeña, de unos 20mV pico a pico (10mV eficaces), para que la respuesta en corriente del sistema sea lineal, o aproximadamente lineal.

En el diagrama de Nyquist el eje horizontal representa a la parte real de la impedancia del electrodo, es decir, su componente de resistivo y el eje de ordenadas el componente imaginario o reactancia capacitiva (ilustración 11). A frecuencias elevadas, del orden de 10kHz o mayores, el condensador conduce tan fácilmente que cortocircuita  $R_T$  y permanece sólo el efecto de la resistencia del electrolito y de las capas superficiales  $R_e$ , valor que corresponde a la intersección izquierda del semicírculo con el eje de abscisas. Cuando decrece la frecuencia, el condensador conduce cada vez menos, pues la reactancia capacitiva es inversamente proporcional a  $\omega = 2\pi f$ , hasta que a bajas frecuencias o en corriente continua (frecuencia cero) el condensador deja de conducir y la impedancia se

igual a la suma  $R_e + R_T$ , marcada por la intersección derecha del semicírculo con el eje real.

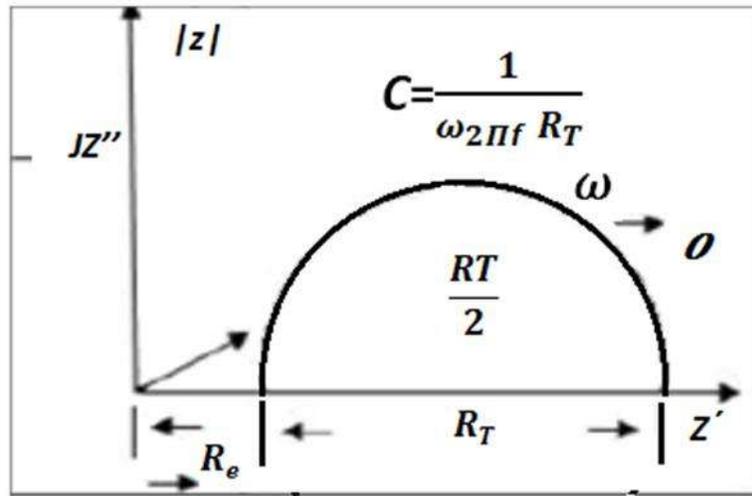


Ilustración 11. Diagrama de Nyquist o de Cole. Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014)

A partir del diámetro  $R_T$  del diagrama de impedancias se puede estimar  $i_{corr}$  con la fórmula de Stern y Geary ( $i_{corr} = B / R_P$ ).

Al trabajar con señales de baja frecuencia se realizan todas las etapas parciales implicadas en los fenómenos de corrosión: adsorción, difusión, transferencia, etc., tal como sucede en corriente continua. Sin embargo, al aumentar la frecuencia, desaparece la contribución de los procesos más lentos, como los de difusión, que no tienen tiempo para desarrollarse antes de la inmersión de la polaridad de la señal de corriente alterna. La obtención de los diagramas de impedancia, en el más amplio dominio de frecuencias constituye un examen analítico de los diversos procesos que de otra manera intervienen y se manifiestan global y simultáneamente en una sollicitación por corriente continua del sistema estudiado.

Con materiales de elevada resistencia a la corrosión es preciso descender a frecuencias muy bajas, del orden de mHz o inferiores, para delimitar  $R_T$  (el semicírculo), pues el fenómeno de corrosión es muy lento. Para velocidades de corrosión grandes, la rapidez o facilidad de la transferencia de cargas hace que el semicírculo quede ya delimitado para frecuencias intermedias, muchas veces del

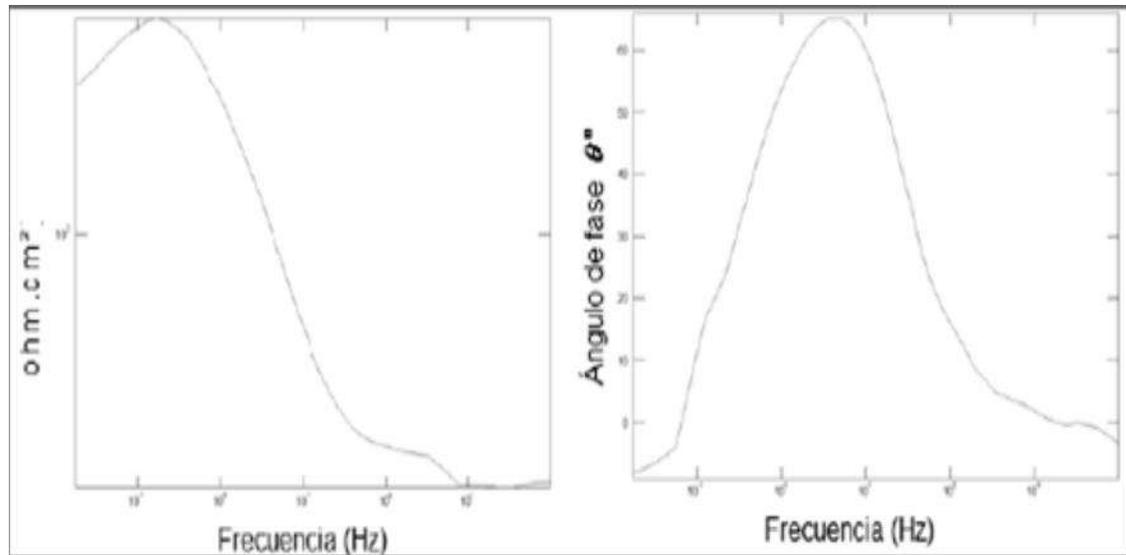


orden de Hz. En aquellos casos puede darse tiempo a desarrollarse fenómenos de difusión que modifiquen la inmediata vecindad del electrodo y, como ocurría con corriente continua, transformen en otro el sistema metal-electrolito estudiado, mientras que con cinéticas de corrosión rápidas es mucho menos probable que otros procesos parciales interfieran con las etapas de transferencia de cargas. El tipo e intensidad de las interferencias se revelan en forma del diagrama de impedancia del sistema.

La exactitud de las predicciones cinéticas basadas en técnicas electroquímicas, tanto de corriente continua como corriente alterna, requiere que la velocidad de corrosión, este bajo control de activación, que exista relación causa-efecto entre la señal o polarización aplicada y la respuesta medida y que la correlación entre aquella y esta sea lineal. En estas condiciones ideales, la velocidad de corrosión está relacionada con la resistencia de polarización  $R_p$ , que permite una estimación fiable y exacta de la  $i_{corr}$  en corriente continua, mientras que en la corriente alterna se obtienen semicírculos bien definidos, con la ventaja de determinar simultáneamente  $R_e$  y  $R_T$  siendo  $R_p = R_e + R_T$  (equivalente a  $R_p$ ).

### Diagrama de Bode

Los diagramas de Bode grafican los parámetros de la impedancia contra la frecuencia, y son posibles diferentes formas. El más común es el diagrama de  $\log |Z|$  y ángulo de fase contra  $\log$  de la frecuencia. Para estos datos el diagrama de Bode se muestra en la ilustración 12.



**Ilustración 12.** Diagrama de Bode  $|Z|$  y diagrama de ángulo de fase para circuitos de la ilustración 9 a) (circuito de Randles). Fuente: (GARCIA INZUNZA, 2014)

Estos diagramas incluyen toda la información obtenida desde las frecuencias que son identificadas. La ventaja de utilizar un diagrama de Bode es que la frecuencia aparece explícitamente permitiendo observar la variación de la impedancia en función de la frecuencia.

En resumen los diagramas de Bode representan la variación de la impedancia real contra la frecuencia graficada en coordenadas log-log. La presencia de resistencias en el circuito provoca mesetas horizontales; mientras que los capacitores presentan pendientes negativas y los inductores de pendientes positivas (GARCIA INZUNZA, 2014).

### **7.3.3.2 Resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ )**

La técnica electroquímica Resistencia a la Polarización Lineal, fue desarrollada por Stern–Geary, la cual consiste en desplazar ligeramente el sistema (proceso de corrosión) de su potencial de equilibrio  $E_{corr}$ , a otro valor de potencial en un intervalo que incluye las direcciones anódicas y catódicas de una reacción redox, registrándose las variaciones de potencial  $\Delta E$  y de corriente  $\Delta I$  en el sistema. La técnica LPR se utiliza para medir las velocidades de corrosión, generalmente expresadas mm/año (GARCIA INZUNZA, 2014).



La ecuación de Stern - Geary establece la relación entre la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Así esta ecuación es una analogía de la ley de Ohm, que establece que la intensidad de la corriente eléctrica  $i$  que circula por un elemento resistivo, es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada  $V$ , e inversamente proporcional a la resistencia del mismo  $R$ , (Torres, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010):

La constante  $B$  depende exclusivamente de las pendientes de Tafel, que son calculadas a partir de una curva de Tafel o de polarización. Este valor oscila entre los 60 y 120 mV/década (Rodríguez Gómez, 2000).

A principios de los años 80, Andrade y col. publicaron valores de la constante  $B$  calculados a partir de la correlación entre valores de velocidad de corrosión obtenidos a partir de mediciones de RPL y pérdida de peso. Estos valores (0.026 V y 0.052 V para acero en estado activo y pasivo respectivamente) son los generalmente empleados para calcular la densidad de corriente de corrosión y por ende, la velocidad de corrosión de refuerzos de estructuras de concreto armado (Arva, Morris, & Duffó, 2002).

## 8 DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 8.1 Caracterización del material inerte (Arena)

La arena utilizada para la elaboración del mortero con sustituciones parciales de PN, CCV, y CEL fue del río Huajúbaro proveniente del poblado el “Cuervo” perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán (ver ilustración 13 y 14). En la sustitución parcial con FN; se utilizó arena del río Lerma. En ambas arenas se usa solo el material que pasa la malla N°16 y se retiene en la malla N°30. Es importante mencionar que las pruebas que se presentan a continuación se efectuaron a la arena para tener un poco más de información acerca de ella, ya que para este caso las mezclas no conllevan un Proporcionamiento de mezcla (Arguello Hernández, 2012).

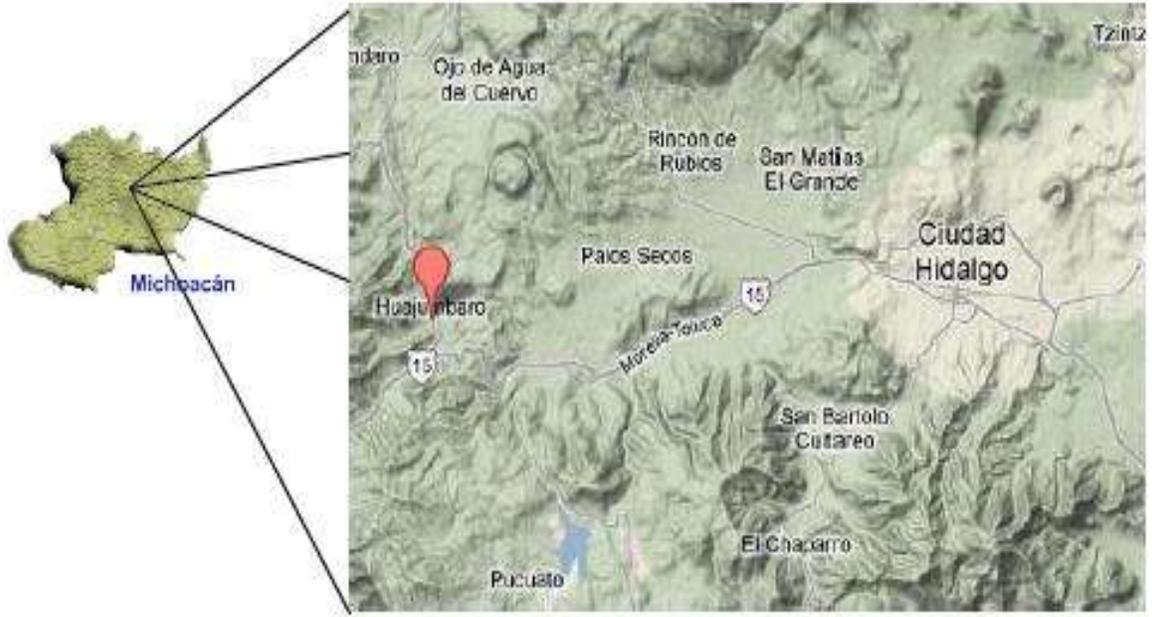


Ilustración 13. Localización del lugar donde se obtuvo la arena, Huajúmbaro Michoacán. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)



Ilustración 14. Lugar de obtención de la arena en estudio. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

## 8.2 Caracterización de la Arena Rio Huajúbaro.

A continuación se hace mención de las pruebas que se le hizo a la arena de rio Huajúbaro.

### 8.2.1 Humedad actual.

La humedad actual se determinó según la norma NMX – C – 166 (NMX-C-166-ONNCCE, 2006). Se realizaron 3 ensayos de los cuales se obtuvo un promedio. Se utilizó la fórmula [10]:

$$\% \text{ de Humedad Actual} = \frac{Mh - MS}{MS} * 100 \quad [10]$$

Dónde:

Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

Ms = masa seca del material en gramos, secada en charola sobre parrilla.



Ilustración 15. Secado de la arena en parrilla para obtener la Masa seca (Ms). Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Se realizaron 3 pruebas para la obtención del % de humedad actual.

### 8.2.2 Humedad de absorción

La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación NMX – C – 165 (NMX-C-165-ONNCCE, 2004), mediante la siguiente fórmula [11]:

$$\% \text{ de Humedad de Absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad [11]$$

Dónde:

M<sub>h</sub>= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

M<sub>s</sub> = masa seca del material en gramos.



**Ilustración 16. Procedimiento para obtener el secado superficial (NMX-C-165-ONNCCE, 2004). Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

Se realizaron 3 pruebas para la obtención del % de humedad de absorción.

### 8.2.3 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena MVSS.

La prueba se realizó según la norma NMX–C–073 (NMX-C-073-ONNCCE, 2004).

(Ver ilustración 17).



Ilustración 17. Equipo para realizar la prueba MVSS. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Se realizaron 3 pruebas para la obtención de un promedio de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS).

#### 8.2.4 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV).

Se realizó en base a la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004). Se utilizó la fórmula [12]:

$$MVSV = \frac{M}{V} \quad [12]$$

Dónde:

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

M= Masa de la arena en gramos.

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

Se utilizó un recipiente metálico y una barra de <sup>3</sup>/<sub>4</sub> de pulgada con “punta de bala” para varillar el material, (Ver ilustración 18).



Ilustración 18. Varillado de la arena en la prueba MVSV. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Se realizaron 3 pruebas para la obtención de un promedio de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSV).

#### 8.2.5 Colorimetría.

Esta prueba permitió determinar el contenido de materia orgánica en el agregado conforme lineamientos de la norma mexicana, (Ver ilustración 19) (NMX-C-088-ONNCCE, 1997).



Ilustración 19. Análisis de colorimetría. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

El material se encuentra en el color límite de presencia de materia orgánica. Se realizaron 3 pruebas.

### 8.2.6 Sedimentación

Se realizaron 3 pruebas.

En las 3 pruebas el resultado fue “Contenido de finos aceptable”, (Ver ilustración 20)



Ilustración 20. Análisis de contenido de finos. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

### 8.2.7 Determinación del material fino

Determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200 (Determina la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla n° 200 (NMX-C-084-ONNCCE, 2006).

### 8.2.8 Prueba de terrones de arcilla.

Es útil para conocer la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan el concreto, cuando se encuentran en abundancia formando parte de la arena (NMX-C-071-ONNCCE, 2004).



Formula que se utilizó para el cálculo [13]:

$$\% \text{ Terrones} = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad [13]$$

### 8.2.9 Gravedad Específica

Se realizó siguiendo los procedimientos del manual de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil. Se evaluaron dos procedimientos, mediante inmersión del material, ilustración 21, y por diferencias gravimétricas, ilustración 22, empleando un frasco de vidrio.



Ilustración 21. Calculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)



Ilustración 22. Cálculo de la gravedad específica. Método de inmersión. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

### 8.3 Caracterización de la Arena Rio Lerma.

A continuación se hace mención de las pruebas que se le hizo a la arena de río Lerma.

#### 8.3.1 Humedad actual

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

La humedad actual se determinó según la norma NMX – C – 166 (NMX-C-166-ONNCCE, 2006). Se realizaron 3 ensayos de los cuales se obtuvo un promedio. Se utilizó la fórmula [14]:

$$\% \text{ de Humedad Actual} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad [14]$$

Dónde:

M<sub>h</sub>= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

M<sub>s</sub> = masa seca del material en gramos, secada en charola sobre parrilla.



Ilustración 23. Secado del material, para la obtención de la Humedad actual. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Se realizaron 3 pruebas para la obtención del % de humedad actual.

### 8.3.2 Humedad de absorción.

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

La humedad de absorción se determina de acuerdo a la norma (NMX-C-165-ONNCCE, 2004). Para la obtención de la absorción se emplea la siguiente formula [15]:

$$\% \text{ de Humedad de Absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad [15]$$

Dónde:

M<sub>ss</sub> = Masa saturado y superficialmente seco en gramos.

M<sub>s</sub> = Masa seca del material en gramos.



Ilustración 24. Determinación de la masa en estado superficialmente seco. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Se realizaron 3 pruebas para la obtención del % de humedad actual.

### 8.3.3 Masa volumétrica seca y suelta (MVSS).

En esta prueba se determina la masa por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre y natural (Ver ilustración 25).



Ilustración 25. Determinación de la MVSS. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)



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

$$M.V.S.S = \frac{M}{V} \quad [16]$$

Dónde:

M.V.S.S.= Masa volumétrica seca y suelta en gramos.

M= Masa de la arena en gramos.

V= volumen del recipiente en  $\text{cm}^3$

Se realizaron 3 pruebas para la obtención de un promedio de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS).

#### 8.3.4 Masa volumétrica seca y varillada (MVSV)

Tiene por objetivo obtener la masa por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación; (Ver ilustración 26).



Ilustración 26. Determinación de la MVSV. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Esta prueba se lleva a cabo como se indica en la norma (NMX-C-073-ONNCCE, 2004), en la cual se presenta la formula siguiente para las operaciones [17]:

$$M.V.S.V = \frac{M}{V} \quad [17]$$



Dónde:

M.V.S.V. = Masa volumétrica seca y varillada en gramos.

M = Masa del material en gramos.

V = Volumen del recipiente en  $\text{cm}^3$ .

### 8.3.5 Colorimetría

Con esta prueba se determinara el contenido de material orgánico en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal; ilustración 27.



Ilustración 27. Determinación de la colorimetría. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

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

Se realizaron 3 pruebas. La arena está dentro de los límites permisibles del contenido de materiales orgánicos, no es necesario hacer un lavado.

### 8.3.6 Sedimentación

Esta prueba determina si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para definir si se acepta o no. (Ver ilustración 28).



**Ilustración 28. Determinación de sedimentos en la arena. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)**

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

### 8.3.7 Prueba de terrones de arcilla en arena

Conoceremos la cantidad de terrones de arcilla que contiene una arena, ya que son partículas de baja resistencia estructural, que además en contacto con el agua forman lodos que contaminan la mezcla, cuando se encuentra en forma abundante formando parte de la arena, ilustración 29.



**Ilustración 29. Prueba de terrones en arcilla en arena. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)**

Formula que se utilizó para el cálculo [18]:

$$\% \text{ Terrones} = \frac{M_i - M_f}{M_i} * 100 \quad [18]$$

Dónde:

$M_i$ = 100 gramos.

$M_f$ = Masa seca sin terrones.

#### **8.4 Análisis del agua**

En este caso el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El agua se tomó tal y como venía para así realizar las mezclas lo más apegado posible al agua que se utiliza en la obra, en condiciones reales (Arguello Hernández, 2012). Generalmente se utiliza el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida (NMX-C-122-ONNCCE, 2004).



## 8.5 Materiales de estudio

Los materiales de sustitución CEL, CCV, FN Y PN, fueron caracterizados mediante pruebas de tamaño de partículas, análisis en el ultrasonido para determinar morfología de partícula y por fluorescencia de rayos X (FRX) en que se determinó la composición química (Arreola Sánchez, 2013).

### 8.5.1 Ceniza Elaboración de Ladrillo (CEL)

La obtención de la ceniza producto de la quema de leña para la cocción del ladrillo (CEL), se obtuvo en las tabiquerías que se encuentran en comunidades aledañas a la ciudad de Morelia. La ubicación de la tabiquería se encuentra en las coordenadas  $19^{\circ}38'15.01''N$  y  $101^{\circ}14'13.46''$ , cuyo territorio corresponde a la tenencia Morelos, ver ilustración 30; (Arguello Hernández, 2012).

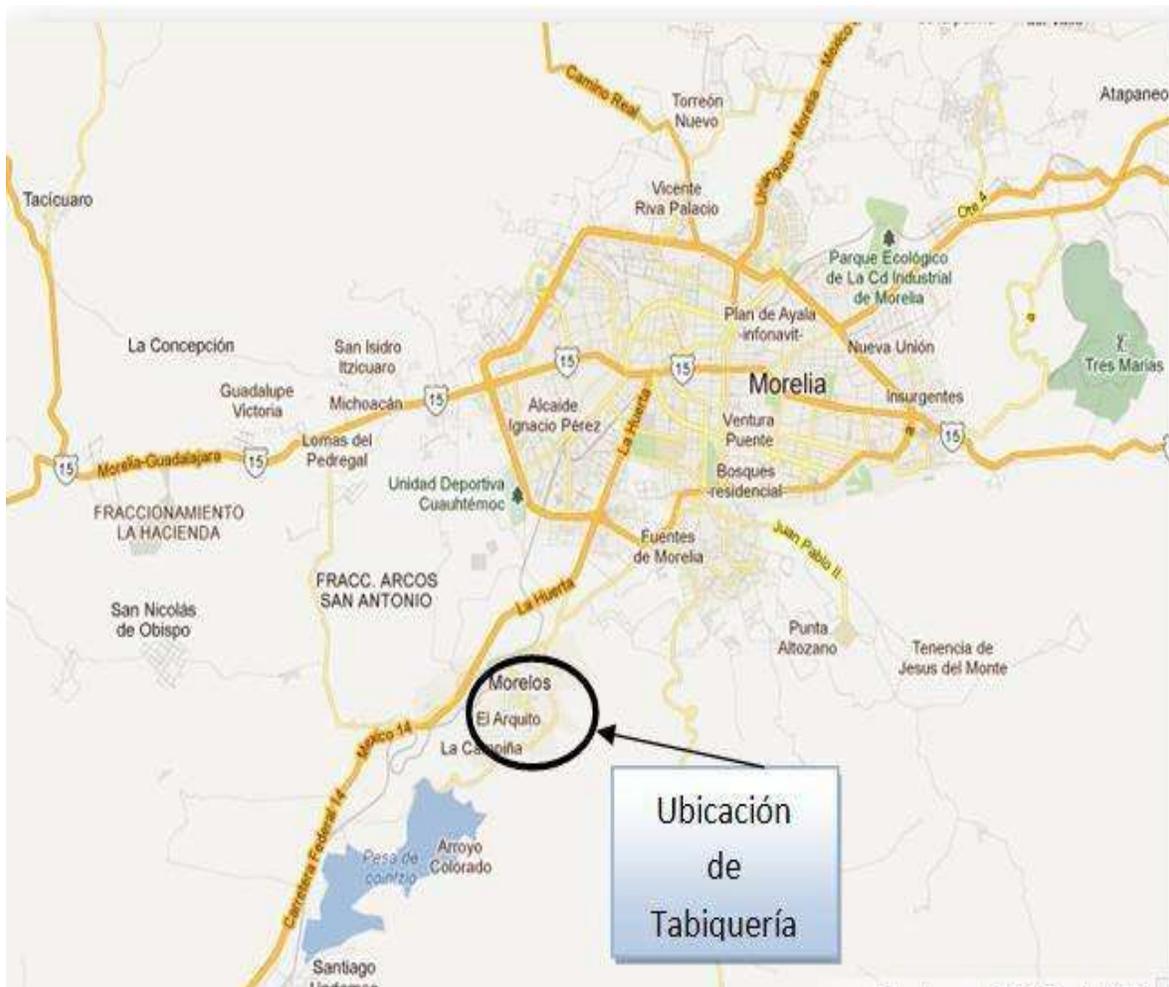


Ilustración 30. Ubicación de tabiquerías. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Esta ceniza es un producto industrial que prácticamente se desecha, exceptuando el uso que le dan los propios tabiqueros, que la pueden utilizar como desmoldante, durante la elaboración de los ladrillos. En la ilustración 31 se muestra el horno del cual se recolecta la (CEL).



**Ilustración 31. Horno de cocción de tabiques. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)**

La CEL fue tamizada para eliminar partículas gruesas y la mayor cantidad de carbón posible, y solo se utilizó el material que paso la malla N°200 ( $80 \mu m$ ).



### 8.5.2 Ceniza de Carbón Vegetal (CCV)

El carbón vegetal es un producto sólido, frágil y poroso con un alto contenido de carbono. El proceso de elaboración es llamado carbonización o pirólisis y se realiza bajo condiciones controladas en espacios cerrados para tener una combustión parcial de la madera a temperaturas que van de 400°C a 700°C. La ausencia de aire es de suma importancia para evitar que la madera se quemara totalmente y se convierta en cenizas como sucede durante el fuego convencional (AMILCAR CANUL TUN, 2013).

Durante el período 2005-2014 la producción forestal maderable ha fluctuado, iniciando con 6.4 millones de metros cúbicos rollo ( $m^3r$ ) en 2005 y finalizando con 5.7 millones de  $m^3r$  en 2014. Los principales Estados productores en 2014 fueron: Durango (30.9%), Chihuahua (16.8%), Michoacán (7.7%), Oaxaca (6.6%) y Jalisco (5.3%) que contribuyeron con el 67.2% de la producción total, equivalente a 3.8 millones de  $m^3r$ . Cabe resaltar que los dos estados con mayor producción tuvieron una participación conjunta del 47.7% de la producción forestal maderable total. Los principales productos que se obtuvieron durante el año 2014 fueron: la madera para aserrío (escuadría y durmientes) con el 72.7% de la producción (4.1 millones de  $m^3r$ ), los combustibles (leña y carbón) con el 12.4% (700.4 mil  $m^3r$ ) y el restante 14.9% (843.3 mil  $m^3r$ ) se destinó a celulósicos, chapa y triplay, postes, pilotes, morillos y combustibles (leña y carbón), el 269,905  $m^3r$  pertenecen a la producción de leña y 430,531  $m^3r$  a la producción de carbón vegetal (AEPF, 2014).

Se estima que de cada metro cúbico de leña destinada a la producción del carbón vegetal, aproximadamente de un 6 a un 10% se convierte en CCV (Arreola Sánchez, 2013).

La Ceniza de Carbón Vegetal para este trabajo de investigación se obtuvo del poblado de Cuto de la Esperanza, el cual se encuentra localizado en el Municipio de Morelia del Estado de Michoacán de Ocampo como se muestra en la ilustración 32.



**Ilustración 32.** Ubicación del lugar de obtención de la CCV. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Para la obtención de la ceniza de carbón vegetal, primero es talar la madera y transportarla hasta la zona donde se produce el carboneo (este es el nombre que recibe la acción de producir el carbón). La leña se deposita en chimeneas, (una especie de agujero en la tierra donde se deposita la madera de encino ilustración 33). Posteriormente se prende fuego a la madera depositada, es importante que la madera se encuentre seca, una vez que se ha cerciorado que la madera está ardiendo se colocan ramas y materia orgánica encima de la leña, ilustración 33. Se deja por varios días la leña bajo el calor de las llamas produciendo la deshidratación y posteriormente la leña adquiere la forma y color del carbón que se vende (Arguello Hernández, 2012).



**Ilustración 33. Producción de carbón: las chimeneas con la leña debajo de ramas y materia orgánica. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)**

Uno de los Métodos más utilizados para la producción de carbón es el de parva o montículo. Para la construcción del horno de parva Cano *et al.*, (2003) recomiendan que la superficie sea sensiblemente plana y compacta, con ausencia de humedad en el suelo y libre de material combustible. También recomiendan que se debiera de construir con una capacidad no mayor a una tonelada de leña, ya que cantidades mayores a ésta pueden complicar su manejo y con ello la producción. En los hornos de parva o también llamados de volcán la madera se estiva sobre el suelo y se cubre con tierra; la finalidad es que la madera a carbonizar quede encerrada en una cámara hecha con el suelo y aislada del aire con tierra. Las dimensiones más utilizadas son de aproximadamente 4 m de diámetro en la base y de 1.0 a 1.5 m de altura (FAO, 1983). La ventaja de este tipo de horno es que se puede construir cerca de la materia prima y en las áreas donde los subproductos forestales se encuentran de una manera dispersa, ver ilustración 34 (AMILCAR CANUL TUN, 2013).



Ilustración 34. Horno tipo parva o montículo. Fuente: (AMILCAR CANUL TUN, 2013)

### 8.5.3 Fibras de Nopal (FN)

Actualmente, los científicos relatan que el nopal es una planta llena de secretos y de beneficios que a lo largo de la vida lo vamos descubriendo. Uno de estos acontecimientos más actuales es el uso del nopal como aditivo en el concreto, esto que para aumentar su resistencia, manejabilidad y disminuir su costo, aunque aún no se obtienen resultados confiables, motivo por el cual se hace esta investigación (Arguello Hernández, 2012).

#### *8.5.3.1 Cactus Opuntia utilizado en la investigación.*

Cabe mencionar que para esta investigación se hizo uso del 1%, 1.5% de cactus opuntia en estado deshidratado, esto para continuar con las investigaciones de tan importante fibra como sustitución en morteros de cemento, el producto usado es de una empresa de productos comerciales, la marca de este producto es: CU-CU ilustración 35.



**Ilustración 35. Nopal deshidratado en polvo, producto CU-CU. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)**

El producto usado fue en polvo y deshidratado, así como embolsado por empresas CU-CU tiene un color amarillento (Arguello Hernández, 2012).

#### **8.5.4 Perlita Natural**

La perlita es una roca volcánica vítrea (silicato de aluminio) formada por el enfriamiento rápido; es un material amorfo que contiene entre 2 y 5% de agua atrapada. Este mineral en su manipulación industrial, se granula y precalienta a 300-400°C y se vierte en hornos a 1000°C, formando una espuma blanca y ligera, por lo que es completamente estéril (Anicua, Gutiérrez, Sánchez, Ortiz, Volke, & Rubiños, 2009).

Las perlitas tienen como propiedad el expandirse por calor aumentando hasta veinte o más veces su volumen. Esta expansión se debe a que en su estructura molecular tiene en forma combinada del 2 al 6% de agua en su estado natural, la cual pierde por evaporación en el proceso de calentamiento. Esta expansión la convierten en un material muy liviano que se asemeja al “pop-corn” o palomitas de maíz (Arguello Hernández, 2012).

En el área de la construcción se usa en yesos y morteros livianos, aislamiento térmico, cielorrasos y filtros. Tanto la perlita natural y la perlita expandida fueron facilitados por la empresa Termolita S.A.P.I de C.V., (Arreola Sánchez, 2013).



## 8.6 Caracterización del cemento

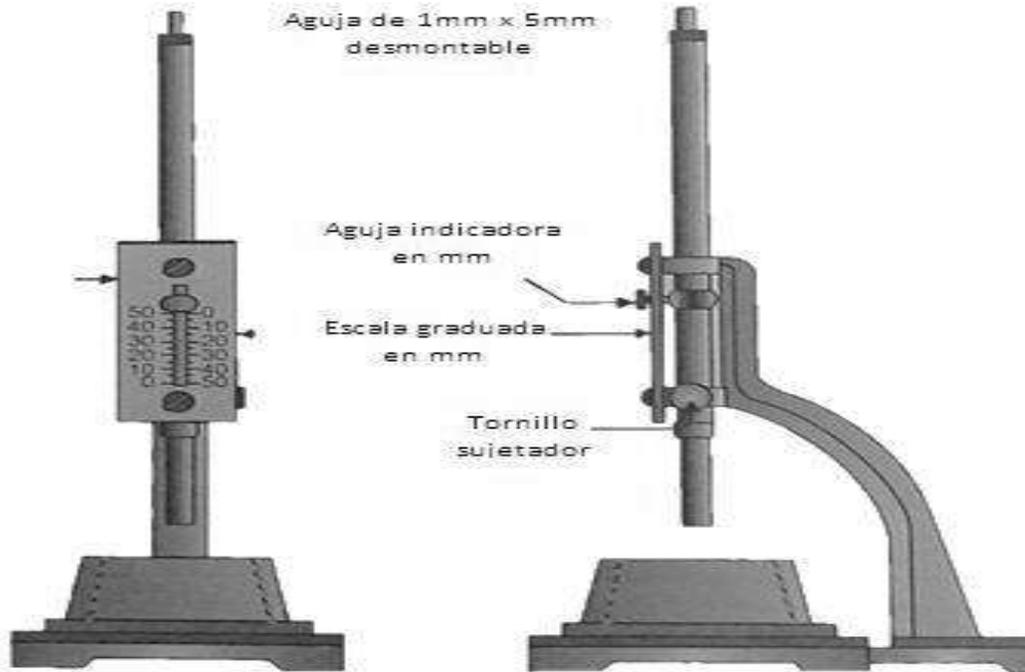
El cemento que se utiliza en esta investigación es Tolteca CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente a los sulfatos NMX-C-414-0NNCCE, 2004, (Arguello Hernández, 2012).

La relación entre la resistencia a sulfatos del cemento Portland y su contenido de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) está bien establecida. El cemento Portland que contiene menos de 5% de  $C_3A$  ha sido clasificado como un resistente a sulfatos, y se usa como el criterio de especificación de muchos reglamentos y normas para el cemento en todo el mundo (NMX-C-414-0NNCCE., 1999).

### 8.6.1 Consistencia Normal y Tiempo de fraguado

La consistencia normal (CN) de una pasta se obtiene cuando al agregar un porcentaje de agua, respecto a la cantidad de cementante seco (cemento o cemento + adición), se obtiene una penetración de  $10 \pm 1$  mm en la pasta de cemento utilizando la aguja de 1 mm del aparato de Vicat, ilustración 36 (NMX-C-057, 2010).

Obtenida la CN, la determinación del tiempo de fraguado inicial se calcula por interpolación entre la lectura menor y la mayor más cercanas de una penetración de 25 mm de la aguja del equipo de Vicat. El tiempo de fraguado final es el tiempo transcurrido desde que el cemento se puso en contacto con el agua hasta que la aguja del aparato de Vicat no deja una huella completa del círculo sobre la pasta de cemento (NMX-C-059, 2010).



**Ilustración 36. Aparato de Vicat utilizado para realizar las pruebas de consistencia normal y tiempos de fraguado inicial y final. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

Para esta prueba la normativa especifica un tiempo de fraguado mínimo de 45 minutos y máximo de 600 minutos de acuerdo con la Normativa del Cemento Hidráulico NMX-C-414-ONNCCE-2004, (Arguello Hernández, 2012).

Otro método para el cálculo de los tiempos de fraguado es mediante la utilización del Aparato de Gillmore, ilustración 37. El tiempo de fraguado inicial es el tiempo transcurrido desde que se agrega el agua a la pasta hasta que la aguja de menor masa deja huella apreciable sobre la superficie. La determinación del tiempo de fraguado inicial sigue el mismo procedimiento utilizando la aguja con masa mayor (Bernabé Reyes, 2015).



Ilustración 37. Aparato de Gillmore para la realización de los tiempos de fraguado. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

### 8.6.2 Proporcionamiento

Se utilizó la cantidad de 1481gr de cementante, puesto que se cuantificó el volumen que se debía llenar en los especímenes que se elaborarían, ya que después de varias pruebas se determinó que el rendimiento de cementante era de  $0.47 \text{ gr/cm}^3$ , ya que si se utilizaba lo que indica la norma correspondiente (ASTM C 109M I., 2002) para llenar de mezcla 6 cubos de dimensiones  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , se desperdiciaría demasiado material al elaborar los especímenes.

Se elaboraron dos mezclas por cada sustitución, ambas con la misma proporción. En la primer mezcla que se elaboró con la cual se obtuvo la fluidez deseada, se utilizaron las cantidades de material y se registraron las características de la mezcla indicadas en la tabla 14.

Tabla 14. Proporción de la mezcla con que se elaboró el mortero.

Agregado o Característica	Cantidad
Cemento	1481 g
Arena	4072 g
Agua	1495 ml

Relación Agua/ Cemento (A/C)	1.01
Fluidez	108 %

Dichas proporciones de mezclas sirvieron de base para la elaboración de todos los especímenes de Prueba para las 8 edades: 14, 28, 45, 90, 180, 360, 500 y 1000 días (Arguello Hernández, 2012).

### 8.7 Prueba de Fluidez

Previo a la elaboración de los especímenes se realizaron las pruebas para determinar la cantidad de agua necesaria para que el mortero tuviese una fluidez de  $110\% \pm 5\%$  (ASTM C 109M I., 2002), (NMX-C-061, 2010).

La mezcla se realizó dentro de recipiente plástico con capacidad de 18 litros aproximadamente, ilustración 38.



Ilustración 38. Método de mezclado de áridos mediante aspas de acero impulsado por el taladro. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Para el mezclado se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750 w y 3500 RPM, implementado con Aspas Mezcladoras.



La prueba de fluidez consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, sobre la mesa de fluidez; el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie, como se observa en la ilustración 39. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a ésta capa otros 25 golpes con el pisón, posteriormente se enraza el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 15 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos.

La medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas por medio de una hélice truncada que la levanta y la deja caer súbitamente. El diámetro final se mide con un vernier apropiado para realizar dicha operación, ilustración 40. Las dimensiones del equipo se establecen en la normativa norteamericana (ASTM-C-230, 2003).



**Ilustración 39. Llenado de molde sobre la mesa de fluidez. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**



Ilustración 40. Medición del radio de expansión de la mezcla. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Una vez determinada la cantidad de agua se estableció la elaboración de las mezclas con las diferentes materiales de sustitución para posteriormente realizar la elaboración de los especímenes (Bernabé Reyes, 2015).

## 8.8 Elaboración de especímenes

### Lolipops

Estos moldes están hechos de material acrílico y Nylamid, con dimensiones de 5 cm x 1.5 cm x 8 cm. Las dos varillas que se colocaron son corrugadas grado 60 de 7/32" diámetro, con un área expuesta al ataque de  $13.67\text{cm}^2$ , tal como se muestra en la figura 41. La forma de la probeta es similar a la establecida en un trabajo de la Dra. Carmen Andrade, en el cual las dimensiones son 5.5 cm x 2 cm x 8 cm, con una área expuesta de  $11\text{ cm}^2$  (Andrade & González, 1978).



**Ilustración 41. Moldes de acrílico para la elaboración de las probetas, parte izquierda, acomodo del acero de refuerzo en los moldes, parte derecha, exhibición de las muestras que se han de emplear en las pruebas electroquímicas. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

Para el colado de las muestras, al molde se le dio el mismo tratamiento que para el colado de especímenes cúbicos o cilíndricos, se le impregnó aceite para facilitar el desmolde posteriormente (Bernabé Reyes, 2015).

Una vez fabricadas las probetas se colocaron dentro de bolsas para evitar que estuvieran en contacto con el CO<sub>2</sub> atmosférico y oxidara la barra de acero. Posteriormente se dejaron las muestras sin ningún tipo de curado por 36 meses para posteriormente iniciar la inmersión en la solución de cloruro de sodio al 3.5% en masa.

### **Elaboración de Cubos**

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

En la fabricación de los cubos de mortero se recubrieron los moldes con aceite como desmoldante.

Una vez que se determinó la fluidez se procedió al llenado de los moldes. El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109M I., 2002), cada capa de mortero fue apisonada con 8 golpes, como se ilustra en las ilustraciones 42 y 43. El pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5 cm x 1.25 cm.

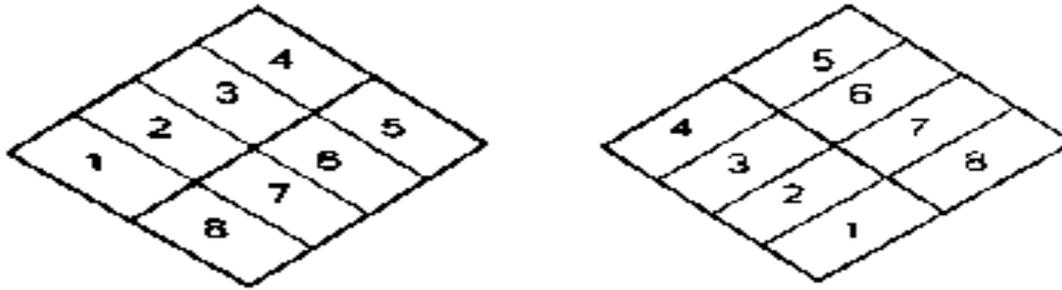


Ilustración 42. Etapas de llenado del cubo de 5 cm x 5 cm x 5 cm. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

En el transcurso de 24h aproximadamente, se procedió a descimbrar y comenzar el proceso de curado, el cual fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 511, 2003).



Ilustración 43. Llenado de moldes para cubos de 5 cm x 5 cm x 5 cm. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Después de hacer lo anterior se limpiaron cada uno de los moldes para la fabricación de cubos, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar

especímenes de la correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes cúbicos requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente (Bernabé Reyes, 2015).

### **Elaboración de prismas**

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 4 cm x 4 cm x 16 cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable. El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (2 cm), cada capa se compactó con 12 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos, ver ilustración 44.



**Ilustración 44. Llenado de especímenes prismáticos 4 cm x 4 cm x 16 cm. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)**

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

Después de sumergir en agua los especímenes, se limpiaron cada uno de los moldes, se armaron, y se engrasaron, para de nuevo fabricar especímenes de la correspondiente fecha, hasta que se terminaron de elaborar el total de especímenes, requeridos para cada edad de prueba y sustitución correspondiente (Arguello Hernández, 2012).

## Elaboración de Briquetas

Puesto que no hay ninguna norma para el llenado de las briquetas, estas se llenaron siguiendo el procedimiento descrito el Manual de Análisis de Materiales tercera edición. El llenado de las briquetas consiste en llenar los moldes de las mismas comprimiendo la mezcla con el dedo índice y enrazando con la ayuda de una espátula (Ver ilustración 45) puesto que los moldes no tienen una base en la cual quedará la mezcla, el molde se puso sobre una superficie de cristal, engrasado previamente para evitar que la mezcla se adhiera a éste.

Después de la elaboración del número correspondiente de briquetas para las edades de prueba especificadas, se dejaron fraguar durante 24 horas aproximadamente (ver ilustración 46), después se les puso la misma nomenclatura descrita anteriormente y se sumergieron en agua para su curado hasta la fecha de prueba (Arguello Hernández, 2012).



Ilustración 45. Elaboración de briquetas, utilizando molde y cristal previamente engrasado. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)



Ilustración 46. Sangrado en briquetas después de un momento de elaboradas. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

### Elaboración de Cilindros

Para elaborar los cilindros de mortero de dimensiones 10 cm de altura por 5 cm de diámetro en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas para su fabricación.

El llenado de los moldes cilíndricos se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente, es decir a la mitad de la altura del cilindro (ilustración 47), en cada capa se le dieron 25 golpes con una varilla punta de bala de 1/4" de diámetro, después de la segunda capa se enrazaron con ayuda de la varilla punta de bala.

Después de la elaboración del número de cilindros correspondiente a las edades de prueba especificadas y con las diferentes sustituciones, se dejaron fraguar durante 24 h aproximadamente, después de esto se descimbraron y al igual que en los cubos se les puso la misma nomenclatura, después se procedió a curar los cilindros de mortero, al igual que los cubos y demás especímenes elaborados, el curado que se dio a las muestras fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (Arguello Hernández, 2012).



Ilustración 47. Fabricación de especímenes cilíndricos de 10 cm de altura por 5 cm de diámetro. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

## 8.9 Pruebas Físico-Mecánicas y electroquímicas

### 8.9.1 Pruebas no destructivas

Los ensayos no destructivos es un amplio grupo de técnicas de análisis utilizadas en la ciencia y la industria para evaluar las propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales de un material, componente o sistema sin causar daños.

#### 8.9.1.1 Velocidad de pulso ultrasónico

El desarrollo de la industria de la construcción ha exigido el perfeccionamiento de métodos no destructivos más eficaces y económicos de inspección que permitan un control más eficiente y confiable. Uno de estos métodos está basado en la medición de la velocidad del pulso ultrasónico (Rodríguez Fadrugas & Rodríguez González, 2011).

La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá (Malhotra y Carino 1991) y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio.



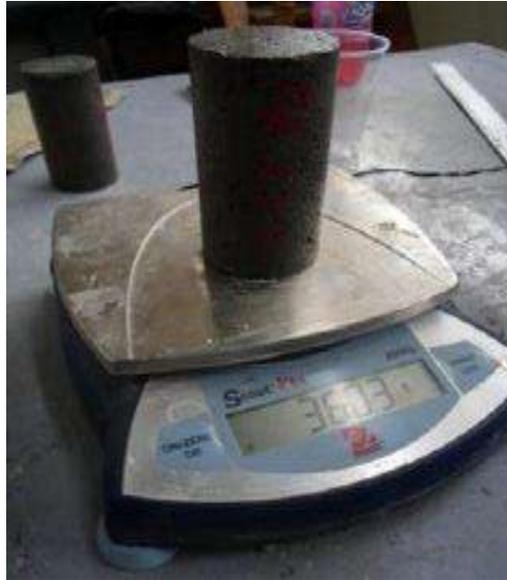
Las ondas de sonido se propagan en los medios sólidos a partir de excitaciones vibratorias en forma de: ondas longitudinales o de compresión, ondas transversales o de cortante y ondas superficiales o Rayleigh (Rose 1999). La velocidad de estas ondas depende de las propiedades elásticas del medio, de tal manera que, conociendo la velocidad del sonido y la masa del sólido, se pueden estimar las propiedades elásticas del medio, mismas que se pueden relacionar con los parámetros de calidad del material (Solís, Moreno, & Castillo, 2004).

La ASTM tiene en las especificaciones (ASTM-C-597, 2009) reglas para el uso de este método desde 1967 y la institución británica de los estándares ha publicado las recomendaciones para la medida de la velocidad de pulsos de ultrasonido en el concreto.

Para poder comenzar con las pruebas se obtuvieron las masas y dimensiones de los especímenes, tal como se muestra en las ilustraciones 48 y 49.



**Ilustración 48. Medición de las dimensiones utilizando vernier. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**



**Ilustración 49. Medición de la masa utilizando instrumentos eléctricos. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, con una escala de frecuencia de 24 a 150 kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9  $\mu\text{s}$ ; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1  $\mu\text{s}$ ; salida del transmisor hasta 1500 V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie de prueba y para tal fin se emplea un gel, (ilustración 50).

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas (Bernabé Reyes, 2015).



Ilustración 50. Equipo para medir la velocidad de pulso ultrasónico (a la izquierda) y espécimen prismático colocado sobre los transductores al ser realizada la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (a la derecha), (ASTM-C-597, 2009). Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

### 8.9.1.2 Resistividad eléctrica

La **resistividad eléctrica** como inversa de la conductividad-difusividad es una propiedad del concreto que permite su control de forma no destructiva y por ello, accesible al autocontrol. La resistividad es un indicador del fraguado y de la resistencia mecánica, del grado de saturación del concreto y por ello del grado de curado y de la impermeabilidad o resistencia al ingreso de sustancias agresivas en el concreto. Finalmente tiene una relación directa con la velocidad de corrosión al indicar el grado de humedad del concreto. Por todo ello es un parámetro que permite relacionar al microestructura con el comportamiento durable del concreto.

La resistividad eléctrica, como indica la Ley de Ohm la resistividad es una propiedad volumétrica del material e indica su resistencia al paso de las cargas eléctricas.

Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del concreto y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Además si el concreto no está saturado de agua la resistividad crece, por lo que es un indicador de su grado de saturación. Por tanto, la resistividad es un indicador de la calidad del

concreto al indicar su porosidad, y es un indicador de su grado de saturación y por tanto puede servir para el control del grado de curado (Andrade & D' Andrea, 2011).

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012), marca Nilsson, ilustración 51.



Ilustración 51. Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica. Fuente: (T. Francisco Martínez)

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra:

**Cubos:** lado 1, lado 2 y espesor.

**Prismas:** base (lado 1), espesor (lado 2) 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 52.

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).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como  $E/I$  y se expresa en Ohmios.

