

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE MORTEROS DE  
CEMENTO ADICIONANDO METAKAOLIN Y  
POLIESTIRENO”

TESIS  
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
INGENIERO CIVIL

PRESENTA:  
OSWALDO ROBERTO FLORES LICA

ASESOR:  
M.A. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA

COASESOR:  
DR. HUGO LUIS CHÁVEZ GARCÍA

Morelia Michoacán, Junio de 2013.

## RESUMEN

Contando con el apoyo de Sika y basados en investigaciones realizadas en el laboratorio con adiciones minerales, se conformo un equipo integrado por cuatro personas, a los cuales se nos repartieron dos adiciones para cada uno, un aditivo y una adición mineral. En mi caso Sika Elemix (esferas de poliestireno) y Metacaolín (puzolana natural). Se procedió a elaborar morteros con dichas adiciones, tomando como partida la información contenida en la ficha técnica del aditivo y la investigación previa realizada en el laboratorio, para obtener tres porcentajes por adición. Se elaboraron cubos de 5 x 5 x 5 cms, prismas de 4 x 4 x 16 cms, cilindros de 5 cms de diámetro por 10 cms de altura, briquetas, y finalmente losas para cada porcentaje, a los cuales se les realizaron pruebas destructivas (compresión, tensión, flexión, ataque por sulfatos, adherencia) y no destructivas (velocidad de pulso, densidad, porcentaje de absorción, resistividad, gravedad específica), con la finalidad de conocer su comportamiento individualmente, ante las diferentes sollicitaciones físico-mecánicas a los que fueron expuestos los morteros. El agregado utilizado, arena de río, por su previa utilización y conocimiento de sus propiedades, utilizando el retenido en la malla 30 como lo marca la norma. El cemento utilizado un CPC 30R RS, para una relación agua-cemento de 1.01, como parámetro inicial para cada porcentaje y previo colado se midió la fluidez,  $105 \pm 5$  cms. El aditivo que me tocó trabajar fue Sika Elemix esferas de poliestireno (PL SC) cuya principal función es aligerar el concreto, la obtención de los porcentajes de acuerdo a lo recomendado por la ficha técnica, de la cual se eligió trabajar el mismo porcentaje de poliestireno variando el agregado, sustituyéndolo en un 10%, 20% y 30%, teniendo que modificar la relación agua-cemento para lograr la fluidez, para lograrlo con ayuda de un fluidificante (Sika Cem). En cuanto al Metacaolín (MK), basados en la investigación del Ingeniero Cipriano Bernabé, de los cuales obtuvo resultados óptimos, se eligieron los porcentajes de 3%, 5% y 7% en adición, conservando la relación agua cemento, cumpliendo con la fluidez.

(Palabras clave: mortero, Metacaolín, poliestireno)

## DEDICATORIA

Primeramente a **Dios** por haberme dado la oportunidad de desarrollar mi carrera, darme las personas adecuadas para lograrlo, por prestarme salud, por permitirme llegar a cumplir esta meta en mi vida.

A mis **Padres, Roberto Flores Sánchez y María Luz Lica Barbosa**, por todo su apoyo, Dios me regalo un par de grandes ejemplos en mi vida, todo lo logrado ha sido gracias a ellos, agradecido por regalarme la vida, por formarme, ayudarme, Dios me los bendiga siempre.

A mis **hermanos, Nely Grisel Flores Lica y Marco Julio Flores Lica**, mis dos grandes orgullos, por todo su apoyo.

A mis **Abuelitos Sofía Barbosa Montero, José Leopoldo Lica Lachino, Carmen Sánchez, José Flores, Francisco Montero y Emilia Juárez**, por todo el cariño, apoyo, crianza, por ser ejemplo de vida.

A toda **mi Familia**, por todo su apoyo, sin duda me ha tocado una gran familia que soy afortunado por contar ellos.

A los **Maestros** que me ayudaron en mi formación en especial a mi Asesor de Tesis **M.A. Wilfrido Martínez Molina**, por todo su apoyo y dedicación.

## AGRADECIMIENTOS

A mis asesores **M.A. Wilfrido Martínez Molina, Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, M.C. Hugo Luis Chávez García y a la M.I. Cindy Lara Gómez**, quienes nos aportaron sus conocimientos, su valioso tiempo e incondicional apoyo en la realización de éste proyecto.

A mis compañeros de Proyecto, **Yesenia Rodríguez Méndez, Juan Miguel Méndez Orozco y Esteban Josué Hernández**, por todo su apoyo, paciencia, dedicación y trabajo en conjunto.

Al personal del laboratorio de Materiales en especial al **Maestro Jesús Zauno Zamudio, M.I. Sandra Carmen Arguello, Ing. Noel Díaz, Ing. Marco Mondragón Ornelas, Arturo Zalapa Damián, Eduardo Razo, Ing. Miguel Villicaña, Ing. José Luis Rodríguez, Rosalía Ruiz, Ing. Luis Jiménez Cruz, Ing. Antonio Nuñez, Ing. Mauricio Arreola, Ing. Edwin Rojas, Elizabeth Contreras, Ing. Cipriano Bernabé, M.I. Marco Navarrete, a los del servicio social y demás personal del laboratorio**, a todos ellos por su amistad, tolerancia y ayuda en este trabajo.

De manera muy especial a la **Dra. Angélica de Lourdes del Valle Montero** quien nos apoyo a conseguir equipo y destino de su tiempo para que pudiéramos continuar con las pruebas en nuestra investigación.

A las personas que me ayudaron en mi desarrollo en la Licenciatura **M.I. Tarsicio Audifred Hurtado, M.C. Joaquín Contreras López, Ing. Ramiro Guzmán Rodríguez, M.I. Antonio Hurtado, Dr. Jaime Saavedra Rosales y todos los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil.**

Al personal de la facultad de Ingeniería Civil de la parte administrativa, **M. A. Enrique Villalobos Velázquez, Mercedes, Karina, Francisco** quienes me brindaron siempre su ayuda durante mi gestión como delegado.

A todos mis amigos por su amistad y apoyo incondicional, de manera muy especial para **Valdemar Tejeda Hernández, Blanca Anilú Pichardo, Alejandra Brambila, Aarón**

**Aguirre, Enrique Villagómez, Jafet Rodríguez, Dalia Ivette Labrada, Ana Karen Melgoza, Manuel Cruz, Laura Flores, Karla Flores, Yarabel Silva, Lucero Calderón, Sarai Contreras, Carolina Sánchez Lara, Mario Alberto Aguiar, Mario Hernández, Verónica Vega Tinoco, Ezequiel Olivares, Sergio Langarica, Tere Betancurt, Karla Luna, Mario Gómez, Enrique Sánchez, Jorge Coria, Luis Chávez, Juan Ontiveros, Felipe Arana, Baldomero Bustos, René Andrade, Karina Villavicencio, Liz Parra, Wendy Marlen Conejo y a mis compañeros de clase de la universidad y a todos los ANEICOS** quienes también me ayudaron en mi desarrollo personal.

A la empresa **SIKA** por apoyarnos con los aditivos utilizados en el desarrollo de este proyecto.