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente fórmula [19]; (ASTM-G57, 2012), (CYTED-DURAR, 1998):

$$\rho = R_e \left( \frac{A}{L} \right) \quad [19]$$

Dónde:

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

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

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

$L$  = Longitud del espécimen en cm



**Ilustración 52.** Izquierdo, espécimen prismático colocado entre las dos placas de cobre para tomar la resistencia eléctrica. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

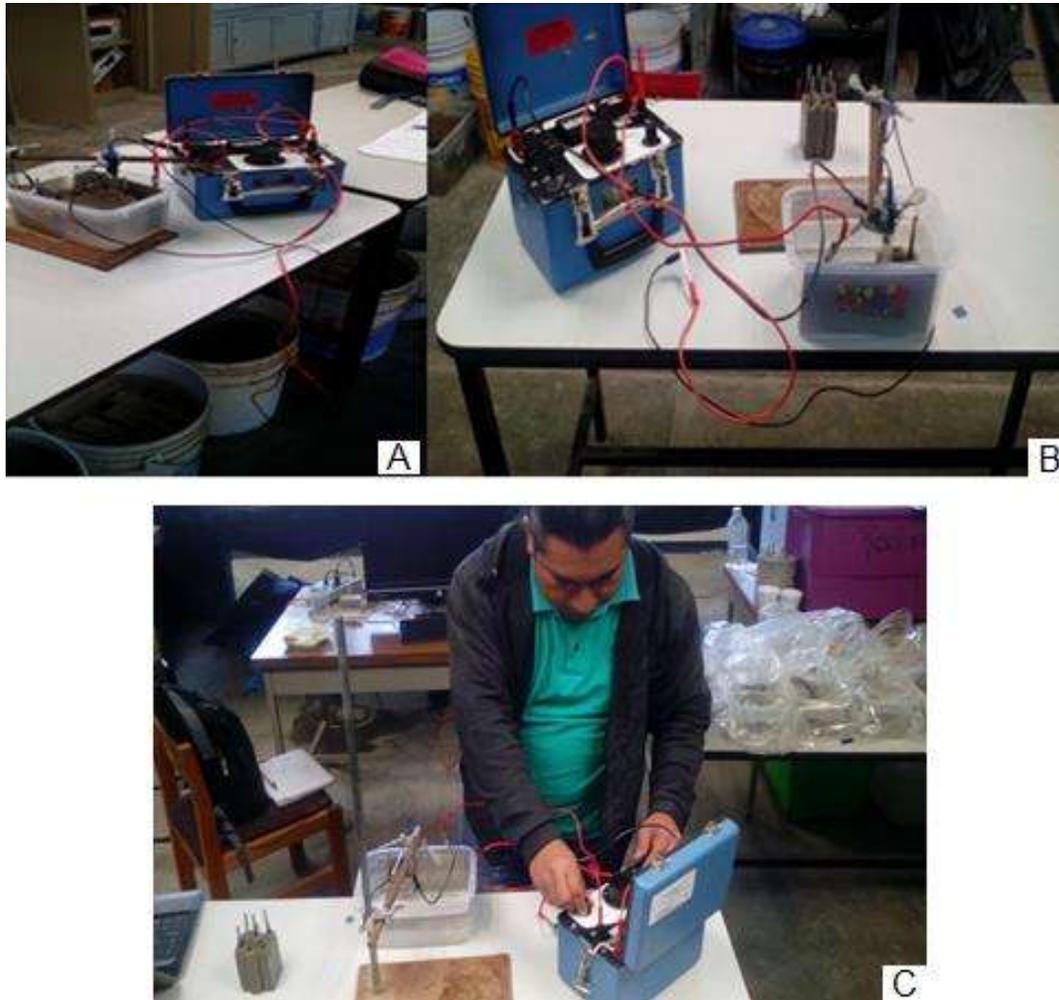
También se le hizo resistividad eléctrica a las probetas (Lolipops) para checar la resistencia que opone el mortero, para esto, se referencio tal cual como se hizo la prueba electroquímica, tanto como para prueba húmeda y prueba seca.

Para la realización de resistividad eléctrica en la prueba húmeda, se ocupó un resistómetro marca Nilsson, este equipo tiene 4 terminales de conexión: potencial 1 (P1), corriente 1 (C1) y potencial 2 (P2), corriente 2 (C2), el (P1) y (C1) tienen que estar conectados con un cable y en (P2) y (C2) no deben de estar conectados, ver ilustración 53.



Ilustración 53. Cable conectado de C1 a P1. Fuente: (T. Francisco Martínez)

Ahora mediante un cable se conecta en la terminal (C1) que va a ir conectado con el electrodo de trabajo (acero de refuerzo), en la terminal (P2) se conecta el cable del electrodo de referencia y en la terminal (C2) se conecta un cable que va a ir conectado en el contraelectrodo (placa de acero inoxidable) ,ver ilustración 54.



**Ilustración 54.** La figura A y B muestra cómo están conectados los cables del resistómetro a los electrodos y la fig. C muestra cómo se lleva a cabo la resistividad eléctrica en prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

Para la realización de resistividad eléctrica en prueba seca la conexión de cables al resistómetro es el mismo arreglo de la explicación en la prueba húmeda, pero cambia en la conexión de los electrodos, el electrodo de referencia se coloca superficialmente sobre el electrodo de trabajo (acero de refuerzo denotado como barra A y B en la muestra), dependiendo en cual barra se trabaja y el otro servirá para el cierre del circuito, la terminal (C2) en el resistómetro se conecta con un cable al electrodo de trabajo (acero de refuerzo denotado como barra A y B en la muestra) ya sea en la barra A o B, esto es para el cierre del circuito; ver ilustración 55.

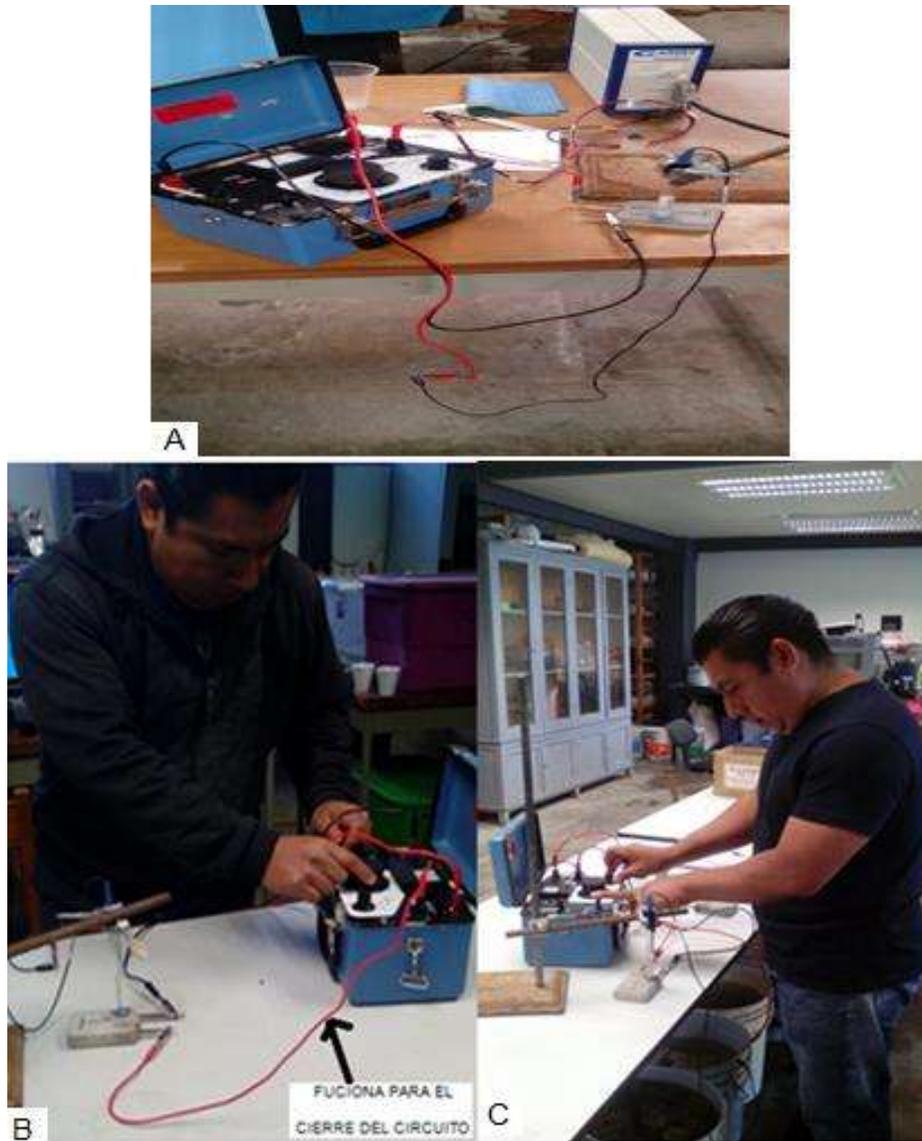


Ilustración 55. La figura A muestra cómo están conectados los cables del resistómetro a los electrodos y la figura B y C muestra de cómo se lleva a cabo la resistividad eléctrica en prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

Para los prismas con las barras de acero (tipo lolipops), la resistividad se calculó utilizando como área (A) la sección rectangular formada por la vista en dos planos de la barra, es decir, el diámetro de la barra por la longitud embebida en el mortero y la longitud (L) como la distancia entre las barras de acero; tomada entre paños internos.



## 8.9.2 Pruebas Destructivas

Las pruebas destructivas son aquellos ensayos en la cual, hay una destrucción en la muestra o espécimen a causa de una carga aplicada.

Cabe mencionar que esta prueba se realiza después de haberse realizado las no destructivas.

### 8.9.2.1 Índice de Actividad Puzolánica

**Índice de actividad puzolánica:** Es el valor que expresa la capacidad de la puzolana para reaccionar con el hidróxido de calcio, formando compuestos cementicios.

La actividad puzolánica depende: de la naturaleza y proporción de las fases activas presentes en la puzolana (composición mineralógica), de la relación cal – puzolana de la mezcla, de la finura (o superficie específica) de la puzolana y de la temperatura de la reacción. Los productos de reacción puzolana/cal generalmente son del mismo tipo que los productos de hidratación del Cemento Pórtland: Silicatos Cálcicos Hidratados (CSH), Aluminatos Cálcicos Hidratados (CAH) y Sílico - Aluminatos Cálcicos Hidratados (CSAH), (Salazar J.).

Según la norma ASTM C 311 – 00, existen dos formas de calcular dicho índice, el primero es mediante un análisis químico y el segundo es mediante un análisis físico. El método usado en esta investigación fue el segundo, el cual relaciona la resistencia a compresión del mortero testigo con la resistencia del mortero hecho con los materiales sustitutos (Arreola Sánchez, 2013).

El método especifica la elaboración de la mezcla de acuerdo a la norma ASTM-C109, y el cemento Portland utilizado deberá encontrarse dentro de los parámetros de la norma ASTM-C150, incluyendo el contenido de álcalis permisibles (Bernabé Reyes, 2015).

### ***8.9.2.2 Prueba a compresión en cubos (5 cm X 5 cm)***

La prueba de compresión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se aplicó a una velocidad constante en el rango de 50,000kg con una aproximación a 0.5kg, esta velocidad se mantuvo durante toda la prueba hasta la falla del cubo registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109M I., 2002).

Se probaron 3 cubos a compresión (ilustración 56) a las edades de 14, 28, 45, 90,180 y 360 días para obtener un promedio de los tres, el cual se tomaría como la resistencia a compresión de dicha mezcla, cabe destacar que los primeros especímenes cúbicos a los cuales se les realizó la prueba fueron los cubos testigo, es decir que no tenían ninguna sustitución de los minerales (Bernabé Reyes, 2015).



**Ilustración 56. Prueba de Resistencia a compresión en cubos utilizando la máquina universal Tinius Olsen. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

En los cálculos para determinar la resistencia a compresión se usó la siguiente ecuación [20]:



$$\sigma = \frac{P}{A} \quad [20]$$

Dónde:

$\sigma$  = Esfuerzo a compresión, kgf/cm<sup>2</sup>.

$P$  = Carga, kgf.

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

### 8.9.2.3 Prueba a flexión Indirecta

Esta prueba se realiza a los especímenes prismáticos de 4cm x 4cm x 16cm. Se probaron tres muestras en cada fecha, el procedimiento seguido se describe a continuación:

- Se marcó el prisma a 1" de sus extremos y al centro donde se aplica la carga.
- Se montó en los soportes cilíndricos metálicos y se aplicó carga sin impacto y a una velocidad constante (ASTM C 293, 2002), (NMX-C-303-ONNCCE, 2010), ilustraciones 57 y 58.
- Se registró la carga de falla y la ubicación de la misma, ya que la ecuación para el Módulo de Ruptura es diferente si la falla se da en el tercio medio marcado o fuera de él.

Los cálculos se realizaron con el empleo de la siguiente ecuación [21]:

$$MR = \frac{3W L}{2B D^2} \quad [21]$$

Dónde:

$MR$  = Módulo de ruptura, kgf/cm<sup>2</sup>

$W$  = Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, kgf

$L$  = Longitud entre apoyos de la muestra, cm

$B$  = Ancho promedio de la muestra, cm

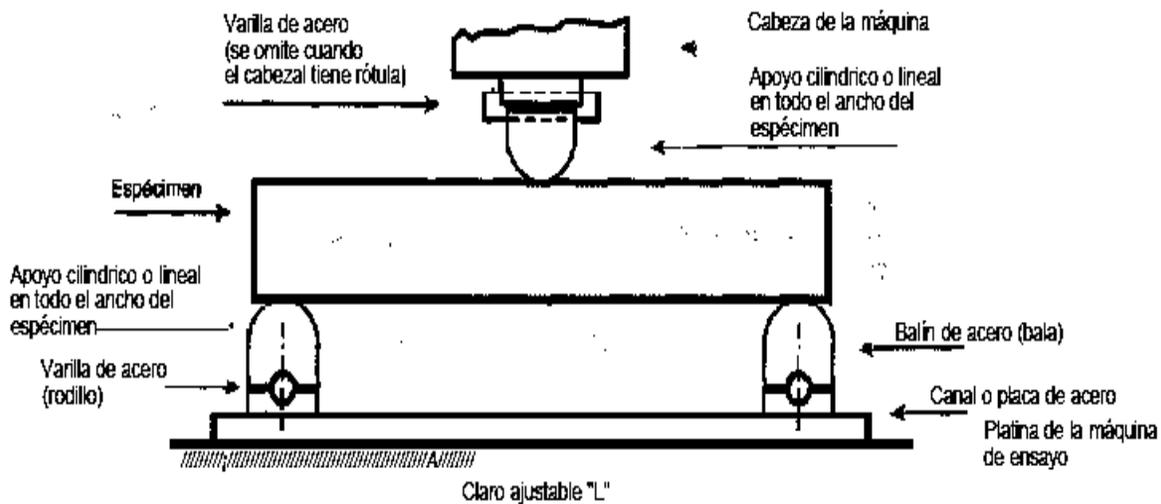
$D$  = Espesor promedio de la muestra, cm

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 [22]:

$$MR = \frac{3W a}{B D^2} \quad [22]$$

Dónde:

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



La presente figura es ilustrativa

**Ilustración 57. Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

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 (Bernabé Reyes, 2015).

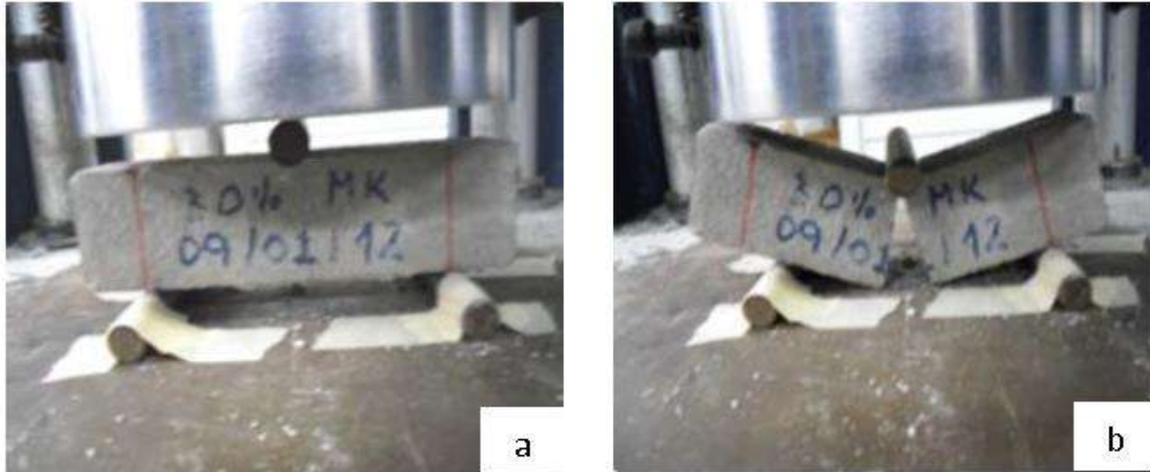


Ilustración 58. Ejemplo de la prueba de flexión estática en los prismas. a) Aplicación de la carga, b) Falla al centro del prisma. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

#### 8.9.2.4 Tensión Directa en briquetas

La determinación de la resistencia a tensión realizada en briquetas, se efectuó en la máquina de prueba para tensión en morteros tipo Michaelis (ilustración 59).



Ilustración 59. Máquina Michaelis para prueba a tensión en briquetas. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)



El procedimiento seguido se describe a continuación:

- Se sacaron de la pila de curado las muestras a probar a la edad correspondiente.
- Se tomaron las medidas de la sección media ( $S_m$ ) de la briqueta.
- Se colocó la briqueta en la máquina la cual debe quedar perfectamente nivelada.
- Se aplicó la carga lenta y constantemente por medio de las municiones hasta la falla de la muestra (ilustración 60).

Después de la falla de la muestra se retiraron las municiones pesándolas al décimo de gramo, la masa de las municiones ( $P_m$ ) fue considerado como la carga que soportó la sección media de la briqueta (Arguello Hernández, 2012).

En los cálculos para determinar la resistencia a tensión se usó la siguiente ecuación [23]:

$$R = \frac{P_m * 50}{S_m} \quad [23]$$

**Dónde:**

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

$P_m$  = masa de las municiones o carga de ruptura en kg.

$S_m$  = sección media de la briqueta en  $\text{cm}^2$ .

50 = constante de la máquina.



Ilustración 60. Aplicación de la fuerza de tensión sobre la briqueta. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

#### 8.9.2.5 Prueba de Adherencia

Uno de los métodos más empleados para evaluar con éxito la adherencia de los materiales de reparación y la resistencia en la superficie de los elementos de concreto, es el ensayo de adherencia; también denominado en la literatura como ensayo de desprendimiento, o “Pull Off”. Es defendido por diversos especialistas como parcialmente destructivo, por lo que tras la prueba, deben realizarse reparaciones puntuales al elemento ensayado.

El ensayo se realiza con dos propósitos fundamentales:

- Para estimar la resistencia del concreto y
- Para evaluar la resistencia de la unión entre el material de reparación y el concreto reparado.

El ensayo consiste básicamente en transmitir tensión axial directa, con un equipo portátil, a un disco previamente adherido al concreto; siempre después de transcurrido un tiempo suficiente para que se haya curado la resina o material adhesivo usado en la fijación del disco (Vidaud Quintana & Vidaud Quintana, 2014).

El procedimiento general que se sigue en este ensayo es la siguiente:

Una vez que se llegó a la edad de prueba, se comenzó por hacer una perforación en la superficie de la losa de concreto de 7cm de espesor recubierta por el mortero en estudio lo cual se observa en la ilustración 61. La perforación se hizo con un esmeril angular portátil marca Black & Decker con una potencia de 750w y 11000rpm adicionada de una broca circular con punta de diamante de 50mm de espesor, la perforación se hizo a un cm por debajo del sustrato de concreto.



**Ilustración 61. Perforación de las losas para la prueba de adherencia. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

Una vez realizadas las perforaciones se adhirieron discos de acero inoxidable de 1.5 cm de diámetro, los discos se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel, ilustración 62.



**Ilustración 62. Elaboración de la mezcla del epóxico. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**



**Ilustración 63.** Pegado de los discos de acero en el recubrimiento de mortero. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)



**Ilustración 64.** Relación de dimensiones de las perforaciones y discos utilizados. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Una vez que el epóxico estuvo seco se procedió a realizar la prueba de adherencia, ilustración 65, la cual consistió en insertar el perno con cabeza cilíndrica en el disco de metal adherido a la superficie de la muestra, después se colocó el instrumento de medición Pull Off (ilustración 66), se aplicó carga lenta y constante en el rango que indica la norma, hasta que se obtuvo la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004).



**Ilustración 65. Disco y perno de acero para realizar la prueba de adherencia. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**



**Ilustración 66. Equipo para prueba Pull off marca CONTROLS. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

En la ilustración 67 se observa el tipo de falla que puede presentarse al momento de realizar la prueba con el equipo Pull Off.

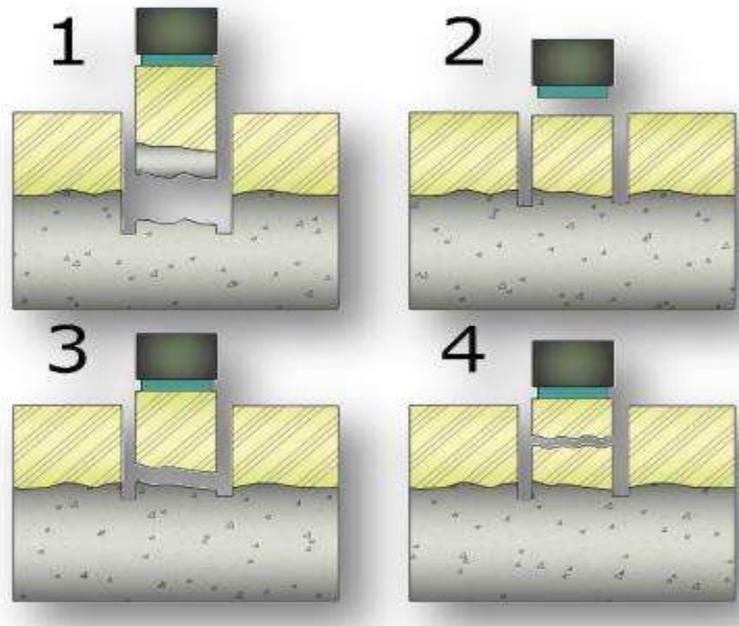


Ilustración 67. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

1. En el sustrato.
2. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero.
3. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
4. En el material de reparación o revestimiento.

Cuando la falla se presenta entre el disco de acero y el epóxico (tipo 2) la prueba se debe realizar nuevamente, ilustración 68 (ASTM C 1583, 2004).



**Ilustración 68.** Falla entre epóxico y el disco metálico. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

Según el resultado obtenido, se le llama fuerza de adherencia cuando se produce el fallo en la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento, ilustración 69, y resistencia a la tensión cuando el fallo se produce en el sustrato o el material de reparación o revestimiento, ilustración 70.



**Ilustración 69.** Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material MK. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)



**Ilustración 70. Falla en el revestimiento. Tipo 4. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**

La fuerza de adherencia o resistencia a la tensión la calcula automáticamente el Equipo Pull Off mediante la división de la carga de tensión de falla y el área del espécimen de prueba (Bernabé Reyes, 2015).



**Ilustración 71. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)**



### 8.9.2.6 RESISTENCIA A LA POLARIZACIÓN LINEAL ( $R_p$ ).

Para el estudio de la velocidad de corrosión se utilizó la técnica electroquímica de resistencia a la polarización lineal ( $R_p$ ).

La resistencia a la polarización ( $R_p$ ) se define como la tangente a la curva de polarización evaluada en el potencial de corrosión o cuando la corriente tiende a cero (Rodríguez Gómez, 2000).

Es uno de las técnicas muy empleadas mediante la cual la velocidad de corrosión es calculada en forma sencilla a partir de la determinación de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ) empleando la ecuación de Stern-Geary, (Arva, Morris, & Duffó, 2002):

$$i_{corr} = \frac{b_a b_c}{2.303 (b_a + b_c)} * \frac{1}{R_p} = \frac{B}{R_p} \quad [24]$$

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303 (b_a + b_c)} \quad [25]$$

**Dónde:**

$b_a$ : Pendiente de Tafel anódica.

$b_c$ : Pendiente de Tafel catódica.

**B**: Es una Constante.

**$R_p$** : Resistencia a la polarización.

**$i_{corr}$** : Densidad corriente de corrosión.

Cuando los electrones circulan por el electrolito encuentran una cierta dificultad al moverse, a esta "dificultad" se le llama *Resistencia a la polarización ( $R_p$ )*. La ecuación de Stern y Geary establece la relación entre la densidad de corriente de



corrosión ( $i_{corr}$ ), es decir, la velocidad de corrosión con la resistencia a la polarización. Así esta ecuación es una analogía de la ley de Ohm, que establece que la intensidad de la corriente eléctrica  $i$  que circula por un elemento resistivo, es directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada  $V$ , e inversamente proporcional a la resistencia del mismo  $R$ , según expresa la ecuación, [26a y26b]:

$$i = \frac{V}{R} \quad \text{ley de ohm Ec. [26a]} \quad i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad \text{ley de Stern y Geary Ec. [26b]}$$

La constante B de la ecuación (29) sirve para pasar de la proporcionalidad a la igualdad y presenta una relación existe entre las pendientes de Tafel. Queda claro que a partir de esta relación, que es indispensable que exista el comportamiento Tafeliano en el sistema electroquímico, para que la ecuación de Stern y Geary pueda ser aplicable.

Por otra parte, se ha dicho que la mayor parte de las pendientes de Tafel oscilan entre valores de 60 a 120 mV/década, de donde se ha optado por hacer una aproximación suponiendo que ambas pendientes tuvieran el segundo valor. Así que se obtiene una  $B = 26$  mV.

Con el paso del tiempo se han desarrollado herramientas experimentales que son más complejas que la  $R_p$ , aportan información mecanística e implican el uso de instrumentación cara y sin embargo, no han conseguido desplazar a esta técnica de un lugar importante en el ámbito de la ingeniería de corrosión (Rodríguez Gómez, 2000).

### **Ensayo electroquímico**

Para el ensayo se utilizó una celda electroquímica que consta de:

- Electrodo de Referencia, calomel de media celda.
- Electrodo de Trabajo, varilla de acero de 7/32" de diámetro.



- Contraelectrodo, placa de acero inoxidable AISI 316.
- Solución salina, al 3.5% de NaCl en masa.
- Potenciostato.

➤ **Electrodo de referencia**

Se utilizó un electrodo de referencia de marca cole parmer. Es un electrodo de media celda tipo calomel recomendado por la norma ASTM G-5 (ASTM-G5, 2004), ilustración 72.

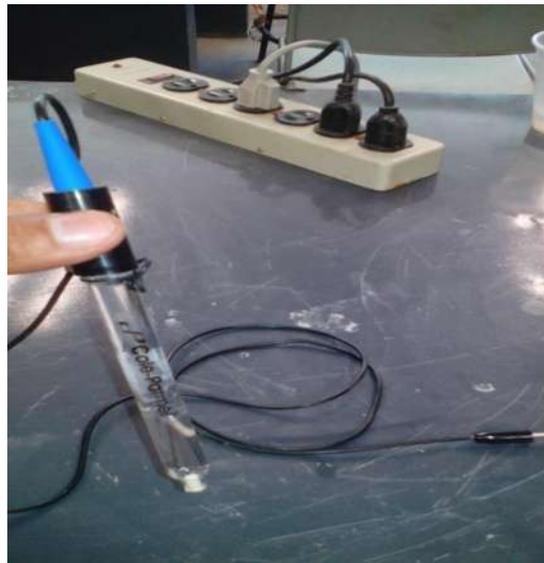


Ilustración 72. Electrodo de referencia de media celda tipo calomel. Fuente: (T. Francisco Martínez)

➤ **Contraelectrodo**

Se utilizó una placa de acero inoxidable con especificación de la norma AISI 316 L/2B, ilustración 73.



Ilustración 73. Placa de acero inoxidable AISI 316L/2B. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

### ➤ Preparación de la solución salina

Para la simulación del medio marino, se preparó una solución salina de NaCl de sodio de 3.5 % en masa con agua destilada.

Las probetas o muestras (Lolipops) que se ocupó para esta investigación estuvieron sin curarse durante 3 años desde su elaboración. Después se realizó la inmersión en la solución salina tal como se muestra en la ilustración 74.



Ilustración 74. Recipientes conteniendo probetas inmersas en cloruro de sodio (NaCl). Fuente: (T. Francisco Martínez)



### ➤ Potenciostato

El Potenciostato ocupado es una marca Gamry modelo 600 tal como se muestra en la ilustración 75.



Ilustración 75. Potenciostato. Fuente: (T. Francisco Martínez)

### Equipo para pruebas

Para la realización de las pruebas se utilizó un equipo Gamry modelo 600, mediante la técnica de resistencia a la polarización lineal (Rpl), todo esto se llevó a cabo como marca las normas de la (ASTM-G3, 2004), (ASTM-G5, 2004) y (ASTM-G59, 2003). Se realizó pruebas húmedas y pruebas secas.

### Pruebas húmedas

Las probetas se sumergían durante una semana en cloruro de sodio (NaCl) antes de la realización de la prueba. La prueba se realizó con las probetas y los electrodos inmersos en la solución de NaCl. El área de acero en contacto fue de  $13.67 \text{ cm}^2$ , y el intervalo de la prueba se realizó de 0.0 V a - 0.02 V, con una velocidad de barrido de 0.05 mV/s; ver la ilustración 76.



Ilustración 76. Realización de la prueba electroquímica. Fuente: (T. Francisco Martínez)

La norma ASTM G-59 recomienda el siguiente esquema para un buen funcionamiento de estudios electroquímicas, ver ilustración 77.

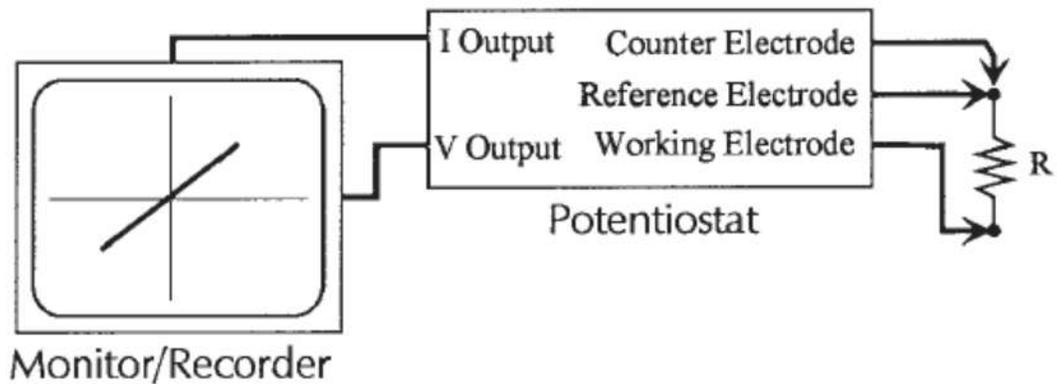


Ilustración 77. Configuración del sistema electroquímico. Fuente: (ASTM-G59, 2003).

### Prueba seca

Las probetas o muestras se mantuvo a tres semanas de secado antes de la realización de la prueba, una vez cumplido el periodo de secado se empezó a realizar la técnica de resistencia a la polarización lineal ( $R_{pl}$ ), para esto se ocupó: las probetas, un electrodo de referencia (marca cole parmer) y un pedazo de esponja de  $1 \text{ cm}^2$ .

La esponja se humedeció y se colocó superficialmente en la probeta (sobre el acero o electrodo de trabajo) y sobre esta el electrodo de referencia. El área de

acero en contacto fue de  $13.67 \text{ cm}^2$ , y el intervalo de la prueba se realizó de  $0.0 \text{ V}$  a  $-0.02 \text{ V}$ , con una velocidad de barrido de  $0.05 \text{ mV/s}$ ; ver la ilustración 78.



Ilustración 78. Realización de la técnica de resistencia a la polarización, prueba en seco. Fuente: (T. Francisco Martínez)

## MÉTODO DE CÁLCULO

Una vez que se haya hecho la técnica de resistencia a la polarización lineal, el equipo arroja una gráfica de intensidad de corriente entre voltaje, después se traza una línea recta sobre la gráfica y se calcula automáticamente (está programada) los valores para tal muestra, ver ilustración 79.

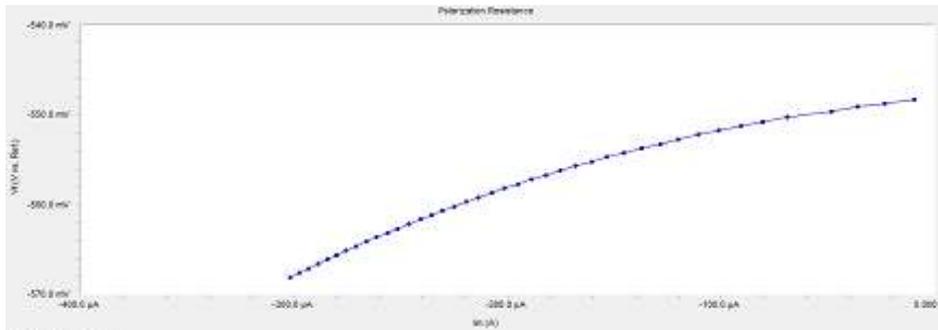


FIG. A

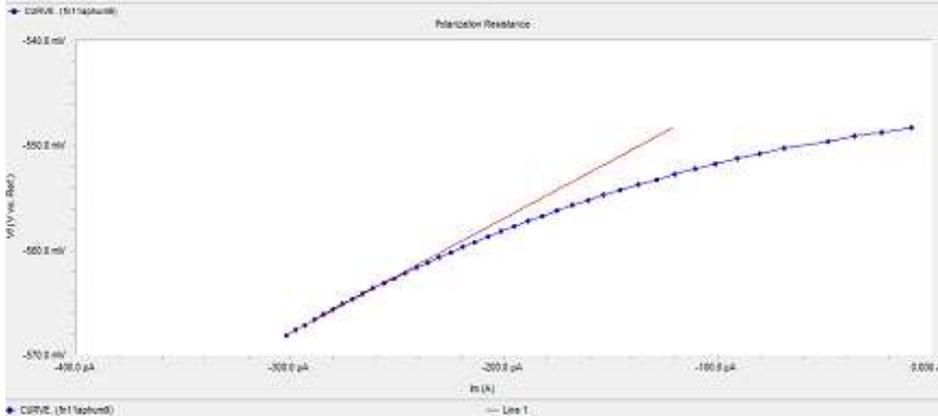


FIG. B

Parameter	Value
Lower Fit Limit	-563.2 mV vs. Ref. (Pt# 30)
Upper Fit Limit	-568.1 mV vs. Ref. (Pt# 40)
Beta A	120.0e-3 V/decade
Beta C	120.0e-3 V/decade
Icorr	237.8 µA
Ecorr	-548.3 mV
Rp	109.6 ohms
Corrosion Rate	108.7 mpy
fn11aphum9.	

FIG. C

Ilustración 79. Los pasos para calcular la resistencia a la polarización, fig. A gráfica que da el equipo, fig. B trazo de la línea recta sobre la gráfica y fig. C muestra el valor calculado para la muestra. Fuente: (T. Francisco Martínez)

El valor de Rp que da el equipo está en las unidades (ohms), para convertirlo en  $\Omega\text{-cm}^2$ , esto será restado por la resistencia del mortero (ohms), el resultado de la diferencia será multiplicada por el área geométrica del electrodo de trabajo (acero de refuerzo). Cabe mencionar que bajas resistencias a la polarización (Rp) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa (Torres, Aperador, Vera, Mejia de Gutierrez, & Ortiz, 2010).



Obtenido el valor de  $R_p$  en ( $\Omega\text{-cm}^2$ ), se procede a calcular la densidad de corriente de corrosión ( $i_{\text{corr}}$ ) mediante la ecuación de Stern y Geary, (1957), ecuación [27] y [28] (ASTM-G59, 2003):

$$i_{\text{corr}} = 10^6 \frac{B}{R_p} \quad [27]$$

$$B = \frac{b_a b_c}{2.303 (b_a + b_c)} \quad [28]$$

Donde  $i_{\text{corr}}$  es la densidad de corriente en  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , **B** es el factor de Stern-Geary que depende de las pendientes de Tafel: anódica ( $b_a$ ) y catódica ( $b_c$ ), en V; **R<sub>p</sub>** es la resistencia a la polarización en  $\text{ohm}\text{-cm}^2$ .

Para el valor de B, toma estos valores (0.026 V y 0.052 V para acero en estado activo y pasivo respectivamente) son los generalmente empleados para calcular la densidad de corriente de corrosión y por ende, la velocidad de corrosión de refuerzos de estructuras de concreto armado (Arva, Morris y Duffo', 2002).

También se puede calcular la densidad de corriente si se cuenta con la corriente total anódico (ASTM-G102, 1999); [29]:

$$i_{\text{corr}} = \frac{I_{\text{CORR}}}{A} \quad [29]$$

Dónde:  $i_{\text{corr}}$  es densidad de corriente de corrosión,  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , **I<sub>CORR</sub>** es corriente total anódico  $\mu\text{A}$ ; **A** es el área expuesta de la muestra,  $\text{cm}^2$ .

La ley de Faraday se puede utilizar para calcular la velocidad de corrosión, ya sea en términos **de tasa de penetración (CR)** o la **tasa de pérdida de masa (MR)**, Ec. [30] y [31]:



$$CR = K_1 \frac{i_{corr}}{\rho} EW \quad [30]$$

Dónde: **CR** es la velocidad de corrosión en términos de tasa de penetración la unidad depende del valor y de la unidad de **K<sub>1</sub>**, **K<sub>1</sub>** es una constante, ver tabla 29 (ASTM G-102), **i<sub>corr</sub>** es la densidad de corriente de corrosión en  $\mu A/cm^2$ ,  **$\rho$**  es la densidad para metales y aleaciones utilizados en pruebas de corrosión está en  $g/cm^3$ , **EW** es el peso equivalente, se considera adimensional.

$$MR = K_2 i_{corr} EW \quad [31]$$

Dónde: **MR** es la velocidad de corrosión en términos de tasa de pérdida de masa, la unidad depende del valor y de unidad de **K<sub>2</sub>**, **K<sub>2</sub>** es una constante, ver tabla 15 (ASTM G-102), **i<sub>corr</sub>** es la densidad de corriente de corrosión en  $\mu A/cm^2$ ; **EW** es el peso equivalente, se considera adimensional.

Tabla 15. Valores de las constantes a utilizarse en la ecuación de velocidad de corrosión. Fuente: (ASTM-G102, 1999)

A				
Penetration Rate Unit (CR)	$i_{cor}$ Unit	$\rho$ Unit	$K_1$	Units of $K_1^A$
mpy	$\mu A/cm^2$	$g/cm^3$	0.1288	mpy $g/\mu A$ cm
mm/yr <sup>B</sup>	$A/m^{2B}$	$kg/m^{3B}$	327.2	mm $kg/A$ m y
mm/yr <sup>B</sup>	$\mu A/cm^2$	$g/cm^3$	$3.27 \times 10^{-3}$	mm $g/\mu A$ cm y
B				
Mass Loss Rate Unit	$i_{cor}$ Unit	$K_2$	Units of $K_2^A$	
$g/m^2d^B$	$A/m^{2B}$	0.8953	$g/Ad$	
mg/dm <sup>2</sup> d (mdd)	$\mu A/cm^2$	0.0895	mg $cm^2/\mu A$ dm <sup>2</sup> d	
mg/dm <sup>2</sup> d (mdd)	$A/m^{2B}$	$8.953 \times 10^{-3}$	mg $m^2/A$ dm <sup>2</sup> d	

<sup>A</sup>EW is assumed to be dimensionless.

<sup>B</sup>SI unit.



### 8.9.3 Levantamiento de grietas

Las probetas que estuvieron inmersos en cloruro de sodio, con el paso del tiempo se presentaron las grietas en los diferentes porcentajes de sustituciones de tales muestras. Para esto se realizó un levantamiento de grietas con un grietometro para conocer el ancho de las grietas y la longitud de cada una. El levantamiento se realizó manualmente, con una mica superpuesta sobre la probeta y sobre la mica se trazó la longitud de la grieta. Se realizó dos veces el levantamiento para ver qué tan rápido aumentaban las grietas.

## 9 RESULTADOS

### 9.1 Caracterización del Material inerte: arena

La tabla 16 muestra los resultados obtenidos de la caracterización de las arenas en las diferentes pruebas de laboratorio; la distribución granulométrica se puede observar en la ilustración 80, junto con los perfiles granulométricos recomendados por la norma ASTM C-778.

Tabla 16. Resultados obtenidos de las pruebas de caracterización realizadas al material inerte. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

Prueba	Arena de Huajúbaro	Arena del Río Lerma
Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)	0.75 %	0.78%
Humedad de Absorción (NMX-C-165-ONNCCE, 2004)	3.73 %	4.04 %
M.V.S.S (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.226 (gr/cm <sup>3</sup> )	0.98 (gr/cm <sup>3</sup> )



M.V.S.V (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.331 (gr/cm <sup>3</sup> )	1.44 (gr/cm <sup>3</sup> )
Sedimentos	Aceptable (<30ml)	Aceptable (<30ml)
Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)	Escala 3 (aceptable)	Escala 3 (aceptable)
Contenido de material fino (pasa malla ASTM No 200) (NMX-C-084-ONNCCE, 2006)	1.98 %	-----
Contenido de Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)	2.43 %	7.5%
Densidad	2.31 (g/cm <sup>3</sup> )	2.4 (g/cm <sup>3</sup> )
Módulo de Finura (<2.3-3.1>)	2.42 (mediana)	2.03 (fina)
Gravedad Específica	2.36	2.48

Los áridos contribuyen a la estabilidad volumétrica, la resistencia y la economía del concreto (Paredes Cárdenas, 2016).

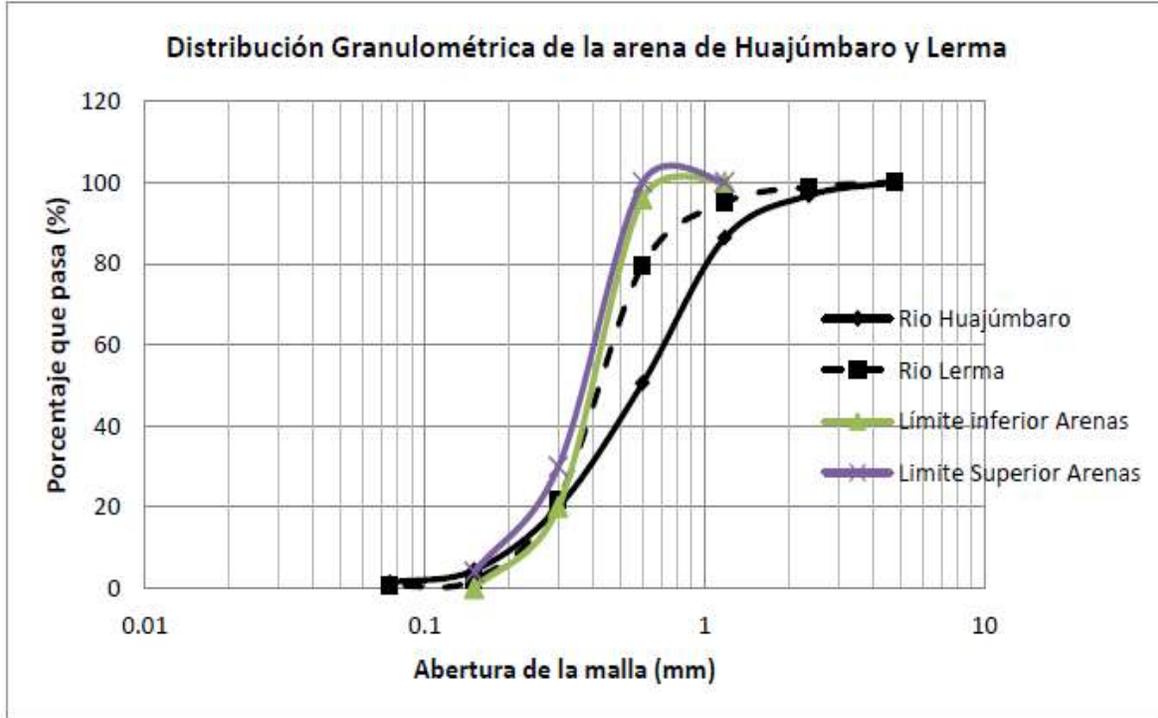


Ilustración 80. Distribución Granulométrica de las arenas empleadas en la experimentación: Huajúbaro y Lerma; límites de arenas para morteros ASTM C778-02. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

## 9.2 Caracterización del agua de mezclado

Los resultados del agua empleada en las mezclas se presentan en la tabla 17.

Tabla 17 Resultados del análisis del agua potable utilizada para la elaboración de las mezclas de mortero. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

**Muestra:** Agua potable de la Red de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

**Sitio de muestreo:** Laboratorio de Materiales

**Fecha de muestreo:** 18 de mayo de 2014

**Norma de referencia:** NMX-C-122-ONNCCE-2004

Parámetro	Resultado	Límite Permisible (NMX-C-122-ONNCCE-2004)	Unidades	Método Utilizado
pH	7.86	>6	U pH	NMX-AA-008-SCFI-2000
Temperatura	29.8	-----	°C	NMX-AA-007-SCFI-2000
Conductividad	456	-----	µs/cm	NMX-AA-093-SCFI-



eléctrica				2000
<b>Sólidos Disueltos Totales</b>	352	3500	mg/L	NMX-AA-034-SCFI-2001
<b>Oxígeno Disuelto</b>	3.37	-----	mg/L	NMX-AA-012-SCFI-2001
<b>Sulfatos</b>	5	3000	mg/L	NMX-AA-074-1981
<b>Cloruros</b>	13.36	400	mg/L	NMX-AA-073-SCFI-2001
<b>Dureza Cálcica</b>	21	-----	mg/L CaCO <sub>3</sub>	Volumétrico
<b>Sales de Magnesio</b>	5	100	mg/L	Volumétrico

Los resultados obtenidos en este análisis muestran que el agua es apropiada. El agua no debe contener componentes dañinos que afecten a las propiedades del concreto o a la protección frente a la corrosión (Paredes Cárdenas, 2016).

### 9.3 Resultados de fluorescencia de Rayos X

En la tabla 18 se muestra el análisis químico cualitativo y cuantitativo de los materiales en estudio, excepto el material de sustitución de fibra de nopal (FN), no fue posible hacer el análisis de la composición química ya que las pérdidas por calcinación de la misma fueron del 88%. La composición química de la perlita natural (PN) en la cual el 73.3% son compuesto deseado para la actividad puzolánica. Según la ASTM C 618, se clasifica como una puzolana clase N. La CCV presenta un 48.8% de compuestos desecados para la actividad puzolánica y unas pérdidas por calcinación un poco altas, lo es lógico considerando el origen de dicha ceniza. Según la ASTM C 618, esta ceniza no se puede clasificar en ninguno de los tres tipos de puzolanas. La ceniza elaboración de ladrillos (CEL) tiene un 41.4% de compuestos encargados de desarrollar la actividad puzolánica, y al igual que la CCV no se le puede clasificar por ASTM (Arreola Sánchez, 2013).



Tabla 18 Composición química en porcentaje de los materiales utilizados en las sustituciones, obtenidas por fluorescencia de rayos X, incluyendo el cemento CPC 30R RS. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

componentes	MATERIALES DE SUSTITUCIÓN			CPC 30R RS
	PN	CCV	CEL	
	%	%	%	%
SiO <sub>2</sub>	72.197	27	28.18	23.88
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.115	12.71	7.188	4.997
TiO <sub>2</sub>	13.58	1	0.61	0.217
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.011	9.131	5.967	2.972
MgO	0.538	2.132	1.55	0.88
MnO	0.073	0.196	0.441	0.096
CaO	1.052	25.22	29.73	54.6
Na <sub>2</sub> O	3.216	0.58	0.136	1.23
K <sub>2</sub> O	4.285	1.945	1.16	1.666
SO <sub>3</sub>	0	0.685	2.15	3.791
ZrO <sub>2</sub>	0	0	0	0
Cl	0	0	0	0
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0	0	0	0
SrO	0	0.216	0.062	0.061
ZnO	0	0	0.084	0.076
PXC/PPI	3.99	19.19	12.54	5.54
BaO	0	0	0	0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.025	0	10.21	0
SUMA	100.082	100.005	100.008	100.006

## 9.4 Análisis de partícula de las cenizas de sustitución

### 9.4.1 Tamaño de la partícula

La tabla 19 muestra los tamaños de partículas de los materiales utilizados como sustitutos de CPC en la elaboración de morteros. Para el sustituto de fibra de nopal (FN), no se le realizó ninguna prueba para determinar su tamaño o distribución de partículas, se empleó tal cual es proporcionado por el fabricante (Productos CU-CU). Respecto al tamaño de partícula de la perlita natural (PN), los datos proporcionados por el fabricante son del orden de tamaños de 45 $\mu$ m (Arreola Sánchez, 2013).



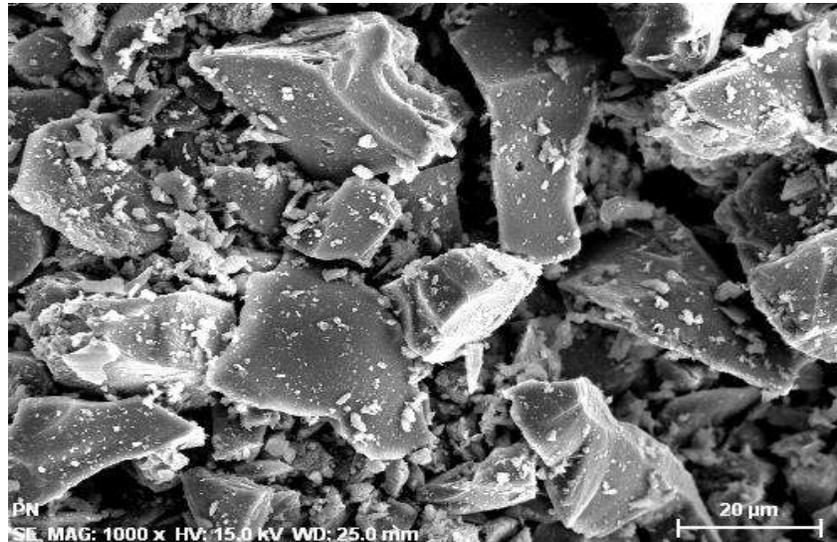
En referencia a los resultados del CPC 30 R-RS, se observa que los materiales con tamaño de partículas mayores son el CCV y CEL. Los resultados del coeficiente de uniformidad (Cu) obtenidos de las distribuciones granulométricas, indican una buena uniformidad para el CCV, pues el valor es menor de 4 (presenta partículas en el mismo rango de tamaños), esto haciendo analogía con el análisis de suelos (M. Das, 2001); (Bernabé Reyes, 2015).