## ÍNDICE

RESUMEN .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
ÍNDICE .....	v
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVO .....	4
3.- MATERIALES EN ESTUDIO .....	5
3.1.- CEMENTO .....	5
3.1.1.- Historia del cemento en México. ....	6
3.1.2.- Producción del Cemento Portland.....	6
3.1.3.- Tipos de cemento portland .....	13
3.1.4.- Cemento utilizado en la investigación .....	15
3.2.- MORTERO .....	17
3.2.1.- Dosificación .....	17
3.2.2.- Clases .....	17
3.2.3.- Propiedades del mortero de cemento portland .....	20
3.3.- PUZOLANAS.....	25
3.3.1.- METACAOLÍN (MK) .....	28
3.4.- AGREGADO (MATERIAL INERTE) .....	33
3.4.1.- Pruebas principales en los agregados .....	34
3.4.2.- Agregado utilizado en la Investigación.....	34

3.5.- AGUA (LÍQUIDO DE AMASADO) .....	37
3.5.1.- Agua utilizada en la Investigación .....	38
3.6.- ADITIVOS.....	39
3.6.1.- Influencia de los Aditivos en el diseño de mezclas.....	39
3.6.2.- Aditivo utilizado en la investigación.....	39
3.6.3.- ADITIVO REDUCTOR DE PESO .....	40
4.- PROGRAMA DE PRUEBAS .....	49
4.1.- PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS.....	49
4.1.2.- Prueba de velocidad de pulso ultrasónico .....	52
4.1.3.- Prueba de resistividad eléctrica .....	63
4.1.4.- Densidad.....	66
4.1.5.- Gravedad específica .....	67
4.1.6.- Absorción de agua.....	67
4.2.- PRUEBAS DESTRUCTIVAS .....	68
4.2.1.- Adherencia .....	68
4.2.2.- Determinación de la resistencia a la compresión simple .....	69
4.2.3.- Determinación de la resistencia a la flexión .....	70
4.2.4.- Ataque por sulfatos .....	72
4.3.- Correlación de pruebas destructivas y no destructivas .....	79
5.- DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	83
5.1.- Diagrama de actividades.....	83
5.2.- Elaboración de los Especímenes.....	84
5.2.1.- Elaboración de losas de concreto para pruebas de adherencia.....	91
5.2.2.- Elaboración de Cubos .....	93
5.2.3.- Elaboración de Prismas .....	96

5.2.4.- Elaboración de Cilindros.....	97
5.2.5.- Elaboración de Briquetas .....	99
5.3.- Curado.....	100
5.4.- Elaboración de mezclas para la realización de pruebas de adherencia.....	101
5.5.- DESARROLLO DE LAS PRUEBAS .....	103
5.5.1.- Pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido.....	103
5.5.2.- Pruebas no destructivas .....	104
5.5.3.- Pruebas Destructivas.....	113
6.- RESULTADOS .....	131
6.1.- Resultados de la Prueba a compresión en cubos de 5cm x 5cm.....	131
6.2.-Resultados de Flexión Estática en Prismas.....	133
6.3.- Resultados de la Resistencia a Tensión en Briquetas .....	135
6.4.- Resultados de la Densidad en Cubos.....	137
6.5.- Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico en Cubos.....	138
6.6.- Resultados de la Gravedad Específica en Cubos.....	140
6.7.-Resultados de la Resistividad en Cubos.....	141
6.8.- Resultados de la Resistividad en Primas.....	142
6.9.- Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico en Prismas.....	143
6.10.- Resultados del Porcentaje de Absorción en Cubos.....	145
6.11.- Resultados de la prueba de Adherencia.....	146
6.12.- Resultados de la prueba de Ataque por Sulfatos.....	147
7.- CONCLUSIÓN .....	155
8.- BIBLIOGRAFÍA.....	156



## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Etapas en la producción tradicional del cemento portland. ....	7
Ilustración 2. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco. ....	8
Ilustración 3. Vista aérea de una planta de cemento .....	9
Ilustración 4. Horno rotatorio para la manufactura del clínker de cemento. La foto, menor, abajo y a la derecha trae una vista interior del horno. ....	11
Ilustración 5. El clínker de cemento portland se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice. Este clínker específico tiene un diámetro de 20 mm (3/4 pulg.) .....	11
Ilustración 6. Proceso de producción del clínker de la materia prima al producto final. ....	12
Ilustración 7. El cemento portland es un polvo fino que cuando se mezcla con el agua. se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el concreto.....	13
Ilustración 8. Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros...	16
Ilustración 9. Ruta. Saliendo de Morelia (A) por la salida Charo, tomando la carretera Morelia-Maravatío hasta llegar al entronque de cuatro caminos (distancia 45 kms), gira hacia la derecha rumbo a Huajúmbaro recorriendo 20 kms, se gira a la izquierda por la carretera rumbo a Zirándaro recorriendo alrededor de 1.5 kms llegando aguas abajo del río donde se obtuvo la arena (B). ....	35
Ilustración 10. Lugar donde se obtuvo la arena, Huajúmbaro, Mich.....	36
Ilustración 11. En la imagen se ilustra cómo nos toco acarrear el arena de un lado al otro del río. ....	36
Ilustración 12. Fluidificante SikaCem .....	40
Ilustración 13. Estructura química representativa del PS ( n = 650-1400).....	41
Ilustración 14. Agregados de peso ligero (K. Metha y P. Monteiro, Concreto: estructura, propiedades y materiales) .....	45
Ilustración 15. Aditivo SIKA ELEMIX utilizado en la investigación.....	48
Ilustración 16. Las perlas de poliestirenos fueron retenidas en la malla numero 16 (1.19 mm o 11.90 micras) con lo que nos damos una aproximación de cuanto tienen de diámetro.....	48
Ilustración 17. Tipos de propagación de onda de mecánicas (Malhotra and Carino, 2004).	54

Ilustración 18. Diagrama esquemático del circuito de prueba de velocidad de pulso (Malhotra and Carino, 2004). .....	56
Ilustración 19. Configuraciones para medición de velocidad de pulso, a) Método directo, b) Método semidirecto, c) Método indirecto o de superficie (Malhotra and Carino, 2004). ....	59
Ilustración 20. Empleo del método de superficie para determinar la profundidad de deterioro (Malhotra and Carino, 2004). .....	61
Ilustración 21. Factores que afectan la velocidad de pulso.....	62
Ilustración 22. Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.....	72
Ilustración 23. El ataque de sulfatos es frecuentemente más severo en la región sometida a mojado y secado, la cual es, normalmente, cerca del nivel del suelo. Aquí los postes han sido atacados por sulfatos cerca del nivel del suelo.....	74
Ilustración 24. Vigas de concreto después de muchos años de exposición a un suelo con alta concentración de sulfatos en Sacramento, California, terreno de ensayo. Las vigas en mejores condiciones tienen bajas relaciones agua-materiales cementantes y muchas de ellas tienen cemento resistente a los sulfatos. La foto menor, a la derecha en la parte superior, enseña dos vigas inclinadas sobre sus laterales para mostrar niveles decrecientes de deterioro con la profundidad y el nivel de humedad. ....	74
Ilustración 25. Depósitos blancos de etringita secundaria en un vacío. Ancho del campo 64 $\mu\text{m}$ . .....	76
Ilustración 26. La expansión retardada inducida por calor se caracteriza por la expansión de la pasta que se suelta de los componentes no-expansivos, tales como los agregados, creando espacios interfaz pasta-agregado. El espacio se puede llenar posteriormente posteriormente por cristales oportunistas de etringita más grandes, como mostrado aquí. Esta foto es cortesía de Z, Zhang y J. Olek (Purdue University). .....	78
Ilustración 27. Cronograma de actividades.....	83
Ilustración 28. Mesa de fluidez.....	84
Ilustración 29. Pisón prueba de fluidez.....	85
Ilustración 30. Medición de la mezcla con ayuda del Vernier especial para esta medición. ....	86

Ilustración 31. Cubetas utilizadas para elaborar nuestras mezclas, enumeradas para poder identificarlas.....	86
Ilustración 32. Taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM.....	87
Ilustración 33. Proporciónamiento adiciones de Metacaolín.....	88
Ilustración 34. Molde de losas y peso de materiales.....	92
Ilustración 35. Acabado a las losas y curado hasta los 28 días.....	93
Ilustración 36. Moldes engrasados.....	94
Ilustración 37. Etapas de llenado del cubo de 5cm x 5cm x5cm.....	94
Ilustración 38. Elaboración de Cubos.....	95
Ilustración 39. Curado de los especímenes por inmersión en cubetas.....	96
Ilustración 40. Etapas de llenado del prisma de 4cm x 4cm x16cm.....	97
Ilustración 41. Elaboración de cilindros.....	98
Ilustración 42. Elaboración de Briquetas.....	99
Ilustración 43. Briquetas de mortero con adición de Metacaolín.....	100
Ilustración 44. Curado por inmersión.....	101
Ilustración 45. Colocación de la mezcla sobre la losa de concreto.....	101
Ilustración 46. Colocación de la mezcla de Poliestirenos en sus tres porcentajes.....	102
Ilustración 47. Especímenes marcados para realizar las pruebas programadas.....	103
Ilustración 48. Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.....	104
Ilustración 49. Medición de los especímenes.....	105
Ilustración 50. Prueba de Resistividad.....	106
Ilustración 51. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico, marca CONTROLS, modelo 58-E0049/B.....	107
Ilustración 52. Realización de la Prueba de Velocidad de Pulso.....	108
Ilustración 53. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico, modelo 58-E0048 marca CONTROLS.....	108
Ilustración 54. Determinación de la densidad de especímenes cúbicos.....	110
Ilustración 55. Determinación de la gravedad específica.....	111
Ilustración 56. Especímenes en el horno para obtener el peso seco.....	112
Ilustración 57. Prueba de Resistencia en cubos utilizando la máquina universal Tinius Olsen.....	113

Ilustración 58. Espécimen probado a compresión utilizando la máquina universal Tinius Olsen. ....	114
Ilustración 59. Se puede apreciar cómo se marco el espécimen y el tipo de falla presentado en esta investigación de la prueba de flexión en prismas. ....	115
Ilustración 60. Prueba de flexión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen. ....	116
Ilustración 61. Máquina Michaelis para prueba a tensión en briquetas. ....	117
Ilustración 62. Aplicación de la carga lentamente por medio de las municiones hasta la presencia de falla en la briquea. ....	118
Ilustración 63. Peso de las municiones en la bascula con aproximación al decimo de gramo. ....	118
Ilustración 64. Tipo de falla presente en la gran mayoría de las briquetas probadas, al centro de la briquea. ....	119
Ilustración 65. Perforación de las losas para la prueba de adherencia. ....	120
Ilustración 66. Dollys listos para realizar la prueba de adherencia. ....	120
Ilustración 67. El epóxico utilizado es marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel. ....	121
Ilustración 68. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off. ....	121
Ilustración 69. Equipo para prueba Pull Off marca DYNA. ....	122
Ilustración 70. Perno con adaptador para el aparato de Prueba Pull Off. ....	122
Ilustración 71. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off. ....	123
Ilustración 72. Falla entre epóxico y el dolly metálico. ....	124
Ilustración 73. Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material Poliestireno. ....	124
Ilustración 74. Falla en el revestimiento. Tipo (4). Material Mk. ....	124
Ilustración 75. Elaboración de la solución con el equipo de protección adecuado para evitar accidentes. ....	126
Ilustración 76. Solución saturada de sulfatos de Sodio. ....	126
Ilustración 77. Especímenes cilíndricos en el horno de secado. ....	127
Ilustración 78. Para cada ciclo de prueba, se pesaron todos los especímenes. ....	127
Ilustración 79. Inmersión de los especímenes en la solución de sulfato de sodio cuidando que nuestro tirante de agua quedara 2 cms encima de los cilindros. ....	128
Ilustración 80. Espécimen sacado de la solución después de 17 hrs. ....	128

Ilustración 81. Espécimen de MK sometido a compresión 2° Ciclo.....	129
Ilustración 82. Espécimen Testigo sometido a compresión 2° Ciclo.....	129
Ilustración 83. Comportamiento del poliestireno durante los 5 ciclos de prueba, como se puede notar no están destruidos por lo que se nos permitió probar a compresión cada ciclo. ....	130
Ilustración 84. Comportamiento de los cilindros de MK, estos no resistieron los 5 ciclos de prueba.....	130
Ilustración 85. Resultados de la Prueba a la compresión en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	131
Ilustración 86. Resultados de la Prueba a la flexión en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	133
Ilustración 87. Resultados de la Prueba a la tensión en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	135
Ilustración 88. Resultados de la Prueba de la Densidad en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	137
Ilustración 89. Resultados de la Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.....	138
Ilustración 90. Resultados de la Prueba de Gravedad Específica en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.....	140
Ilustración 91. Resultados de la Prueba de Resistividad en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	141
Ilustración 92. Resultados de la Prueba de Resistividad en prismas para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	142
Ilustración 93. Resultados de la Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico en prismas para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.....	143
Ilustración 94. Resultados de la Prueba de Porcentaje de Absorción en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	145
Ilustración 95. Resultados de la Prueba de Adherencia para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	146
Ilustración 96. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en los Testigos. ....	148

Ilustración 97. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del 3% de Metacaolín. ....	148
Ilustración 98. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del 5% de Metacaolín. ....	149
Ilustración 99. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del 7% de Metacaolín. ....	149
Ilustración 100. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del poliestireno para sustituir el 10% del agregado.....	150
Ilustración 101. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del poliestireno para sustituir el 20% del agregado.....	150
Ilustración 102. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del poliestireno para sustituir el 30% del agregado.....	151
Ilustración 103. Resultados de la prueba a la Compresión en Cilindros para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en las adiciones de Metacaolín, Poliestireno y Testigos...	152

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Fuentes De Las Materias Primas Usadas Y La Fabricación Del Cemento Portland .....	10
Tabla 2. Tipos de cemento Portland. ....	14
Tabla 3. Análisis Químico y Propiedades Seleccionadas de Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice, Arcilla Calcinada, Esquisto Calcinado y Metacaolinita Típicos. (Diseño y Control de Mezclas) .....	28
Tabla 4. Composición química porcentual del Metacaolín. (TESIS, Cipriano Bernabé Reyes, “Adiciones Minerales De Alta Temperatura A Morteros De Cemento Como Modificadores De Comportamiento Físico-Mecánico”) .....	30
Tabla 5. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (Instituto del Concreto, 1997). ....	38
Tabla 6. Proporcionamiento adición de poliestireno PL SC 10%. ....	89
Tabla 7. Proporcionamiento adición de poliestireno PL SC 20%. ....	89
Tabla 8. Proporcionamiento adición de poliestireno PL SC 30%. ....	90
Tabla 9. Numero de especímenes elaborados con la bachada por porcentaje. ....	90
Tabla 10. Proporcionamiento para una losa por el método el ACI.....	92
Tabla 11. Porcentaje obtenido para la prueba de Modulo de Ruptura respecto a la compresión.....	134
Tabla 12. Porcentaje obtenido para la prueba de Modulo de Ruptura respecto a la compresión.....	136
Tabla 13. Resultados de la Prueba de Adherencia para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno. ....	147