**Tabla 19. Medidas de tamaño de partícula de los materiales de sustitución y el CPC 30R-RS. Fuente: (T. Francisco Martínez)**

Tamaño de partículas	CCV	CEL	CPC-30R RS
<b>D10 (Diámetro efectivo) (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	10	10	5.3
<b>D30 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	14	40	9
<b>D50 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	18	65	16
<b>D60 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	21	75	27
<b>D90 (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	40	130	230
<b>Cu</b>	2.1	7.5	5.094
<b>Cc</b>	0.933	2.133	0.566

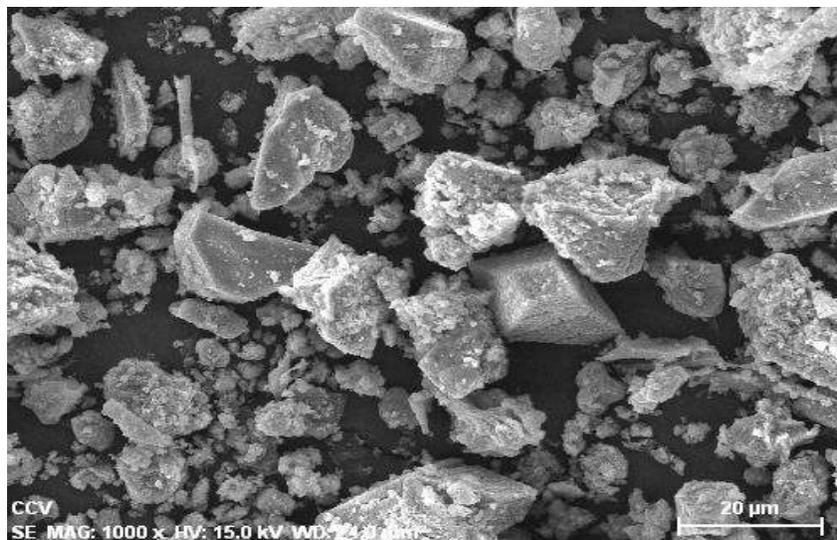
#### 9.4.2 Morfología de partículas

En la ilustración 81 se aprecia que la forma de partícula de la perlita natural (PN) es angulosa, parecida a la del cemento portland, solo que de un tamaño mayor.



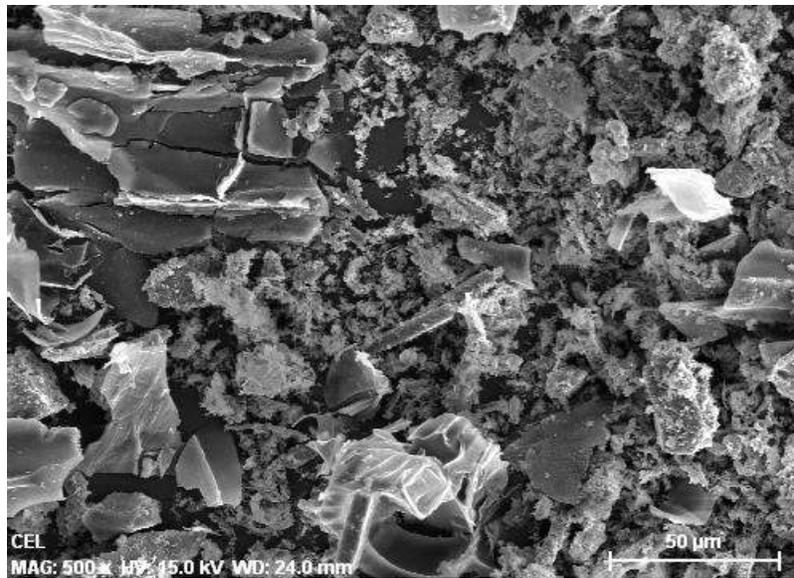
**Ilustración 81. Forma de partícula de la PN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)**

En la ilustración 82 se observa que la ceniza de carbón vegetal (CCV) tiene una forma de partícula angular, muy semejante a la perlita natural (PN) y al carbón mineral (CM).



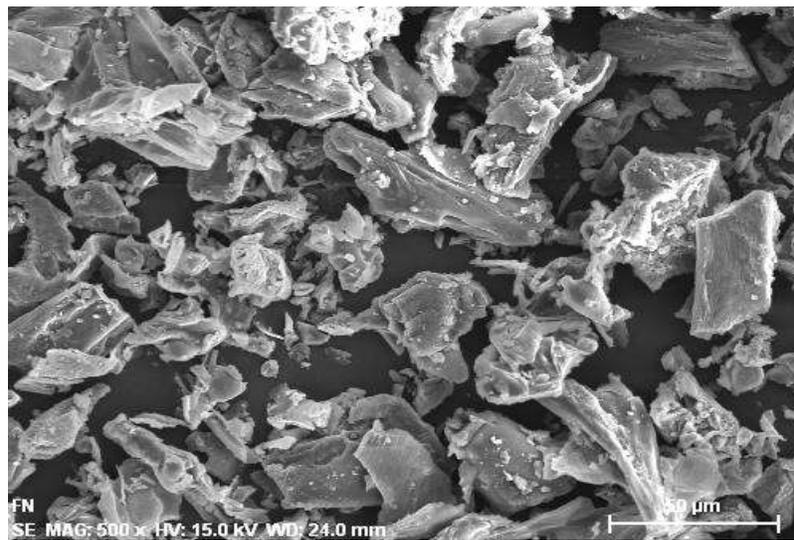
**Ilustración 82. Forma de partícula de la CCV. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)**

Las formas de las partículas de la ceniza elaboración de ladrillo (CEL) son un poco, son una mezcla entre partículas alargadas y laminadas, lo cual nos permite suponer una gran área superficial y por ende buena reactividad, ver ilustración 83.



**Ilustración 83. Forma de las partículas de la CEL. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)**

La forma de las partículas de la fibra de nopal (FN) es muy parecida a la ceniza de bagazo de caña (CBC) y ceniza elaboración de ladrillo (CEL) ya que los tres materiales son de origen vegetal, es por esto que presentan fibras de formas alargadas, ver ilustración 84.



**Ilustración 84. Forma de partícula de la FN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)**



## 9.5 Tiempos de fraguado y Consistencia Normal

En la tabla 20 se encuentran los resultados de consistencia normal y tiempos de fraguado. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales, algunas adiciones más que otras, tal es el caso de la fibra de nopal (FN). En los tiempos de fraguado se observó que en todos los materiales no se cumplió con los tiempos que se especifica en la norma del cemento (NMX-C-414-0NNCCE, 2004), (Arguello Hernández, 2012).

Tabla 20. Resultados de tiempo de fraguado y consistencia normal de las pastas de cemento con sustituciones de PN, CCV, CEL, FN y sin sustitución. Fuente: (Arguello Hernández, 2012)

MATERIALES DE SUSTITUCIÓN	% DE SUSTITUCIÓN	CONSISTENCIA NORMAL (%)	TIEMPO DE FRAGUADO	
			T. DE FRAGUADO INICIAL (MIN)	T. DE FRAGUADO FINAL (MIN)
TESTIGO	0%	36	263	540
PN	5%	33.33	490	730
	10%	35.93	415	732
	15%	39.22	435	738
	20%	40.83	495	764
	30%	46.67	497	862
CCV	5%	35.79	546	773
	10%	39.63	551	757
	15%	43.53	397	758
	20%	47.92	333	670
	30%	59.05	359	754
CEL	5%	36.84	529	767
	10%	45.93	422	728
	15%	54.9	395	781
	20%	61.25	356	768
	30%	78.57	184	738
FN	1%	34.66	540	2040
	1.5%	35	450	840



La norma NMX-C-021 especifica las condiciones permisibles para los tiempos de fraguado, tabla 21.

Tabla 21 Especificaciones físicas que deben cumplir los morteros (NMX-C-021-ONNCCE, 2004).

Determinación de Tiempo de Fraguado	Condición	Especificación
T. de fraguado inicial (min)	Mínimo	90
T. de fraguado final (min)	Máximo	1080

## 9.6 Pruebas Físico-mecánicas

### 9.6.1 Índice de Actividad Puzolánica

En las ilustraciones 85, 86, 87 y 88 se muestran los resultados del índice de actividad puzolánico (IAP) de las sustituciones de PN, CCV, CEL y FN. El (IAP) para la PN de 5% de sustitución es el único porcentaje que se mantiene a lo largo del tiempo y sobre el testigo. En las primeras edades se observa un AIP en todas las sustituciones de CCV y al incrementar la edad de las pruebas decrece el (IAP), quedando solo el porcentaje que realmente tienen reacción puzolánica por encima del testigo, siendo el 20% para CCV. En el caso de la CEL los porcentajes de 5% y 15% son los que tienen un (IAP) ligeramente superior al 100%. La FN muestra un comportamiento del IAP constante con un incremento brusco a los 90 días de edad, para la FN los porcentajes de 0.5, 1 y 1.5, los cuales muestran un IAP del 100% a los 360 días (Arreola, 2013). El porcentaje de índice de actividad puzolánica para los 4 materiales de sustitución se encuentra por encima de 75%, límite inferior establecido en la norma ASTM C618. Por lo tanto los materiales en estudio son adecuados para realizar sustituciones de cemento en los morteros (Bernabé Reyes, 2015).

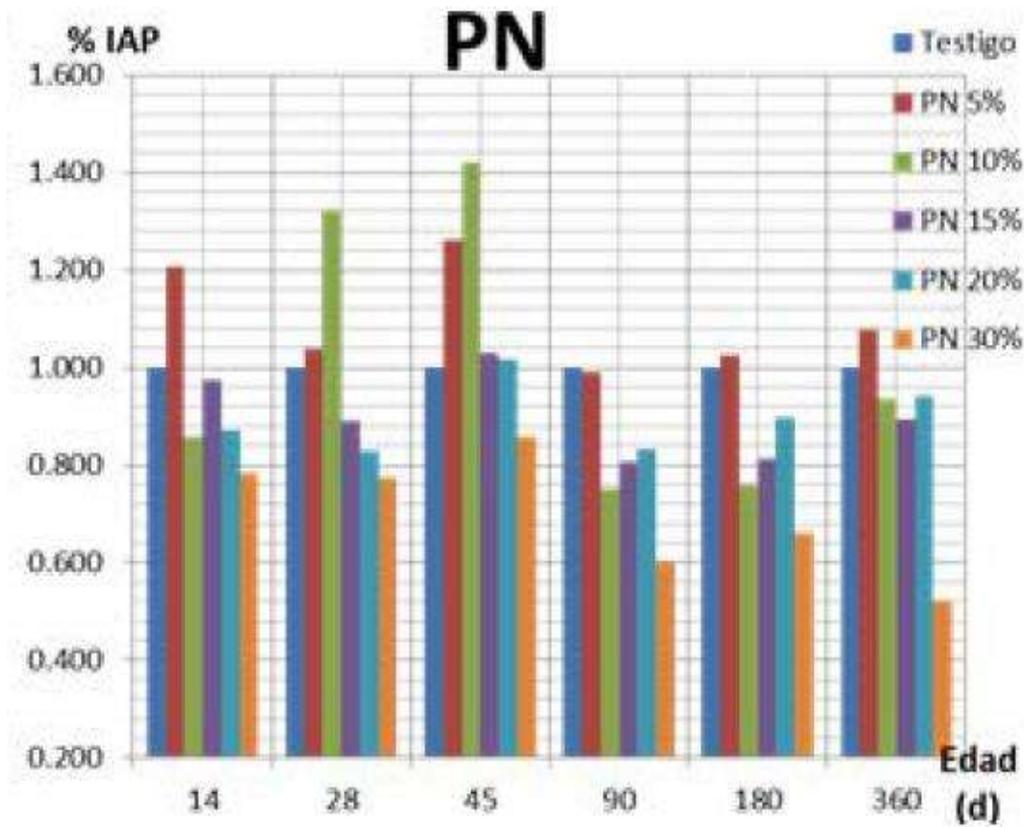


Ilustración 85. Gráfica del IAP de la PN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

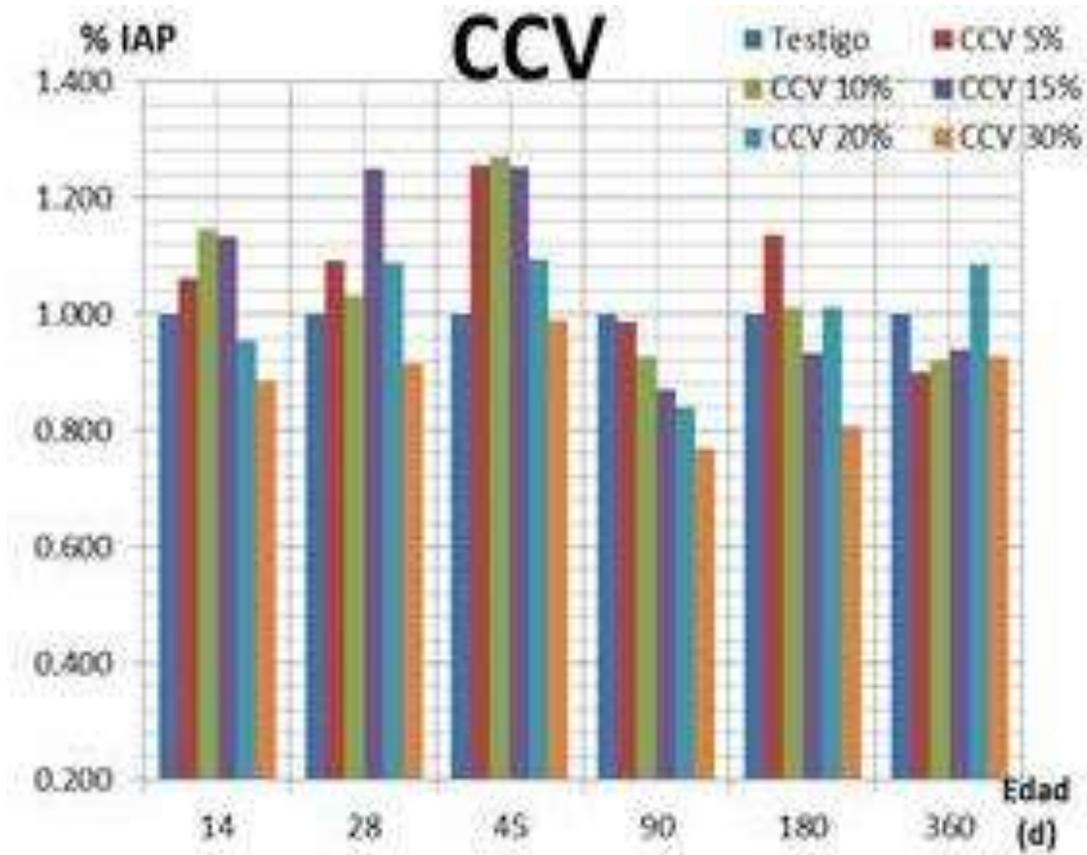


Ilustración 86. Gráfica del IAP de la CCV. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

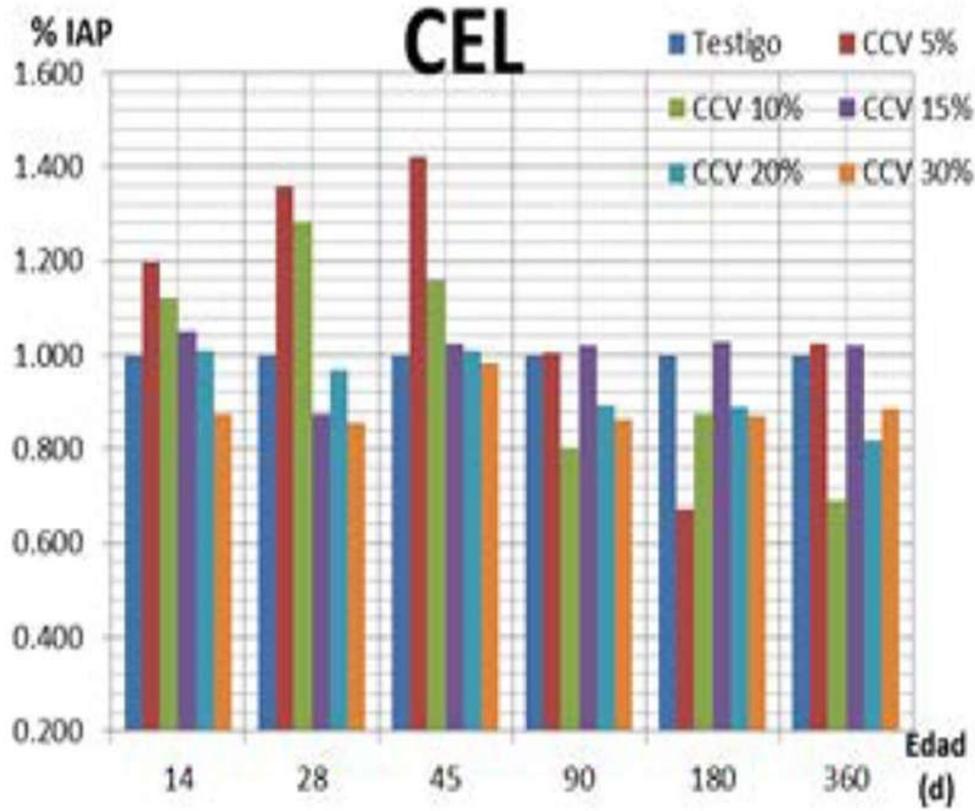


Ilustración 87. Gráfica del IAP de la CEL. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

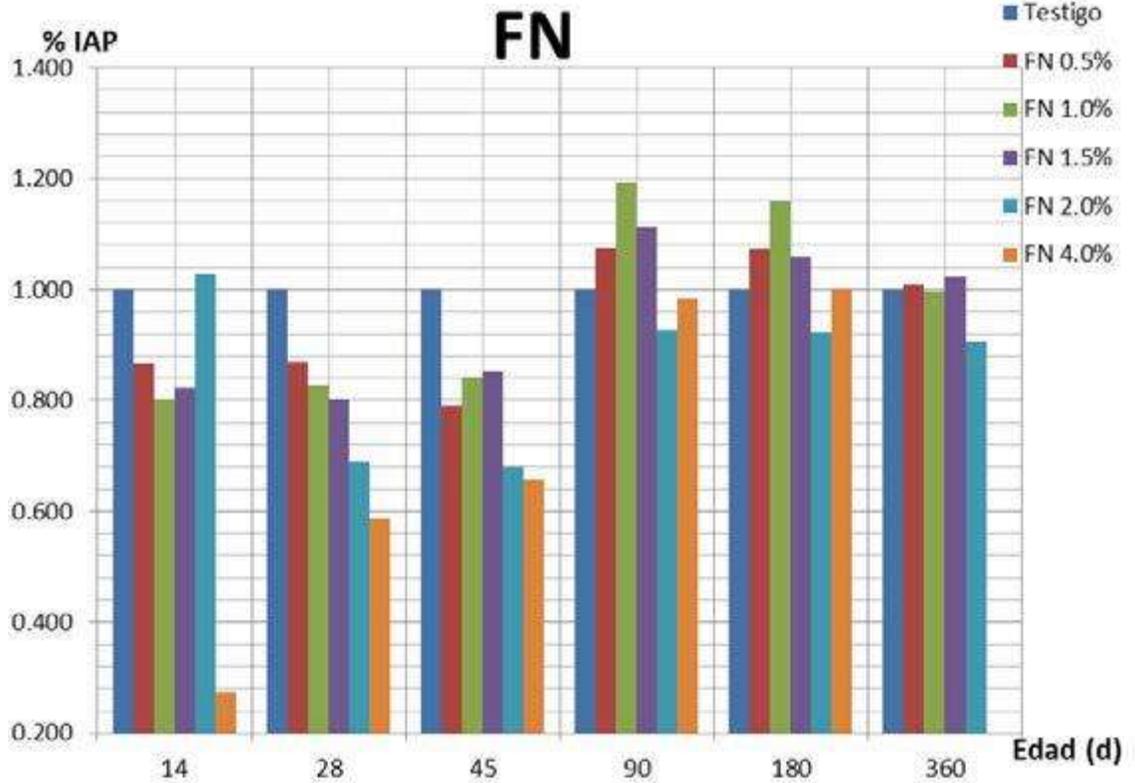


Ilustración 88. Gráfica del IAP de la FN. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

### 9.6.2 Resistencia a compresión en cubos

En las ilustraciones 89, 90, 91 y 92 se muestran los resultados de la prueba a compresión en los cubos de mortero de cemento con las sustituciones de PN, CCV, CEL y FN. Para el caso de PN solo el 5% de sustitución logra desarrollar una resistencia ligeramente superior al testigo, siendo esta más notoria a la edad de 360 días, en la CCV solo el 20% de sustitución supera el testigo y solo a la edad de 360 días, para la CEL solo el 15% de sustitución muestra un comportamiento muy similar al testigo y ligeramente superior al mismo a partir de la edad de 45 días ; el comportamiento para la fibra de nopal (FN) es superior al testigo para las sustituciones de 0.5 al 1.5% en edades de 90 y 180 días pero mostrándose con la misma resistencia a la edad de 360 días (Arreola Sánchez, 2013).

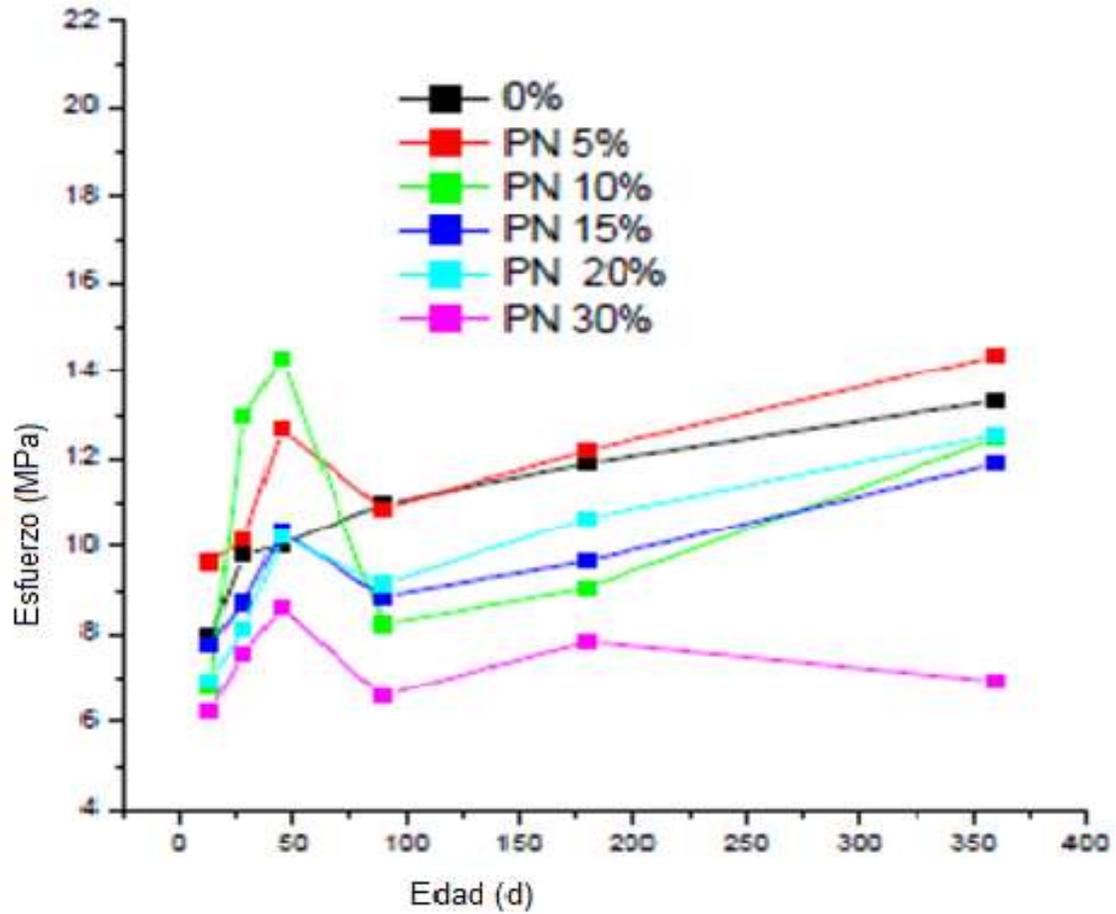


Ilustración 89. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con PN a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

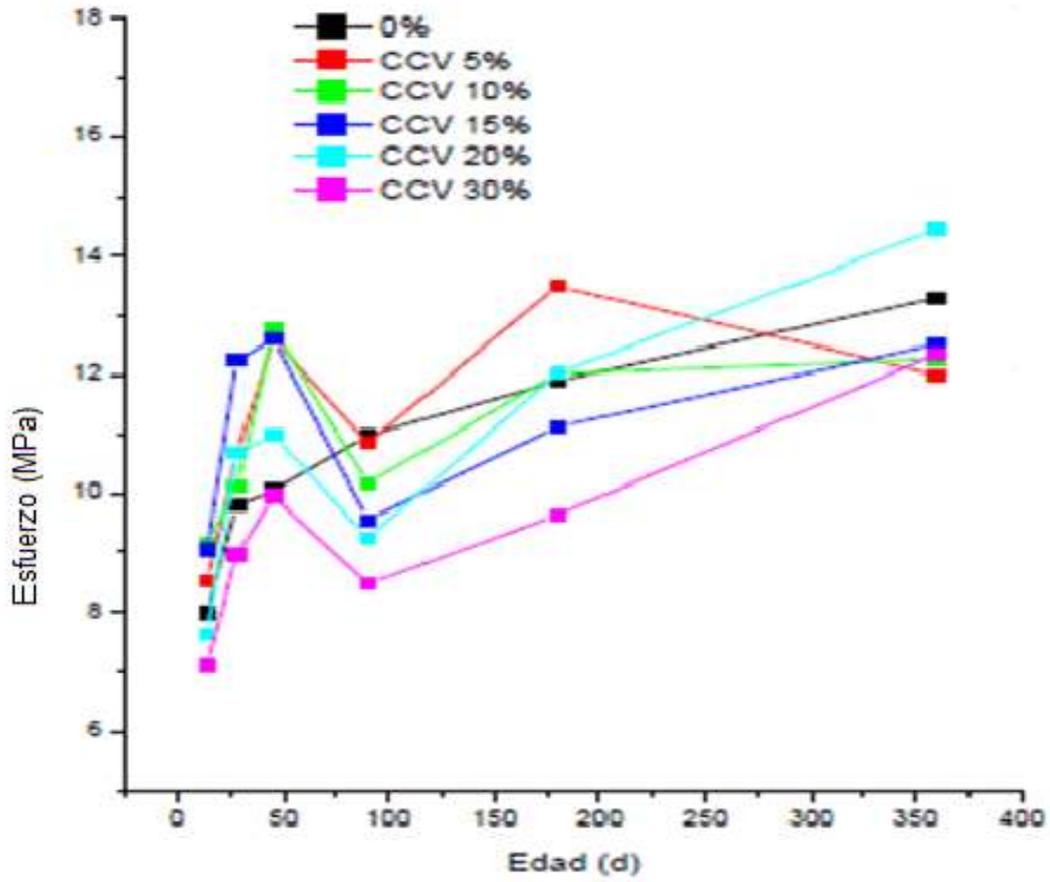


Ilustración 90. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con CCV a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

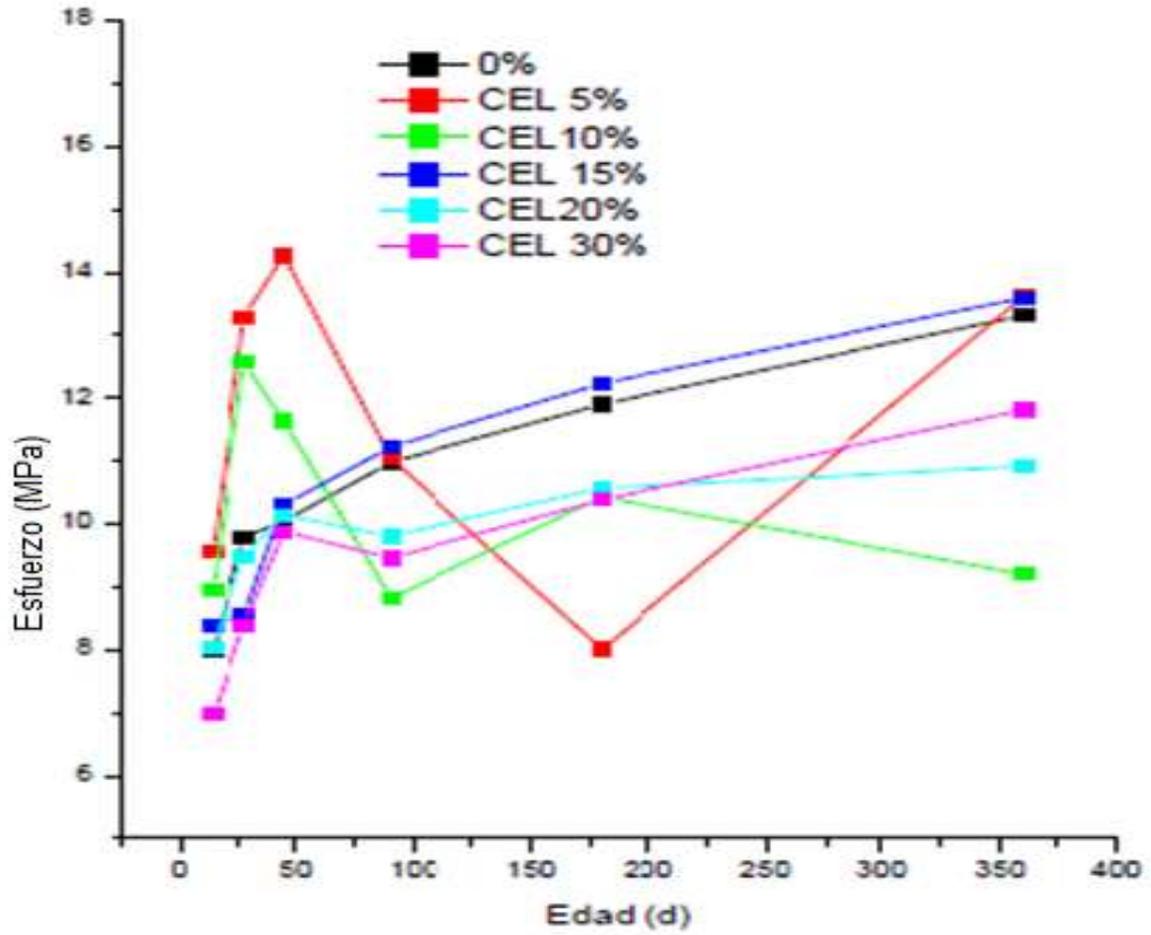


Ilustración 91. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con CEL a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

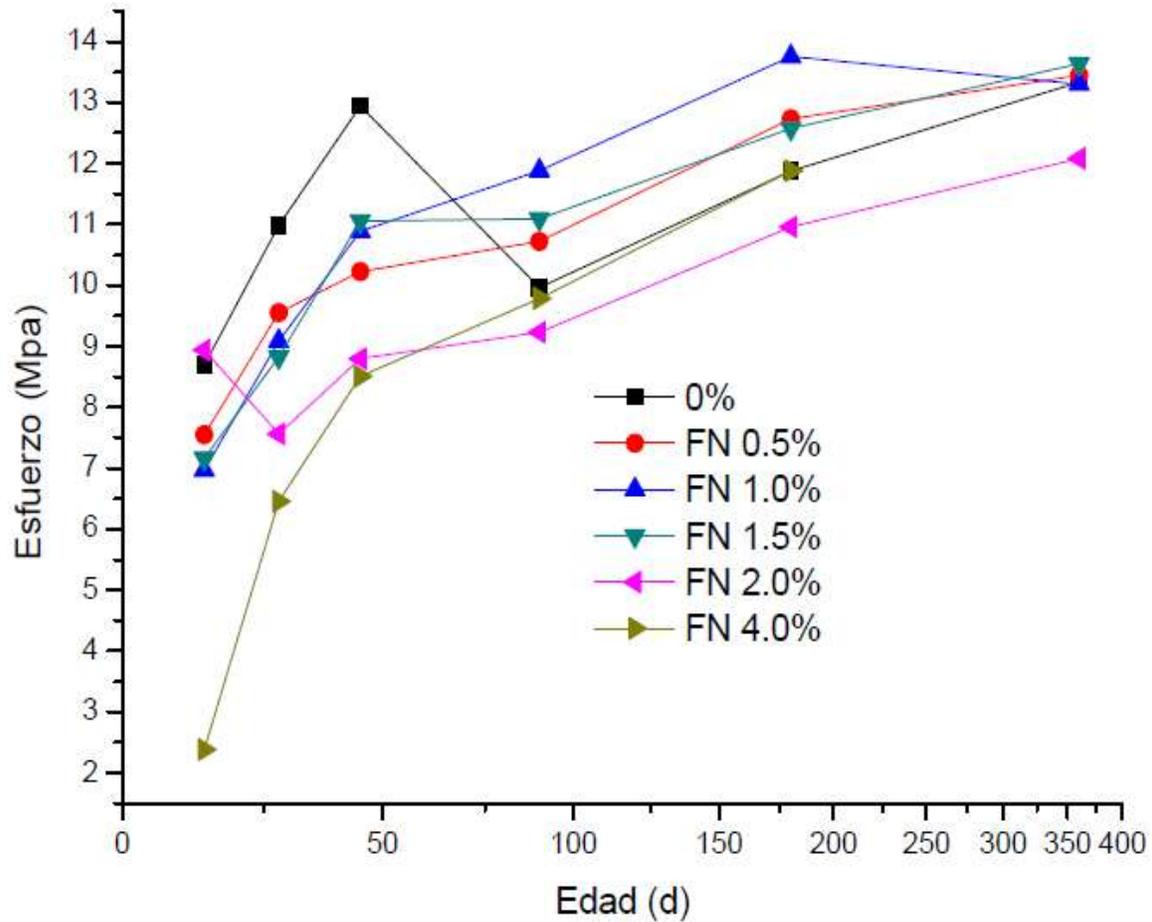


Ilustración 92. Gráfica de resistencia a compresión en cubos de morteros de cemento parcialmente sustituido con FN a edades de 14,28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

### 9.6.3 Resistencia a la Flexión

En las ilustraciones 93, 94, 95 y 96 se muestran los resultados de la prueba a flexión en prismas de mortero de cemento con las sustituciones de PN, CCV, CEL y FN. La PN supera el testigo solo en los porcentajes de 5 y 10% y solo a la edad de 360 días, en la CCV el comportamiento es inferior en casi todos los porcentajes pero a la edad de 360 días el comportamiento general es prácticamente igual al testigo, siendo los porcentajes de 15 y 20% los que alcanzaron la mayor resistencia; en el caso de la CEL la variabilidad es notoria en casi todos los porcentajes (excepto para el 15%) y se ubica por debajo del testigo en todas las edades de prueba, salvo el 15% que lo iguala a 360 días y el 20% lo supera a la



misma edad; la FN muestra mucha variabilidad de resistencia y en general un comportamiento inferior al testigo a edades tempranas, mismo que se incrementa en edades de 180 y 360 días para los porcentajes de 1 y 1.5 de sustitución, aunque aún falta probar a la edad de 360 días el porcentaje de 4% (Arreola Sánchez, 2013).

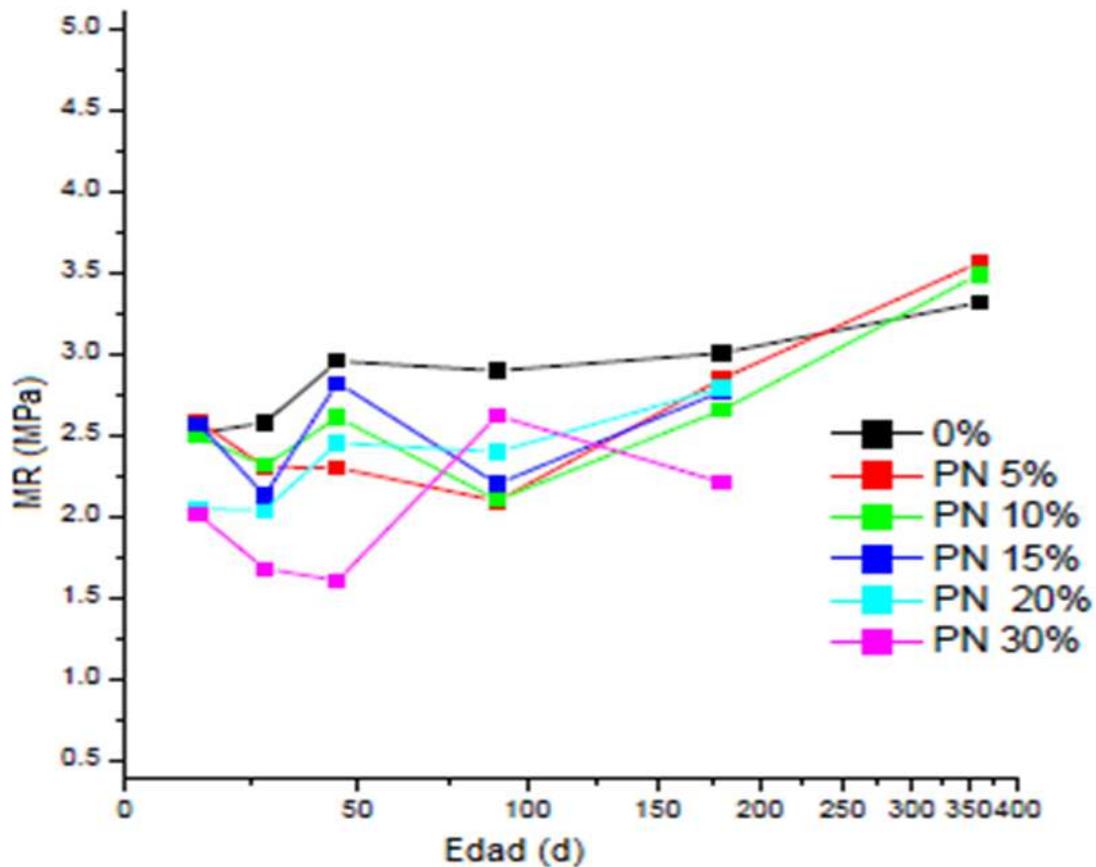


Ilustración 93. Gráfica de resistencia a flexión en morteros de cemento parcialmente sustituido con PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

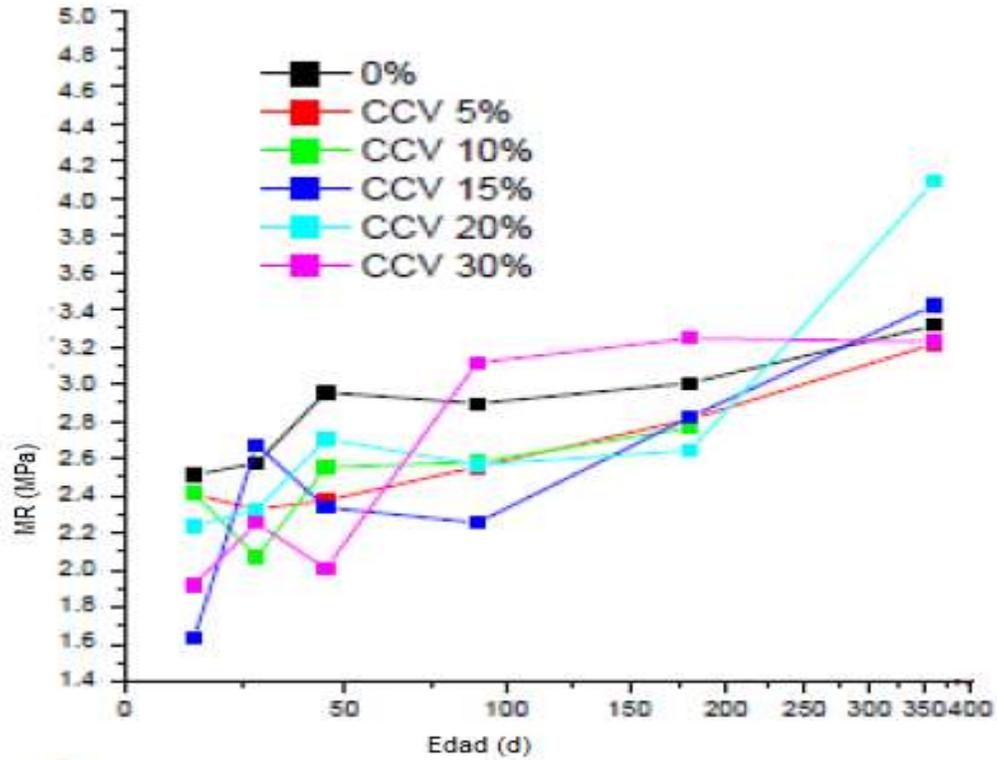


Ilustración 94. Gráfica de resistencia a flexión en prismas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

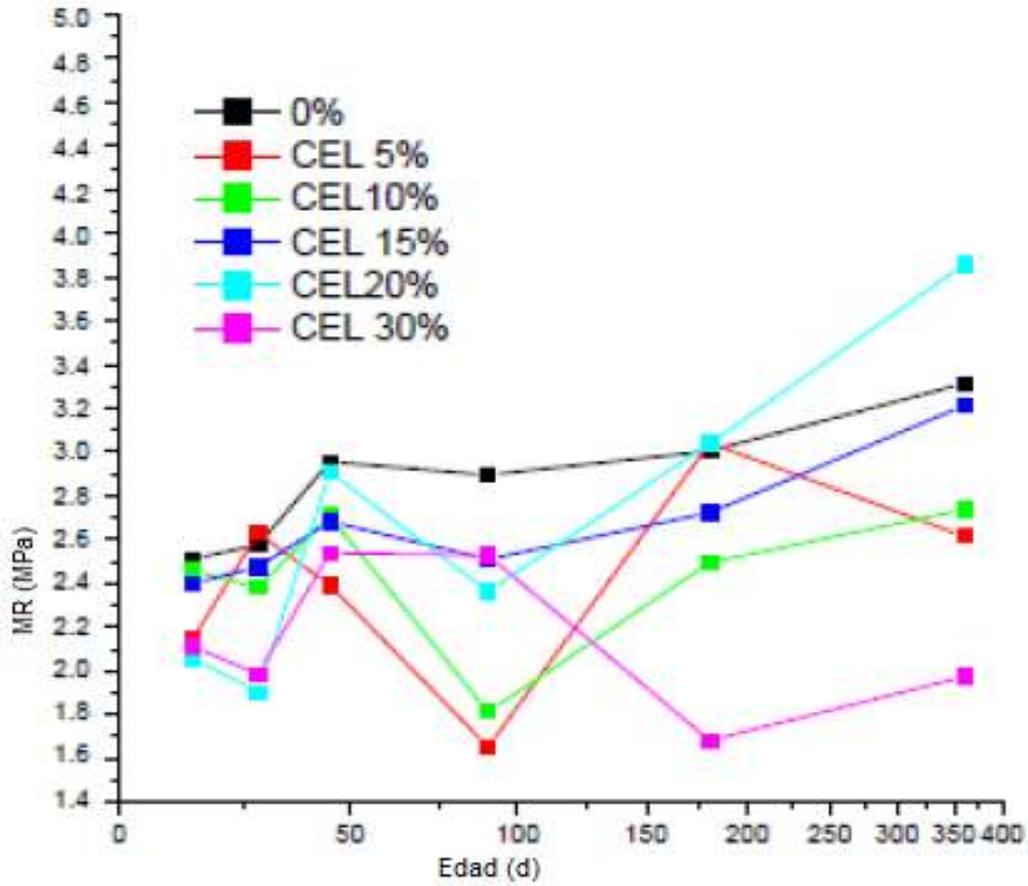


Ilustración 95. Gráfica de resistencia a flexión en prismas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

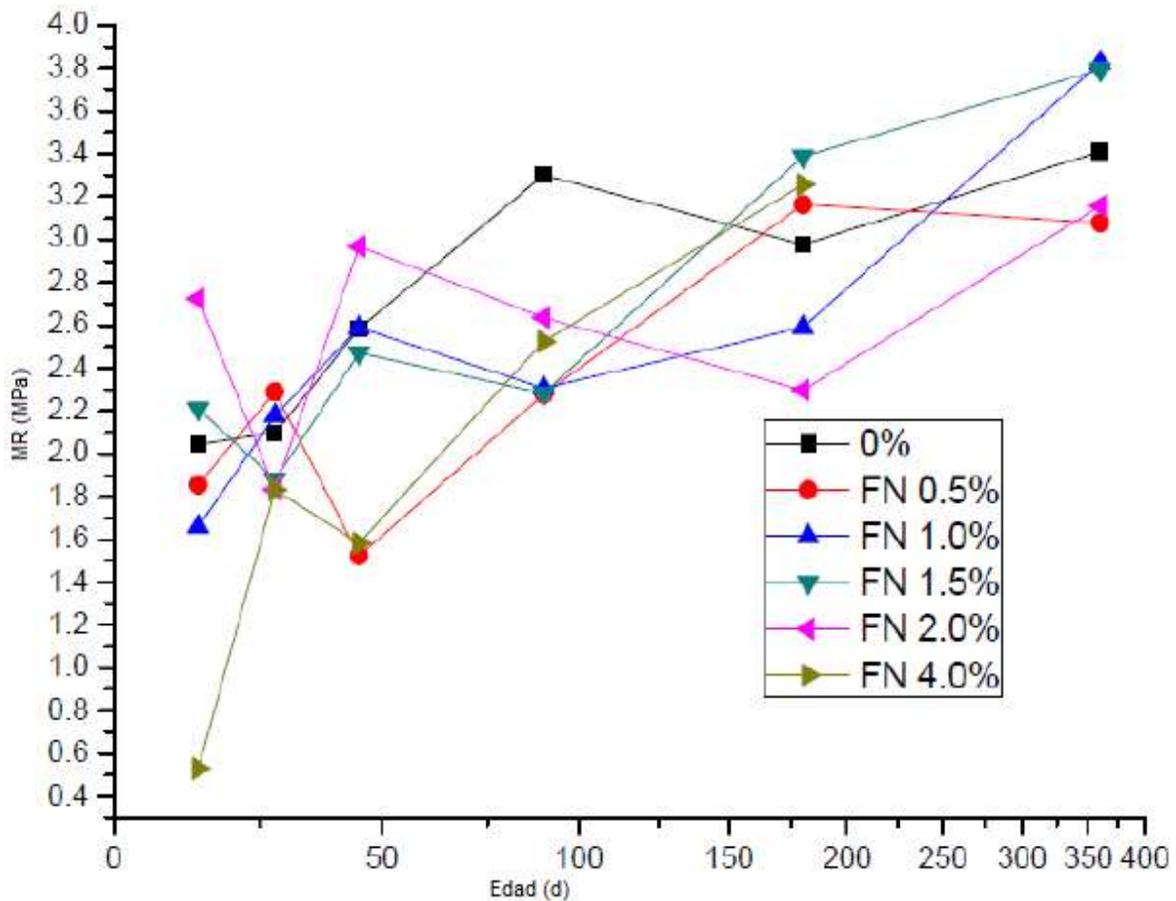


Ilustración 96. Gráfica de resistencia a flexión en prismas de morteros de cemento parcialmente sustituido con FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

#### 9.6.4 Resistencia a la Tensión directa en briquetas

En las ilustraciones 97, 98, 99 y 100 se muestran los resultados de la prueba a tensión en briquetas de mortero de cemento con las sustituciones de PN, CCV, CEL y FN. La perlita natural tuvo un desempeño inferior al testigo y mucha variabilidad de resistencia, el porcentaje de sustitución que más o menos tiene un buen comportamiento fue PN 20%, aunque el de 10%, 15% y 30% superan al testigo a la edad de 360 días. La ceniza de carbón vegetal CCV muestra mucha variabilidad de resistencia y el porcentaje que mejor se comportó fue el CCV 15%, también la de 20% en edades de 45 a 360 días fue muy bueno. Para el caso de



CEL la variabilidad disminuye notablemente y dos de sus porcentajes se comporta de forma muy similar al testigo en todas las edades, dicho porcentajes son el CEL 10% y 15%, aunque la 15 es más mejor todavía. El comportamiento de la FN a tensión, en general se tuvo un comportamiento similar al testigo con tres de sus porcentajes ligeramente por encima del testigo, siendo el FN 1 y 1.5% los que superan al testigo y también el 2% solo que aún falta de probar este porcentaje a 360 días de edad (Arreola Sánchez, 2013).