## 1.- INTRODUCCIÓN

En la industria de la construcción en general, es cada vez más grande el reto de proporcionar servicios con bajos costos y altos índices de calidad, durabilidad y rendimiento. Esto se ve reflejado en los innumerables sistemas de prefabricación, en el desarrollo de herramientas y equipos más ingeniosos y potentes, y en frecuente sustitución de materiales naturales, por resinas sintéticas y materiales reciclados. El tema de investigación nació gracias al Concurso de Canoas de Concreto del ACI, durante dicho concurso se diseñan mezclas de concreto ligero para la elaboración de las canoas, motivo por el cual se solicitó el apoyo de SIKA, empresa que nos patrocinó varios aditivos recomendados por ellos que nos servirían para realizar dichas mezclas, teniendo presente que no son las únicas alternativas para desarrollar concretos ligeros.

Con el paso de los años el uso de un concreto ligero toma importancia debido a que cada vez más es más notoria la tendencia a construir edificaciones más altas, por lo cual se busca reducir los pesos de la estructura, teniendo gran impacto en el diseño de la cimentación por citar un ejemplo. A la vez resulta ideal para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas, que requieren de ser ligeros a fin de reducir las cargas muertas, para colar elementos de relleno que no soporten cargas estructurales y para la construcción de vivienda con características de aislamiento térmico. Todo esto nos lleva de la mano al ahorro de materiales, con lo que acarrea el ahorro de energía y materia prima para su producción, al mismo tiempo al ahorro de energía en el acondicionamiento de la temperatura de un hogar.

La importancia de nuestra investigación se basó en desarrollar una serie de pruebas a aditivos y adiciones minerales que nos permitan mejorar notablemente las sollicitaciones físico-mecánicas a las que estará sometido un concreto ligero, elaborando muestras de mortero esto debido al ahorro de materiales utilizando moldes de pequeña dimensión y al conocimiento de la caracterización del agregado. Todo esto con la finalidad de conocer las propiedades y características de los morteros adicionándole algún aditivo contra un mortero tradicional, tratando de equilibrar la pérdida de peso, con la pérdida de resistencia,





característica principal de un concreto ligero, así mismo de alcanzar densidades bajas para que el elemento colado pueda cumplir el objetivo para el cual se le solicita.

Para tratar de equilibrar esa pérdida de peso con la pérdida de resistencia se utilizó una adición en este caso, una puzolana natural obtenida de la arcilla caolinítica de alta pureza, el Metacaolín (MK), el cual tiene alta actividad puzolánica, y por esta razón es parte del estudio en este trabajo. Las puzolanas naturales se usan desde hace siglos. El término “puzolana” viene de una ceniza volcánica encontrada en Pozzuoli, un pueblo de Nápoles, Italia. Esta ceniza ha resultado de la erupción del Monte Vesuvio, en 79 D.C. Sin embargo, el empleo de la ceniza volcánica y de la arcilla calcinada en otras culturas data de 2000 A.C. o tal vez antes. Muchas de las estructuras romanas, griegas, egipcias, producidas con concreto de puzolana se pueden visitar aún hoy, comprobando la durabilidad de estos materiales. La experiencia americana con puzolanas naturales data del principio del siglo XX en proyectos de obras públicas, tales como presas, donde fueron utilizadas para controlar el aumento de temperatura en concreto masivo y actuar como material cementante.

Los primeros concretos livianos utilizados para construir edificaciones surgieron en el Imperio Romano en los años 20 a.C. Estos primeros hormigones eran resultado de la mezcla de cementos puzolánicos con materiales de baja densidad como lo es la piedra pómez. Entre las obras realizadas con este tipo de hormigón destacan: La cúpula del Panteón de Agripa (25 a.C), los arcos del Coliseo Romano (70 d.C), con luces mayores a 25 metros. Con los avances en la tecnología se experimentaron con nuevos tipos de agregados livianos como las arcillas, pizarras y escorias expandidas procedentes de plantas industriales, también se ha experimentado con agregados artificiales plásticos como el poliestireno, y agregados ricos en sílice como la cascarilla de arroz. El poliestireno se usa en Europa como agregado ligero, principalmente por su elevado valor como aislante térmico, así como por su baja densidad. Principalmente se ha empleado en la fabricación de bloques ligeros para muros divisorios, de revestimiento, en tableros precolados, en construcciones diversas y como capa aisladora colocada bajo el pavimento de concreto en carreteras para aumentar su resistencia a las heladas. Sika Elemix es un aditivo innovador



hecho de esferas poliméricas especialmente diseñado de partículas ligeras sintéticas, que se dispersan uniformemente en una mezcla de concreto para reemplazar un volumen significativo y reducir el peso, funcionando como un agregado liviano, el cual fue utilizado para sustituir el agregado en tres diferentes porcentajes en nuestro mortero, respecto al utilizado como testigo y comparar como afecta a las sollicitaciones físico-mecánicas sometidas a prueba.

A pesar de las ventajas que se tienen con los concretos ligeros, solo las dosificaciones empleando agregado ligero y aditivo inclusor de aire están suficientemente documentadas, para concretos aligerados con otros componentes no existen técnicas generalizadas de dosificación y preparación de las mezclas.

En este trabajo se presentan los resultados para obtener una posible dosificación de concreto ligero mediante una combinación de agregado (arena de río) y perlas de poliestireno.



## 2. OBJETIVO

El objetivo de esta investigación es conocer el comportamiento de los morteros ante las sollicitaciones físico-mecánicas a las que estarán sometidos, utilizando una puzolana que nos ayudara principalmente a incrementar la resistencia, mediante tres porcentajes en adición para el Metacaolín (MK) 3, 5 y 7 %; además de un material sintético que nos ayudara a aligerar nuestra mezcla, en este caso Sika Elemix esferas de poliestireno utilizado en tres porcentajes como sustitución del agregado en un 10, 20 y 30%, realizando probetas para las edades de 7, 14, 28, 45, 90, 150, 210 y 300 días; esto con la finalidad de compararlos frente un mortero tradicional, ver cuáles son los pros y contras con cada prueba destructiva y no destructiva. Establecer cuál de los porcentajes presenta mejor resultado, todo esto enfocado a crear posibles líneas de tendencia, basados en los resultados obtenidos, para diseñar un concreto con la característica especial de ser ligero.



### 3.- MATERIALES EN ESTUDIO

#### 3.1.- CEMENTO

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

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicatos hidráulicos de calcio. Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen por la reacción química con el agua. Durante la reacción, llamada hidratación, el cemento se combina con el agua para formar una masa similar a una piedra, llamada pasta. Cuando se adiciona la pasta (cemento y agua) a los agregados (arena y grava, piedra triturada, piedra machacada, u otro material granular), la pasta actúa como adhesivo y une a los agregados para formar el concreto, el material de construcción más versátil y más usado del mundo.

La hidratación empieza cuando el cemento entra en contacto con el agua. En la superficie de cada partícula de cemento se forma una capa fibrosa que gradualmente se propaga hasta que se enlace con la capa fibrosa de otra partícula de cemento o se adhiera a sustancias adyacentes. El crecimiento de las fibras resulta en rigidización, endurecimiento y desarrollo progresivo de la resistencia. La rigidización del concreto puede reconocerse por la pérdida de trabajabilidad, la cual normalmente ocurre después de 3 horas de mezclado, pero es dependiente de la composición y finura del cemento, de cualquier aditivo usado, de las proporciones de la mezcla y de las condiciones de temperatura. Consecuentemente. El concreto fragua y se endurece.



La hidratación continúa desde que existen condiciones favorables de temperatura y humedad (curado) y espacio disponible para la formación de los productos de hidratación. A medida que la hidratación continúa, el concreto se vuelve más duro y resistente. Gran parte de la hidratación y del desarrollo de la resistencia ocurre a lo largo del primer mes, pero si hay humedad y temperatura adecuadas, continúa de manera más lenta, por un largo periodo. Se ha reportado el aumento continuo de resistencia. Excediendo 30 años (Washa y Wendt 1975 y Word 1992).

### **3.1.1.- Historia del cemento en México.**

En México a principios del siglo XX fue cuando se empezó consumir el cemento importado de Inglaterra y para 1906 se constituyó la primera Compañía de Cementos Portland, en Toluca estado de Hidalgo, cuyo primer horno comenzó a trabajar en 1909. La revolución mexicana de 1920 y la crisis mundial de 1929 fueron factores determinantes que retrasaron el desarrollo de la industria cementera mexicana; sin embargo, Desde principios del siglo XX el uso del cemento se ha popularizado hasta convertirse en un producto estratégico para el crecimiento económico. En México las primeras fábricas iniciaron a principios del siglo XX. Actualmente México tiene la tercera empresa más importante del mundo en la producción de cemento, a pesar de ser el décimo productor mundial (Pacífica, 2008).

### **3.1.2.- Producción del Cemento Portland**

El cemento portland se produce por la pulverización de clínker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) que se muelen conjuntamente con el clínker para la fabricación del producto final.

Los materiales usados para la producción del cemento portland deben contener cantidades apropiadas de compuestos de calcio, sílice, alúmina e hierro. Durante la fabricación, se hace el análisis químico frecuente de todos los materiales para garantizarse una calidad alta y uniforme del cemento.

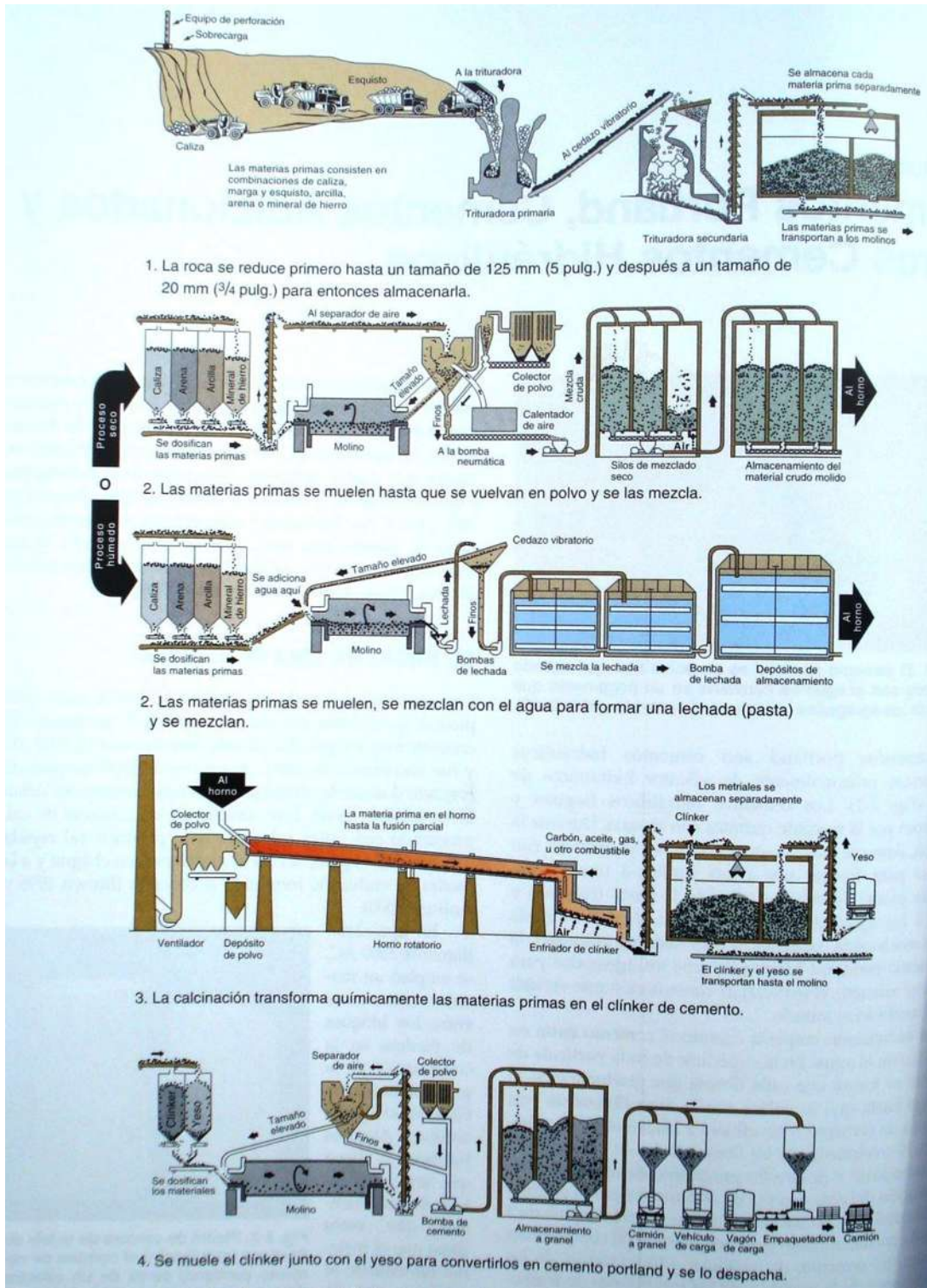
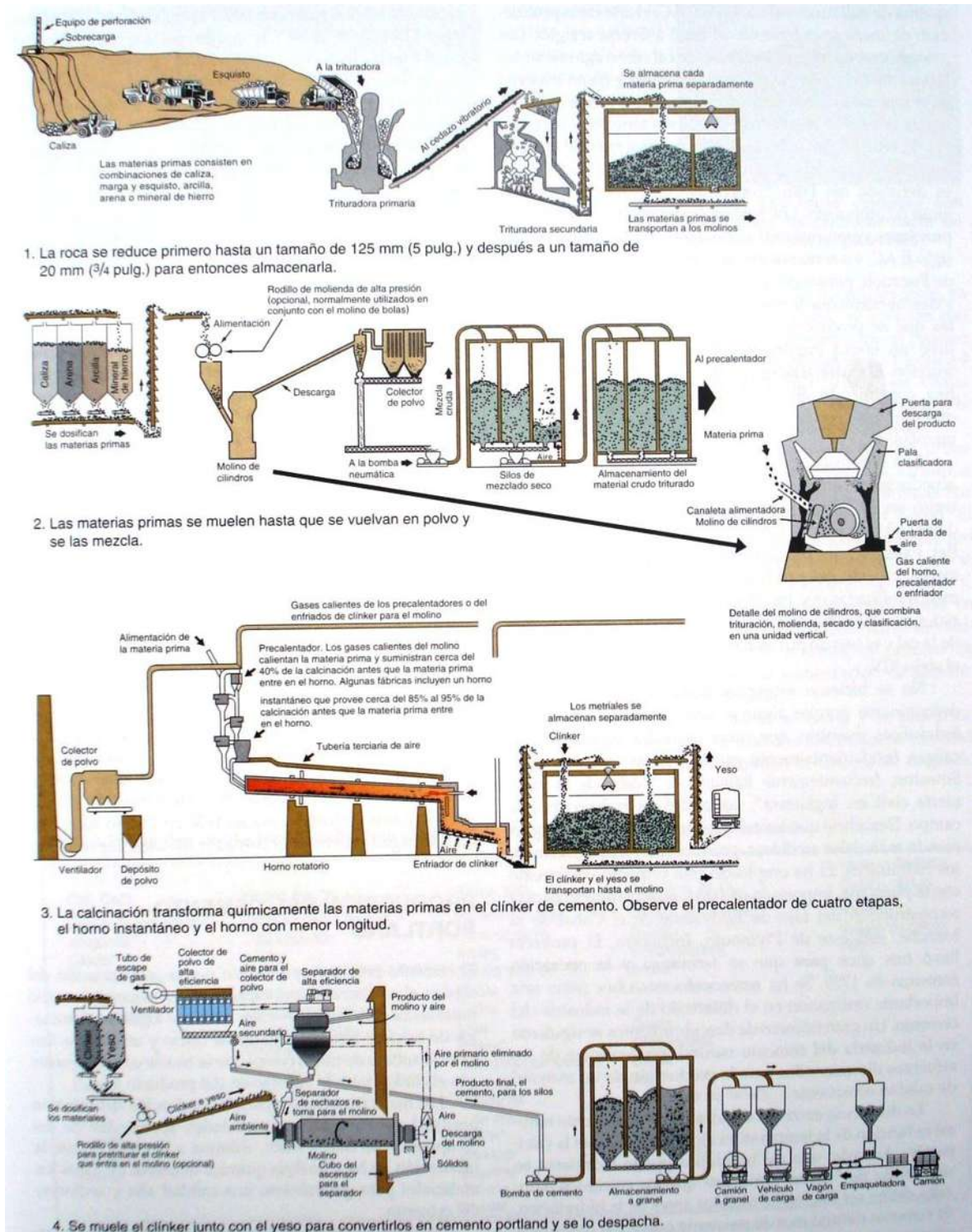