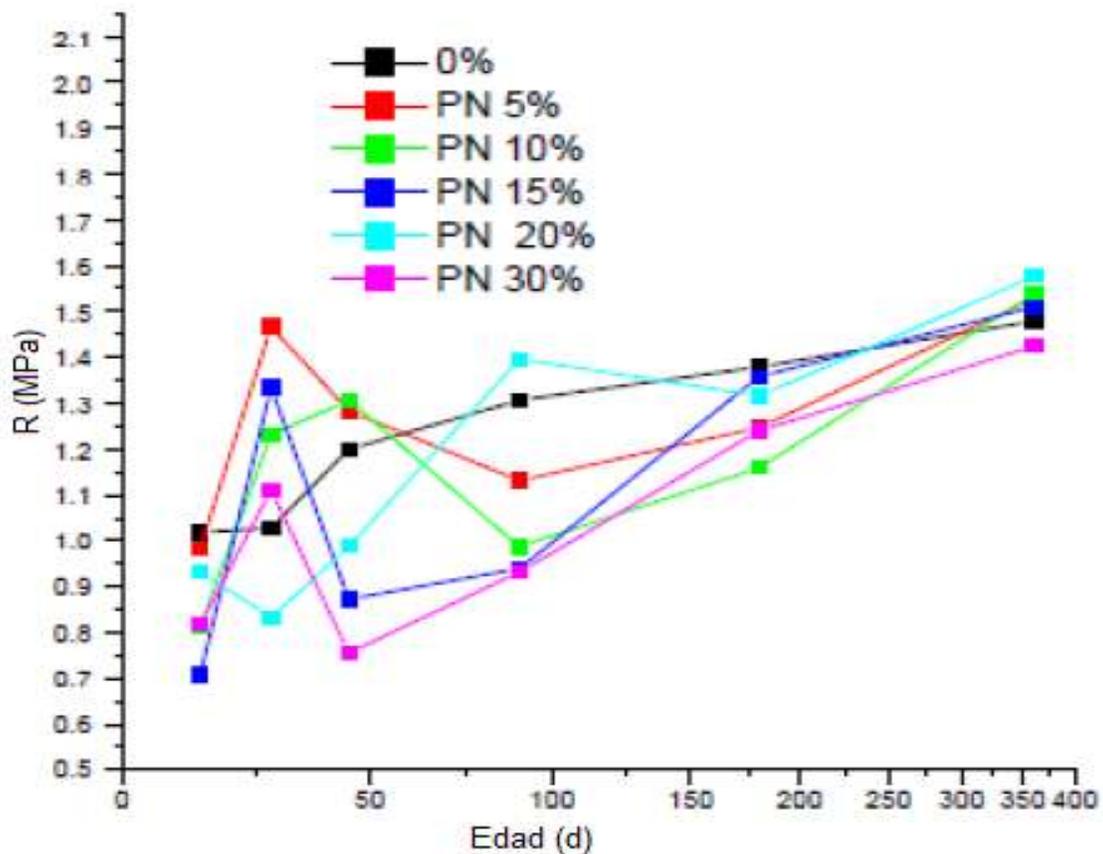


Ilustración 97. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

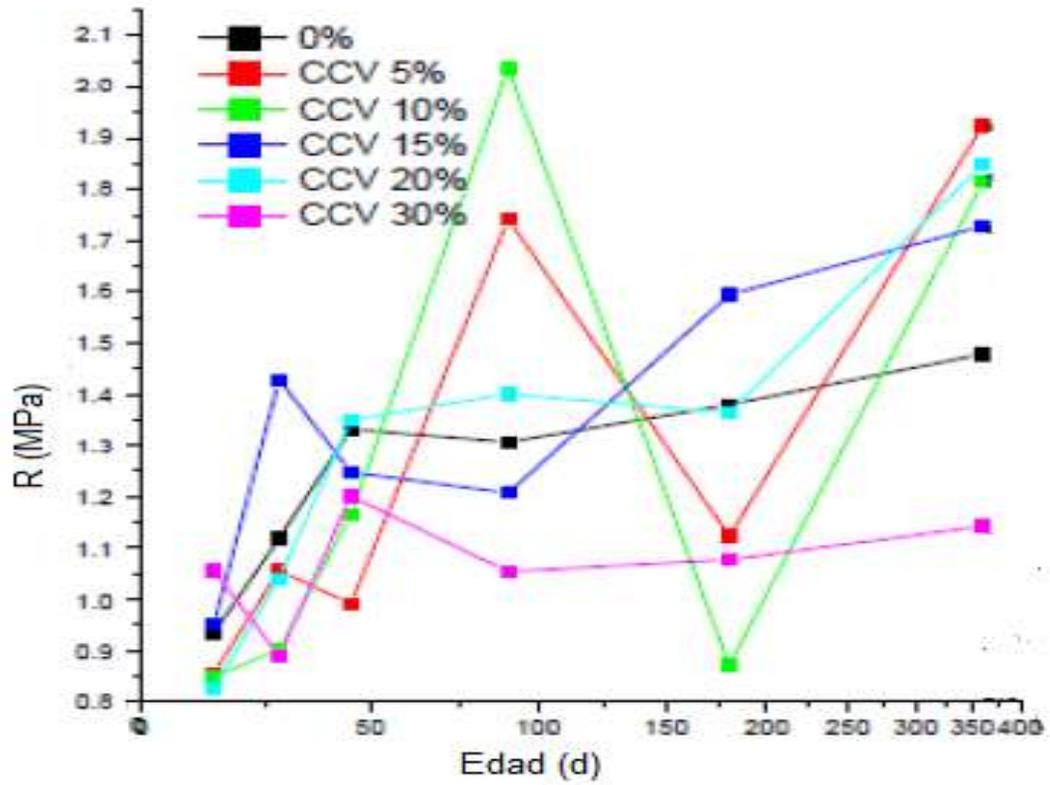


Ilustración 98. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

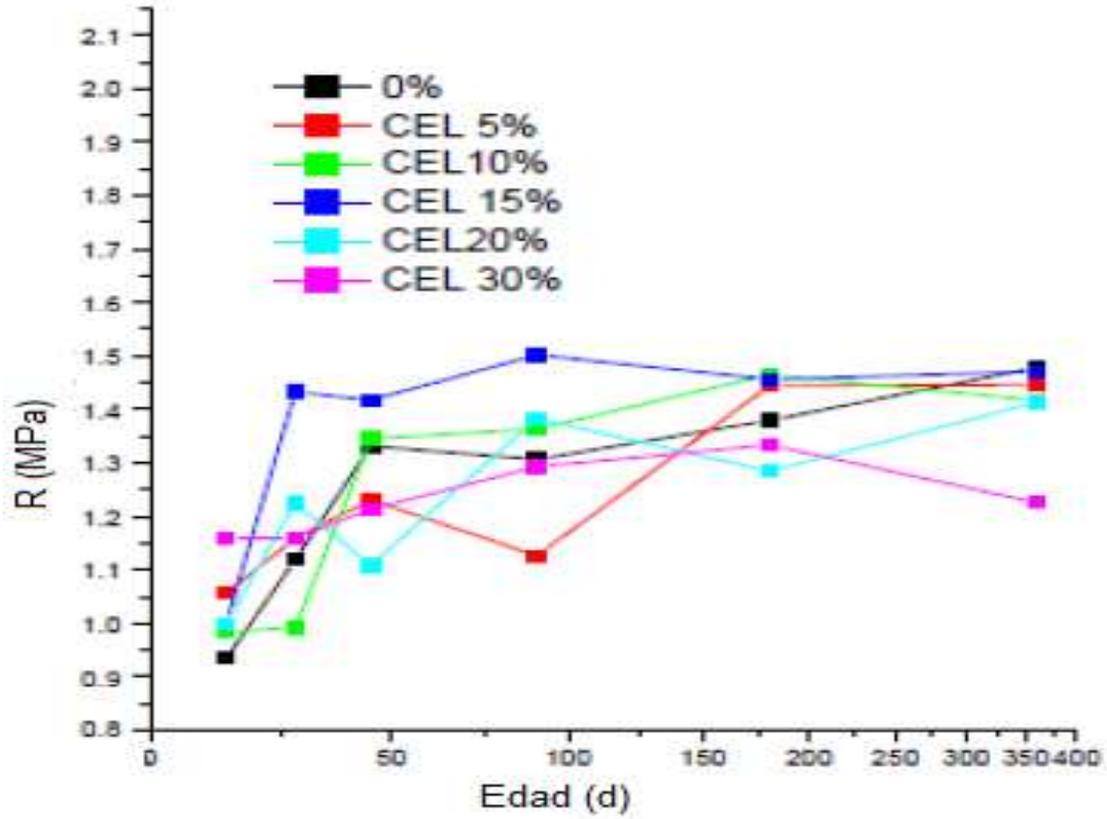


Ilustración 99. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

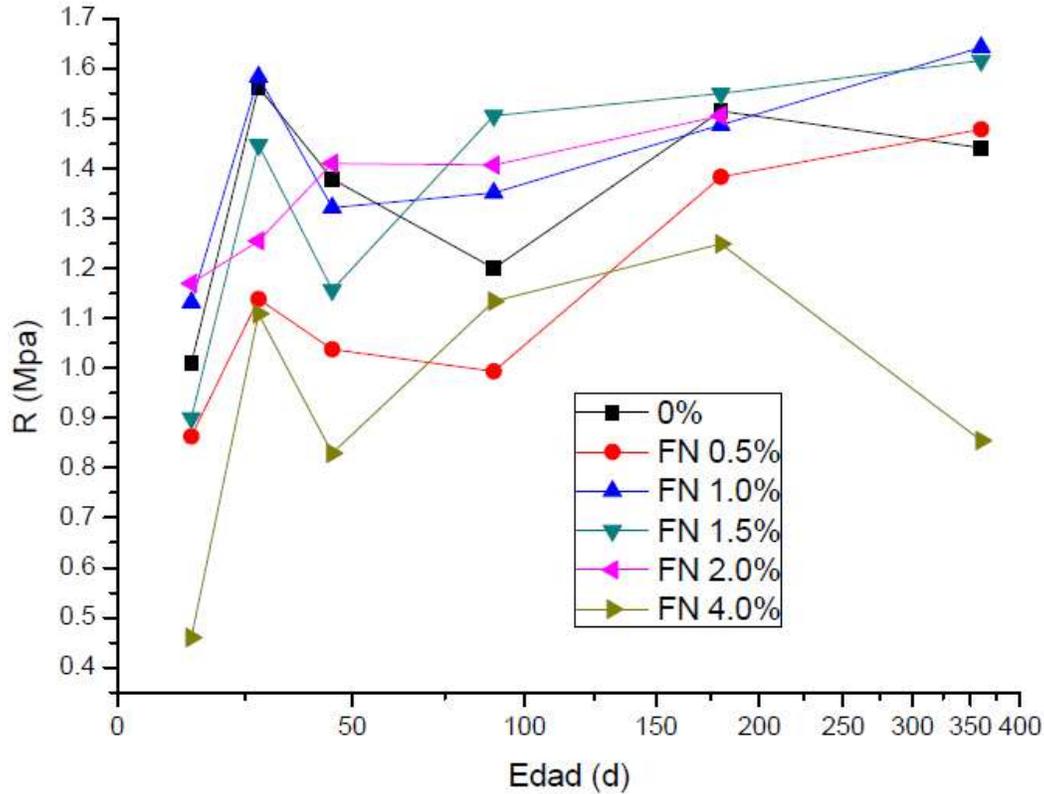


Ilustración 100. Gráfica de resistencia a la tensión en briquetas de morteros de cemento parcialmente sustituido con FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

### 9.6.5 Adherencia

En las ilustraciones 101, 102, 103 y 104 se muestran los resultados de la prueba de adherencia con las sustituciones de PN, CCV, CEL y FN. Como se puede observar en la PN 10% y PN 30% resistieron prácticamente lo mismo que el testigo a la edad de 180 días. Para la CCV 5% se comporta de forma similar al testigo y las resistencias son prácticamente iguales, en el caso de la CEL 5% es la única sustitución de dicha ceniza que supera al testigo en todas las edades y su comportamiento es casi paralelo al mismo. La FN muestra una tendencia a la alza en casi todas las sustituciones, cuatro de las cinco sustituciones superan al testigo en la edad de 180 días de los cuales se registró un mejor comportamiento de las sustituciones del 0.5 y 1%, también la de 1.5% tiene un comportamiento muy similar al testigo (Arreola Sánchez, 2013).

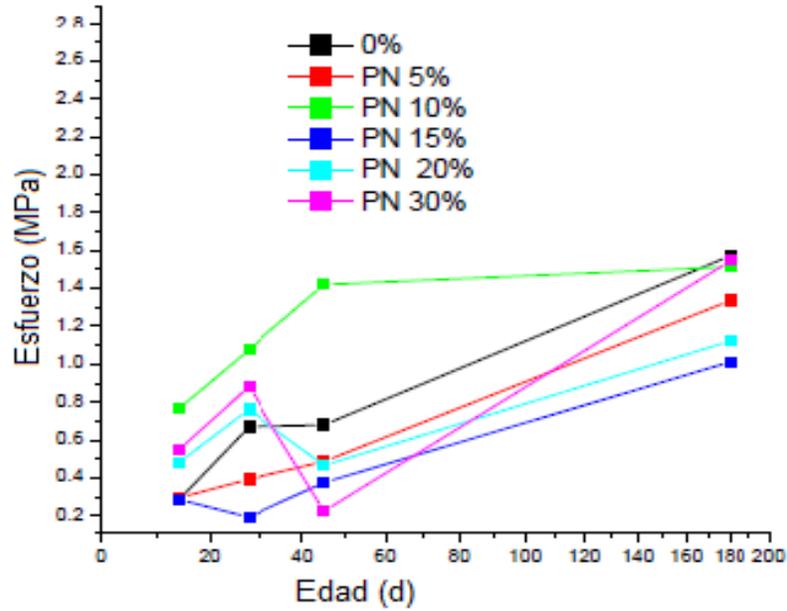


Ilustración 101. Gráfica de esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con PN a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

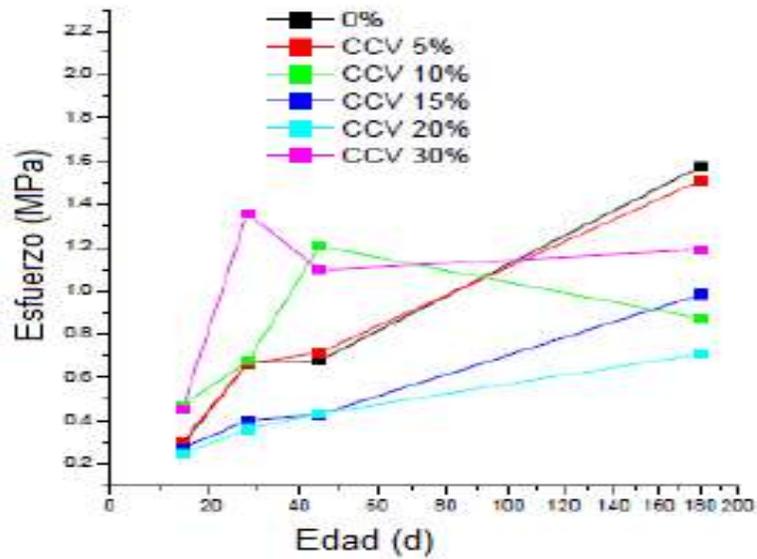


Ilustración 102. Gráfica de esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con CCV a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

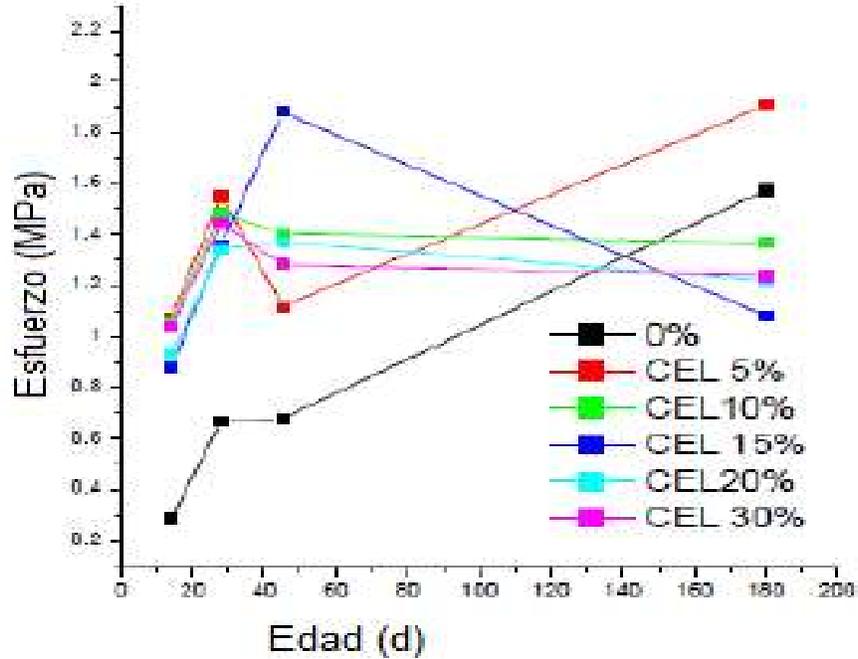


Ilustración 103. Gráfica de Esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con CEL a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

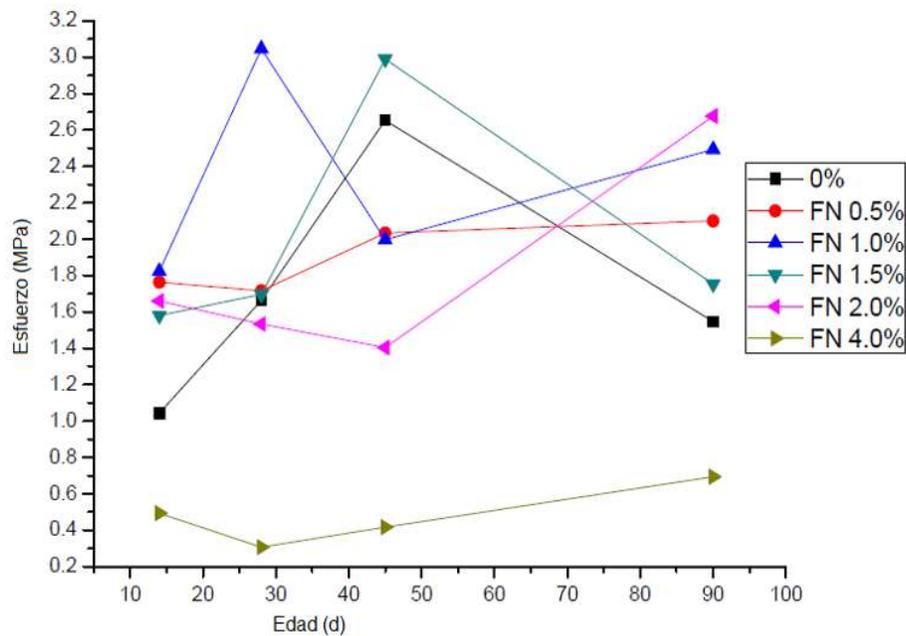


Ilustración 104. Gráfica de esfuerzos por adherencia de mortero sustituido con FN a edades de 14, 28, 45 y 180 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)



### 9.6.6 Resistividad eléctrica

En las ilustraciones 105, 106, 107, 108 se muestran los resultados de la prueba de resistividad eléctrica. Para el caso de la PN, muestra una tendencia al alza conforme se incrementa la edad, aunque la PN sus mejor porcentajes son el 20 y 30%. En la ilustración (106) se puede comprobar que el mejor comportamiento lo tiene la CCV ya que todos sus porcentajes superan al testigo a partir de la edad de 45 días, siendo el CCV 15, 20 y 30% los de mejores resultados. En el caso de la CEL se observa un comportamiento inferior al testigo en prácticamente en todos los porcentajes y en casi todas la edades, logrando al cansarlo hasta la edad de 360 días. La FN muestra un comportamiento generalizado menor al testigo solo, logrando superar al testigo a la edad de 360 días, siendo el FN 1.5% la mezcla con mayor resistividad (Arreola Sánchez, 2013).

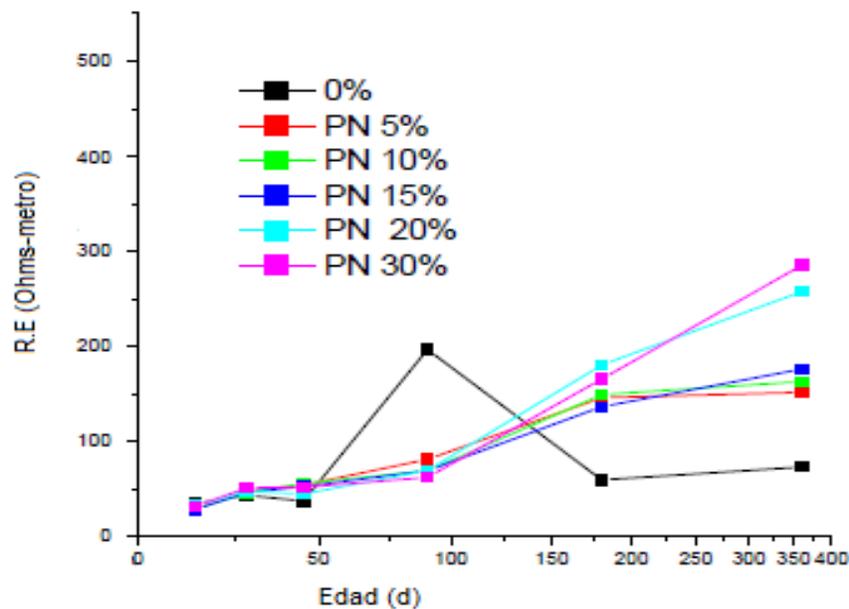


Ilustración 105. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

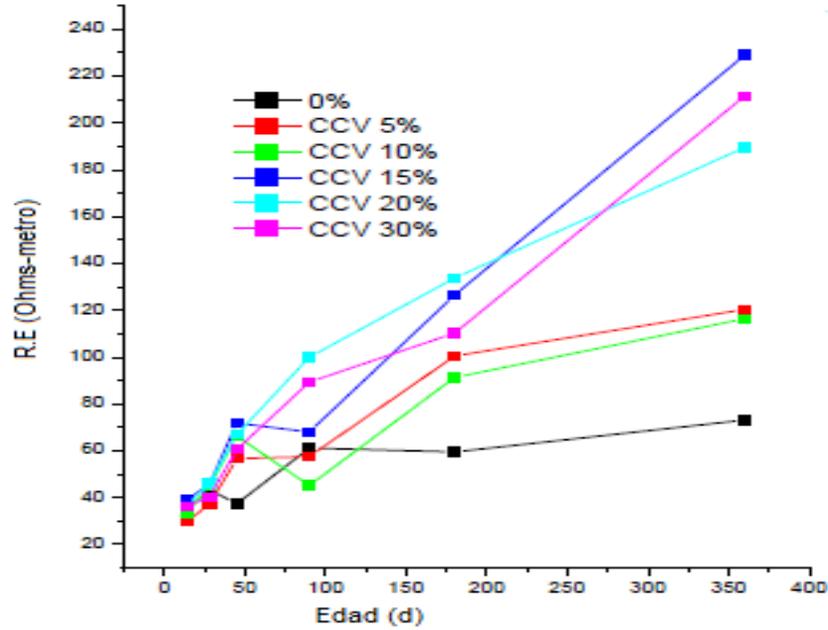


Ilustración 106. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

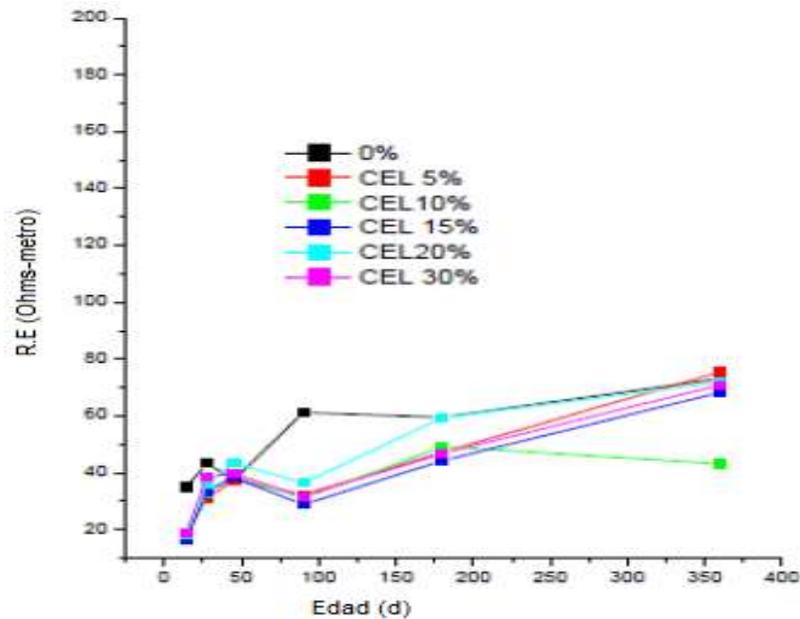


Ilustración 107. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

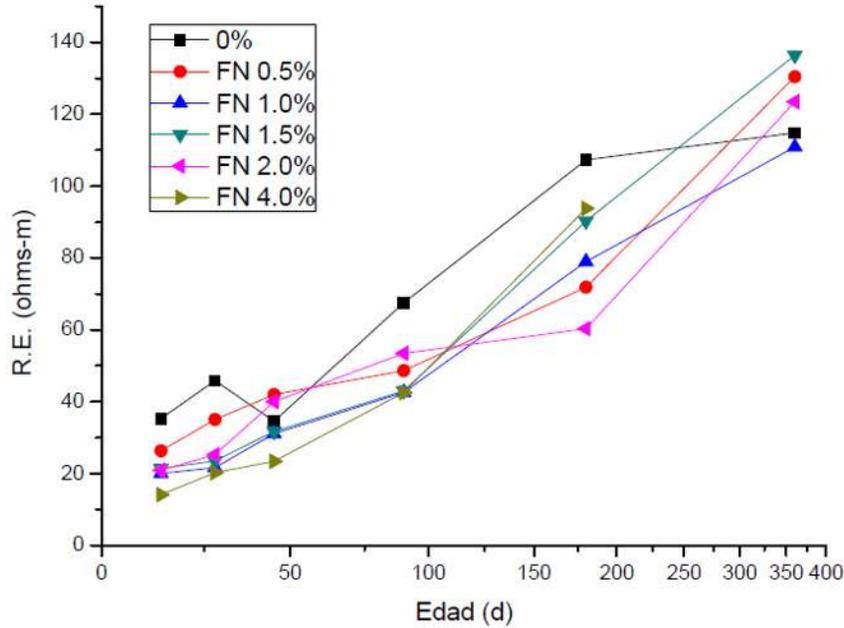


Ilustración 108. Gráfica de Resistividad eléctrica medida en cubos de mortero con sustituciones de FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

### 9.6.7 Velocidad de pulso Ultrasónico

Un criterio de evaluación para la velocidad de pulso ultrasónico (VPU), se muestra en la tabla 22. Este criterio, es utilizado en concreto hidráulicos, mas sin embargo a su vez nos puede ubicar en el rango de calidad del mortero que estamos estudiando.

Tabla 22. Criterio de evaluación de la calidad del concreto hidráulico en función de la VPU. Fuente: (CYTED-DURAR, 1998).

Velocidad de Propagación	Calidad del Concreto
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 - 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

En las ilustraciones de gráficas 109, 110, 111 y 112 se observa el comportamiento de prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) realizada a las sustituciones de



PN, CCV, CEL y FN. La PN logra desarrollar un comportamiento similar al testigo en todas sus sustituciones, logrando superarlo a partir de la edad de 180 días, siendo el 15 y 30% los que logran una VPUS mayor. A edades tempranas la CCV muestra un comportamiento inferior al testigo siendo que a edades tardías es cuando incrementa la VPU especialmente para los de 5 y 10%. Al igual que la CCV, la CEL tiene mismo comportamiento a edades tempranas e incremento a edades tardías, siendo el 5 y 10% los que logran una VPU mayor. También la FN muestra una tendencia ligeramente inferior al testigo en las primeras edades de prueba logrando incrementarse las lecturas a los 360 días, teniendo tres de sus porcentajes con una tendencia al alza (FN 0.5-1.5%), (Arreola Sánchez, 2013). Las adiciones evaluadas en cuanto a (VPU) se encuentran en rango de 2450 a 3100 m/s, esto indica que se encuentra entre normal y alta; ver tabla 22.

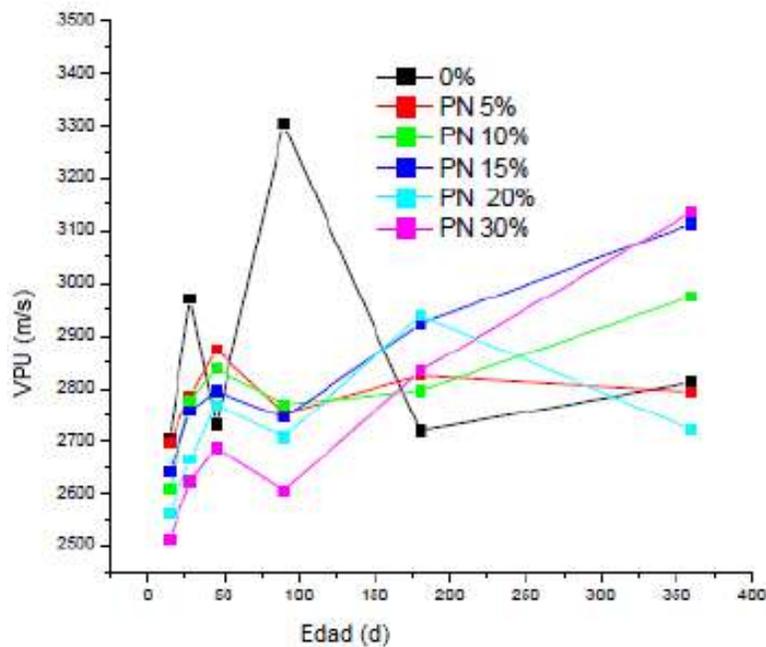


Ilustración 109. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de PN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

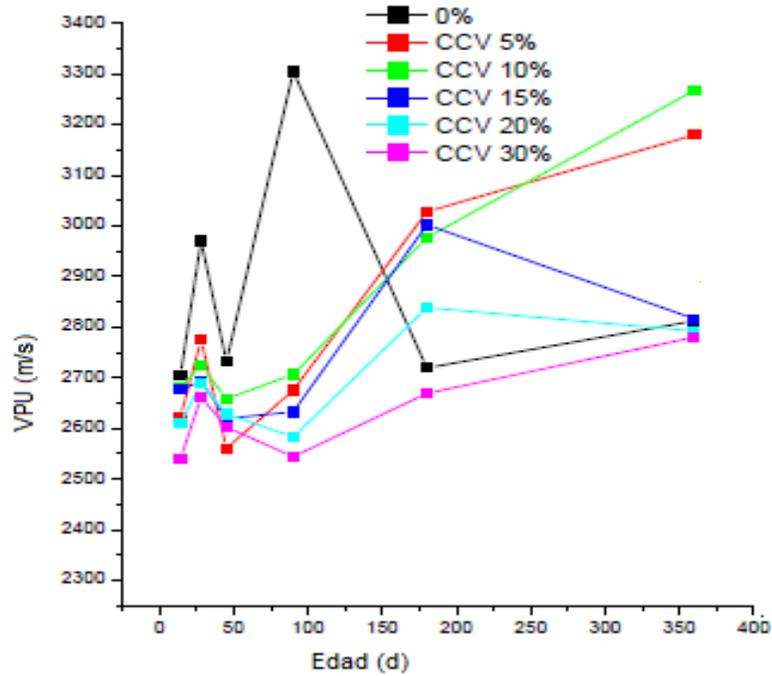


Ilustración 110. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de CCV a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

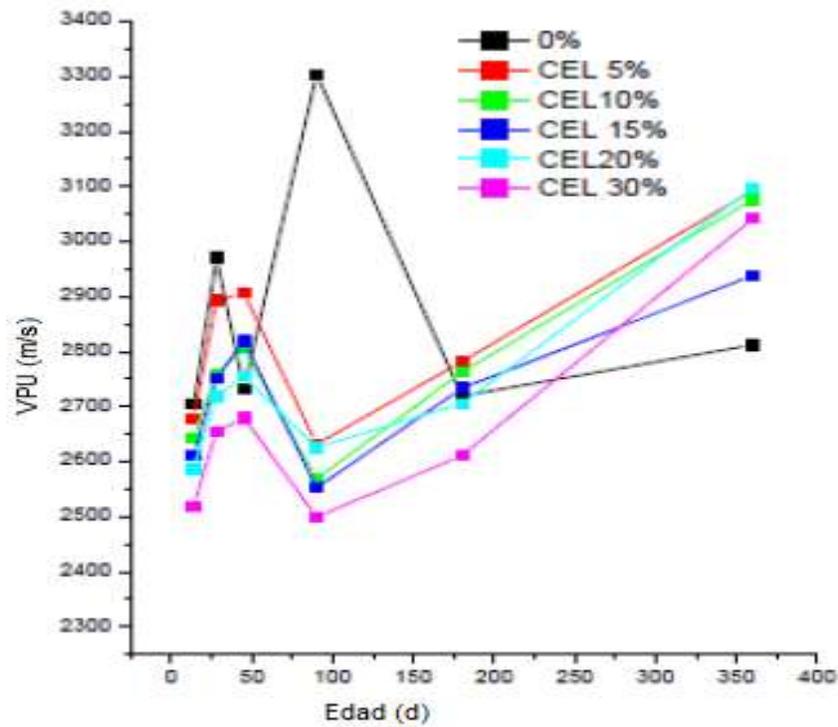
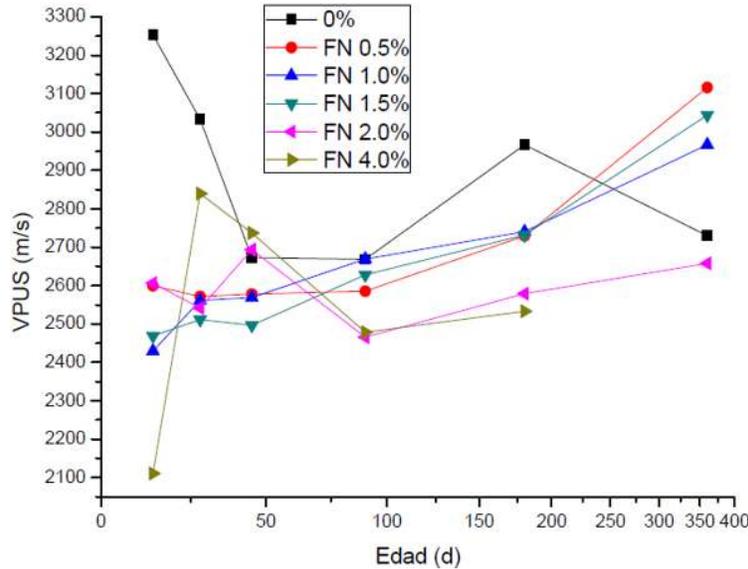


Ilustración 111. Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de CEL a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)



**Ilustración 112.** Velocidad de pulso ultrasónico de los ensayos realizados con sustituciones de FN a edades de 14, 28, 45, 90, 180 y 360 días. Fuente: (Arreola Sánchez, 2013)

### 9.6.8 Resistividad Eléctrica en Prismas con barras de acero inmerso y no inmerso (Prueba húmeda y prueba seca).

La (NMX-C514-ONNCCE, 2016), hace un criterio de evaluación de resistividad eléctrica en concreto hidráulico.

**Tabla 23.** Criterio de evaluación de resistividad eléctrica real en especímenes de concreto. Fuente: (NMX-C514-ONNCCE, 2016).

Resistividad	Probabilidad de corrosión
> 100 - 200 kΩ-cm	El concreto es muy denso, por lo que su porosidad interconectada es extremadamente baja, al igual que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son muy bajas, independientemente del contenido de cloruros o del nivel de carbonatación. No existe distinción entre acero en estado activo o pasivo.
50 a 100 kΩ-cm	El concreto tiene una porosidad interconectada baja, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo. Las velocidades de corrosión del mismo acero son bajas.
10 a 50 kΩ-cm	El concreto tiene una porosidad interconectada de consideración, permitiendo el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros.



<p>&lt; 10 kΩ-cm</p>	<p>El concreto tiene una porosidad interconectada excesiva, permitiendo que el transporte de agentes agresivos hacia el acero de refuerzo, sea extremadamente rápido. Las velocidades de corrosión del mismo acero son moderadas o altas en concretos carbonatados o con cloruros. La resistividad no es el parámetro que controla el proceso de corrosión. El valor de la velocidad de corrosión, obtenido con NMX-C501-ONNCCE refleja la cota superior de la velocidad de corrosión en ese concreto para un determinado contenido de cloruros o nivel de carbonatación.</p>
----------------------	---

En las ilustraciones 113 a 125, se muestra los resultados de resistividad eléctrica real o húmeda en las sustituciones de PN, CCV, CEL y FN. Como se puede observar en las gráficas de las ilustraciones se divide en tres partes, A, B y C, lo cual denota lo siguiente: **A** = La prueba se realizó en estado de humectación consecutivamente semana tras semana. **B** = La prueba se realizó una semana seca y una semana húmeda (en prueba seca, se cambiaba el NaCl por agua simple). **C** = En las pruebas secas las muestras se dejó a 3 semanas de secado y en la pruebas húmedas a 1 semana. En general de las 4 sustituciones con las que se trabajó en estado húmeda que se presenta en la sección C de la gráfica, ver ilustración 125, los resultados es la siguiente: En la PN el porcentaje que tiene una resistencia buena es la de 5% que va en el rango de 31 a 55 Ω-cm, en la CCV los porcentajes que tienen una resistencia buena es la de 10% que va de 31 a 55 Ω-cm y 15% en un rango de 31 a 67 Ω-cm, en la CEL el porcentaje que tiene una resistencia buena es la de 5% en un rango de 31 a 38 Ω-cm y en FN es la de 1.5% en un rango de 46 a 59 Ω-cm .

En las pruebas secas tal como se observa en las ilustraciones 126 a 138 está dividida en 2 partes de la gráfica en B y C. En general de las 4 sustituciones con las que se trabajó en estado seco, que se presenta en la sección C de la gráfica, ver la ilustración 138, los resultados es la siguiente: En la PN el porcentaje que tiene una resistencia buena es la de 10% que va en el rango de 468 a 859 Ω-cm, en la CCV el porcentaje que tienen una resistencia buena es la de 10% en un rango de 781 a 2343 Ω-cm, en la CEL el porcentaje que tienen una resistencia buena es la de 5% en un rango de 50 a 820 Ω-cm y en FN es la de 1.5% en un



rango de 78 a 1484  $\Omega$ -cm. De las pruebas húmedas y secas en la que se realizó la resistividad eléctrica, se nota la diferencia que en estado seco, aumenta la resistencia; esto es debido de que la interconectividad de los poros se encoje.

Si para estas probetas aplicáramos el criterio de la resistividad para definir un rango de susceptibilidad a la corrosión, mostrado en la tabla 23, la valorización no sería favorable, porque entra en el rango de alto riesgo y porque el criterio de evaluación es para concreto.

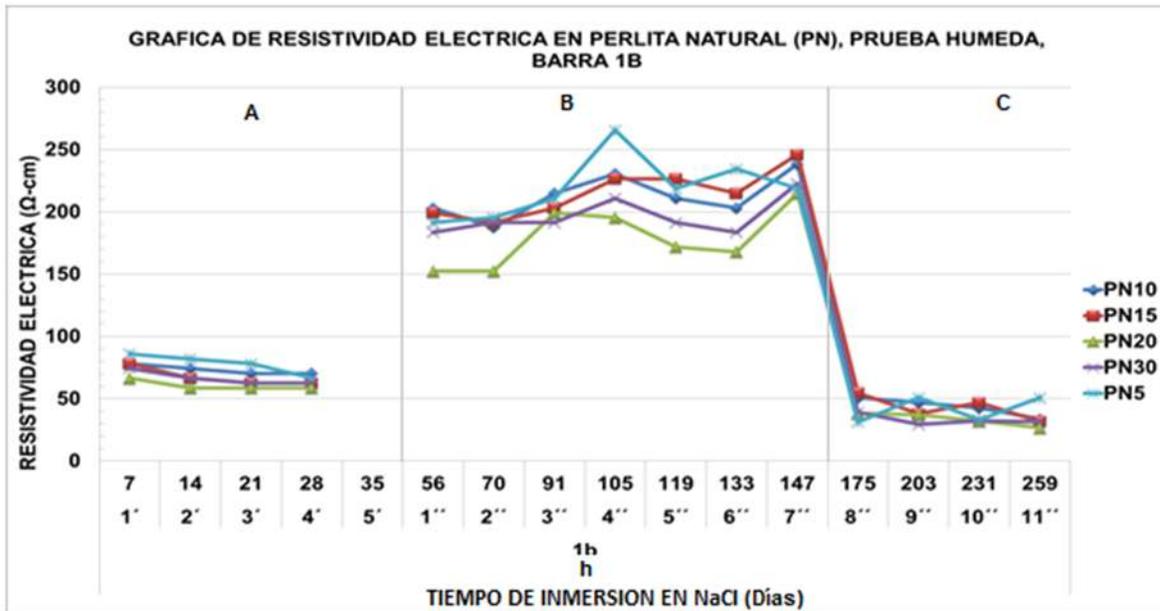


Ilustración 113. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

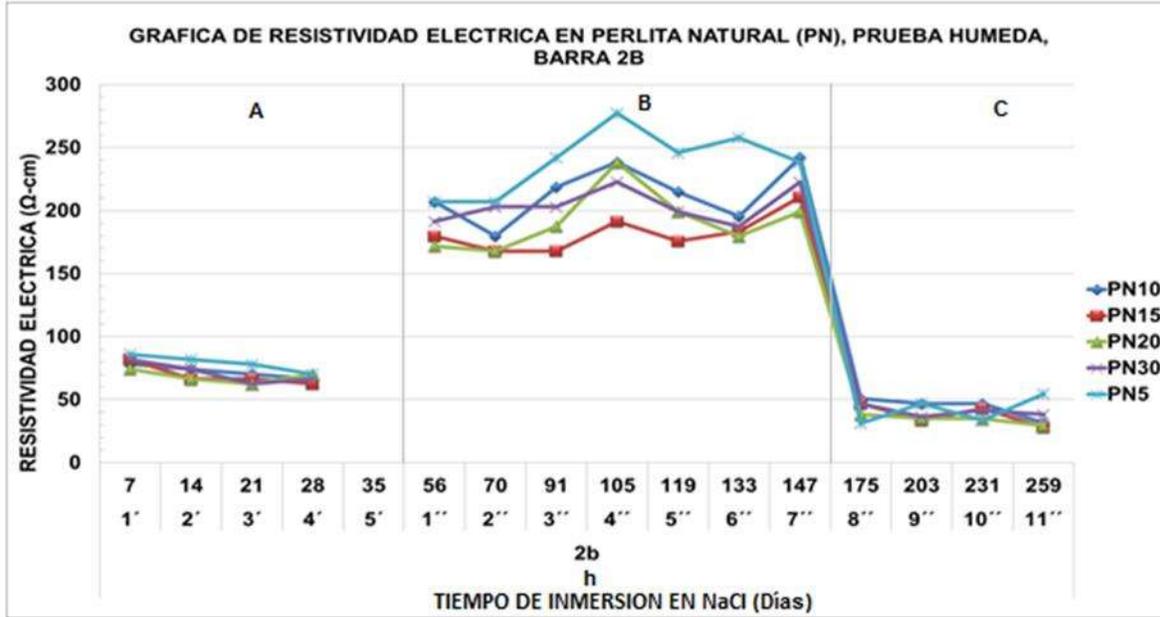


Ilustración 114. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

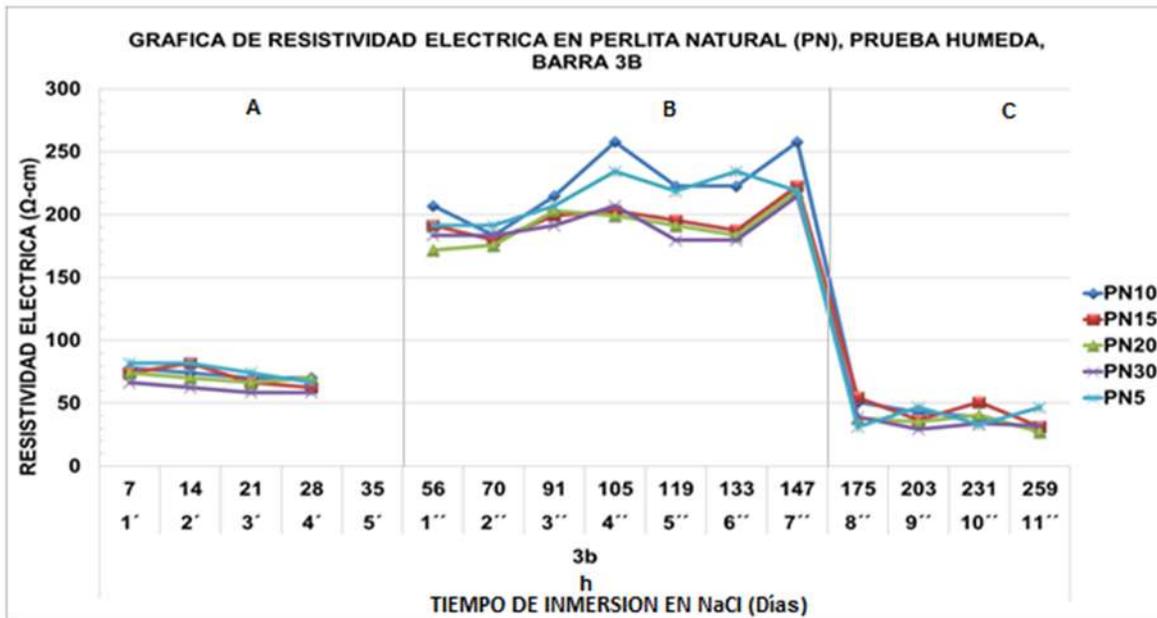


Ilustración 115. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

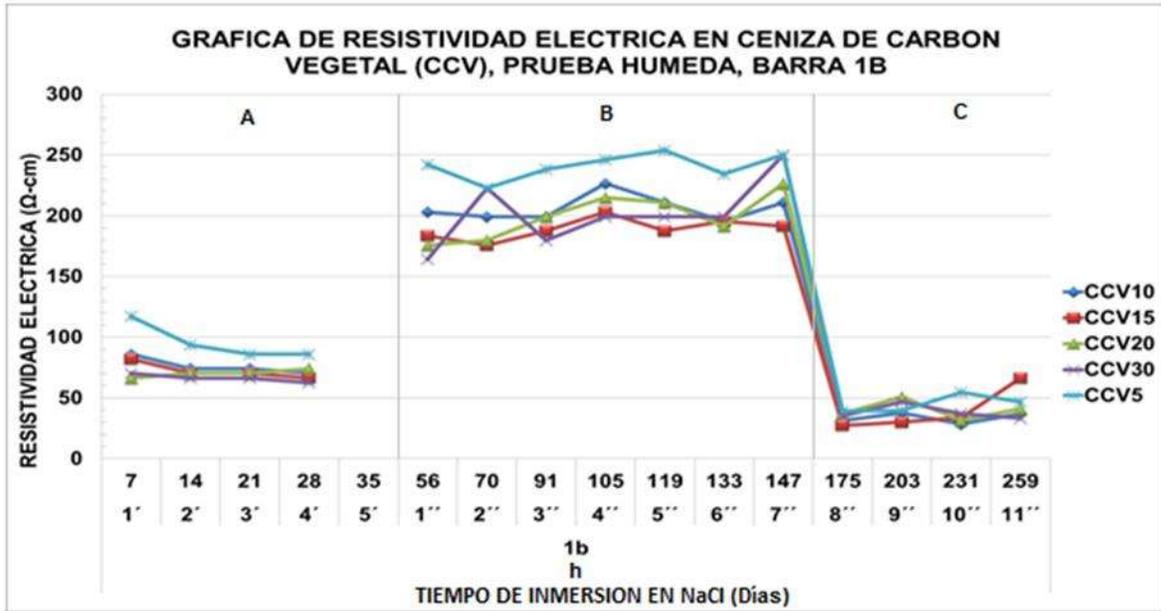


Ilustración 116. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

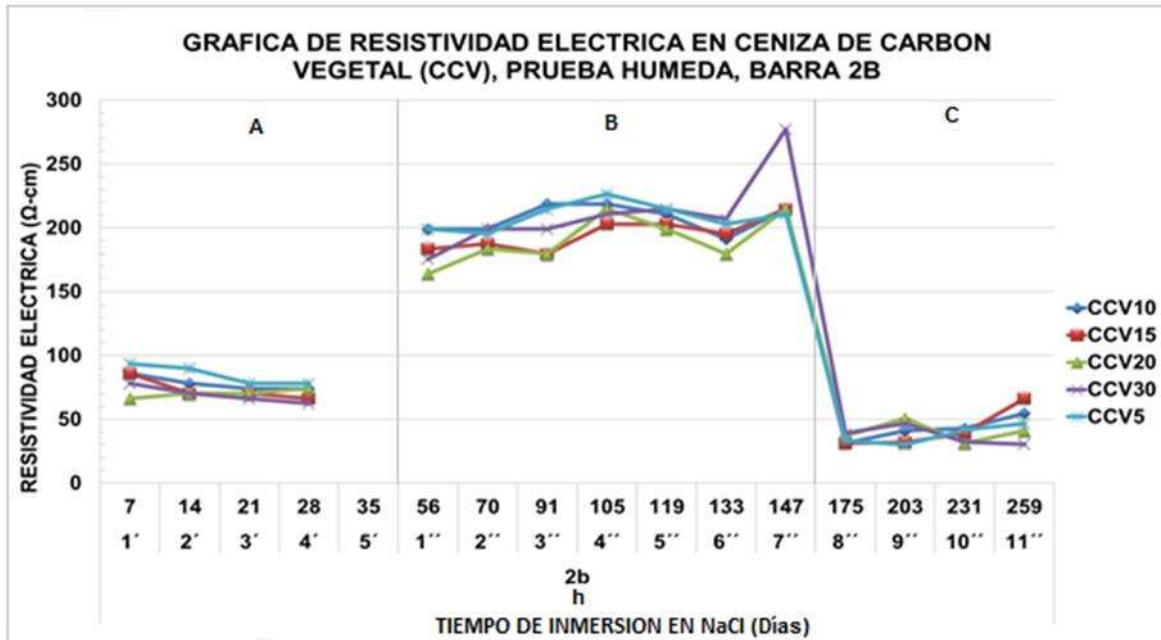


Ilustración 117. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

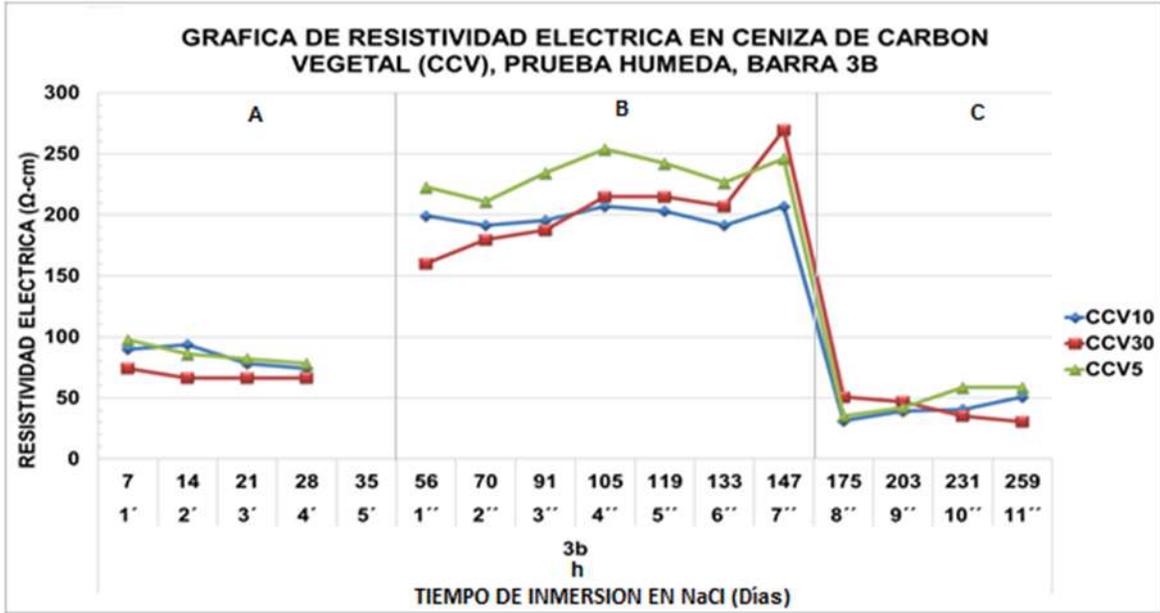


Ilustración 118. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10% y 30% de CCV, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