Ilustración 1. Etapas en la producción tradicional del cemento portland.





**Ilustración 2. Etapas en la producción moderna del cemento portland, a través del proceso seco.**

Los diagramas en las Ilustraciones 1 y 2 muestran las etapas de la fabricación del cemento. Como las operaciones de las plantas de cemento no son básicamente iguales. No se puede ilustrar adecuadamente por un mismo grafico todas las plantas. No hay instalaciones típicas para la producción del cemento, cada planta tiene diferencias significativas en disposición, equipos o apariencia en general (Ilustración 3).



**Ilustración 3. Vista aérea de una planta de cemento**

Las materias primas seleccionadas (Tabla 1) se transportan de la cantera, se trituran, se muelen y se dosifican de tal manera que la harina resultante tenga la composición deseada. La harina cruda es generalmente una mezcla de material calcáreo (carbonato de calcio), tal como la caliza y material arcilloso (sílice y alúmina), tal como arcilla, pizarra (esquisto) o escoria de alto horno. El cemento se fabrica tanto por vía seca como por vía húmeda, En el proceso de vía seca, las operaciones de molienda y mezcla se efectúan con los materiales secos, ya en el proceso de vía húmeda los materiales se mezclan con agua en la forma de lechada. En otros aspectos, el proceso seco y el proceso húmedo son muy similares. La Ilustración 2 ilustra desarrollos tecnológicos importantes, los cuales pueden mejorar considerablemente la productividad y la eficiencia energética de las plantas con proceso seco.



**Tabla 1. Fuentes De Las Materias Primas Usadas Y La Fabricación Del Cemento Portland**

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

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

**\*Las fuentes más comunes.**

Después del mezclado, se alimenta la materia prima molida en la parte superior del horno (Ilustración 4). La harina cruda pasa a lo largo del horno en una tasa controlada por la inclinación y la velocidad de rotación del horno. El combustible (carbón, aceite nuevo o

reciclado, fuel-oil, gas natural, llantas de goma y subproductos) se fuerza hacia la parte inferior del horno donde las temperaturas de 1400°C a 1550°C cambian químicamente el material crudo en clínker, pelotitas grises con tamaño predominante de canicas (Ilustración 5). La Ilustración 6 muestra el proceso de producción del clínker desde la alimentación de la materia prima hasta el producto final.



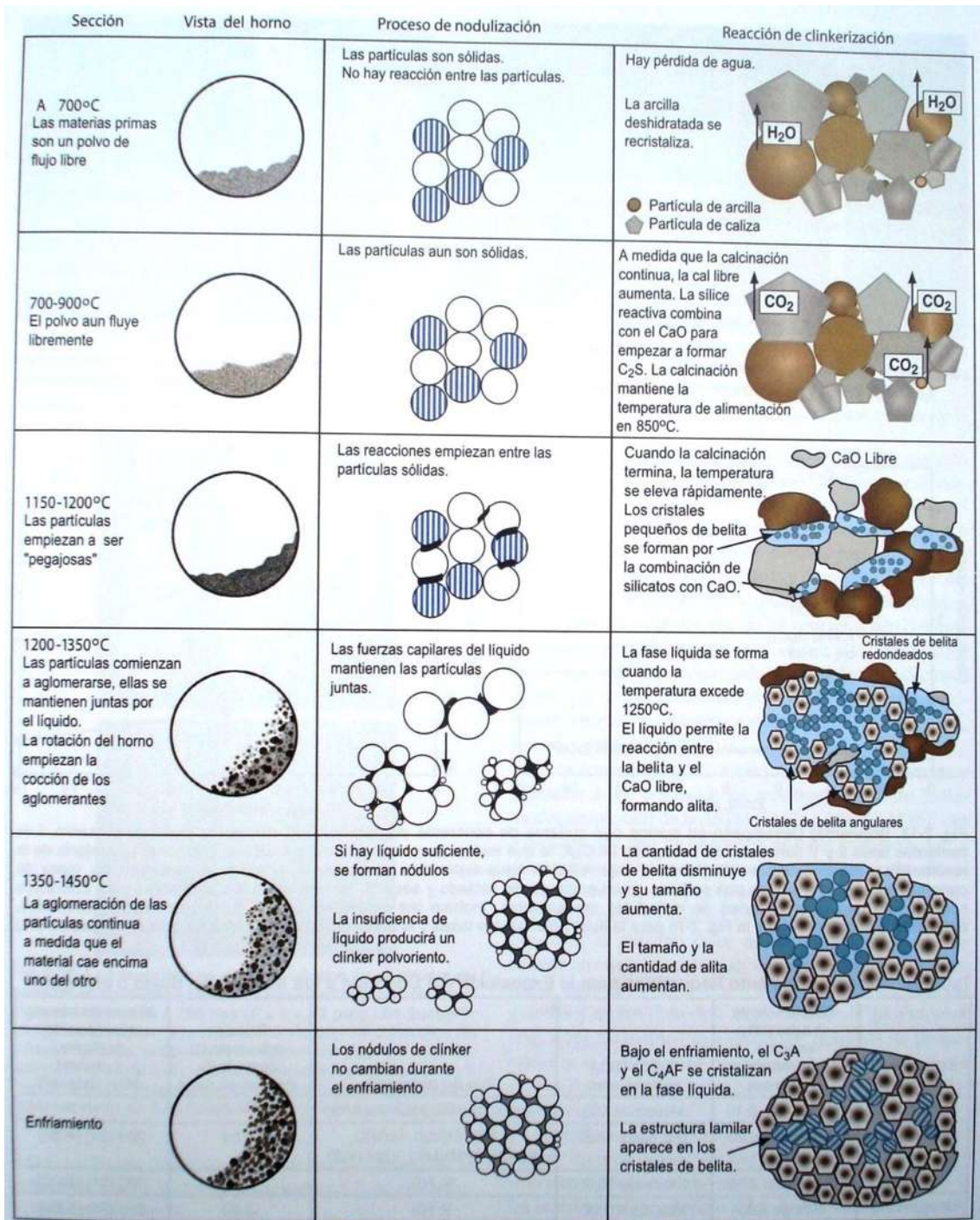
**Ilustración 4. Horno rotatorio para la manufactura del clínker de cemento. La foto, menor, abajo y a la derecha trae una vista interior del horno.**



**Ilustración 5. El clínker de cemento portland se forma por la calcinación en el horno del material crudo calcáreo y sílice. Este clínker específico tiene un diámetro de 20 mm (3/4 pulg.)**

Después de esto, el clínker se enfría y pulveriza. Durante esta operación, se adiciona en una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado (fragüe) del cemento y para que se mejoren las propiedades de contracción (retracción) y el desarrollo de resistencia (Lerch 1946 y Tang 1992). En el molinillo, el clínker se muele tan fino que puede pasar,

casi completamente, a través de un tamiz de 45 micrómetros (malla No. 325). Ese polvo gris extremadamente fino es el cemento portland (Ilustración 7).



**Ilustración 6. Proceso de producción del clinker de la materia prima al producto final.**



**Ilustración 7. El cemento portland es un polvo fino que cuando se mezcla con el agua se convierte en un pegamento que mantiene los agregados unidos en el concreto.**

### 3.1.3.- Tipos de cemento portland

Se fabrican diferentes tipos de cemento portland para satisfacer a varios requisitos físicos y químicos para aplicaciones específicas. Los cementos portland se producen de acuerdo a las especificaciones ASTM C 150, AASTHO M 85 o ASTM C 1157.

La ASTM C 150, Especificaciones de Norma para el cemento Portland (Standard Specification for Portland Cement), designa ocho tipos de cementos, usando los números romanos, como sigue:

Tipo I	Normal  Es un cemento para uso general, apropiado para todos los usos donde las propiedades especiales de otros cementos no sean necesarias. Usos: en pavimento, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tanques, embalses, tubería, unidades de mampostería y productos de concreto prefabricado y precolado.
Tipo IA	Normal con aire incluido
Tipo II	Moderada resistencia a los sulfatos  Se usa donde sean necesarias precauciones contra el ataque por sulfatos. Se lo puede utilizar en estructuras normales o en miembros expuestos a suelos o agua subterránea, donde la concentración de sulfatos sea más alta que la normal pero no





	severa.
Tipo IIA	Moderada resistencia a los sulfatos con aire incluido
Tipo III	Alta resistencia inicial (alta resistencia temprana)  Ofrece resistencia a edades tempranas normalmente una semana o menos. Este cemento es química y físicamente al cemento tipo I, a excepción de que las partículas se muelen más finamente. Es usado cuando se necesita remover las cimbras lo más temprano posible o cuando la estructura será puesta en servicio tempranamente.
Tipo IIIA	Alta resistencia inicial con aire incluido
Tipo IV	Baja calor de hidratación  Se usa donde se deben minimizar la tasa y cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto este cemento desarrolla la resistencia en una tasa más lenta que otros tipos de cemento. Se utiliza en estructuras de gran dimensión, tales como grandes presas. El cemento raramente está disponible en el mercado.
Tipo V	Alta resistencia a los sulfatos  Se utiliza en concretos expuestos a la acción severa de sulfatos-principalmente donde el suelo y el agua subterránea tiene alta concentración de sulfatos. Su desarrollo de resistencia es más lento que en el cemento tipo I.

**Tabla 2. Tipos de cemento Portland.**

La AASHTO M 85, Especificaciones para el Cemento Portland (Specification for Portland Cement), también usa cinco designaciones para el cemento portland del I al V. Los requisitos de la M 85 son casi idénticos a los de la ASTM C 150. Las especificaciones de la AASHTO se usan por algunos departamentos de transporte estatales en lugar de las normas ASTM.



### 3.1.4.- Cemento utilizado en la investigación

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

El Cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) la norma inglesa para este cemento, BS 4027:1980, estipula un contenido de  $C_3A$ , del 3.5%. La finura mínima es  $250 \text{ m}^2 / \text{kg}$ . Los demás aspectos, al cemento resistente a los sulfatos debe cumplir con la norma BS 12: 1978 para cemento portland normal.

En los Estados Unidos, el cemento resistente a los sulfatos, se conoce como tipo V y está incluido en la norma ASTM C 150: 78<sup>a</sup> (Tabla 2.3.1.). Esta especificación limita el contenido de  $C_3A$  al 5% y también restringe la suma del contenido total del aluminoferrito tetrácalcico ( $C_4AF$ ), a más del doble del contenido de  $C_3A$  al 20%. El contenido de óxido de magnesio está limitado aún 6%.

Desde el punto de vista químico, se debería esperar que el  $C_4AF$  formara sulfoaluminato de calcio y sulfoferrita de calcio y, por lo tanto que produjera expansión. Sin embargo la acción del sulfato de calcio en el cemento hidratado disminuye al reducirse la relación  $Al_2O_3: Fe_2O_3$ . La baja proporción de  $C_3A$  y el contenido comparativamente bajo de  $C_4AF$  del cemento resistente a los sulfatos significa que este tiene un alto contenido de silicatos que le proporcione una alta resistencia, pero como el silicato dicálcico ( $C_2S$ ) representa una alta proporción de silicatos, la resistencia a edades tempranas es baja.

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato. El cemento CPC 30R RS, genera moderado calor

de hidratación ya que el  $C_3S$  y el  $C_3A$ , que son los que producen alto de hidratación, disminuyen notablemente.

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

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



**Ilustración 8. Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros.**



## 3.2.- MORTERO

En el sentido general de la palabra, el mortero puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland y/o otros cementantes), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse presenta propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del concreto y es ampliamente utilizado para pegar piezas de mampostería en la construcción de muros, o para recubrirlos. La característica de todo mortero es endurecerse con el tiempo y formar una masa común con los materiales que une.

### 3.2.1.- Dosificación

Se llama dosificación en construcción, a la proporción en volumen de los diversos materiales que integran una composición. La dosificación de un mortero será de 1: 1 cuando a un volumen de aglomerante (cal o cemento) se le mezcle otro de arena; de 1: 2, cuando a uno de aglomerante, dos de arena, etc.

### 3.2.2.- Clases

Las diferentes clases de mortero dependen de la clase de sus componentes y de la finalidad de la construcción a realizar. Pueden ser simples y compuestos.