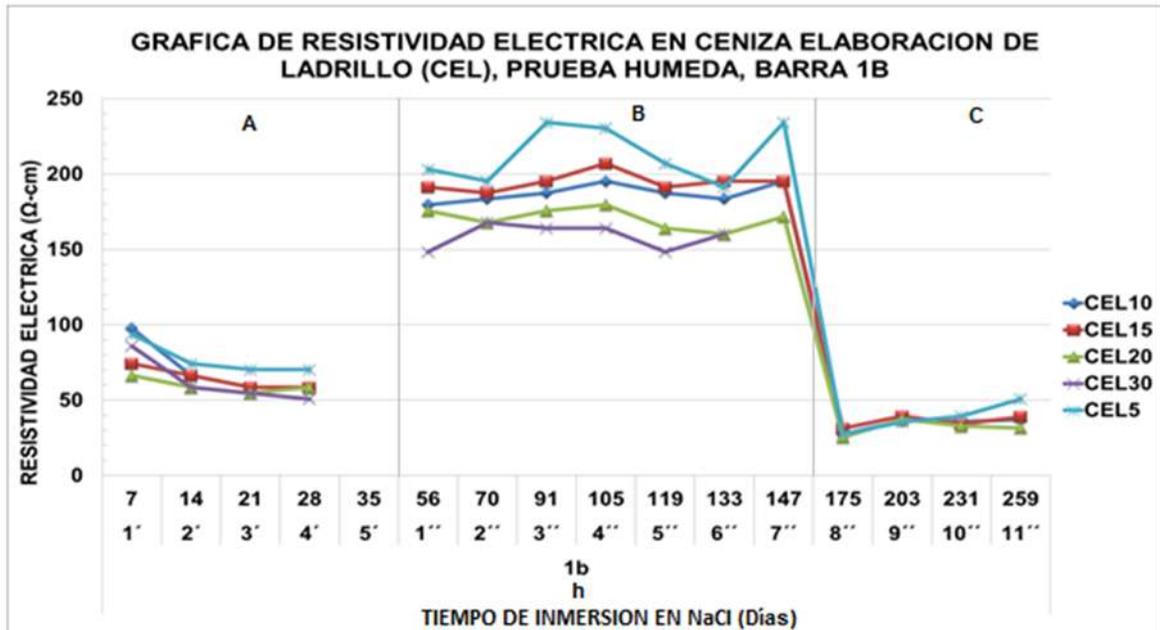


Ilustración 119. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

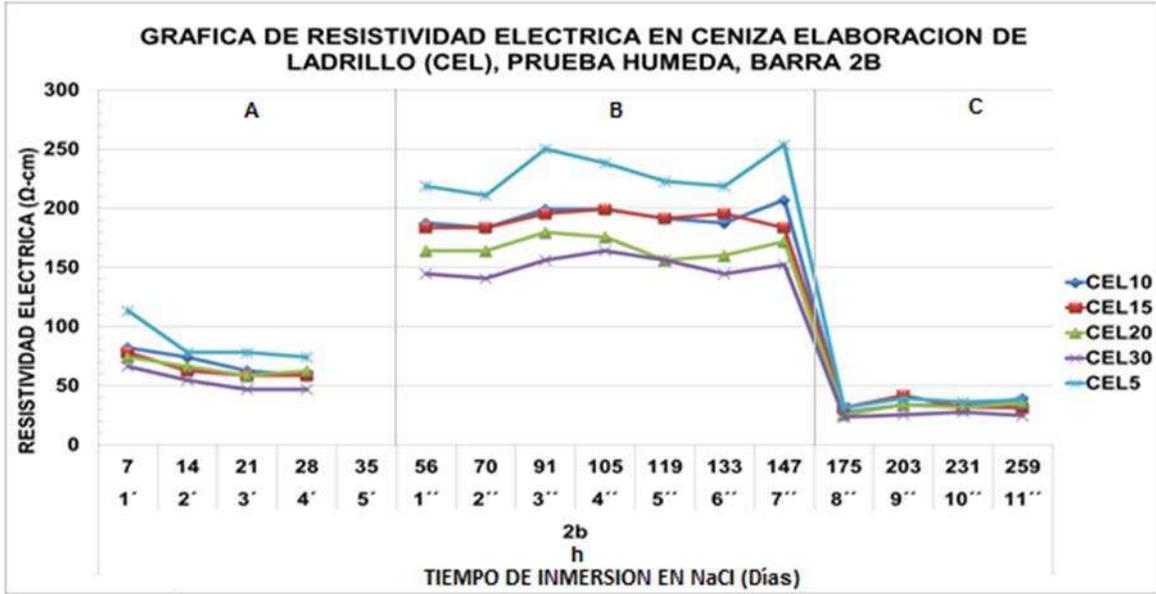


Ilustración 120. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

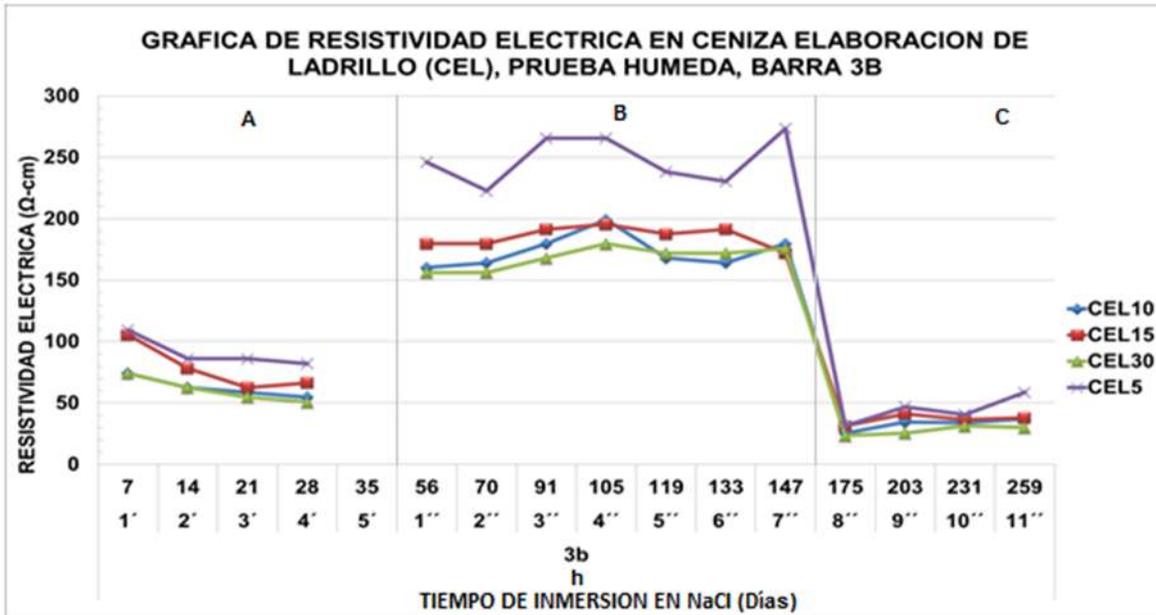


Ilustración 121. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15% y 30% de CEL, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

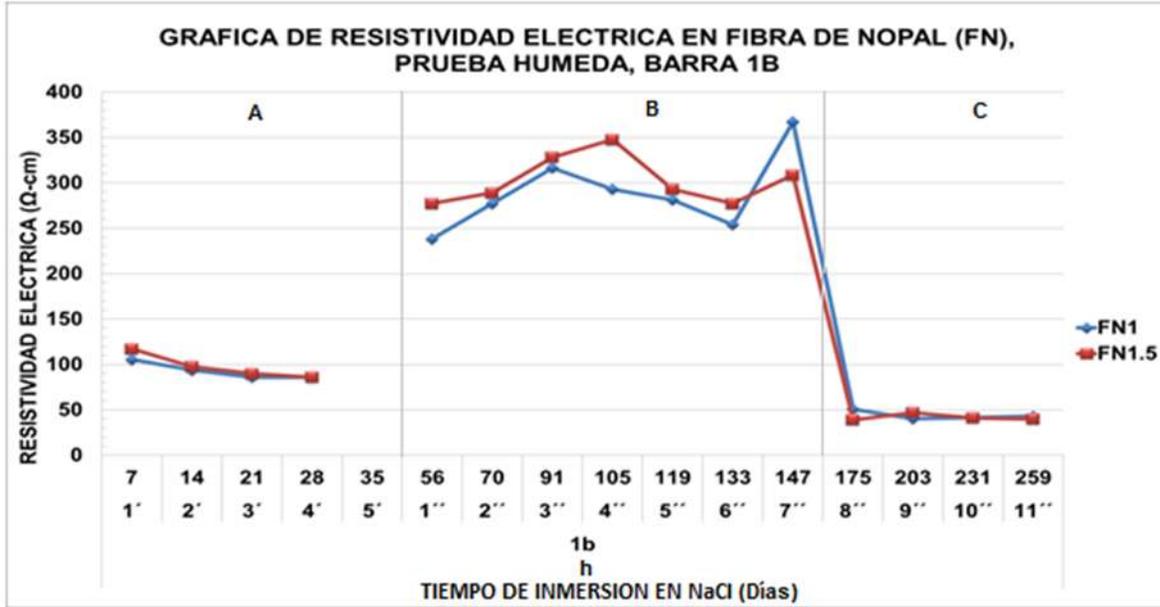


Ilustración 122. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0 %, 1.5 % de FN, prueba húmeda; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

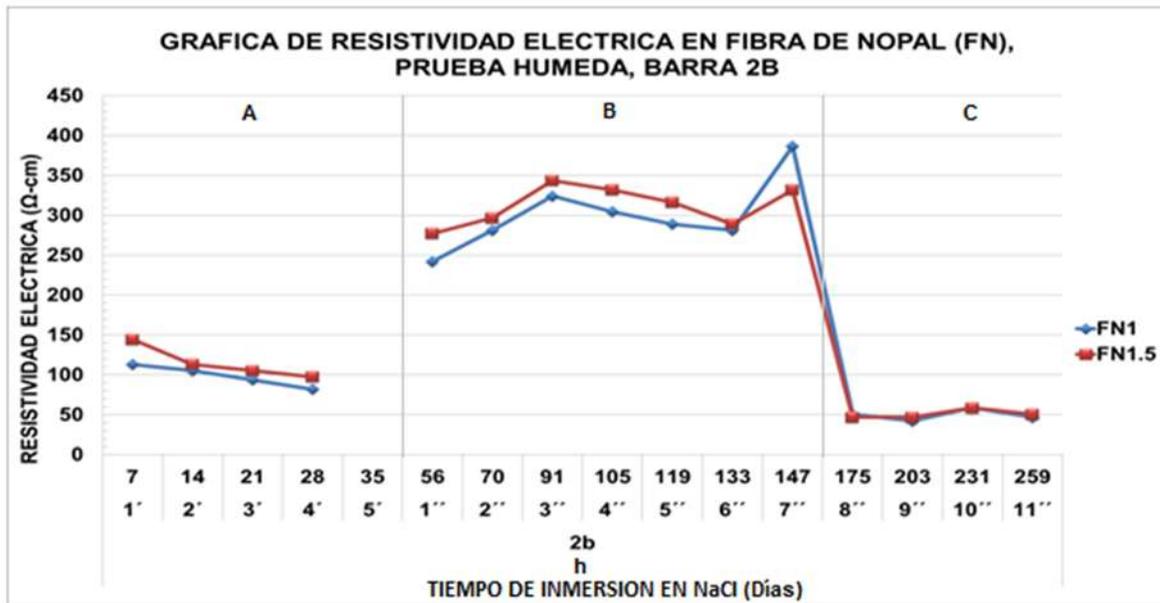


Ilustración 123. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0 %, 1.5 % de FN, prueba húmeda; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

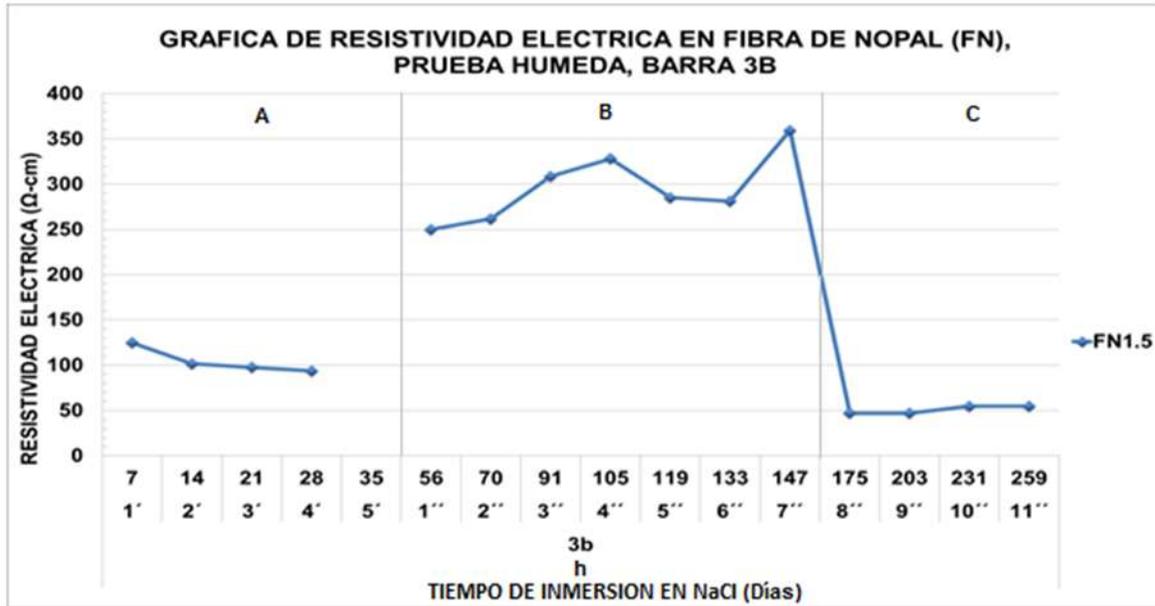


Ilustración 124. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.5 % de FN, prueba húmeda; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

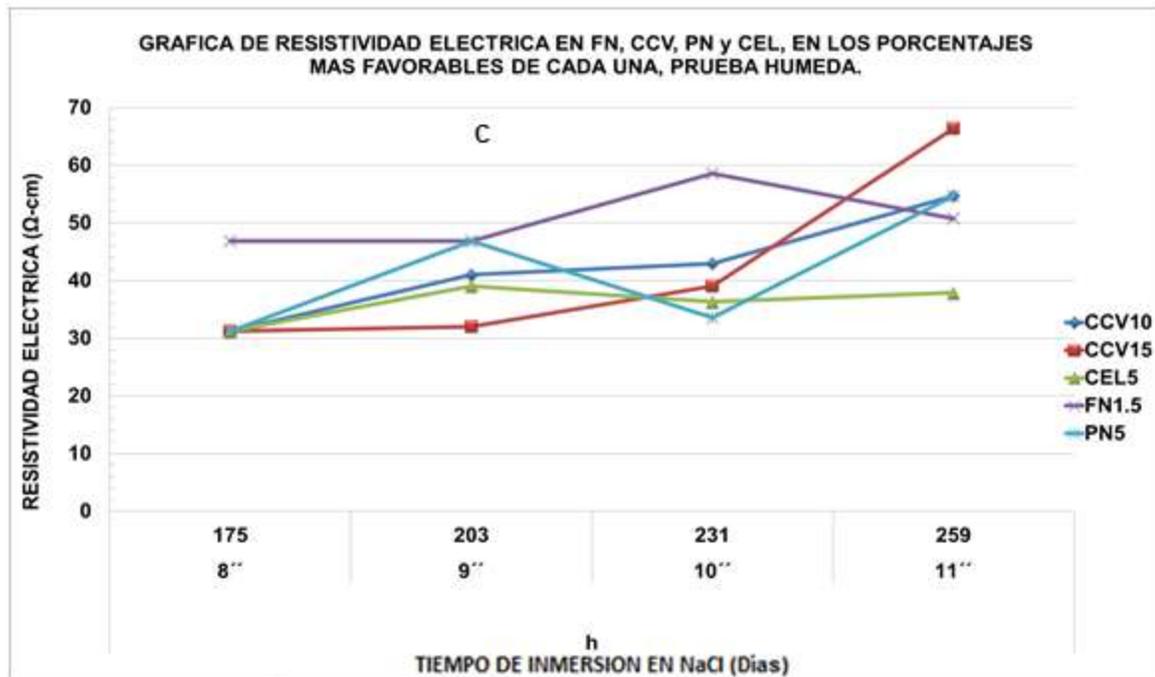


Ilustración 125. Gráfica de resistividad eléctrica en las sustituciones de FN1.5%, CCV10, 15%, PN5% y CEL5% más favorables de las ultimas 4 pruebas del total, prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

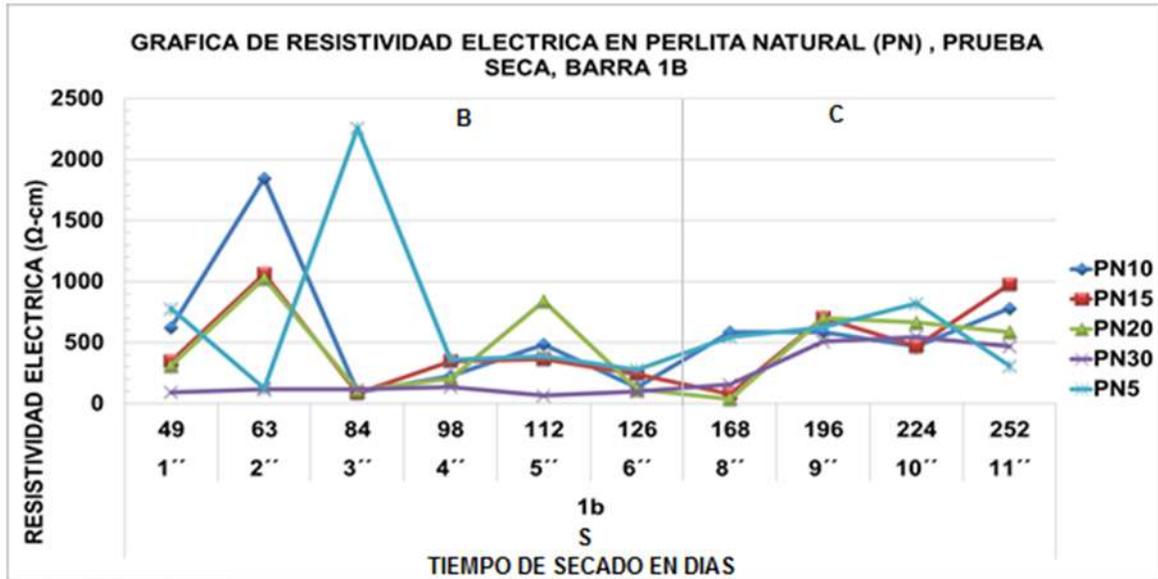


Ilustración 126. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

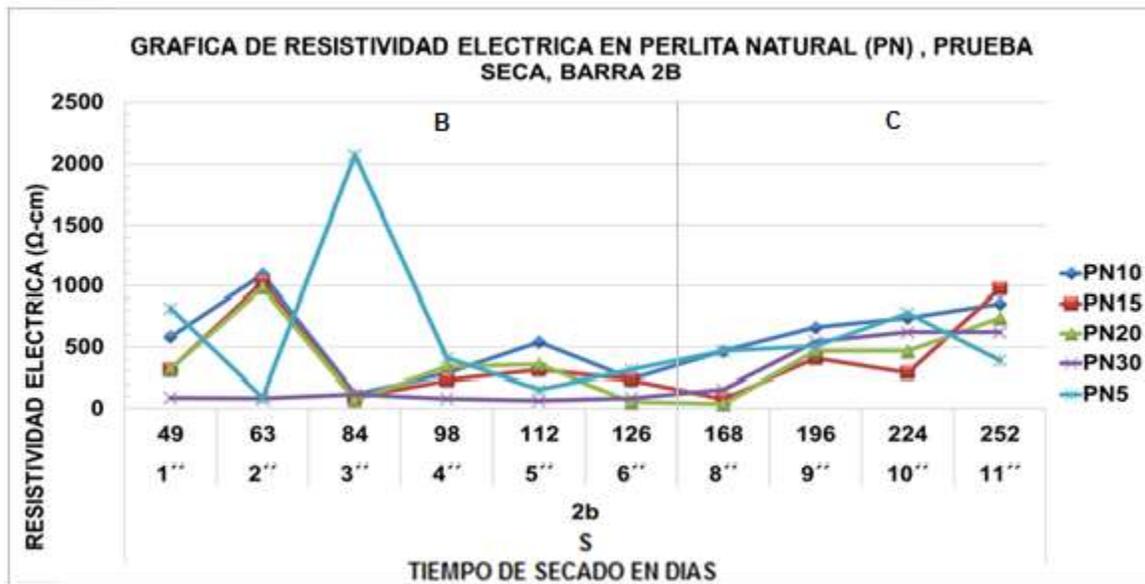


Ilustración 127. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

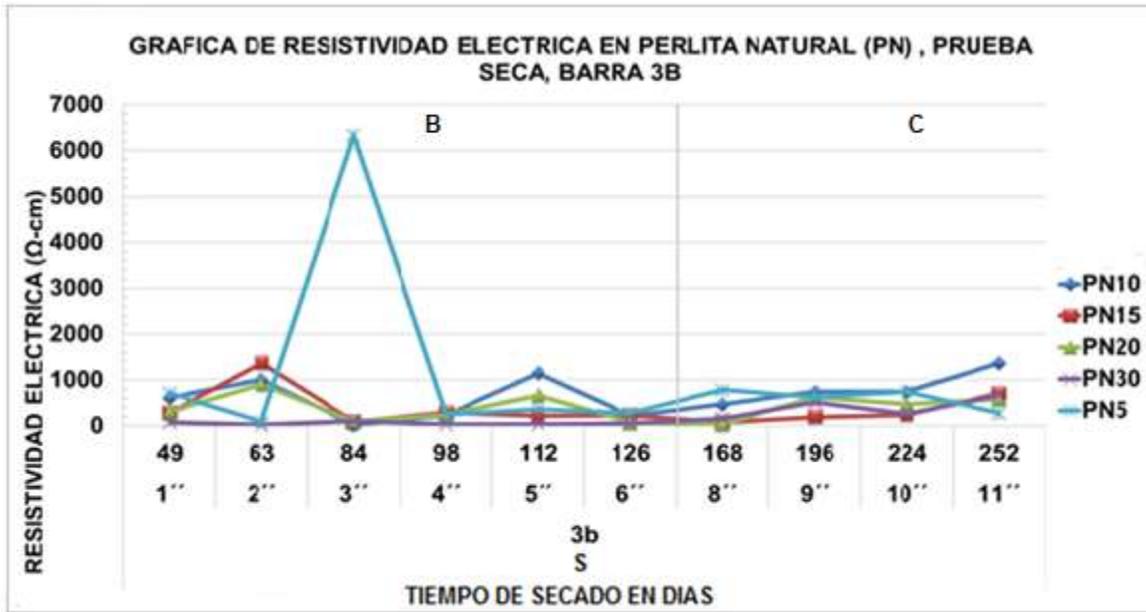


Ilustración 128. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de PN, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

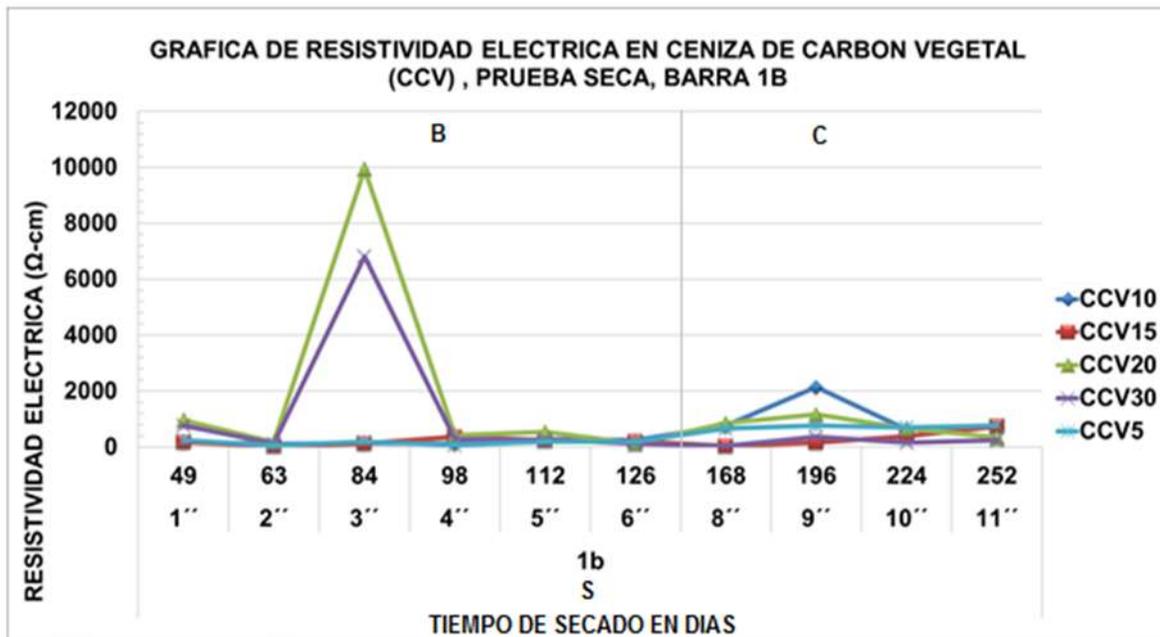


Ilustración 129. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

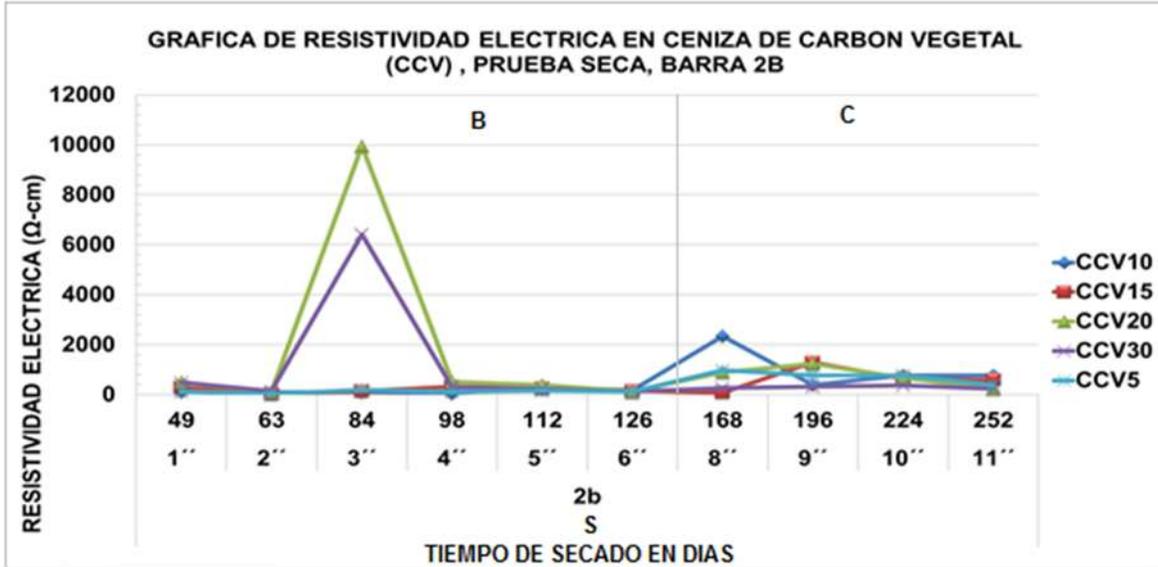


Ilustración 130. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CCV, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

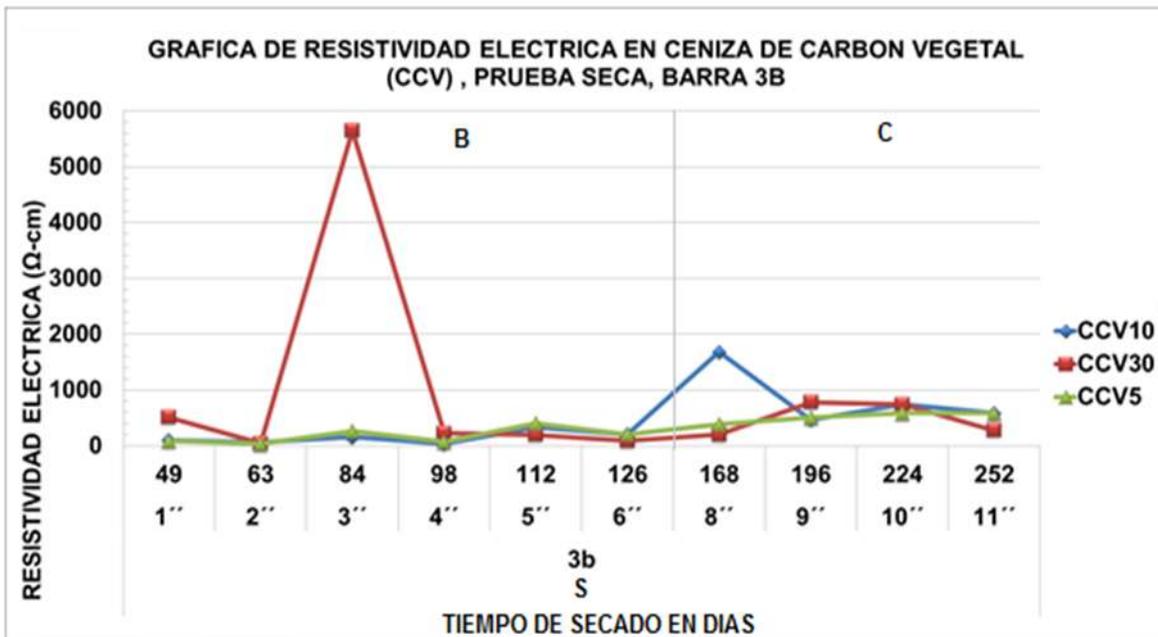


Ilustración 131. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 30% de CCV, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

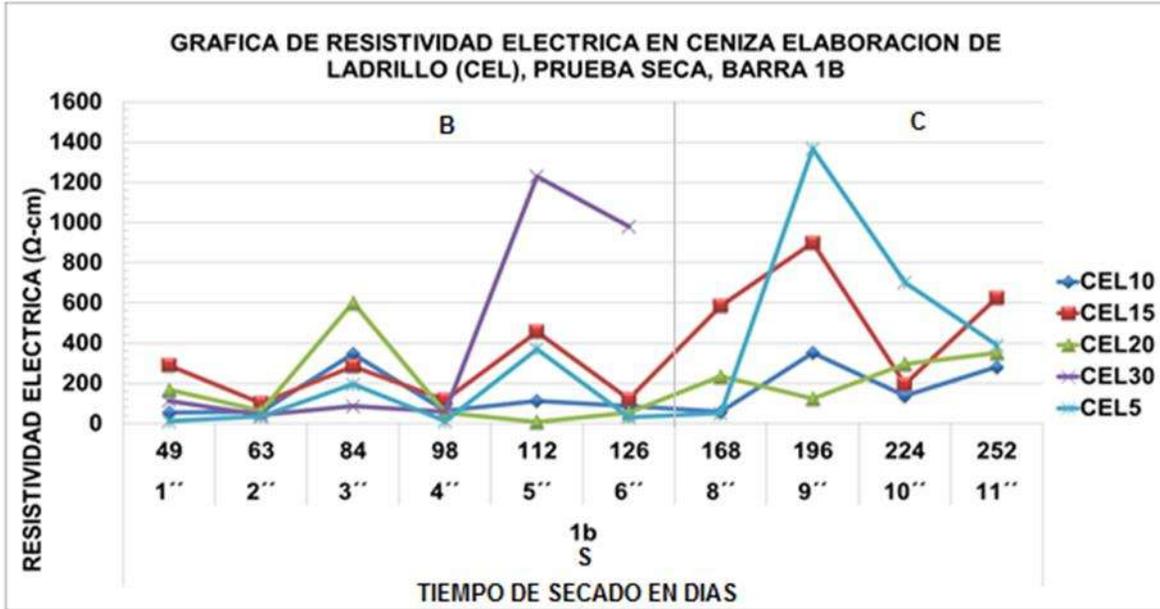


Ilustración 132. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

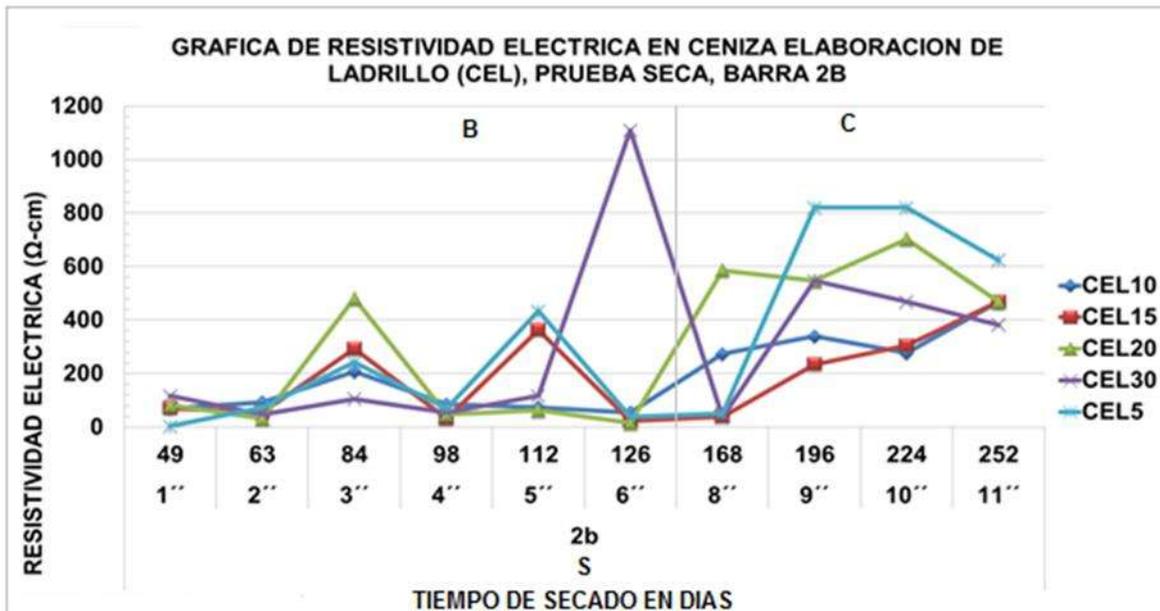


Ilustración 133. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% de CEL, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

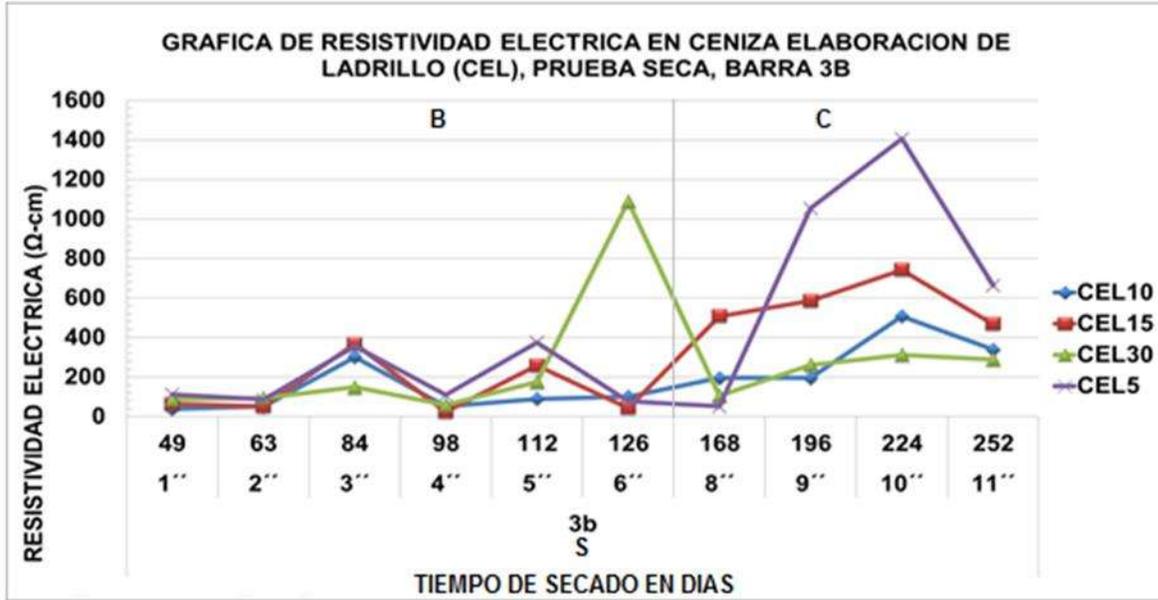


Ilustración 134. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 5%, 10%, 15% y 30% de CEL, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

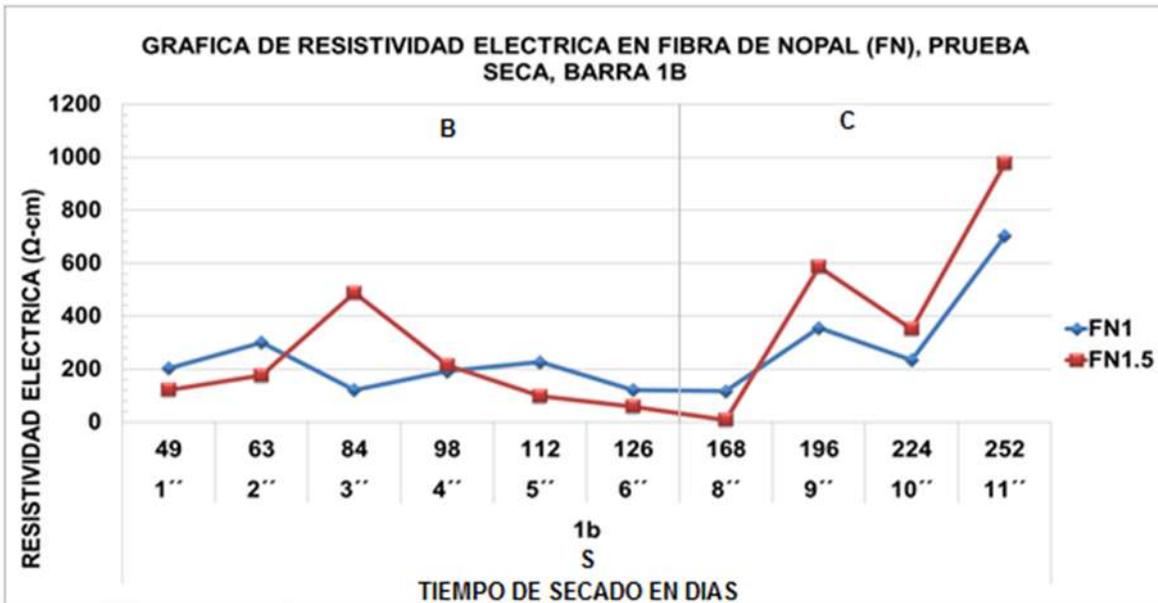


Ilustración 135. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0%, 1.5% de FN, prueba seca; barra 1b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

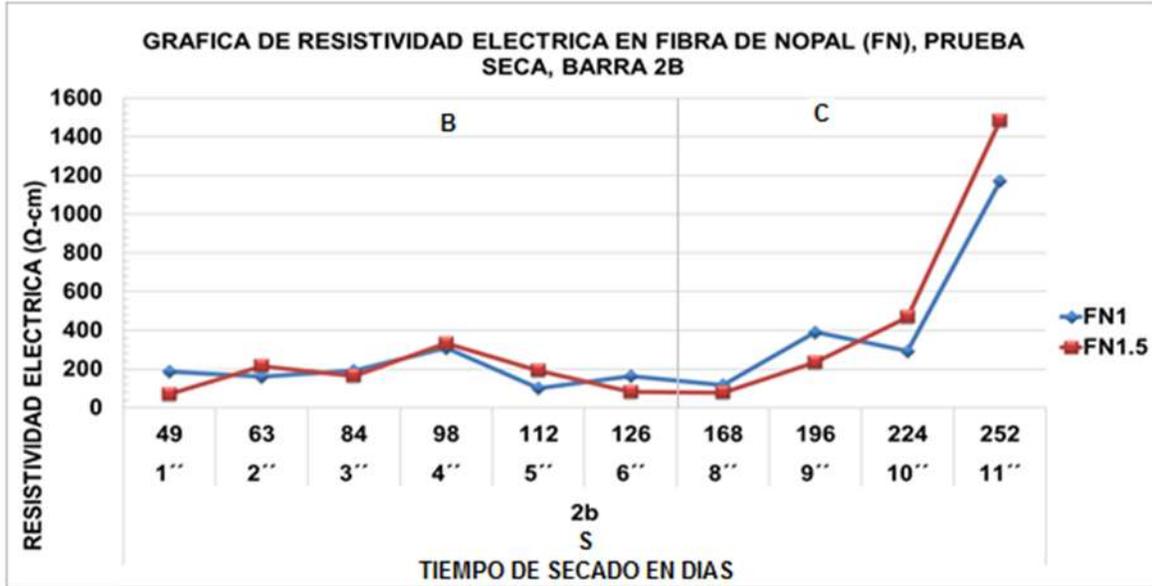


Ilustración 136. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.0%, 1.5% de FN, prueba seca; barra 2b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

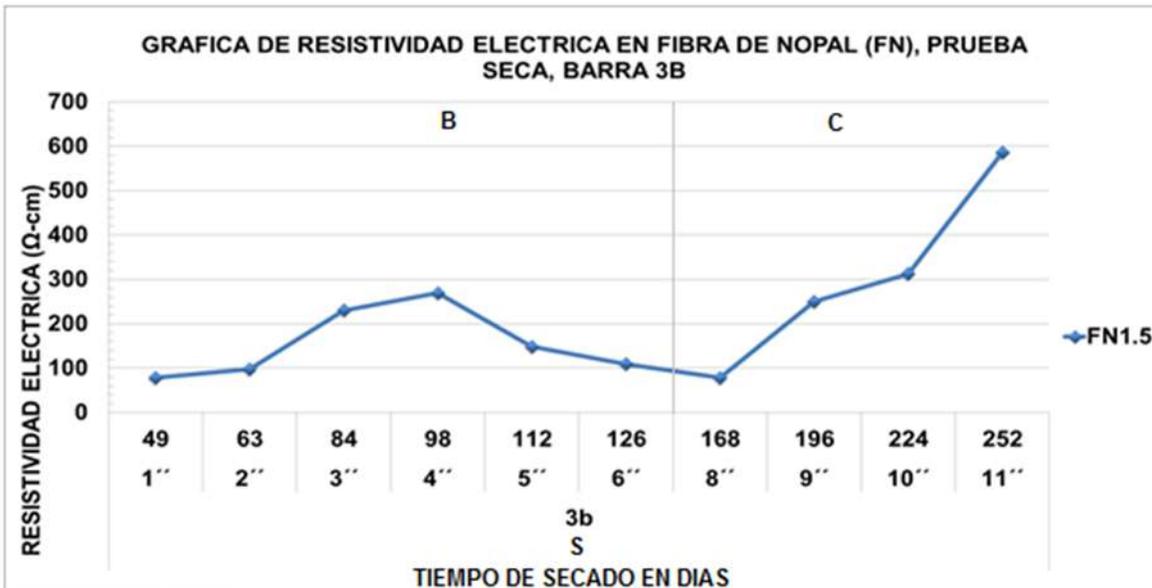


Ilustración 137. Resistividad eléctrica en las probetas de mortero con sustitución de 1.5% de FN, prueba seca; barra 3b. Fuente: (T. Francisco Martínez)

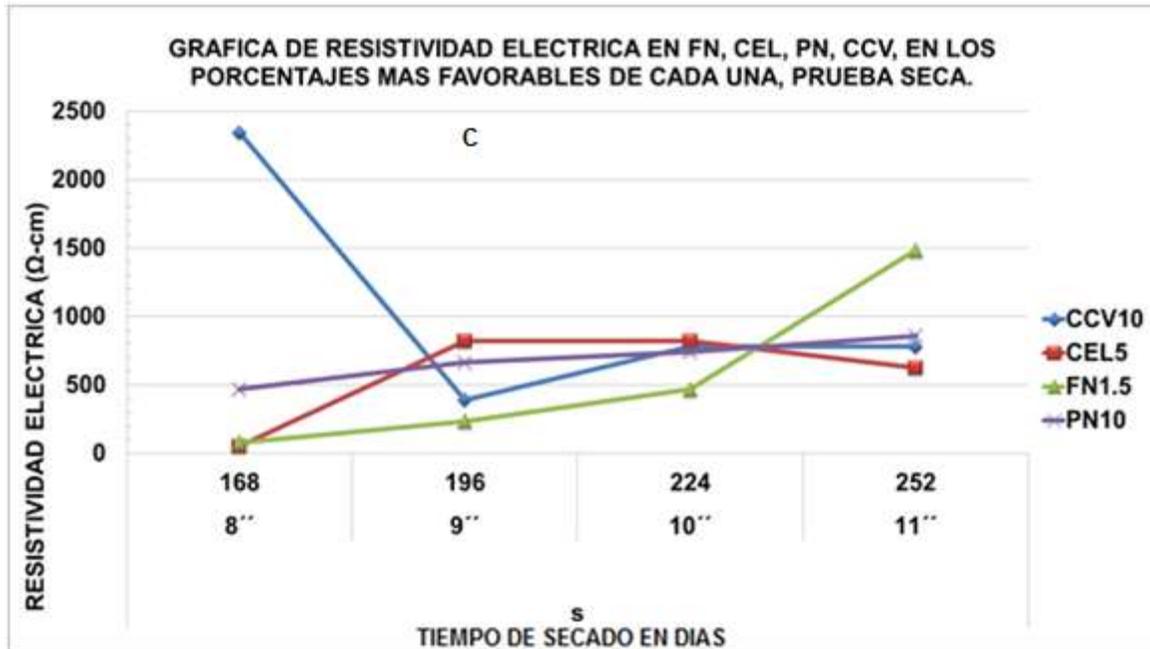


Ilustración 138. Gráfica de resistividad eléctrica en las sustituciones de FN1.5%, CEL5%, PN10% y CCV10% más favorables de las últimas 4 pruebas del total, prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

### 9.6.9 Ensayos electroquímicos

Los resultados de los ensayos electroquímicos a que se refiere este subcapítulo son: el potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ) y velocidad de corrosión.

#### 9.6.9.1 Potencial de Corrosión ( $E_{corr}$ )

Para la evaluación de resultados de las mediciones de los potenciales de corrosión, es conforme a la (NMX-C-495-ONNCCE, 2015), (ASTM-C-876, 2009); se hace de acuerdo con los siguientes:

- si los potenciales en un área son más positivos de  $-0.200$  mV vs  $Cu/CuSO_4$ , la probabilidad de que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en el momento de la medición es de 10%.
- si los potenciales en un área están en el intervalo de  $-0.200$  a  $-0.350$  mV vs  $Cu/CuSO_4$ , la probabilidad de que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en el momento de la medición es incierta.



- Si los potenciales en un área son más negativos de  $-0.350$  mV vs  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , la probabilidad de que la corrosión del acero de refuerzo esté ocurriendo en el momento de la medición es de 90%.
- Si los potenciales en un área son más negativos de  $-0.500$  mV vs  $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$ , la actividad de corrosión del acero de refuerzo en el momento de la medición se considera severa.

En la tabla 24 se resume la interpretación de los valores de potencial de corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) con base a la actividad de corrosión

Tabla 24. Relación entre el  $E_{\text{corr}}$  y la actividad de corrosión. Fuente: (NMX-C-495-ONNCCE, 2015).

Potenciales de Corrosión ( $E_{\text{corr}}$ ) mV vs $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$	Actividad de Corrosión
$< -500$	Corrosión severa
$< -350$	90% de probabilidad de corrosión
$-350$ a $-200$	Incertidumbre
$-200$	10% de probabilidad de corrosión

También la tabla 25 resume de forma general los diversos factores y su influencia en la interpretación de los valores de potenciales de corrosión que pudieran presentarse en una condición particular.

Tabla 25. Relación entre el  $E_{\text{corr}}$ , factores diversos y la condición de corrosión del acero de refuerzo. Fuente: (NMX-C-495-ONNCCE, 2015).

Condición	Potencial ( $E_{\text{corr}}$ ) mV vs $\text{Cu}/\text{CuSO}_4$	Observaciones	Riesgo de daño
Estado Pasivo	$+0.200$ a $-0.200$	Ausencia de $\text{Cl}^-$ $\text{pH} > 12.5$ $\text{H}_2\text{O}$ (HR↑)	Despreciable
Corrosión Localizada	$-0.200$ a $-0.600$	$\text{Cl}^-$ , $\text{O}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ (HR↑)	Alto



Corrosión Uniforme	+0.200 a -0.150	Carbonatado O <sub>2</sub> , seco (HR↓)	Bajo
	-0.150 a -0.600	Carbonatado O <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Moderado Alto
	-0.400 a -0.600	Cl <sup>-</sup> Elevado, H <sub>2</sub> O o Carbonatado H <sub>2</sub> O, (HR↑)	Alto
Corrosión Uniforme	<-0.600	↑Cl <sup>-</sup> , ↑H <sub>2</sub> O (Sin O <sub>2</sub> )	Despreciable

Los resultados de potenciales de corrosión monitoreados en las probetas con varillas de acero embebidas, para las pruebas húmedas se muestran en las ilustraciones de gráficas de la 139 a 150 en las sustituciones de PN, CCV, CEL Y FN. Como se puede observar en las gráficas de las ilustraciones se divide en tres partes, A, B y C, lo cual denota lo siguiente: **A** = La prueba se realizó en estado de humectación consecutivamente semana tras semana. **B** = La prueba se realizó una semana seca y una semana húmeda (en prueba seca, se cambiaba el NaCl por agua simple). **C** = En las pruebas secas las muestras se dejó a 3 semanas de secado y en la pruebas húmedas a 1 semana. De forma general en las pruebas húmedas para las sustituciones de PN, CCV, CEL Y FN se encuentran con un ( $E_{corr}$ ) de -500 a -700 mV (actividad de corrosión alto), tal como se observa en la parte C de las gráficas que es la parte donde se realizó la prueba como estaba diseñada; y se evalúa con forme a la tabla 24 y 25.

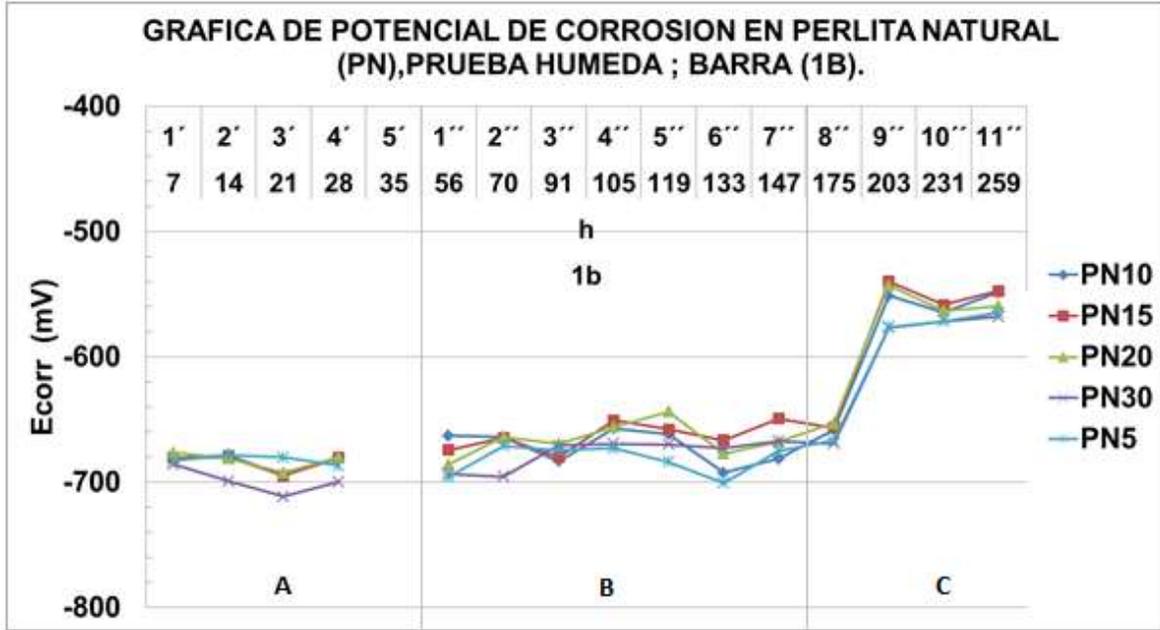


Ilustración 139. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

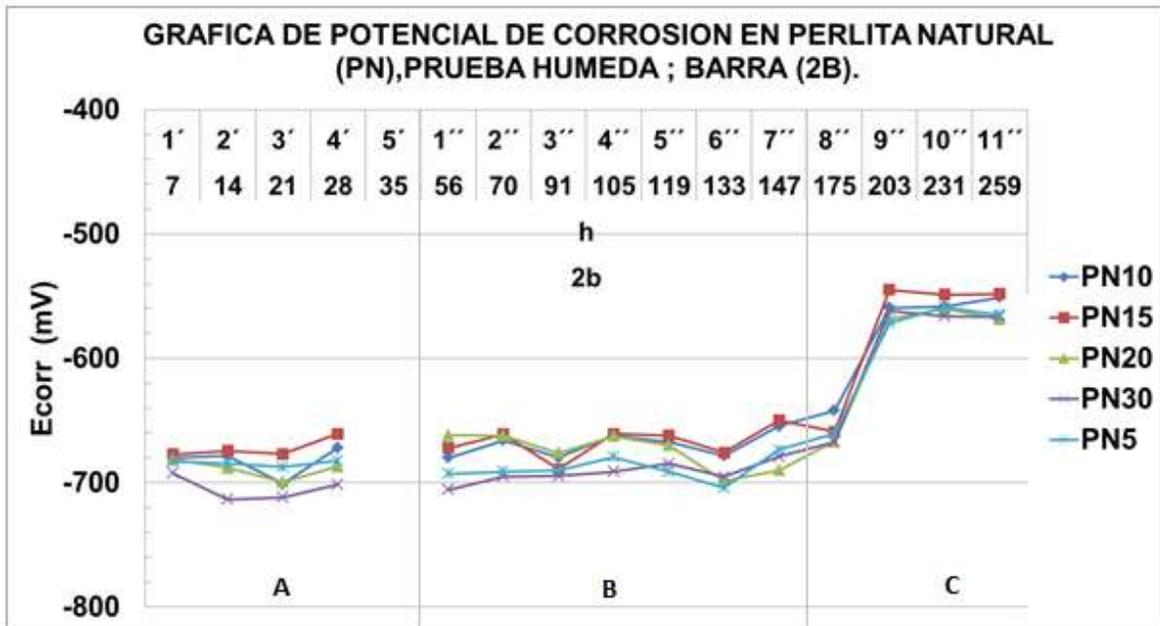


Ilustración 140. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

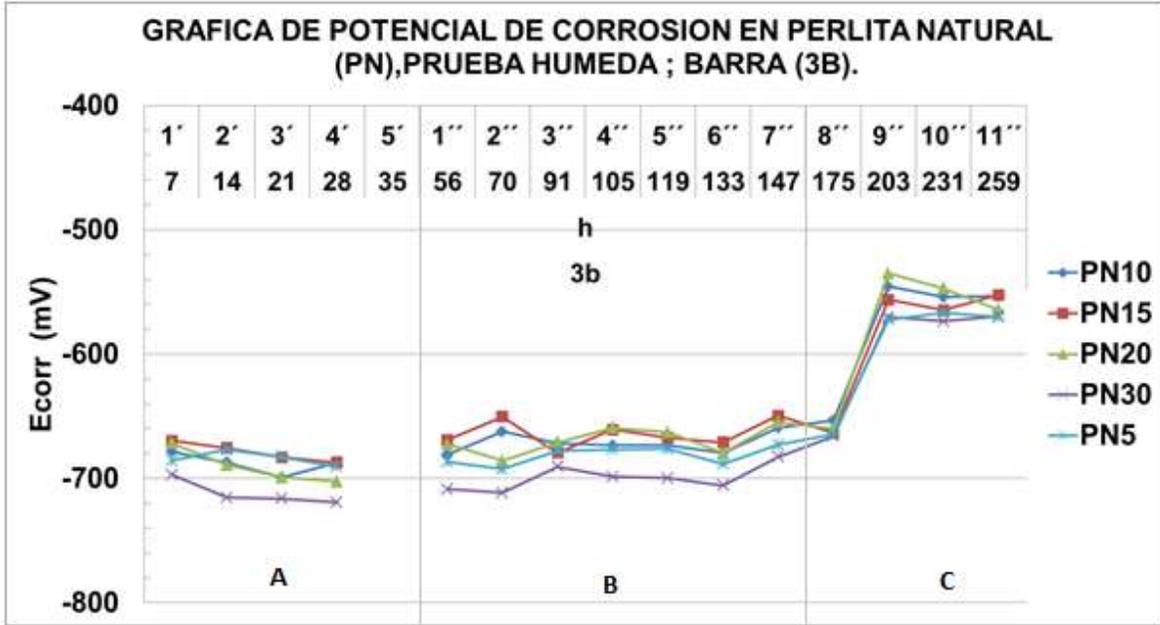


Ilustración 141. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

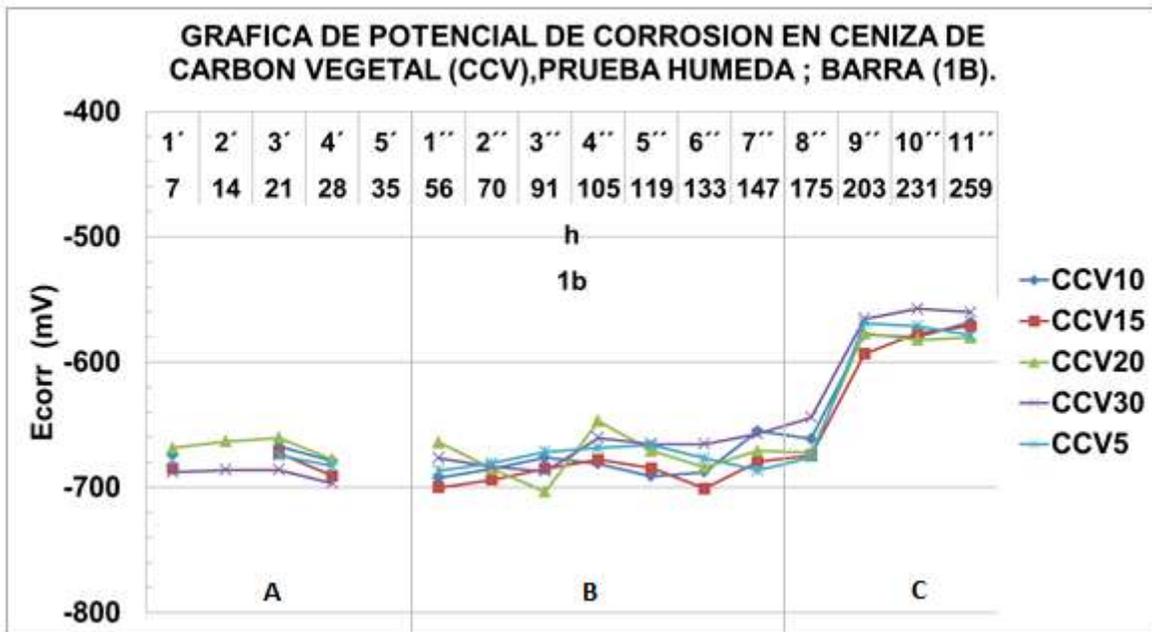


Ilustración 142. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

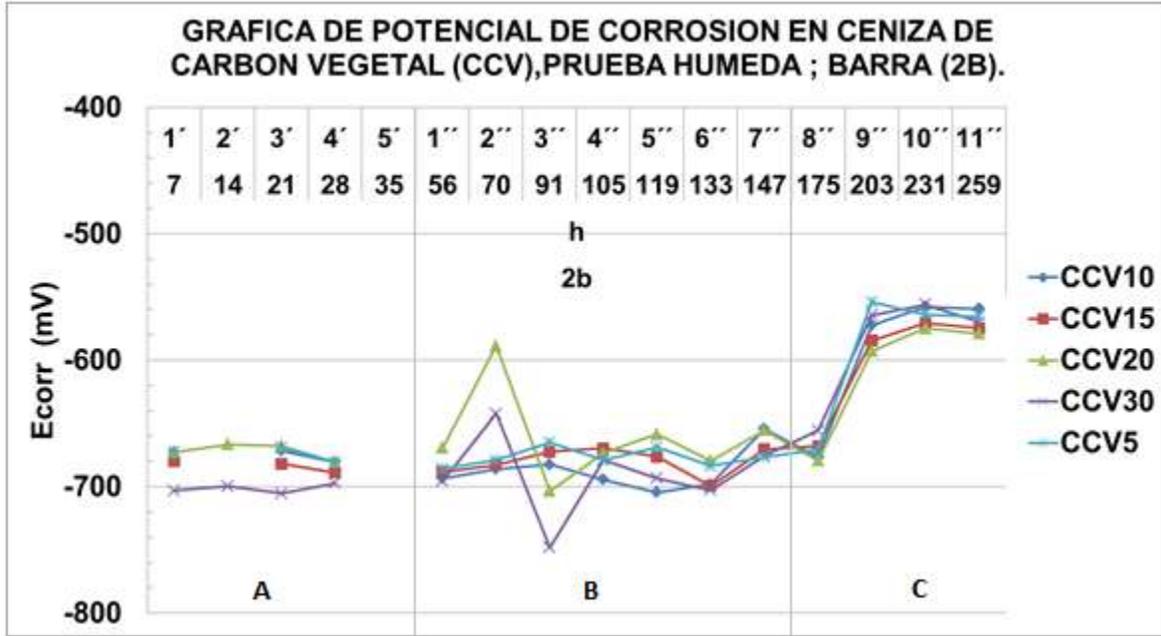


Ilustración 143. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

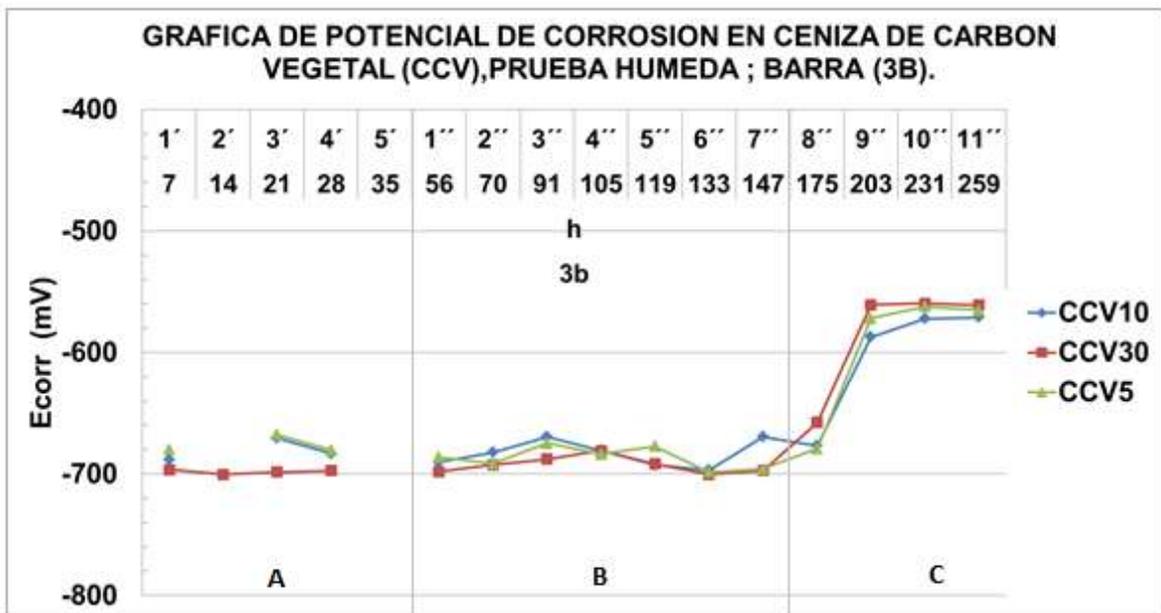


Ilustración 144. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)



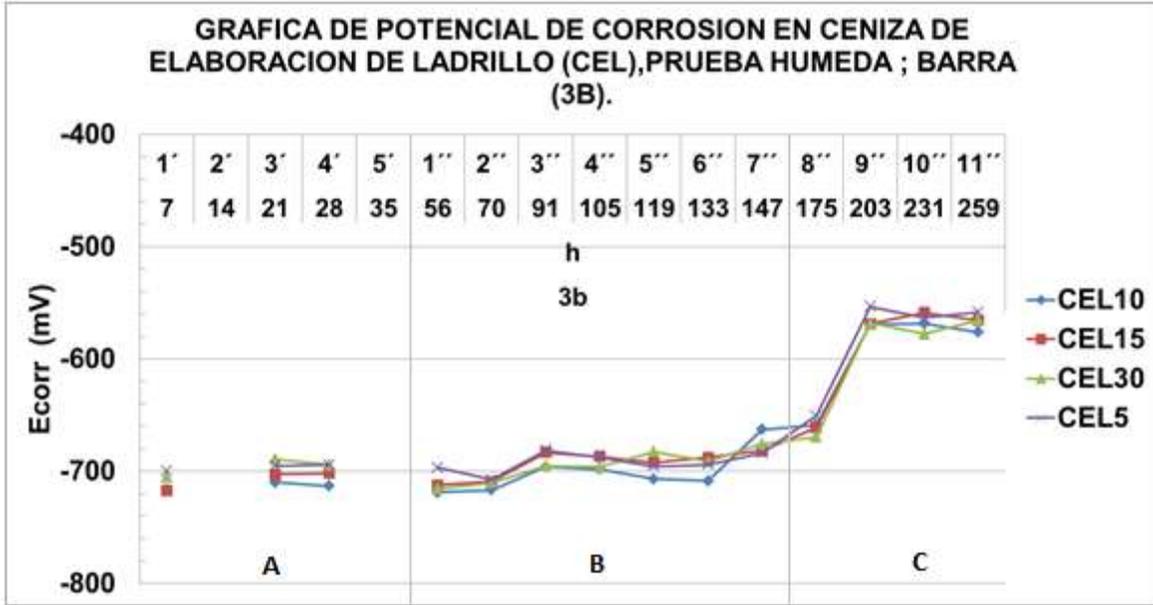


Ilustración 147. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

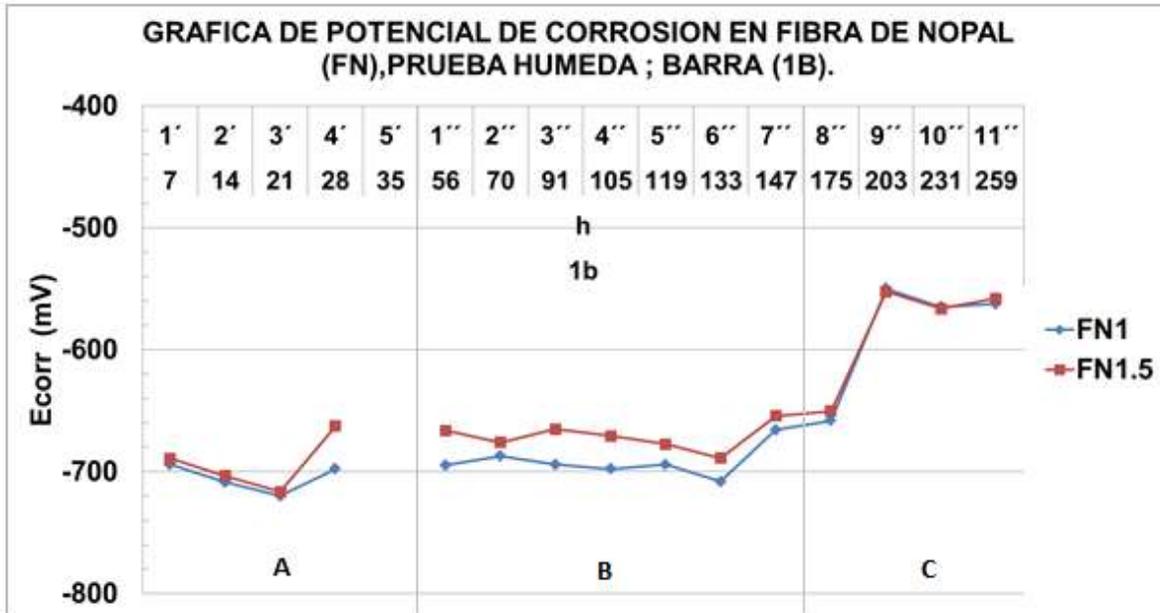


Ilustración 148. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 1; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

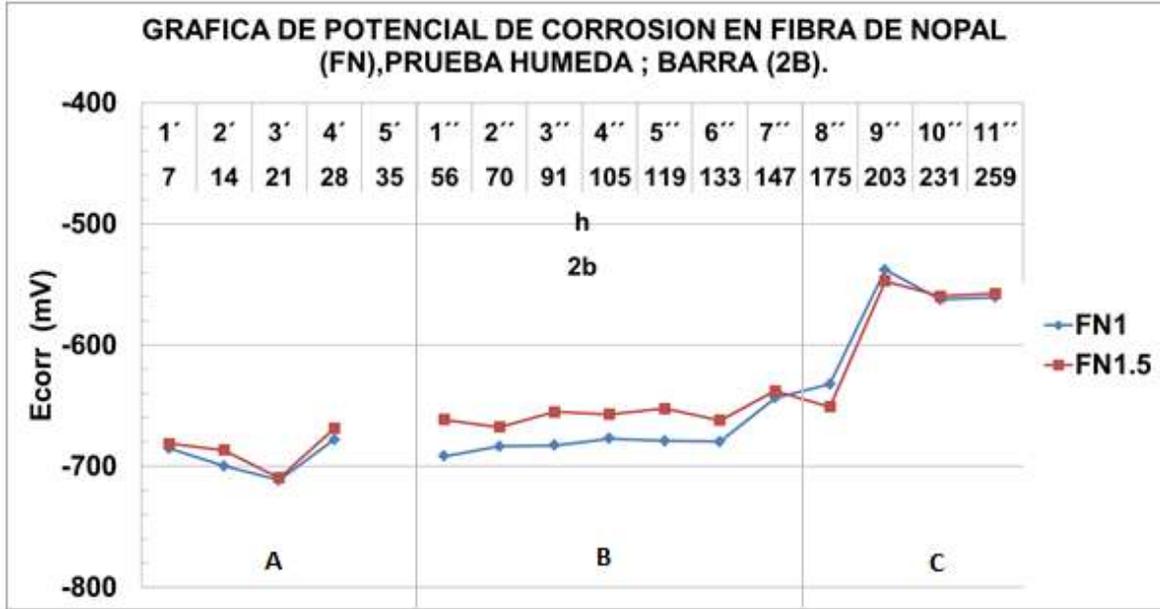


Ilustración 149. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)

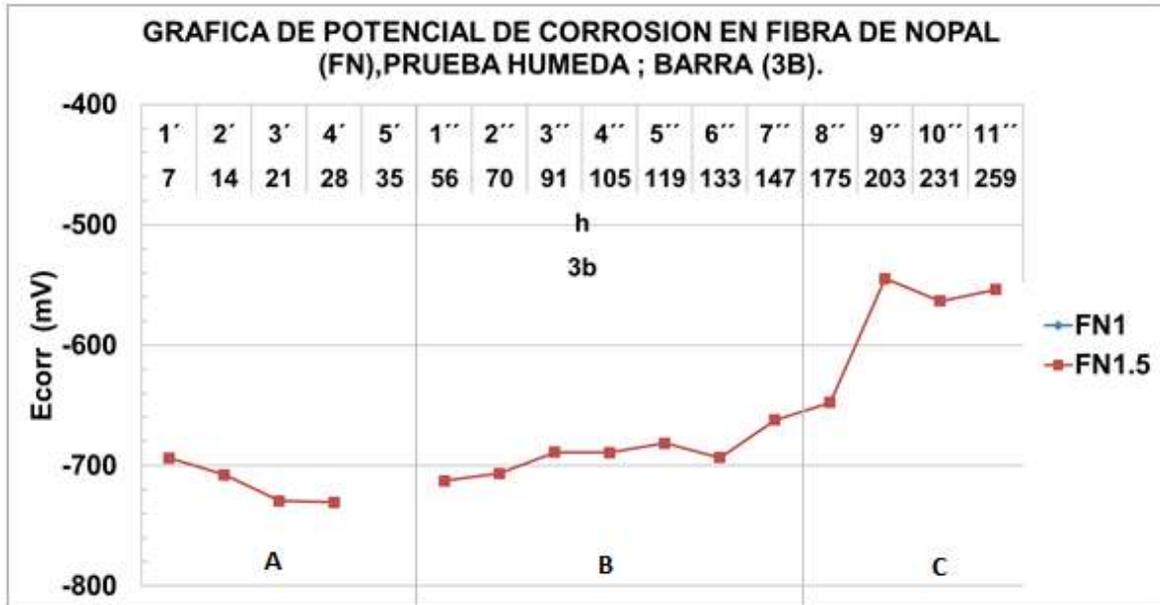


Ilustración 150. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 3; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco Martínez)



Los resultados de potenciales de corrosión monitoreados en las probetas con varillas de acero embebidas, para las pruebas secas se muestran en las ilustraciones de gráficas de la 151 a 162 en las sustituciones de PN, CCV, CEL Y FN. Como se puede observar en las gráficas de las ilustraciones se divide en dos partes, B y C, lo cual denota lo siguiente: **B** = La prueba se realizó una semana seca y una semana húmeda (en prueba seca, se cambiaba el NaCl por agua simple). **C** = En las pruebas secas las muestras se dejó a 3 semanas de secado y en la pruebas húmedas a 1 semana. De forma general en las pruebas secas para las sustituciones de PN, CCV, CEL Y FN se encuentran con un ( $E_{corr}$ ) de -100 a -550 mV (10% de probabilidad de corrosión, hay incertidumbre y una probabilidad del 90% de que hay corrosión), tal como se observa en la parte C de las gráficas que es la parte donde se realizó la prueba como estaba diseñada; y se evalúa con forme a la tabla 24 y 25.

Se tiene que una lectura más negativa de potencial de media celda generalmente es considerada para indicar una alta probabilidad de corrosión. Sin embargo, esta regla general no siempre se puede aplicar debido a la complejidad del concreto de hoy y las tecnologías de reparación. La evaluación de corrosión de acuerdo con los primeros valores de potenciales de corrosión obtenidos pueden llevar a los ingenieros a errores si otros factores como la concentración de oxígeno, carbonatación, concentración del ion cloruro e inhibidores de corrosión no se toman en cuenta (NMX-C-495-ONNCCE, 2015).

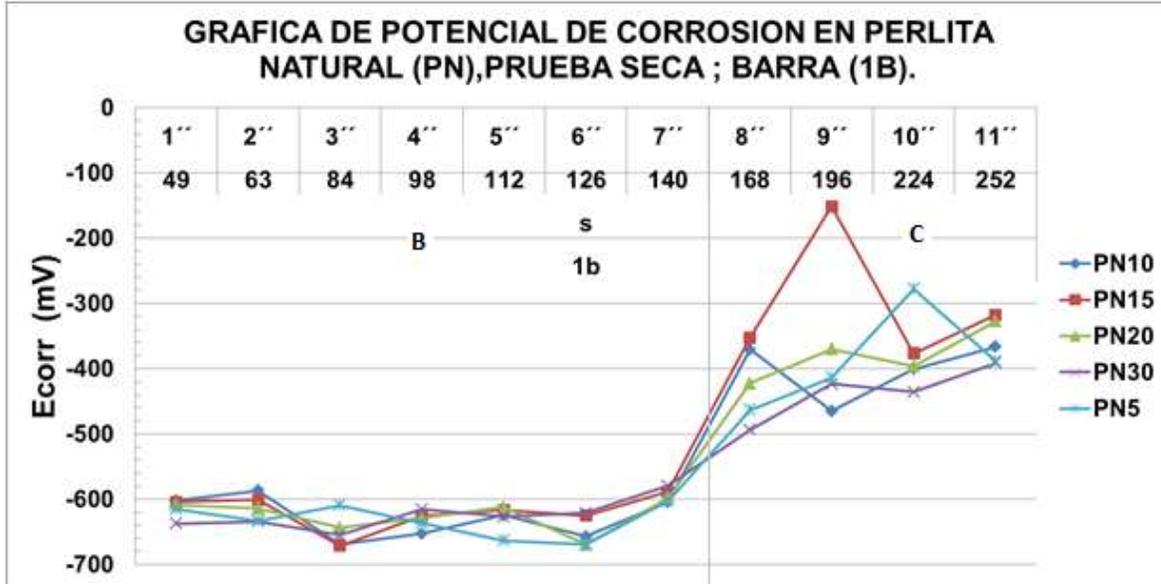


Ilustración 151. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

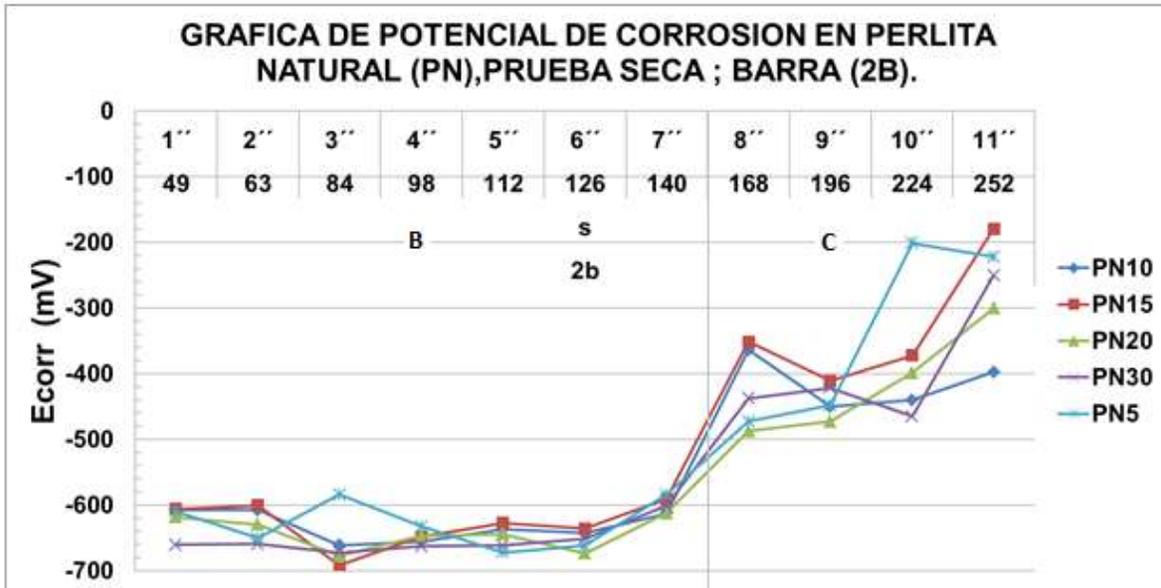


Ilustración 152. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

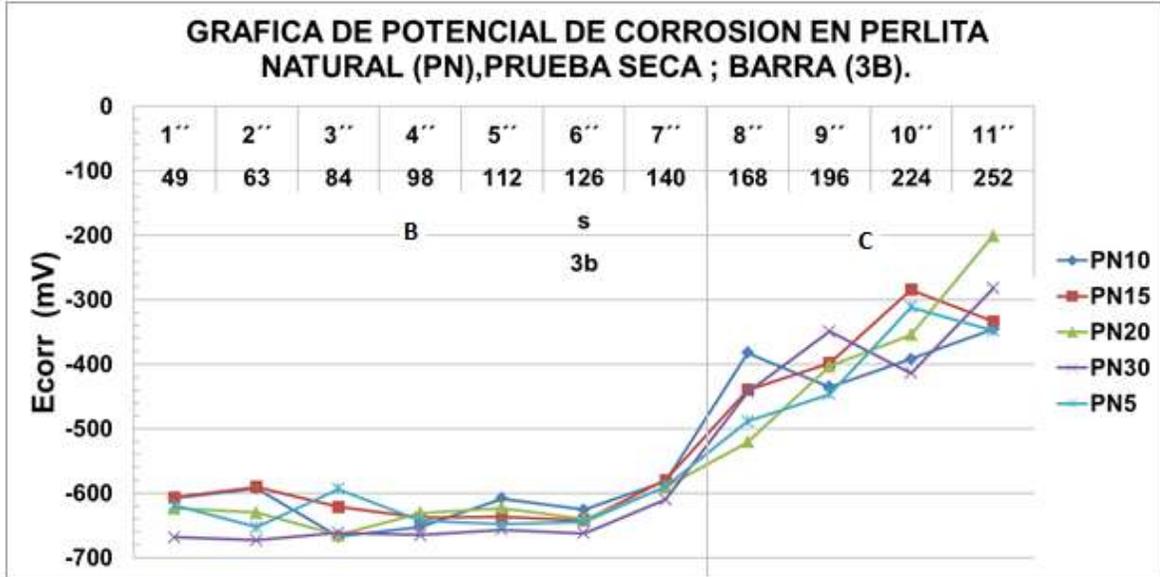


Ilustración 153. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 3; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

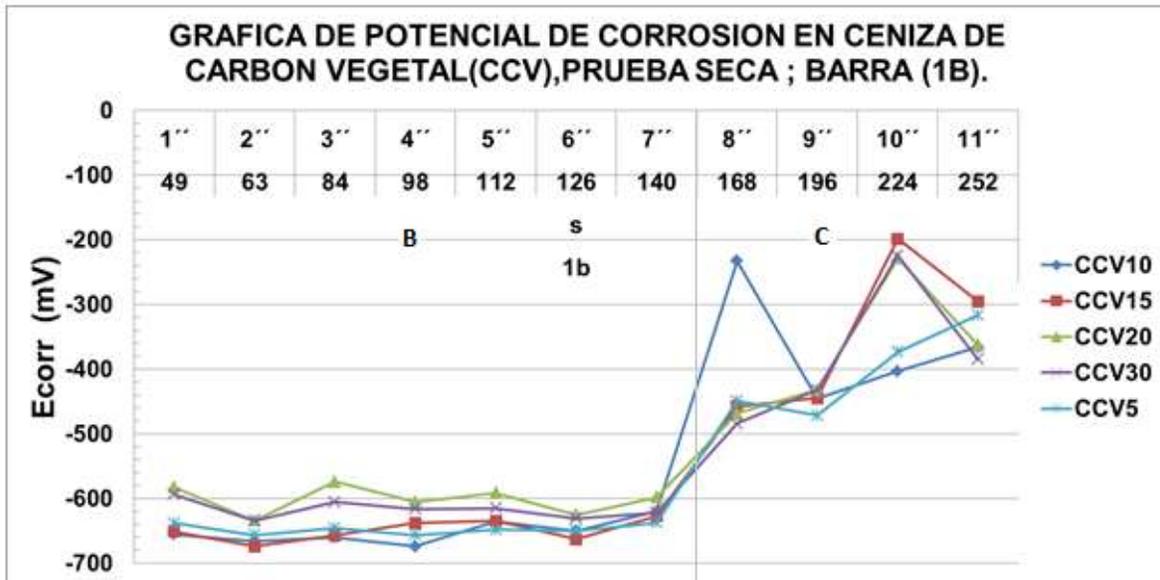


Ilustración 154. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

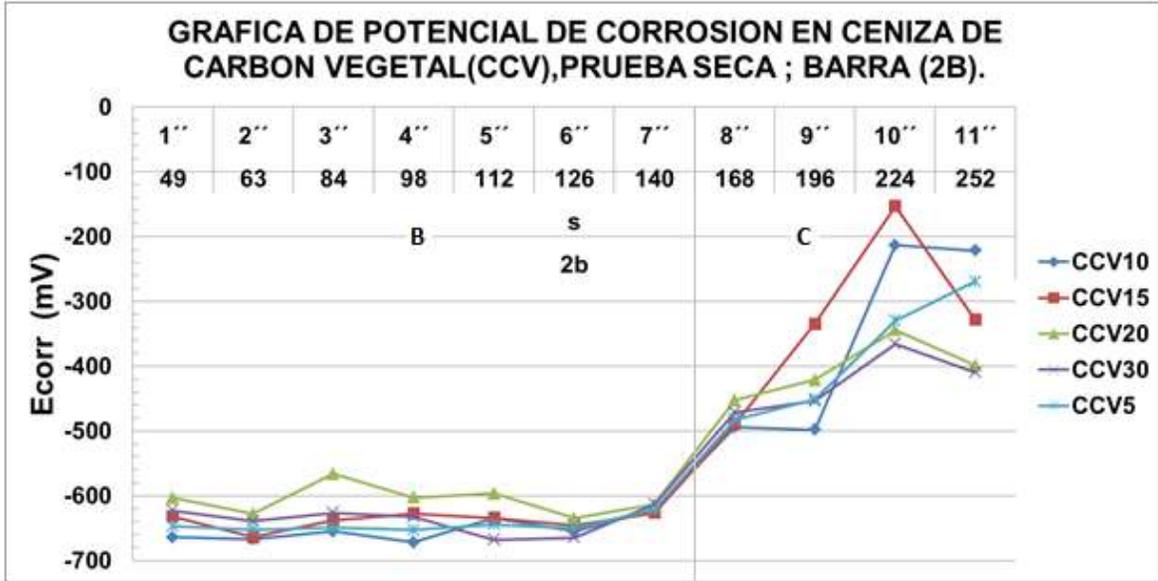


Ilustración 155. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

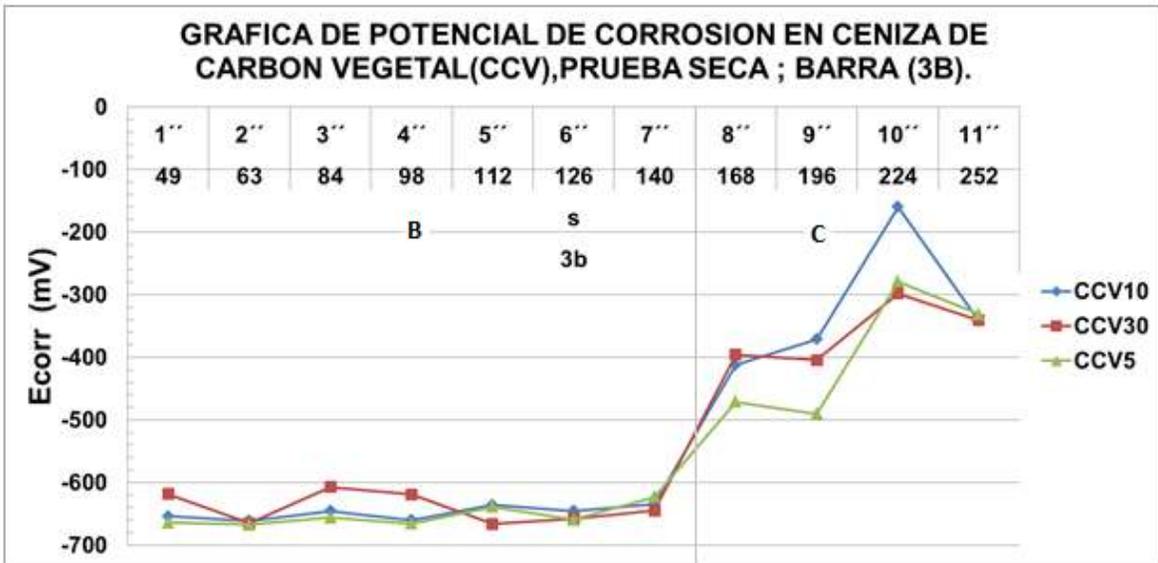


Ilustración 156. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 3; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

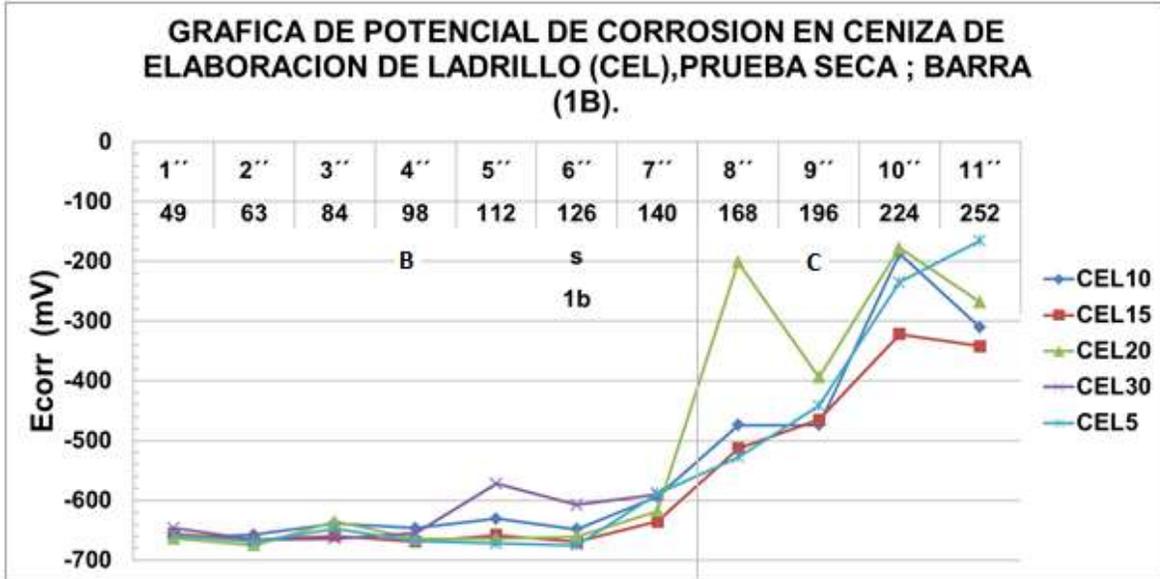


Ilustración 157. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

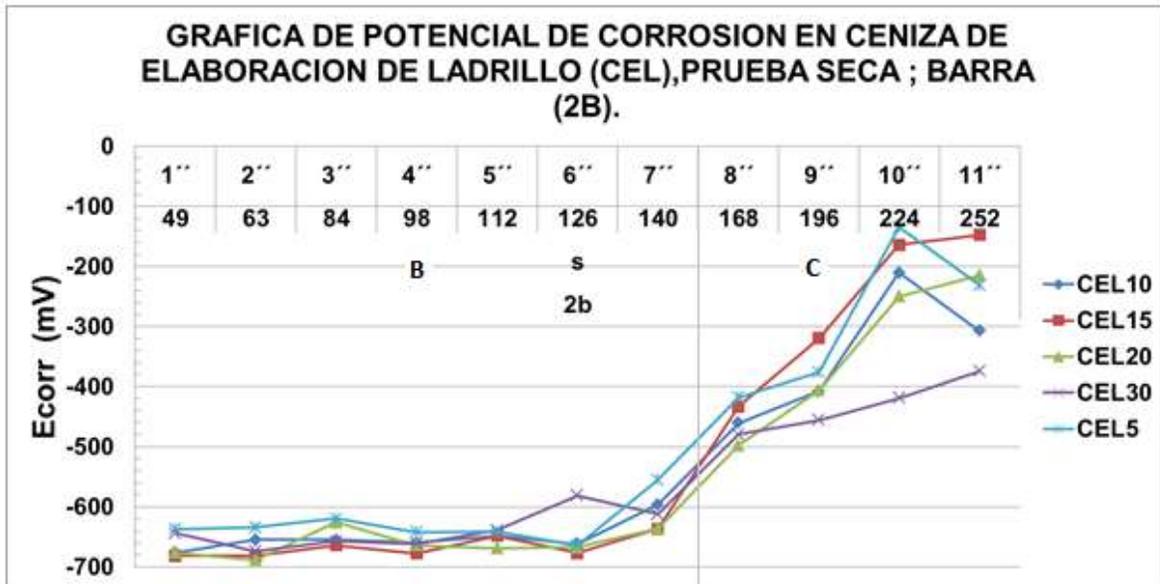


Ilustración 158. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

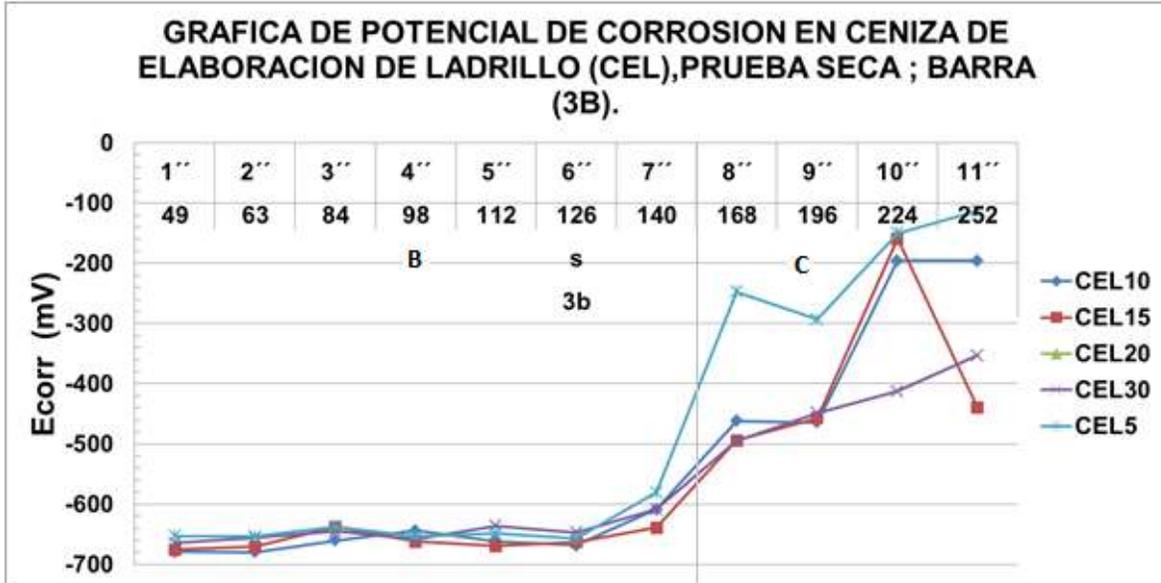


Ilustración 159. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 3; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

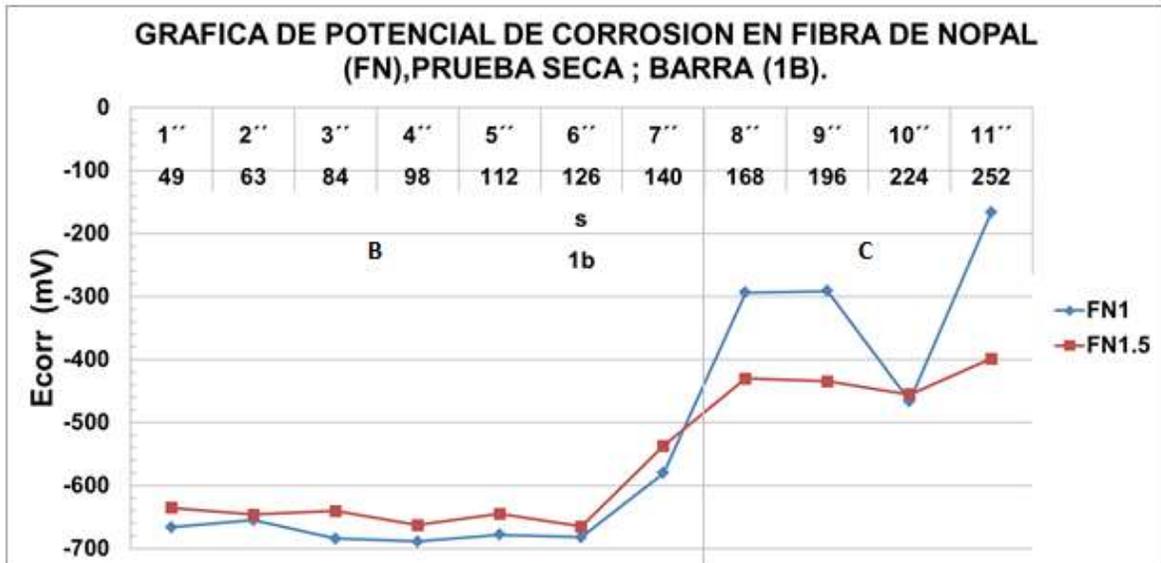


Ilustración 160. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 1; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

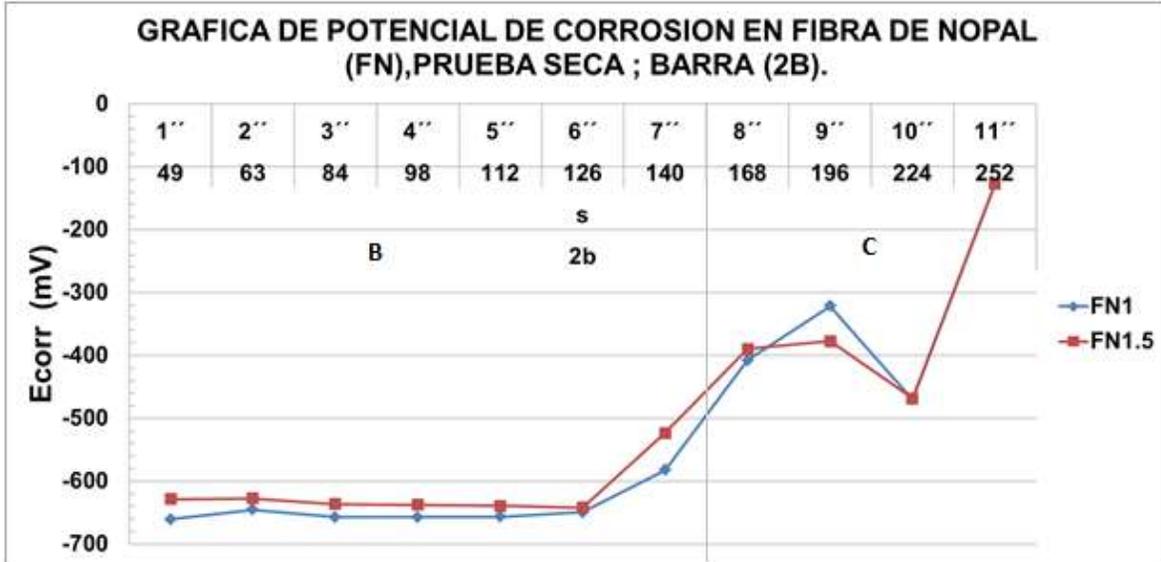


Ilustración 161. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)

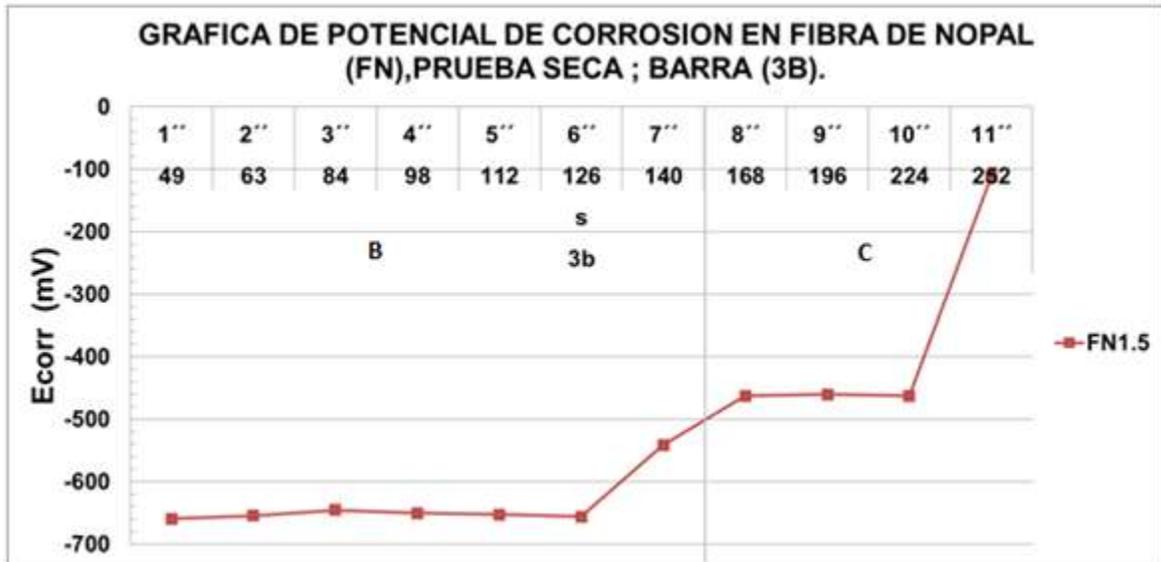


Ilustración 162. Potenciales de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 3; prueba Seca. Fuente: (T. Francisco Martínez)



### 9.6.9.2 Velocidad de corrosión

De acuerdo al criterio de evaluación que hace la (CYTED-DURAR, 1998), Una clasificación de los valores de  $i_{corr}$  o velocidad de corrosión en términos de vida útil es la que se muestra en la tabla 26.

Tabla 26. Clasificación de los valores de  $i_{corr}$  en términos de vida útil. Fuente: (Bernabé Reyes, 2015)

$i_{corr}$ ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ )	Velocidad de Corrosión (mm/año)	Nivel de Corrosión
< 0.1	<0.0058	Despreciable
0.1 – 0.5	0.00116 – 0.0058	Moderado
0.5 – 1	0.0058 – 0.0116	Elevado
> 1	>0.0116	Muy Elevado

Los resultados de velocidad de corrosión monitoreados en las probetas con varillas de acero embebidas, para las pruebas húmedas se muestran en las ilustraciones de gráficas de la 163 a 167 en las sustituciones de PN, CCV, CEL Y FN. Los resultados que se muestran son de las 4 últimas del total de pruebas realizadas, que son las pruebas que se realizó como estaba diseñado para que se llevara a cabo. Los resultados indican que están dentro de un nivel de corrosión muy elevado de acuerdo a la tabla 26, puede ser por la edad en que se probó las muestras y también por el tiempo que estuvo guardado las muestras desde su elaboración (3 años en reposo) y sin pasar por un proceso de curado. En la perlita natural que más o menos tiene un comportamiento bueno es la PN20% y que va de un rango de  $i_{corr}$  de 25 a 56  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , en la ceniza de carbón vegetal el % favorable es la CCV15% que va de un rango de  $i_{corr}$  de 15 a 56  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , en la ceniza de elaboración de ladrillo la favorable es la CEL20% que va de un rango de  $i_{corr}$  de 28 a 65  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y la fibra de nopal FN1.5% con un  $i_{corr}$  de 24 a 49  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  que es la más favorable de las 4 sustituciones seguido de CCV15%, PN20% y CEL20%, ver ilustración 167. Los valores máximos que se han detectado en ensayos de laboratorio son del orden de 100-200  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  (CYTED-DURAR, 1998).

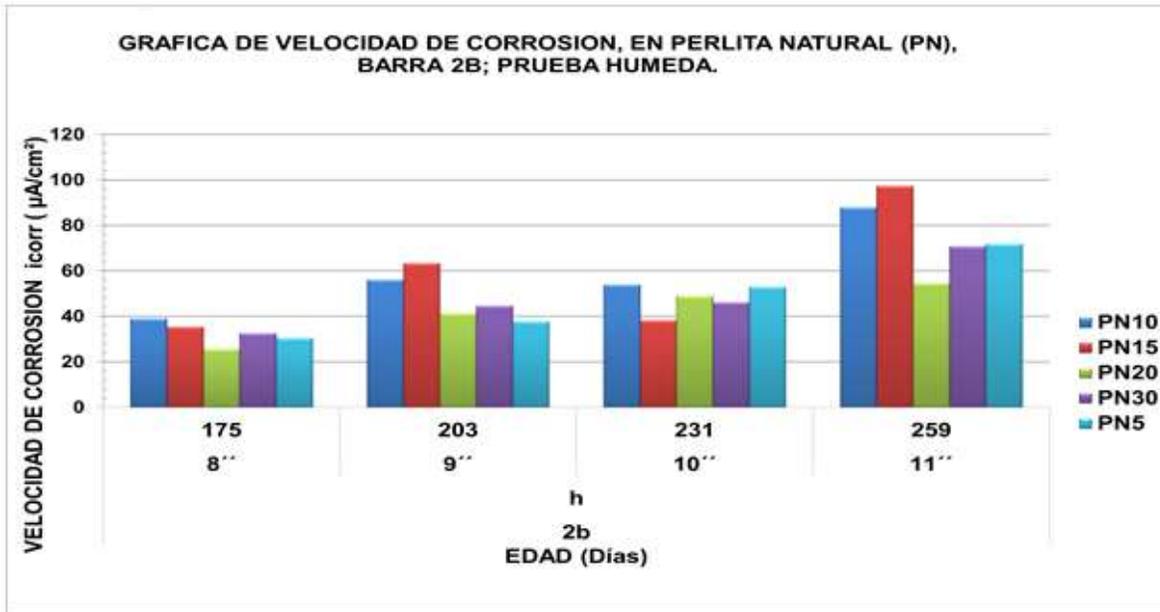


Ilustración 163. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

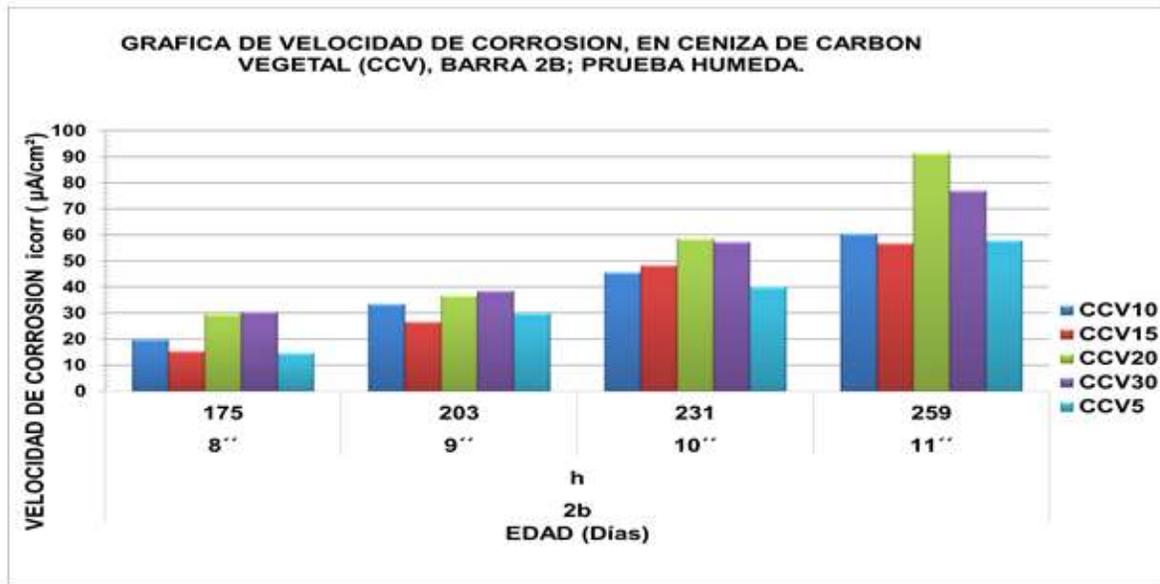


Ilustración 164 Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

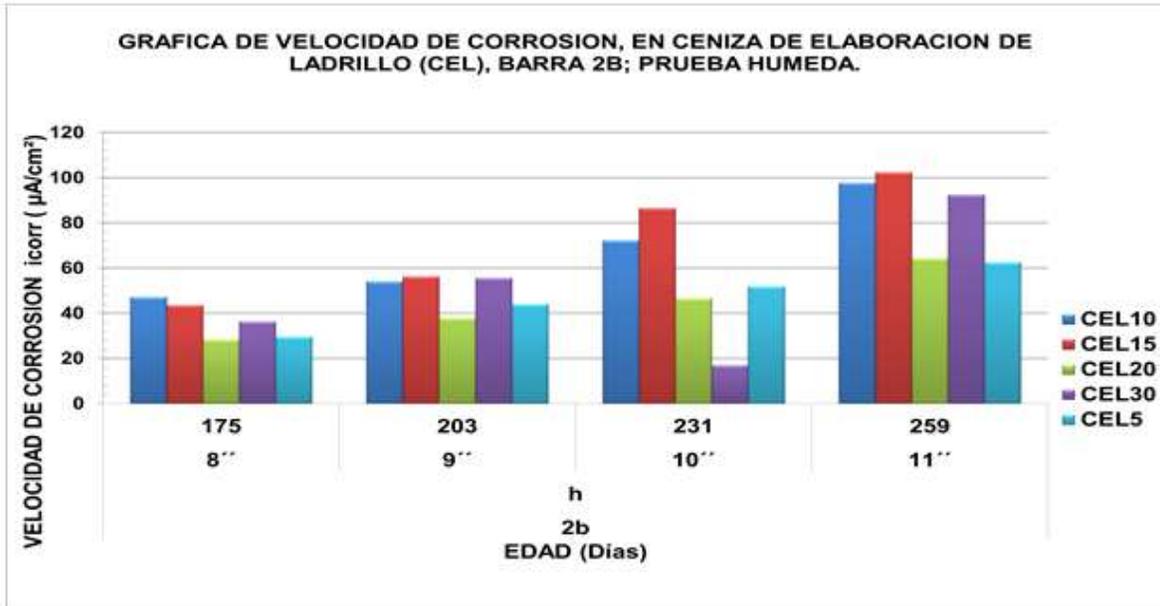


Ilustración 165. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

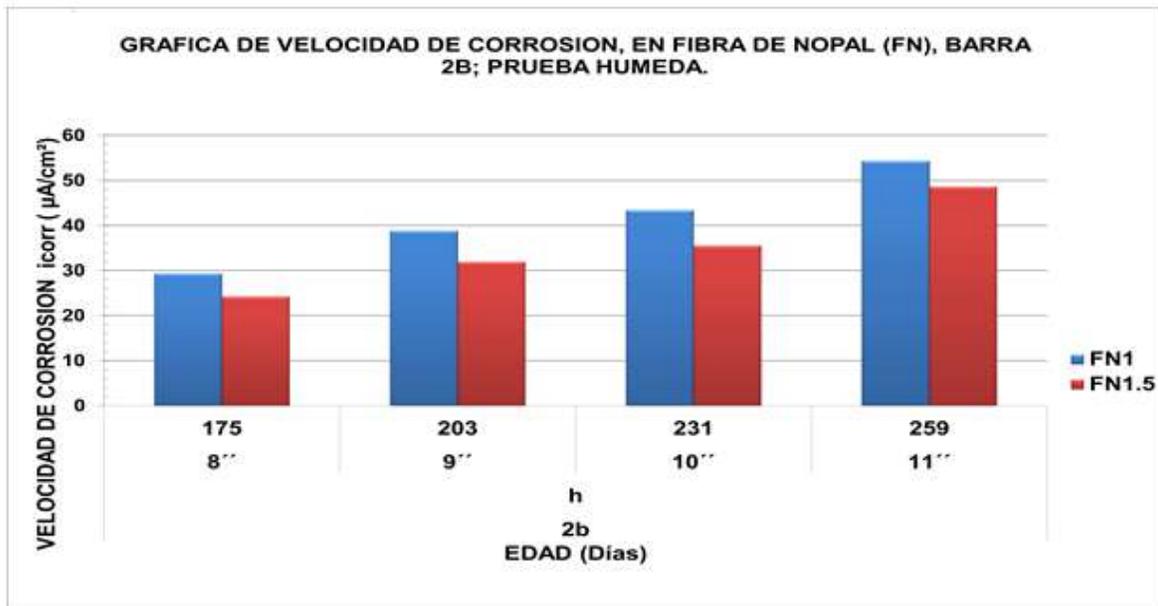


Ilustración 166. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

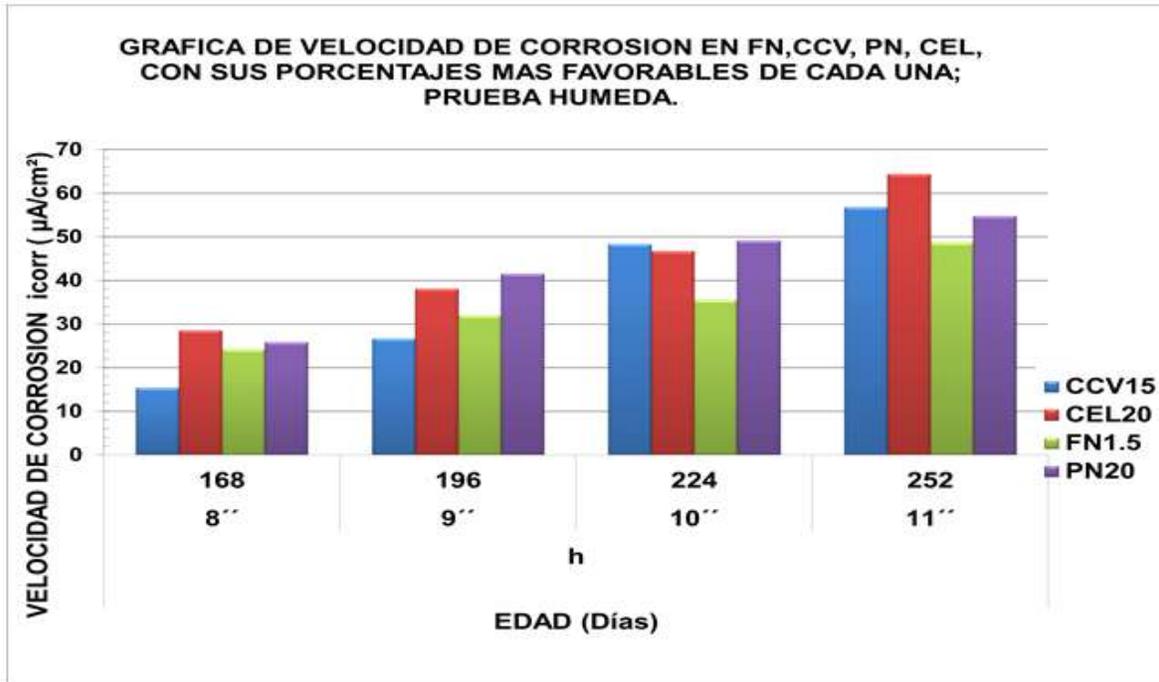


Ilustración 167. Gráfica de velocidad de corrosión en FN1.5%, CCV15%, PN20% y CEL20% más favorables, prueba húmeda. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

Los resultados de velocidad de corrosión monitoreados en las probetas con varillas de acero embebidas, para las pruebas secas se muestran en las ilustraciones de gráficas de la 168 a 172 en las sustituciones de PN, CCV, CEL Y FN. Los resultados que se muestran son de las 4 últimas del total de pruebas realizadas, que son las pruebas que se realizó como estaba diseñado para que se llevara a cabo. Los resultados indican que están dentro de un nivel de corrosión muy elevado de acuerdo a la tabla 26, es por la edad en que se probó las muestras y también por el tiempo que estuvo guardado las muestras desde su elaboración (3 años en reposo) y sin pasar por un proceso de curado. La perlita natural presenta un comportamiento bueno en la sustitución de 15% (PN15%), en el rango de  $i_{corr}$  de 2.5 a 4.1  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , en la ceniza de carbón vegetal el % favorable es la CCV15% que va de un rango de  $i_{corr}$  de 0.7 a 4  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ , en la ceniza de elaboración de ladrillo la favorable es la CEL20% que va de un rango de  $i_{corr}$  de 0.1 a 38  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$  y la fibra de nopal en FN1.5% con un  $i_{corr}$  de 1.4 a 7.0  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Los sustitutos más favorables son como se enumera a continuación:



CCV15%, PN15%, FN1.5% y CEL20%, ver ilustración 172. De forma general, en las pruebas húmedas, en comparación con las secas, se observa gran diferencia en cuanto a los valores obtenidos, esto es debido a que el potencial de corrosión permanece constante, entonces podemos inferir que bajas resistencias permiten el paso de mayores cantidades de corriente y viceversa. Si relacionamos este hecho con la pérdida de especies metálicas, entonces bajas resistencias a la polarización ( $R_p$ ) corresponden a valores altos de velocidad de corrosión y viceversa (Torres, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010).

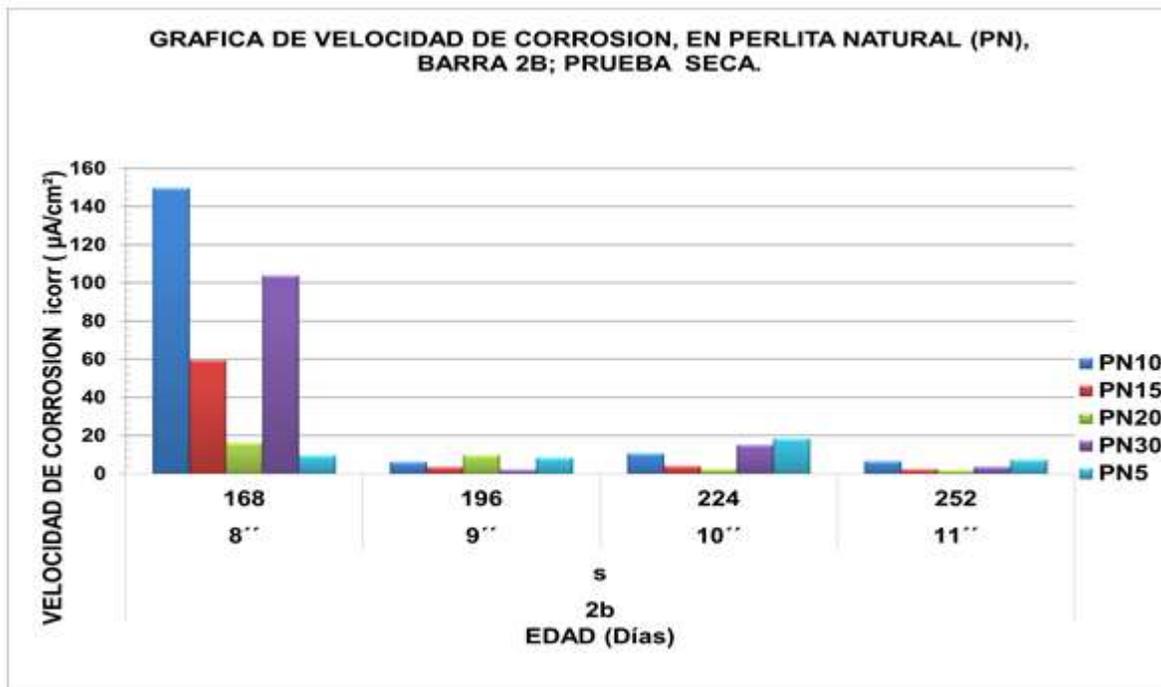


Ilustración 168. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de PN, probeta 2; prueba seca.

Fuente: (T. Francisco. Martínez)

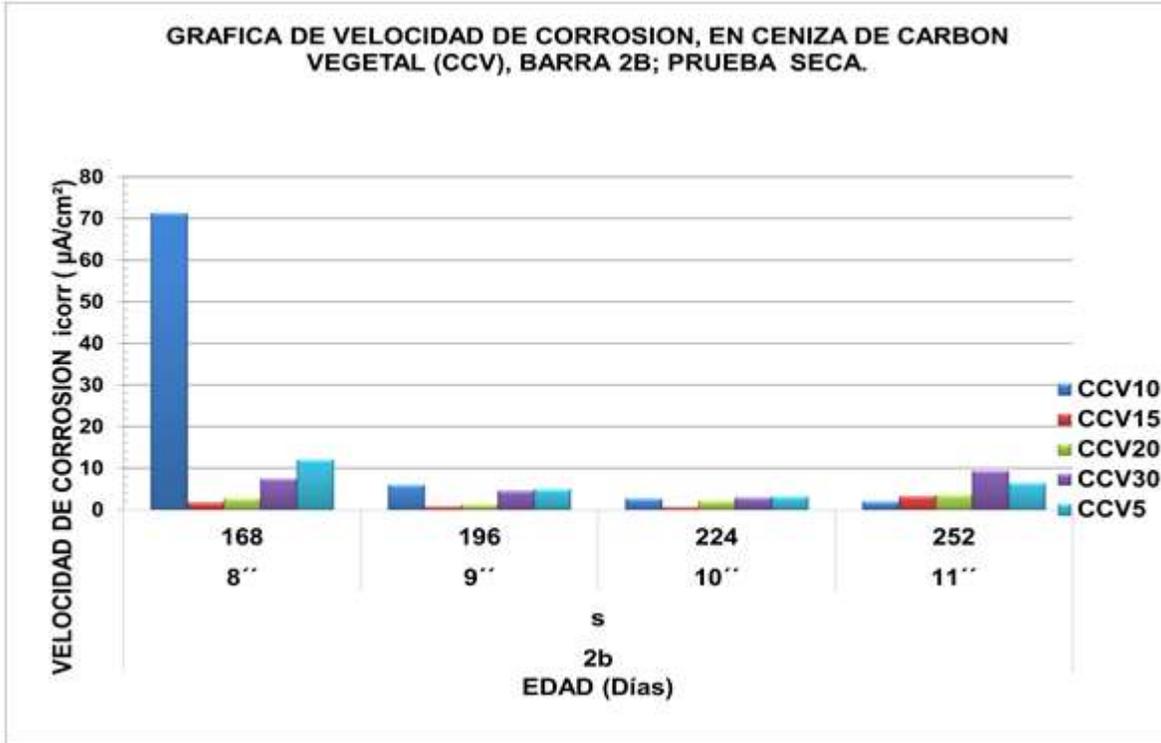


Ilustración 169. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CCV, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

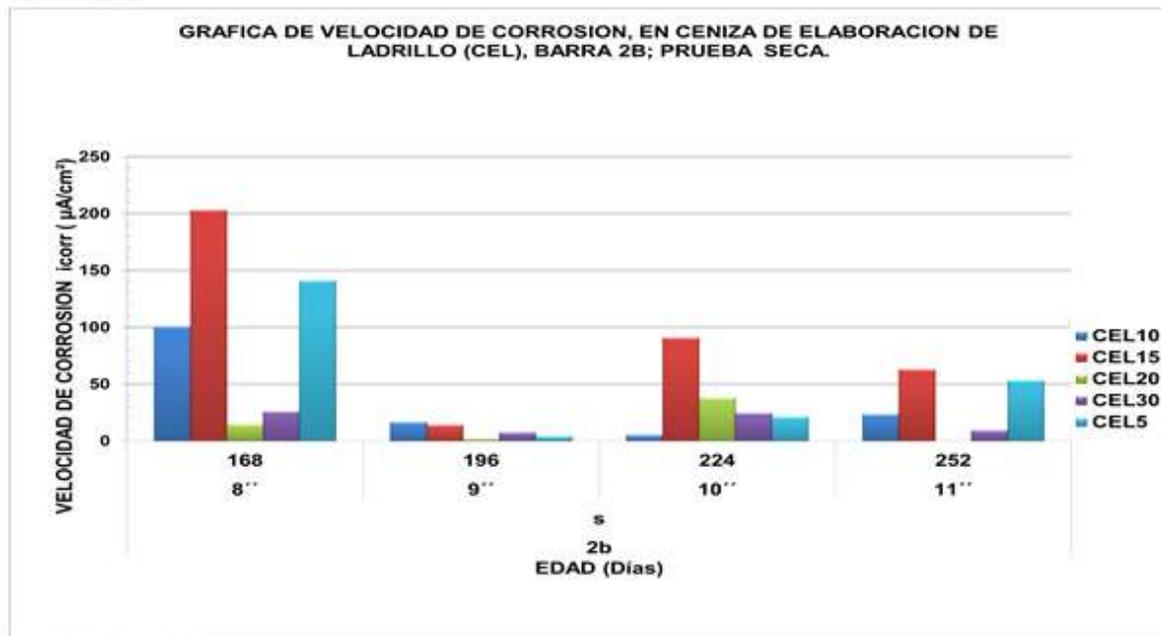


Ilustración 170. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de CEL, probeta 2; prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

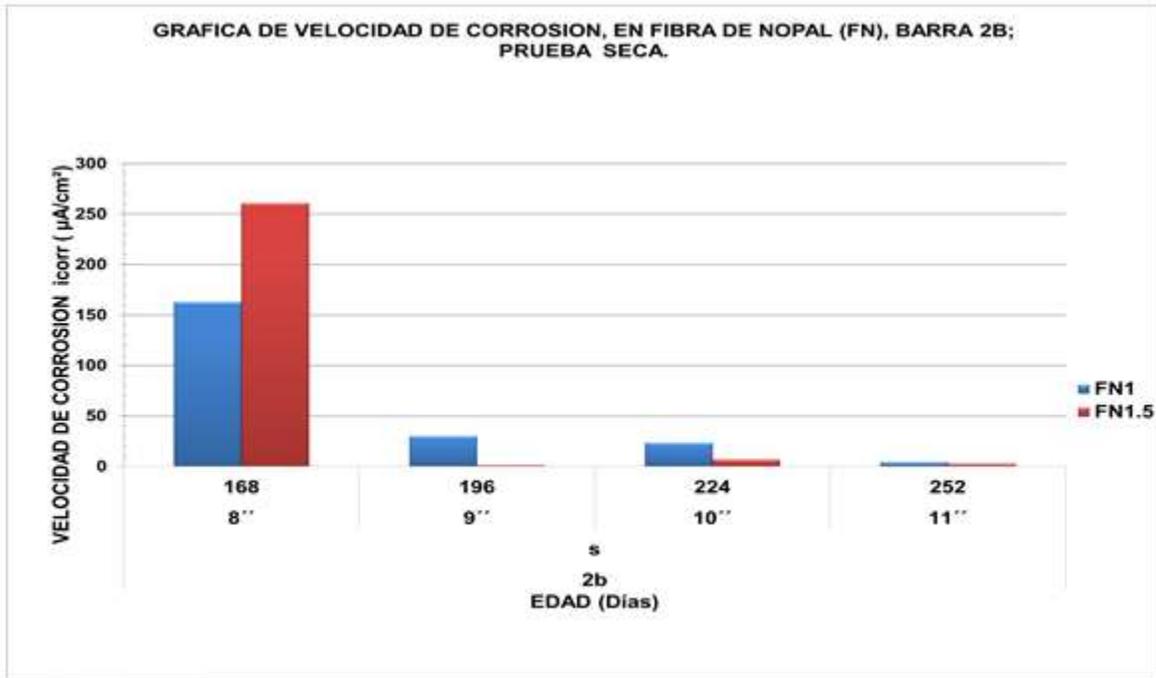


Ilustración 171. Velocidad de corrosión obtenidos en los morteros con sustituciones de FN, probeta 2; prueba seca.

Fuente: (T. Francisco. Martínez)

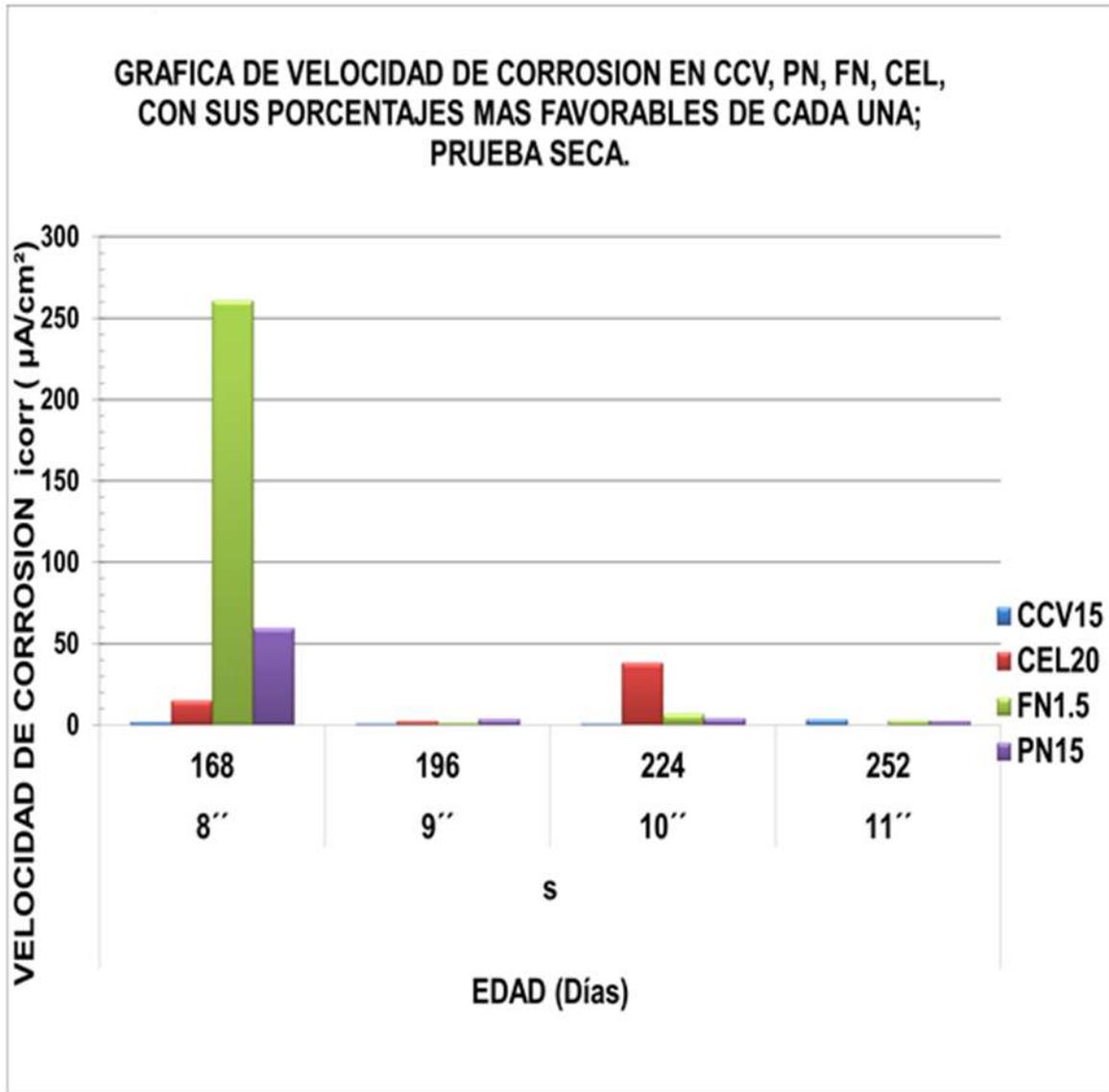


Ilustración 172. Gráfica de velocidad de corrosión en CCV15%, PN15%, FN1.5% y CEL20% más favorables, prueba seca. Fuente: (T. Francisco. Martínez)



### ***9.6.9.3 Levantamientos de grietas.***

Los resultados para el levantamiento de grietas se muestran en las ilustraciones de la 173 a 181. Se observa que de las 4 sustituciones con las que se trabajó la perlita natural (PN) casi en todos sus porcentajes de sustituciones presentaron grietas con un ancho que va de 0.05 mm a 0.25 mm. En la ceniza de carbón vegetal (CCV), en unos porcentajes se presentaron manchas en la parte base o extremo del acero de refuerzo embebido con un diámetro de 0.5 mm a 0.6 mm tal es el caso de CCV10% y de los otros porcentajes grietas con un ancho que va de 0.05 mm a 0.15 mm. En la ceniza de elaboración de ladrillo (CEL) se presentaron manchas en la parte base o extremo del acero de refuerzo con un diámetro de 0.4 mm a 0.65 mm y grietas con un ancho que va de 0.05 mm a 0.25 mm. Para la fibra de nopal solamente una mancha en FN1.5% con un diámetro de 0.45 mm.

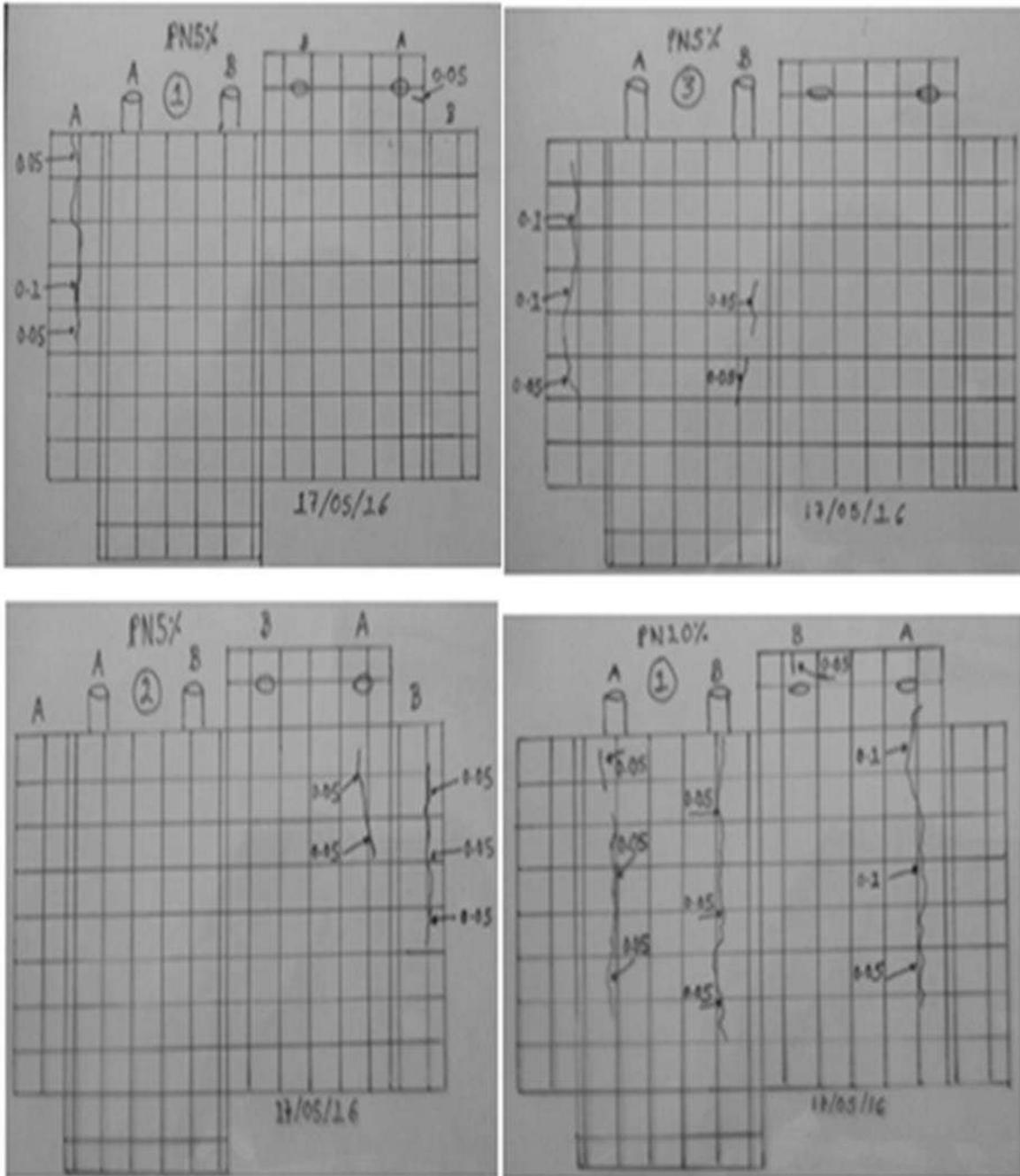


Ilustración 173. Levantamiento de grietas en PN5% en probetas 1, 2 y 3, PN10% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

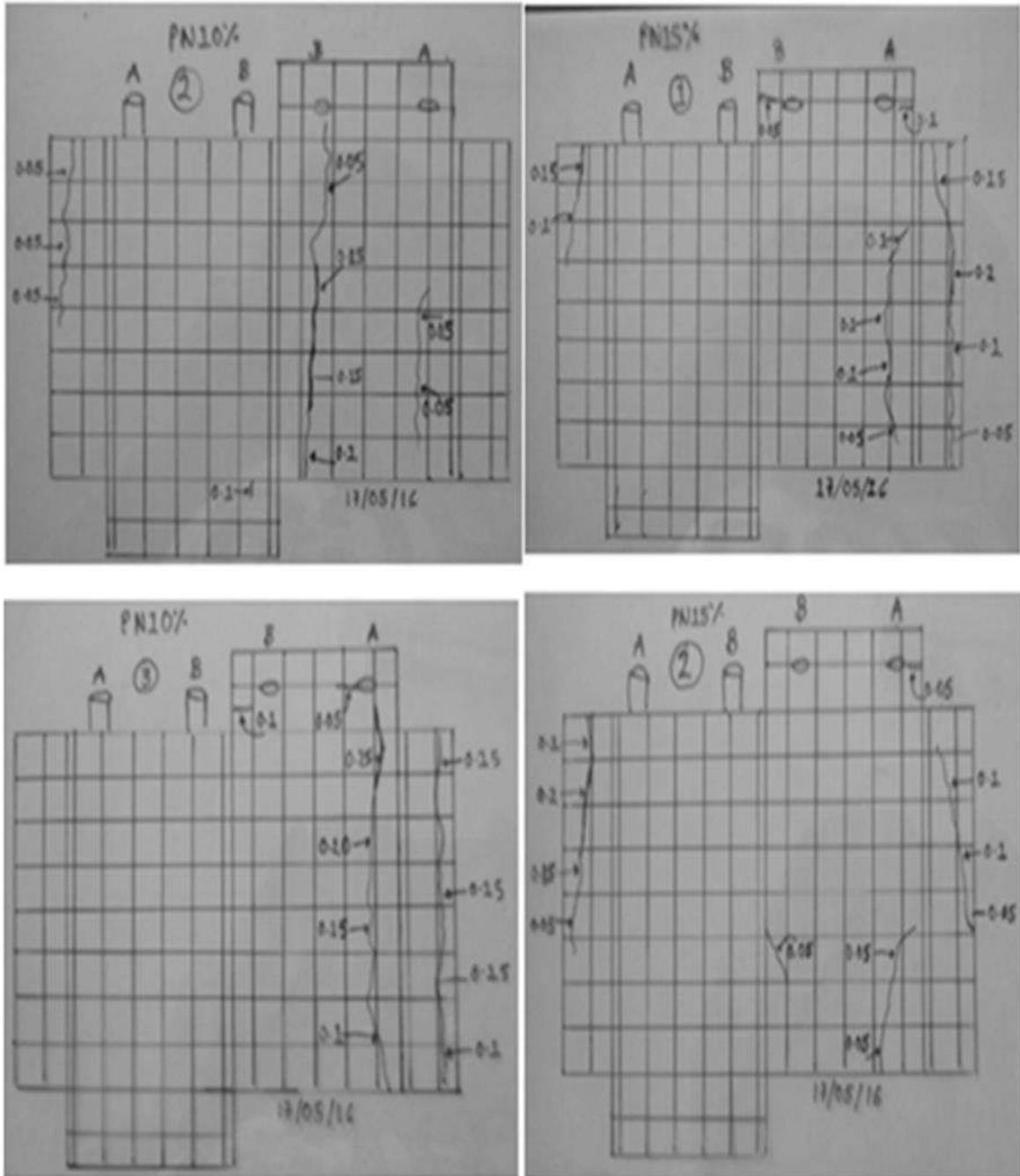


Ilustración 174. Levantamiento de grietas en PN10% en probetas 2 y 3, PN15% en probetas 1 y 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez)



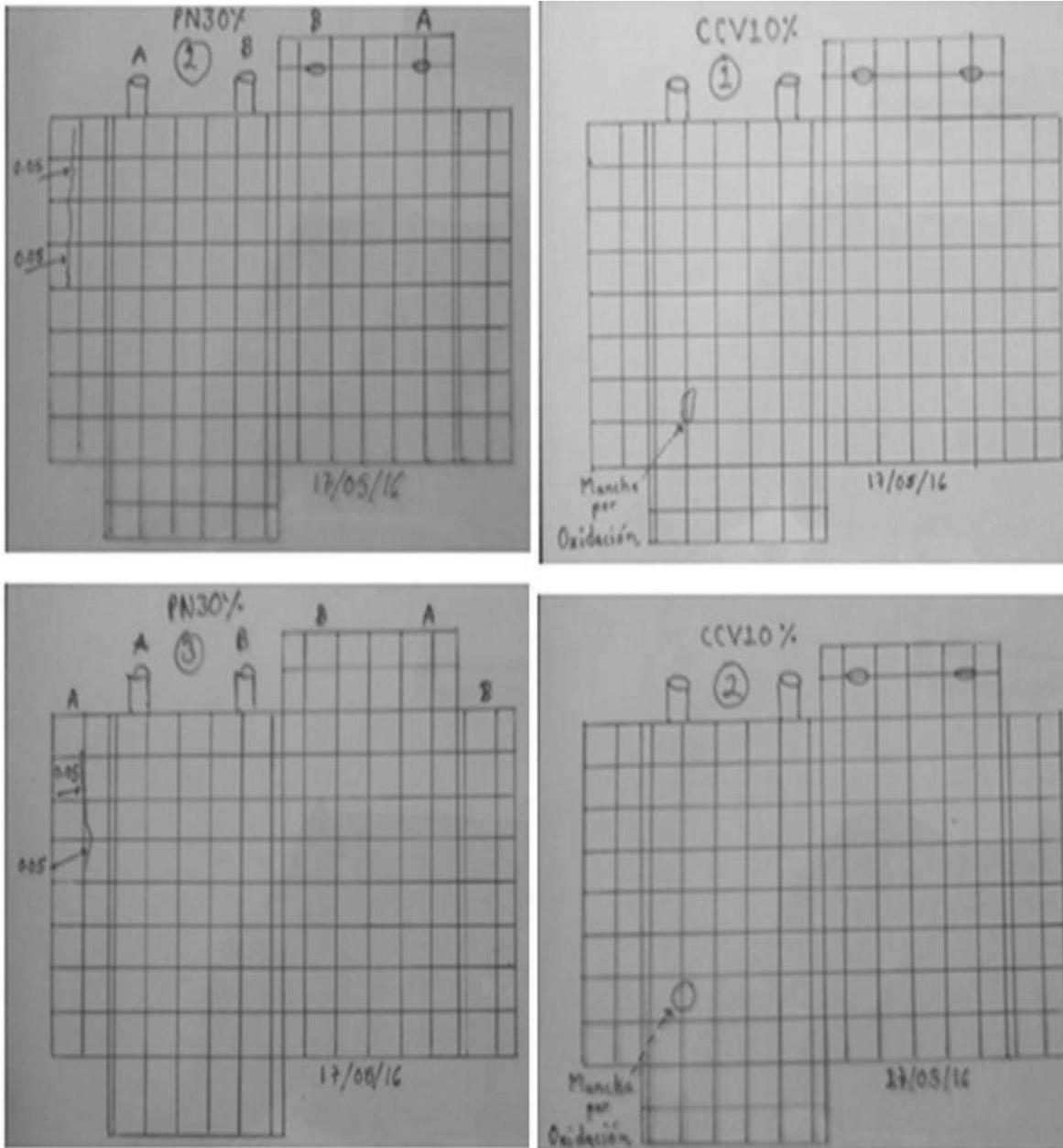


Ilustración 176. Levantamiento de grietas en PN30% en probetas 2 y 3, CCV10% en probetas 1 y 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

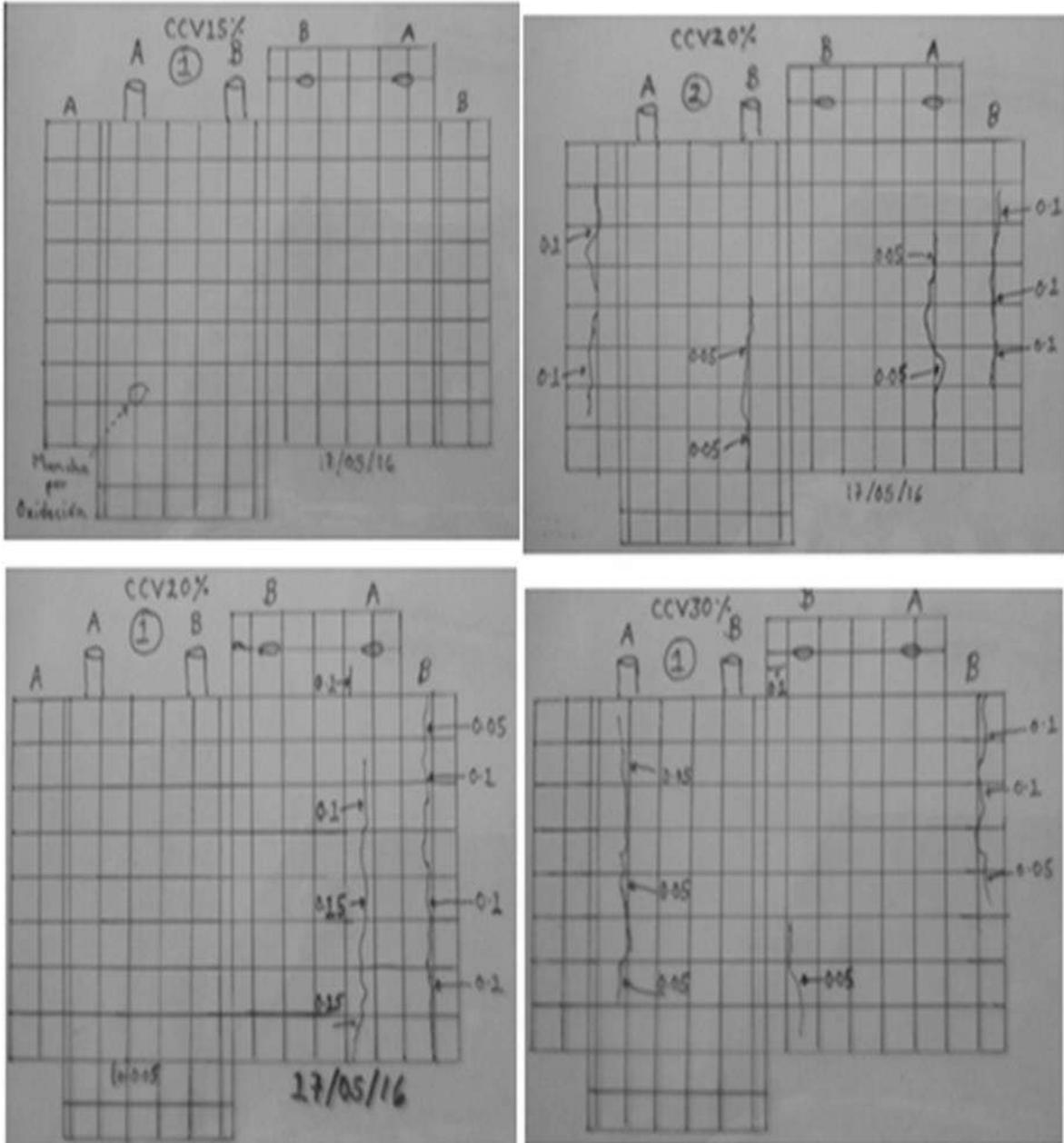


Ilustración 177. Levantamiento de grietas en CCV15% en probeta 1, CCV20% en probetas 1 y 2 y CCV30% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

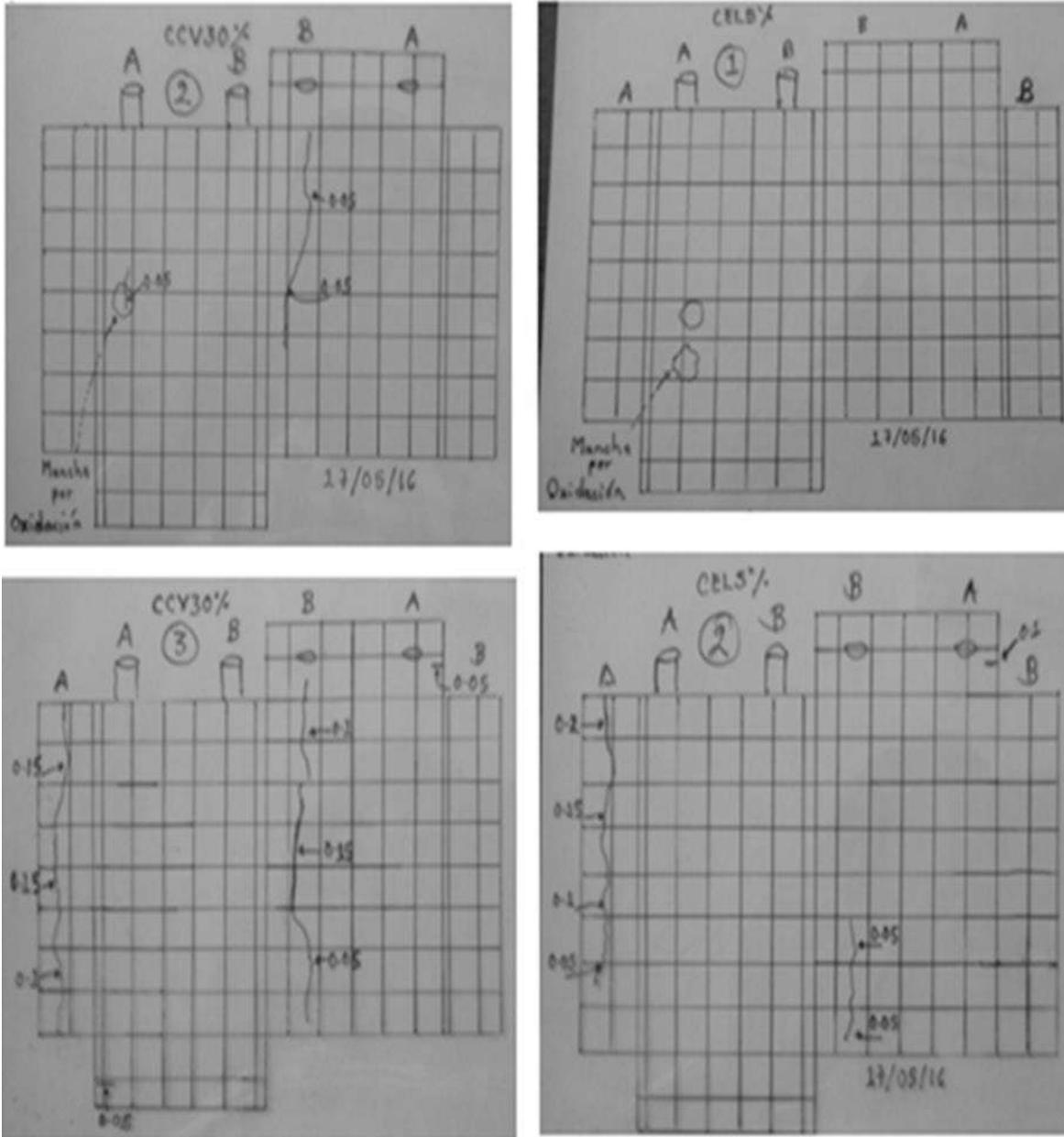


Ilustración 178. Levantamiento de grietas en CCV30% en probetas 2 y 3, CEL5% en probetas 1 y 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

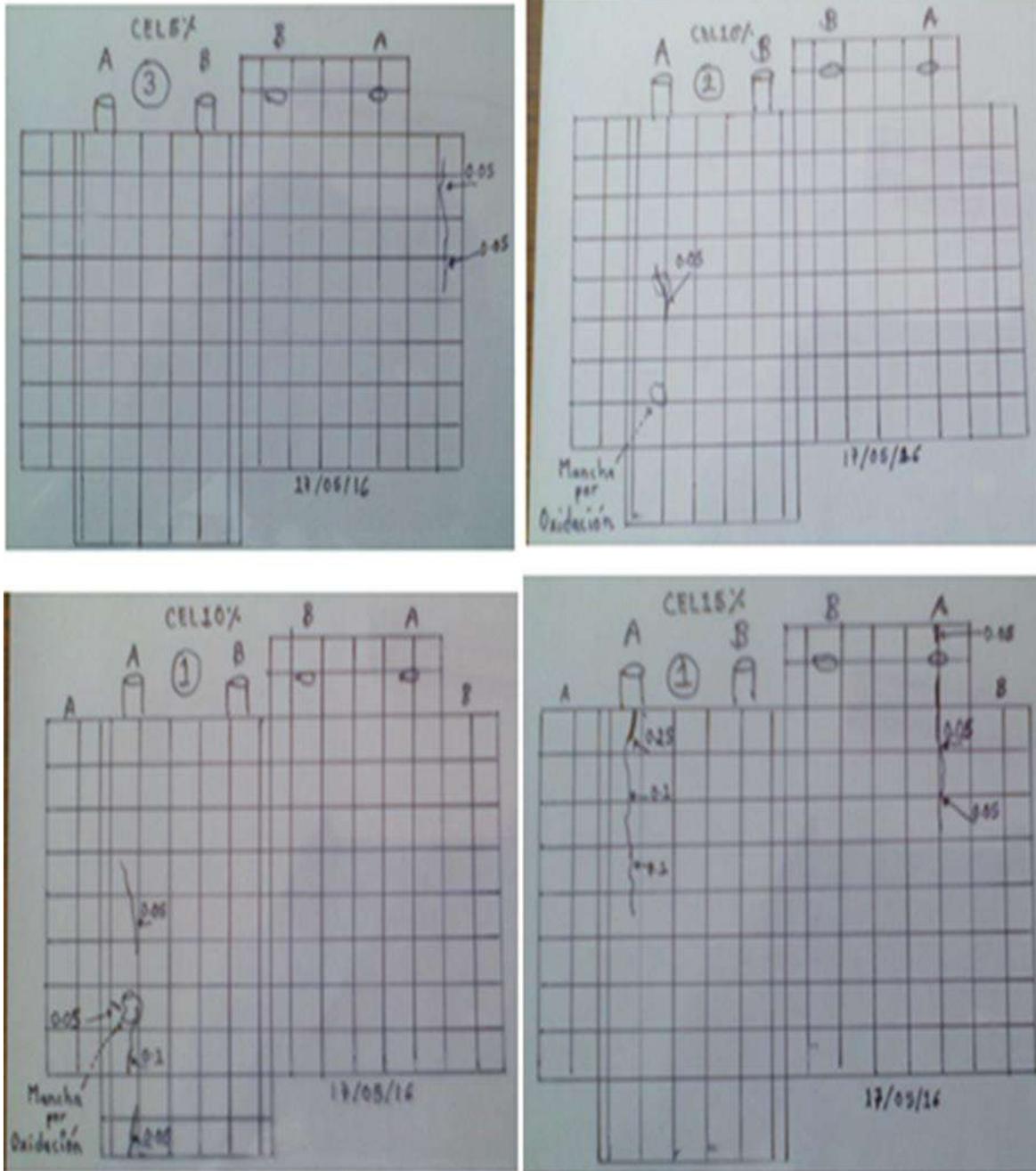


Ilustración 179. Levantamiento de grietas en CEL5% en probeta 3, CEL10% en probetas 1 y 2 y CEL15% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

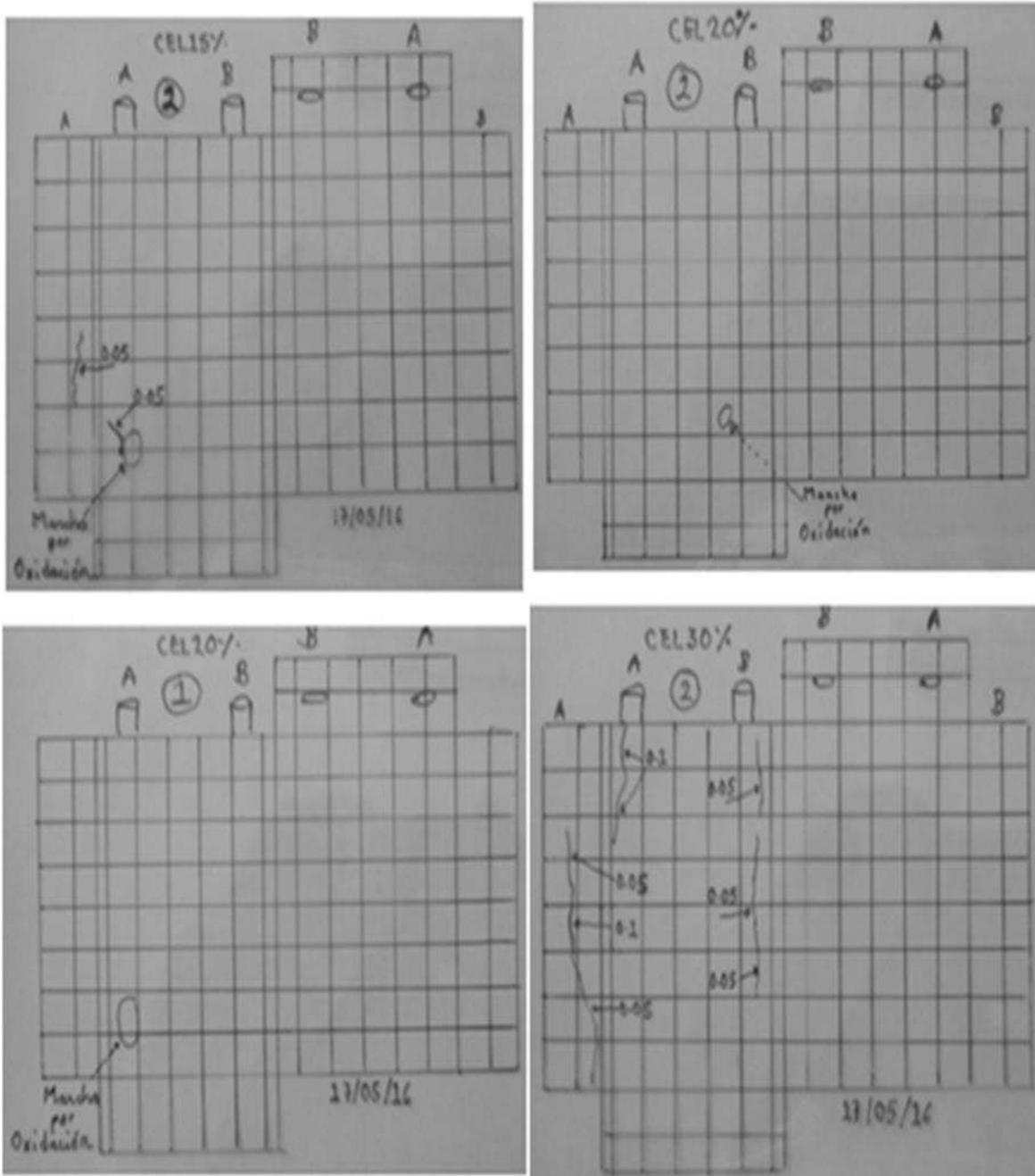


Ilustración 180. Levantamiento de grietas en CEL15% en probeta 2, CEL20% en probeta 1 y 2 y CEL30% en probeta 2. Fuente: (T. Francisco. Martínez)

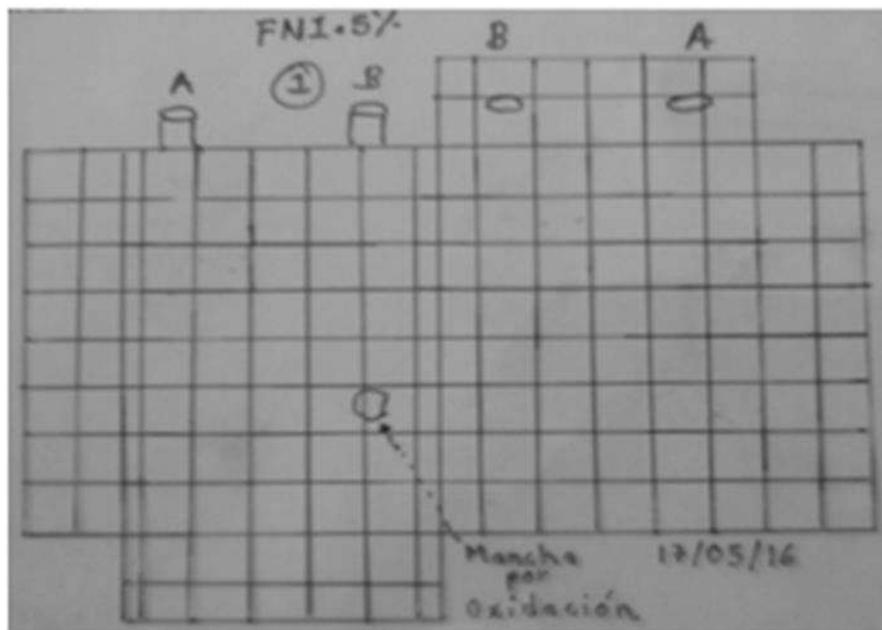
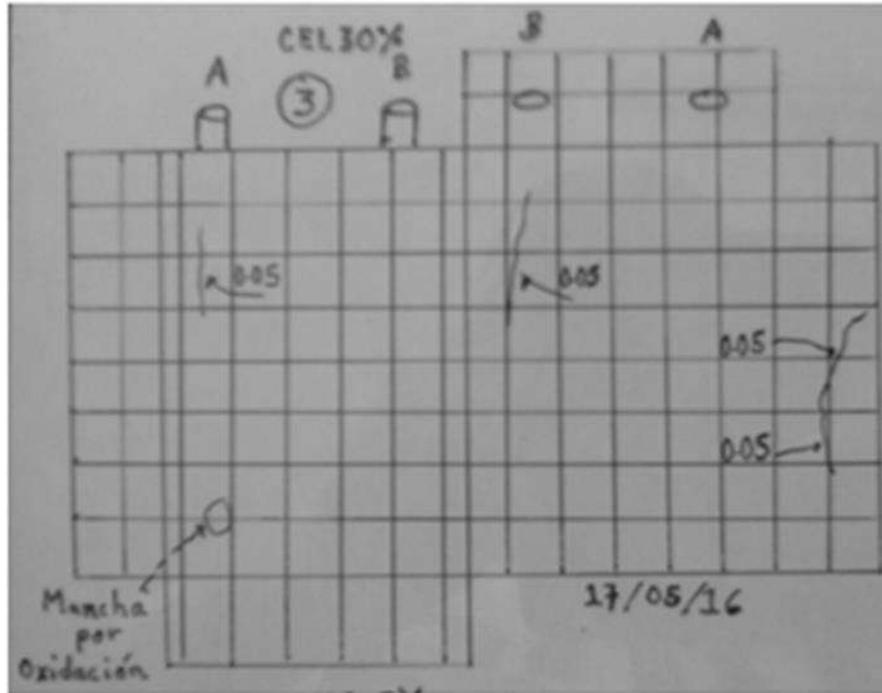


Ilustración 181. Levantamiento de grietas en CEL30% en probeta 3 y FN1.5% en probeta 1. Fuente: (T. Francisco. Martínez)



## 10 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La arena, atendiendo a sus parámetros de calidad, posee numerosos atributos y variables, entre ellas esta su granulometría, que representa una de las propiedades físicas más importantes e influyentes, pues gravita de manera decisiva en la resistencia y el consumo de cemento del concreto o mortero que con ella producimos (Toirac Corral, 2012). Los resultados de granulometría para las arenas en estudio, arena del río Huajúmbaro es mediana y para la arena de Lerma es fina. Las arenas finas (mayor superficie específica) consumirán más pasta y consecuentemente más cemento, por el contrario las arenas gruesas (menos superficie específica) consumirán menos pasta y consecuentemente menos cemento.

Los resultados para las pruebas a compresión axial, flexión, tensión y resistividad indican que los porcentajes de sustitución más eficientes para la perlita natural (PN) en compresión es la de 5%, a flexión son las sustituciones PN5% y PN10%, a tensión es la PN5% y resistividad es la PN20% y 30%. Para la prueba de compresión en la CCV la mejor es la de 20%, en la flexión es la CCV15% y 20%, para la tensión es la de CCV15% y resistividad es la CCV15% y 20%. Para la prueba de compresión simple en las sustituciones con CEL, el porcentaje de 15% presentó mejores resultados, 15% y 20% para la resistencia a flexión, para la resistencia a tensión el mejor comportamiento lo tuvieron las sustituciones del 10% y 15%, y para la resistividad eléctrica la CEL20%. Para las mezclas de FN, la sustitución con 1 % presentó los mejores resultados en las pruebas físico-mecánicas, excepto en la resistividad, donde la mezcla FN1.5% presentó el mejor resultado. Los resultados indican que la mayor parte de estos sustitutos del cemento aumentan su resistencia a edades tardías y uno que otro en algunos porcentajes a edades cortas. Se piensa que este comportamiento se debe a la cantidad de fases activas presentes en el material, pues el PN posee una composición de 72.3% de la suma de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , la CCV un 39.7% y la CEL un 35.3%, y como sabemos estas fases son las que forman el silicato de calcio



hidratado responsable de darle al mortero resistencia microestructural (Bernabé Reyes, 2015).

Los mejores resultados para la prueba de adherencia se presentaron en la PN en sustituciones de 10%, en la CCV es la 5%, en la ceniza de elaboración de ladrillo es la CEL5% y en la fibra de nopal es la de FN1.5%. Todos estos materiales de sustitución fueron comparados con una muestra testigo para cada sustituto y todos los porcentajes que se mencionan están por encima de la muestra, en esto radica el buen trabajo del agregado y la relación agua-cemento.

Los resultados de prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU) de los 4 sustitutos del cemento con que se trabajó y de acuerdo a la criterio de evaluación que hace la RED-DURAR, se muestra que la calidad del mortero se encuentra en un nivel normal y alto, donde el sustituto de fibra de nopal FN1.5% es la mejor de las 4; teniendo en cuenta que el criterio de evaluación es para concretos.

Los valores de resistividad obtenidos de las probetas con las barras de acero inmersas, tanto para pruebas húmedas y pruebas secas indican que las húmedas son muy inferiores a los secos (o sea es mínima la resistencia que opone) y se mantienen constante, es mínima la variación que se da. En las pruebas secas los valores de resistividad son muy altos en comparación con los húmedos, la razón es el tiempo de secado en que permanecieron los especímenes antes de la prueba. Cabe mencionar que las muestras desde su elaboración permanecieron 3 años almacenados, y al no haber pasado por un proceso de curado, se supone que hay una mayor cantidad de poros vacíos, los cuales al ser saturados con la solución de NaCl vuelven al material menos resistivo.

Los potenciales de corrosión siempre estuvieron entre -500 y -700 mV en las pruebas húmedas, lo cual como ya se mencionó, indica el estado activo de las barras de acero desde un principio. Para las pruebas secas, los potenciales estuvieron en un intervalo de -100 a -550 mV, lo cual indica que hay una incertidumbre y un 90 % de probabilidad de corrosión.



Los resultados de velocidades de corrosión indican que en todos los porcentajes de sustituciones con los que se trabajó, presentan un nivel de corrosión muy elevada, mayor a  $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  tanto para las pruebas húmedas y secas.

## 11 CONCLUSION Y RECOMENDACIONES

Las adiciones evaluadas, PN, CCV, CEL y FN presentan excelente actividad puzolánica, destacándose la CEL5% con un índice de 136%, PN10% con un índice de 132%, CCV15% con un índice de 125% y FN1.0% con un índice de 82%, la mayor parte de estas sustituciones presentan valores superiores al testigo. Cabe destacar que para las pruebas mecánicas si se realizó el curado de los especímenes.

Algunas de las adiciones evaluadas para esta investigación no cumplen con los requisitos para ser catalogadas como puzolanas, ya que no cumplen con el contenido mínimo de fases activas ( $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 = 70\%$  mín.), teniendo solo 48.8% para CCV, 41.4% para CEL, para la FN no se realizó la composición química por razones explicadas anteriormente; solamente la PN es catalogada como puzolana de clase N.

Las sustituciones de cemento por cenizas reactivas y fibra, en la elaboración de morteros realizados para este estudio, comprueban su efectividad al ser un reemplazo que disminuye la cantidad de cemento en las mezclas y proporciona propiedades mecánicas similares a las de los morteros convencionales a base de CPC, hablando de la FN1%, CEL15% y 20%, CCV15% y 20% y PN5%. La perlita natural (PN) proporcionada por la empresa Termolita y utilizada tal cual como fue entregado, no presenta valores presumiblemente favorables, sin embargo sus propiedades le confieren características especiales a las mostradas en este trabajo.

Se resalta también que las características del material, no solo por su composición sino por su morfología y tamaño de partícula son determinantes para un buen desempeño frente a propiedades de durabilidad.



Los iones cloruro generan una despasivación marcada en el acero embebido en concreto Portland, pues estos materiales al poseer mayor porosidad permiten el paso de más agentes agresivos (Torres, Aperador, Vera, Mejía de Gutierrez, & Ortiz, 2010). Las velocidades de corrosión fueron muy altas tanto para la prueba húmeda y seca, lo cual indica un nivel de corrosión muy elevado. La primera respuesta en algunas probetas presentó producto de corrosión de color rojizo alrededor de la barra de acero, sobre la superficie del mortero, por encima de la barra de acero embebida. Se atribuye la corrosión puntual a la deficiencia del mortero en zonas donde los cloruros tuvieron fácil acceso. Esta deficiencia puede deberse a un exceso de vacíos, lo que refleja un inadecuado procedimiento de llenado, que es lo que suele ocurrir en lo cotidiano en las obras civiles.

A la edad de 8 meses de pruebas se presentaron las grietas, causadas por expansión del acero, lo cual indica que hubo fuerzas de tensión en el interior de las probetas. Cabe mencionar que las grietas se presentaron en todas las caras de la probeta; el ancho de grietas registrado fue de 0.05 mm a 0.25 mm (ver ilustraciones de la 173 a 181). Sin embargo, el fenómeno común presentado en las muestras fue el desgaste de las aristas, sobre todo en la sustitución de la perlita natural (PN), lo cual es un indicativo de la poca cohesión, que puede deberse a la incompleta reacción del cementante, por falta de curado y a la vez es un indicativo de que este sustituto no es tan eficiente en ataques por NaCl.

Con base al presente estudio se recomienda realizar un curado específico y adecuado en morteros, para permitir la formación de los productos de reacción del cementante, ya sea cemento ordinario o adicionado; especialmente si se fabrican probetas para la evaluación del fenómeno de corrosión.

Al realizar pruebas electroquímicas para la evaluación del fenómeno de corrosión se recomienda efectuar ensayos a tiempos más prolongados para tener mejores argumentos en el planteamiento de las conclusiones.



## 12. BIBLIOGRAFIA

- Abraham, P. R. (s.f.). *Manual de Practicas de Laboratorio de Concreto*. Obtenido de [http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL\\_LAB\\_DE\\_CONCRETO.pdf](http://fing.uach.mx/licenciaturas/IC/2012/01/26/MANUAL_LAB_DE_CONCRETO.pdf)
- AEPF. (2014). (*Anuario Estadístico de la Producción Forestal*). Obtenido de Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/43390/ANUARIO\\_FORESTAL\\_2014.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/43390/ANUARIO_FORESTAL_2014.pdf)
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durabilidad del hormigón armado expuesto a condiciones agresivas. *Materiales de Construcción*, Vol. 63(309), 7-38.
- Alonso, M., Puertas, F., & Palacios, M. (2009). Cementos comunes: tipos y componentes. *Aditivos para el hormigón: compatibilidad cemento-aditivos basados en policarboxilatos*, 14-17.
- AMILCAR CANUL TUN, S. (2013). RENDIMIENTO Y CALIDAD DEL CARBÓN VEGETAL ELABORADO EN HORNO TIPO FOSA CON SUBPRODUCTOS FORESTALES DE *Piscidia piscipula* (L.) Sarg. Y *Lonchocarpus castilloi* Standl. EN CAMPECHE. *Tesis Maestría, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN, México*, PAG. 4-10.
- Andrade, C., & D' Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Revista ALCONPAT*, Vol. 1(2), 93-101.
- Anicua, R., Gutiérrez, M. C., Sánchez, P., Ortiz, C., Volke, V. H., & Rubiños, J. E. (2009). TAMAÑO DE PARTICULA Y RELACION MICROMORFOLOGICA EN PROPIEDADES FISICAS DE PERLITA Y ZEOLITA. *Agricultura Técnica en México*, Vol. 35 (Núm.2 ), 147-156.
- Arguello Hernández, S. C. (2012). ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS NO DESTRUCTIVAS Y DESTRUCTIVAS APLICADAS A MORTEROS CON SUSTITUCIONES MINERALES DE ALTA TEMPERATURA, CENIZAS ORGÁNICAS E INORGÁNICAS, RESIDUOS INDUSTRIALES Y FIBRAS DE CACTUS. *Tesis maestría, UMSNH, Morelia Michoacán, México*, pag 14-194.
- Arreola Sánchez, M. (2013). ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE MATERIALES (SUSTITUTOS PARCIALES DEL CEMENTO), PARA MEJORAR LA DURABILIDAD DE MORTEROS PARA REPARACIÓN Y/O CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO. *Tesis Maestría, UMSNH; Morelia Michoacán México*, 93-181.
- Arva, E. A., Morris, W., & Duffó, G. S. (2002). ASPECTOS ELECTROQUÍMICOS EN LA MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE CORROSIÓN DEL ACERO EN EL HORMIGÓN. . *CONAMET/SAM-SIMPOSIO MATERIA*.
- ASTM-C270. (2014). Standard Specification for Mortar for Unit Masonry. *ASTM International*, 9-10.



- ASTM-C-305. (2013). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. ASTM International.
- ASTM-C-597. (2009). Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete.
- ASTM-C-618. (2003). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM-C-876. (2009). STANDARD TEST METHOD FOR CORROSION POTENTIALS OF UNCOATED REINFORCING STEEL IN CONCRETE.
- ASTM-G102. (1999). Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements<sup>1</sup>. *ASTM International*.
- ASTM-G106. (2004). Standard Practice for Verification of Algorithm and Equipment for Electrochemical Impedance Measurements.
- ASTM-G3. (2004). Standard Practice for Conventions Applicable to Electrochemical Measurements in Corrosion Testing.
- ASTM-G5. (2004). Standard Reference Test Method for Making Potentiostatic and Potentiodynamic Anodic Polarization Measurements.
- ASTM-G57. (2012). Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method.
- ASTM-G59. (2003). Standard Test Method for Conducting Potentiodynamic Polarization Resistance Measurements.
- Barreto, M., De Brito, J., & Santos, A. (2011). Métodos de evaluación de las reacciones álcali-sílice en hormigones con áridos reciclados. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 24(2), 141-152.
- Berna Serna, J. M. (2013). Evolución de las propiedades mecánicas de los morteros aditivados de yeso con vermiculita. *Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD MIGUEL HERNANDEZ, Elche España.*, pag. 64.
- Bernabé Reyes, C. (2015). EVALUACIÓN DE MORTEROS DE CEMENTO SUSTITUIDOS CON CENIZAS PUZOLÁNICAS PARA MITIGAR EL FENÓMENO DE CORROSIÓN EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO EN REHABILITACIÓN. *Tesis Maestría, UMSNH, Morelia Michoacán, México*, pag 10-97.
- Bernabé, C., Martínez, W., Alonso, E. M., Chávez, H. L., Torres, A. A., Pérez, J. T., y otros. (2015). Using Bagasse Ash as a Substitute for the Preparation of Cement Mortar. *2nd International Conference on Green Materials and Environmental Engineering*, 126-129.



- Camou, A., Ghilardi, A., Mwampamba, T., Serrano, M., Ortiz, T., Vega, E., y otros. (2014). Análisis de la producción de carbón vegetal en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México: implicaciones para una producción sustentable. *Investigación ambiental*, Vol. 6(2), 127-138.
- Castañeda, A., Corvo, F., & O'Really, V. (2003). Comparación entre el pronóstico de corrosión basado en la medición de potenciales y la determinación de la velocidad de corrosión de la barra de refuerzo mediante técnicas electroquímicas. *MATER CONSTRUCC*, Vol. 53(nº 271–272), 155-164.
- Castillo, R., Fernández, R., Antoni, M., Scrivener, K., Alujas, A., & Martirena, J. F. (2010). Activación de arcillas de bajo grado a altas temperaturas. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 25 (3), 329- 352.
- Cavalcante, C. F., Barreto, E. C., & Duarte, A. (2011). Análisis de métodos de prevención de la reacción álcali-agregado: Análisis petrográfico y método acelerado para barras de mortero. *Ingeniería*, Vol. 15(1), 9-17.
- Cementeras, d. B. (2013). *Cementeras de Bolivia*. Obtenido de [http://cemento.ind.com.bo/2013/07/proceso-de-produccion-del-cemento\\_24.html](http://cemento.ind.com.bo/2013/07/proceso-de-produccion-del-cemento_24.html)
- CEMEX. (2013). *CEMENTOS MEXICANOS: CEMEX en el Mundo*. Obtenido de <http://www.cemex.com/ES/AcercaCemex/CemexEnElMundo.aspx>
- CEMEX. (s.f.). *CEMENTOS MEXICANOS: Cómo Hacemos Cemento*. Obtenido de <http://www.cemex.com/ES/ProductosServicios/ComoHacemosCemento.aspx>
- Censo, A. (2007). *Características principales del cultivo de nopal en el Distrito Federal caso Milpa Alta*.
- Cenzano, M. C., Ramos, A., & Ulo, C. R. (2011). INHIBICIÓN DE LA REACCIÓN ÁLCALI - AGREGADO UTILIZANDO PUZOLANA NATURAL. *Rev. Inv. Des. 2011*, Vol. 6(6), 20-26.
- Ciencia, y. h. (2007). *Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico*. Obtenido de REVISTA DE DIVULGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA: <http://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol20num2/articulos/corrosion/>
- CONACEM. (2016). *Cámara Nacional del Cemento: Producción y Consumo*. Obtenido de <http://canacem.org.mx/produccion-y-consumo/>
- CONSTRUMATICA. (s.f.). *Cemento Puzolánico*. Obtenido de [http://www.construmatica.com/construpedia/Cemento\\_Puzol%C3%A1nico](http://www.construmatica.com/construpedia/Cemento_Puzol%C3%A1nico)
- Cruz, J. M., Paya, J., Lalinde, L. F., & Fita, I. C. (2011). Evaluación de las propiedades eléctricas de morteros de cemento con puzolanas. *Materiales de Construcción*, Vol. 61(301), 7-26.



- CYTED-DURAR. (1998). En *Red Temática XV. Durabilidad de la Armadura, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado* (SEGUNDA ed.).
- De León, D., & Carlos Honorato, J. (2015). TIEMPO ESTIMADO PARA MANTENIMIENTO DE UN PUEBLO DE CONCRETO REFORZADO EXPUESTO A CORROSIÓN EN EL VALLE DE TOLUCA APLICANDO CRITERIOS PROBABILISTAS. *CONCRETO Y CEMENTO. DESARROLLO Y TECNOLOGIA*, 6(2), 80-96.
- Enrique Rivva, L. (2006). *DURABILIDAD y PATOLOGIA DEL CONCRETO*.
- Esquerdo Lloret, T. V. (2015). DESARROLLO DE MODELOS DE COMPORTAMIENTO ACÚSTICO Y CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL DE MATERIALES ELABORADOS CON ALIGERANTES. *Tesis Doctoral, UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA, España*, pag. 81.
- Fernanda Carrasco, M. (2013). AGUA PARA MORTEROS Y HORMIGONES. *Tecnología del hormigón*, pag 1-9.
- Fernández, O., Aperador, W., Torres, R. J., Vera, E., & Mejía de Gutiérrez, R. (2011). IMPLEMENTACIÓN DE LA TÉCNICA DE PULSO GALVANOSTÁTICO PARA EVALUAR EL GRADO DE PASIVACIÓN DEL ACERO DE REFUERZO DE LOS CONCRETOS. *Revista de la Facultad de ingeniería*(26), 50-57.
- FICHA, T. (2012). *POZULANAS. Practical Action The Schumacher Centre for Technology and Development*.
- G2MTLaboratories. (s.f.). *G2MT Laboratories*. Obtenido de <http://www.g2mtlabs.com/corrosion/cost-of-corrosion/>
- García Chowell, L. A. (2005). *TECNOLOGÍA BÁSICA DEL CONCRETO HIDRÁULICO. EL MATERIAL. Imcyc*.
- GARCIA INZUNZA, R. (2014). INHIBIDORES DE CORROSIÓN DE ACERO EN MEDIOS ÁCIDOS A PARTIR DE EXTRACTOS NATURALES. *Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA, Mexicali, B. C. Mexico*, pág. 45-50.
- GCC. (s.f.). (*GRUPO CEMENTOS CHIHUAHUA*). *AGREGADOS. FICHA TECNICA*. Obtenido de [https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=FICHA+TECNICA+AGREGADOS\(GCC\)](https://www.google.com.mx/webhp?sourceid=chrome-instant&ion=1&espv=2&ie=UTF-8#q=FICHA+TECNICA+AGREGADOS(GCC))
- Genescá, J. (2015). Corrosión y Tratamientos de Superficies (CTS). En F. Almeraya, *30 años impulsando la Electroquímica en México* (págs. 144-180). Monterrey, Nuevo León: impreso en México.



- Gómez, L. Y., Iñiguez, C. A., & Lothenbach, B. (2015). Microestructura y propiedades mecánicas de cementos compuestos: Efecto de la reactividad de adiciones puzolánicas e hidráulicas. *Revista ALCONPAT*, 5(1), 18-30.
- Gonzáles de la Cotera, M. (1991). ATAQUE QUIMICO AL CONCRETO. *Exposición en el ciclo organizado por el ACI, Capítulo Peruano sobre Corrosión en Estructuras de Concreto*, 1-17.
- González G., J. F. (2012). 50 años de grandes avances. *Construcción y tecnología en concreto*.
- González-González, L. R. (2011). Desarrollo y evaluación de una película comestible obtenida del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) utilizada para reducir la tasa de respiración de nopal verdura. *Facultad de Ciencia y Tecnología*, 10, 131-138.
- Gordillo, L. J., Domínguez, B. M., & Riveros, L. C. (2014). Trayectoria del sector tabiquero en Tulancingo, Hidalgo. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, Vol. 1(5), 54-68.
- Herrera, H., Franco, M. I., Miranda, J. G., Hernández, E., Espinoza, A., & Fajardo, G. (2015). GEL DE ALOE-VERA COMO POTENCIAL INHIBIDOR DE LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO ESTRUCTURAL. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6(3), 9-23.
- ICPC. (2005). *INSTITUTO COLOMBIANO DE PRODUCTORES DE CEMENTO: GUIA MINERO AMBIENTAL DE LA INDUSTRIA DEL CEMENTO*.
- IECA. (2016). *Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones: Historia del Cemento*. Obtenido de [https://www.ieca.es/reportaje.asp?id\\_rep=5](https://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5)
- IMCyC. (2011). (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto). Corrosión del acero del refuerzo. *CONSTRUCCIÓN Y TECNOLOGÍA EN CONCRETO*, *Ingeniería*, 1-4.
- IMT-PT-182. (2001). EL FENOMENO DE LA CORROSION EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO. *Publicación Técnica*(182).
- IMT-pt-326. (2010). Mejora en la durabilidad de materiales base cemento, utilizando adiciones deshidratadas de dos cactáceas. *Publicación Técnica*(326).
- IMT-PT-328. (2010). Adiciones en base a cactus como inhibidor de corrosión para acero de refuerzo en concreto. *Publicación Técnica*(328).
- IMT-pt-380. (2011). *P.T. No. 380: Evaluación Electroquímica de Cables de Preesfuerzo para Aplicación Estructural en el Sector Transporte 2a Etapa*. Sanfandila, Querétaro 2011: Secretaria de Comunicaciones y Transportes.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice y Puzolanas Naturales. Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Mexico: Portland Cement Association.



Kumar, P., & Monteiro, P. J. (2006). *Durability. Concrete Microstructure, Properties, and Materials* (Third Edition ed.). United States of America: McGraw-Hill Companies.

León Brito, N. E. (2015). Influencia de la Adición Nano-sílice y Micro-sílice en el Comportamiento Mecánico, Microestructural y Durable de un Hormigón Autocompactante. *Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD POLITECNICA DE MADRID, Madrid*, pag. 39.

León, L., Vázquez, A., & Torres, C. M. (2012). ESTUDIO DEL SURGIMIENTO Y DESARROLLO DE LOS MORTEROS EN LA CONSTRUCCIÓN. *CD de Monografías*.

Lorca Aranda, P. (2014). EFECTO DE LA ADICIÓN DE HIDRÓXIDO CÁLCICO SOBRE MEZCLAS CON ALTA SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR CENIZA VOLANTE. *Tesis doctoral. Universitat Politècnica de valencia, España*, pag 22.

MANUAL, C. (2012). FABRICACION Y PROPIEDADES DEL CEMENTO PORTLAND. *CEMEX Concreto*, pag 39.

Materiales, C. (s.f.). *Materiales Aglutinantes*. Obtenido de <https://sites.google.com/site/materialesdeconstrucion/clasificacion-de-los-materiales-de-construccion/materiales-aglutinantes>

Menéndez, G., Bonavetti, V. L., & Irassar, E. F. (2006). Hormigones con cementos compuestos ternarios. Parte I: estado fresco y resistencia mecánica. *Materiales de Construcción, Vol. 56(284)*, 55-67.

Monteagudo Viera, S. M. (2014). Estudio Microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid*, pag. 14 - 15.

Navarro Calderón, A. (2014). Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la Comunidad Autónoma de La Rioja. *Tesis Doctoral, UNIVERSIDAD DE LA RIOJA, ESPAÑA*, pag. 198.

NMX-C-059-ONNCCE. (2010). Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Determinación del Tiempo de Fraguado de Cementantes Hidráulicos (Método Vicat). México.

NMX-C-061-ONNCCE. (2010). *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos*. MEXICO.

NMX-C-071-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES. México: ONNCCE.

NMX-C-073-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.



- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS PARA CONCRETO- PARTICULAS MAS FINAS DE LA CRIBA 0,075 mm (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO . México: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino. México: ONNCCE.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). Industria de la Construcción- Agua para Concreto- especificaciones. México.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba*. México.
- NMX-C-414-ONNCCE. (1999). *Cemento y concreto resistentes a sulfatos. Problemas,Causas y Soluciones*. Obtenido de <http://www.imcyc.com/revistact06/oct06/PROBLEMAS.pdf>
- NMX-C-486-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción- Mampostería - Mortero para uso estructural-Especificaciones y métodos de ensayo*. México.
- NMX-C-495-ONNCCE. (2015). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-DURABILIDAD DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO-MEDICION DE POTENCIALES DE CORROSION DEL ACERO DE REFUERZO SIN REVESTIR,EMBEBIDO EN CONCRETO-ESPECIFICACIONES Y METODO DE ENSAYO.
- NMX-C514-ONNCCE. (2016). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-RESISTIVIDAD ELECTRICA DEL CONCRETO HIDRAULICO-ESPECIFICACIONES Y METODOS DE ENSAYO.
- NMX-C-021-ONNCCE. (2004). Industria de la construcción- Cemento para albañilería (Mortero). *Especificaciones y Métodos de ensayo*. México.
- Notas Técnicas para la Construcción, D. S. (1997). *Concretos y Morteros*. 2, 2-11.
- NRMCA. (2014). (National Ready Mixed Concrete Associate).CIP 25 - Corrosion of Steel in concrete. *Información técnica*.
- Olague, C., Wenglas, G., & Astorga, F. (2011). Adiciones minerales como atenuantes de la reacción álcali sílice en estructuras de concreto hidráulico. *TECNOCIENCIA Chihuahua*, Vol.6(1), 49-56.



- Orozco, R., Martínez, E. A., Galván, R., Ramírez, J. L., & Fernández, I. (2007). Corrosión: fenómeno natural, visible y catastrófico. *REVISTA DE DIVULGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA DE LA UNIVERSIDAD VERACRUZANA*, Vol. XX(2), 1-4.
- Paredes Cárdenas, E. (2016). Comportamiento de armaduras de acero inoxidable en morteros con cenizas volantes. *Tesis Doctoral, Universidad Carlos III de Madrid, España*, pag 84.
- Paredes, J., Prieto, P., & Santos, E. (2013). CORROSION DEL ACERO EN ELEMENTOS DE HORMIGON ARMADO: VIGAS Y COLUMNAS.
- Peralta Muñoz, E., Aguirre, A. M., & Mejía de Gutiérrez, R. (2015). Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros. *Informador Técnico*, 137-145.
- Peralta, E., Aguirre, A. M., & Mejía de Gutiérrez, R. (2015). Técnicas aceleradas para evaluar la susceptibilidad a corrosión de aceros embebidos en morteros con adiciones minerales expuestos a cloruros. *Informador Técnico (Colombia)*, Vol.79(2), 137-145.
- PÉREZ GÓMEZ, J. A. (2015). *MANUAL DE NORMA MEXICANA NMX-C-486-ONNCCE-2014. MORTERO PARA USO ESTRUCTURAL Y INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN – MAMPOSTERÍA – MORTERO PARA USO ESTRUCTURAL – ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO.*
- Porto Quintián, J. M. (2005). *Patología en las estructuras de hormigón armado. Proyecto Fin de Carrera.* Universidad de A Coruña, España.
- Quintana Crespo, E. (2005). RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS. *Tesis doctoral, UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA, Argentina*, pag. 71-72.
- Rivera, P., & Uceda, M. (1987). Características físicos\_ químicas de la madera de carbón de 11 especies Forestales de la Amazonia Peruana. *Revista forestal de Perú*, Vol. 14(2), 1-8.
- Rodríguez Fadrugas, C., & Rodríguez González, M. (2011). Dependencia de la velocidad del pulso ultrasónico con el contenido de agua libre en la estructura de hormigón en condiciones de clima tropical. *Materiales de Construcción*, Vol. 62(305), 39-53.
- Rodríguez Gómez, F. J. (2000). Técnicas electroquímicas de corriente directa para la medición de la velocidad de corrosión: Resistencia a la polarización. *Depto. de Ingeniería Metalúrgica, Facultad Química UNAM, México.*
- Rodríguez, R. E., Dámazo, D., & Afif, R. U. (2000). Los cementos puzolánicos aumentan la resistencia del concreto al ataque de sulfatos. *construcción y tecnología 2000.*
- Rosales Rivas, V. R. (2012). Tesis: GEOLOGÍA Y CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE PUZOLANAS DE LA ZONA ORIENTAL DE GUATEMALA. *Tesis Licenciatura, UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA, GUATEMALA*, pag. 41.



- SAGARPA. (2015). SAGARPA Presente en la IV Edición Estatal de la Feria del Nopal y la Tuna. *BOLETIN 090*.
- Salazar J., A. (s.f.). *¿Qué es una pozulanas?* Obtenido de [https://www.academia.edu/24569108/Puzolonas.\\_Texto\\_elaborado\\_por\\_Alejandro\\_Salazar\\_J](https://www.academia.edu/24569108/Puzolonas._Texto_elaborado_por_Alejandro_Salazar_J)
- Sepulcre Aguilar, A. (2005). INFLUENCIA DE LAS ADICIONES PUZOLANICAS EN LOS MORTEROS DE RESTAURACION DE FABRICAS DE INTERES HISTORICO-ARTISTICO. *Tesis Doctoral, ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE ARQUITECTORA, Madrid*, pag 38.
- SERpro. (2012). *Servicios Profesionales para el Desarrollo Económico, S.C. Diagnóstico Nacional del sector ladrillero artesanal de México*.
- SGM. (2014). (*SERVICIO GEOLOGICO MEXICANO*). *Panorama Minero del Estado de Durango*.
- Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary Cementitious Materials. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry, Vol. 74*, 211-278.
- Solís, R. G., Moreno, E. I., & Castillo, W. R. (2004). Predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y un índice de calidad de los agregados. *Ingeniería, Vol. 8(2)*, 41-52.
- Sotomayor Fontealba, L. C. (2009). GUIA DE CONDICIONES MEDIOAMBIENTALES A CONSIDERAR PARA EL DISEÑO DE UNA PLANTA DE EXTRACCIÓN Y PROCESAMIENTO DE ÁRIDOS. *Tesis licenciatura, Universidad Austral de Chile, CHILE*, pag. 3.
- Toirac Corral, J. (2012). CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LAS PLANTAS PRODUCTORAS DE ARENA EN LA REPÚBLICA DOMINICANA, SU IMPACTO EN LA CALIDAD Y COSTO DEL HORMIGÓN. *Ciencia y Sociedad, Vol. XXXVII(3)*, 293-334.
- Torres, R., Aperador, W., Vera, E., Mejía de Gutierrez, R., & Ortiz, C. (2010). ESTUDIO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO EN CONCRETO AAS SOMETIDO A CLORUROS. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal, vol. 77(núm. 164)*, 52-59.
- USGS. (2016). (*U.S. Geological Survey*). *MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2016*.
- Valencia, G., Mejía de Gutiérrez, R., Barrera, J., & Delvasto, S. (2012). Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña de azúcar. *Revista de la Construcción, 12(22)*, 112-122.
- Vidaud Quintana, E., & Vidaud Quintana, I. N. (2014). Prueba de "Pull Off" para evaluar la adherencia de los materiales de reparación en concreto. *INGENIERIA*.



Villabona Ortiz, A., Tejada, C., & Villabona Durán, Y. P. (2013). Determinación electroquímica de la corrosión en el hormigón armado en solución salina. *Ingenium*, Vol. 7(15), 35-39.