#### 3.2.2.1.- Morteros simples

Morteros simples son aquellos en que sólo interviene el aglomerado «disuelto» en la cantidad de agua suficiente para formar una masa pastosa, o sea, que se prescinde de la materia inerte (arena).





Los más corrientes son: el de tierra y el de yeso. Morteros compuestos (como veremos más adelante) son los que además llevan arena; podemos decir que estos últimos son los verdaderos morteros.

#### ***3.2.2.2.- Mortero de yeso***

El mortero de yeso tiene dos aplicaciones distintas una como material característico en la construcción, que se emplea en todas partes, y otra como sustituto de otros morteros en aquellos lugares en que abunda extraordinariamente el yeso. Hay tantos morteros de yeso como clases de yeso existen. No se emplea en trabajos al exterior o al aire libre.

#### ***3.2.2.3.- Morteros hidráulicos***

Son aquellos morteros compuestos que tienen la particularidad de fraguar debajo del agua. En estos morteros el aglomerante es la cal hidráulica, el cemento o ambos a la vez.

#### ***3.2.2.4.- Mortero de cemento***

Los morteros de cemento se usan generalmente para trabajos de mayor resistencia que los de cales hidráulicas. Por la duración de su fraguado se dividen en morteros de fraguado lento y morteros de fraguado rápido. Sus aplicaciones prácticas son todas aquellas donde se necesita un aglomerante, diferenciándose solamente en la proporción de la dosificación.

#### ***3.2.2.5.- Mortero de fraguado lento***

Este mortero, de fraguado lento, es mucho más denso que los de fraguado rápido; se endurece bien en el agua como todos los morteros de cemento, y su fraguado completo dura hasta 15 o 20 días, según su calidad.



El uso de un tipo u otro de mortero, dependerá de la clase de trabajo, pudiéndose decir, en términos generales, que se usarán en los sitios en que los muros necesitan mayor unión que la que dan los morteros de cal, como son: hileras de apoyo del envigado, verdugadas de cimientos, enlucidos exteriores y muros de las plantas bajas cuando hay varios pisos encima.

### ***3.2.2.6.- Mortero de fraguado rápido***

El mortero de fraguado rápido, aparte de poseer todas las características de cualquier mortero de cemento tiene, por su fraguado rápido, aplicaciones que lo hacen insustituible, como son: tabiques de panderete, doblado de bóvedas, bovedillas, soleras, ya que si bien el de yeso tiene parecidas características, encuentra más aplicaciones el de cemento por su mayor resistencia y no estar tan perjudicado por la acción de los agentes atmosféricos. El mortero por su fraguado instantáneo tiene una buena aplicación en los escapes de agua.

### ***3.2.2.7.- Morteros de cemento portland***

El mortero de cemento Portland es el mejor aglomerado para trabajos de importancia en la construcción, como son muros, bóvedas, macizos muy cargados, buenos cimientos, forjados de cornisa, pavimentos, revoques impermeables, enlucidos exteriores de fosas, cisternas, depósitos y, en general, todos aquellos trabajos que necesitan gran resistencia o preservarse del agua o de los agentes atmosféricos.

Este mortero tiene la propiedad de endurecerse en menos de dos horas debajo del agua. Debemos advertir que al hablar de cemento Portland nos referimos al Portland artificial, y que si bien el natural puede tener las mismas propiedades, es corrientemente de calidades irregulares, lo que no lo hace tan aplicable en estos tipos de trabajo.



### ***3.2.2.8.- Mortero fraguado lento-portland***

La finalidad de un mortero con fraguado lento y portland puede ser para aumentar la resistencia de un mortero de o para disminuir el coste del mortero de cemento Portland. En este último caso, que casi siempre es el que da lugar a esta combinación, debe prescribirse, ya que en épocas normales la diferencia de precio era tan escasa que no compensaba, en el total de la obra, la deficiencia en su construcción.

### ***3.2.3.- Propiedades del mortero de cemento portland***

#### ***3.2.3.1.- Propiedades en estado plástico***

##### ***3.2.3.1.1.- Manejabilidad***

Al igual que en el concreto, es una medida de la facilidad de colocación de la mezcla, en este caso, en las unidades de mampostería, o en revestimientos. La manejabilidad está relacionada con la consistencia, la cual se refiere al estado de fluidez del mortero, es decir, que tan dura (seca) o blanda (fluida) es la mezcla cuando se encuentra en estado plástico.

En general, se acepta como medida de la manejabilidad, la característica de fluidez de la mezcla medida en el ensayo de la mesa de fluidez (ASTM C-230), aunque hasta el momento dicha propiedad ha dependido de la apreciación subjetiva del albañil.

##### ***3.2.3.1.2.- Retención de agua***

Esta propiedad, es una medida de la habilidad del mortero para mantener su plasticidad cuando quede en contacto con una superficie absorbente, como una pieza de mampostería.



La retención de agua puede ser mejorada mediante la adición de cal dada su capacidad plastificante, aunque no necesariamente, ya que hoy en día se tienen otras alternativas igualmente satisfactorias como son: mayores contenidos de finos, la adición de aditivos plastificantes y agentes incorporadores de aire o simplemente utilizando cemento puzolánicos. La retención de agua incide altamente en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final a la compresión, ya que por ejemplo, una mezcla incapaz de retener el agua no permite la hidratación del cemento.

#### 3.2.3.1.3.- Velocidad de endurecimiento

Los tiempos de fraguado inicial y final de la mezcla, deben estar entre límites adecuados. Por lo general se aceptan valores entre 2 y 24 horas respectivamente. Sin embargo, estos dependen de diversos factores tales como las condiciones del clima o la composición de la mezcla y hoy en día son fácilmente controlables con el uso de aditivos.

#### 3.2.3.2.- *Propiedades en estado endurecido*

##### 3.2.3.2.1.- Retracción

Como es sabido, la retracción se debe principalmente a reacciones químicas de hidratación de la pasta, sobre todo en pastas puras con una alta relación agua-cemento. La arena soluciona el problema en parte, sobre todo si es de textura rugosa, ya que forma un esqueleto que evita los cambios de volumen y el peligro de agrietamiento. En zonas calurosas y de muchos vientos, el agua de mezclado tiende a evaporarse produciendo tensiones internas en el mortero, que se expresan en la formación de visibles grietas. Lo mismo ocurre si la base es muy absorbente. Aparentemente la retracción es proporcional al espesor de la capa de mortero y a la riqueza del cemento. Para evitar la retracción es conveniente usar cementos de baja retracción al secado (puzolánicos o con adición inerte) y arenas de buena granulometría con pocos finos.



### 3.2.3.2.2.- Adherencia

En general, la adherencia es la capacidad que tiene el mortero de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura. Es de gran importancia ya que a ella se debe el hecho de que un mortero pueda resistir pandeo, cargas transversales y excéntricas, dándole resistencia a la estructura.

Morteros de baja capacidad de retención de agua y morteros de alta resistencia se adhieren solo en partes por lo que su adherencia es pobre. En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie del bloque sea tan rugosa como sea posible para permitir la unión mecánica del mortero y además debe tener un nivel de absorción adecuado y compatible con la mezcla de mortero. Los morteros plásticos, de buena adherencia, buena capacidad de retención de agua y que no requieran de superficies húmedas para su colocación, son los más adaptables y de mayor utilización en mampostería ya que permiten una íntima unión entre las piezas.

### 3.2.3.2.3.- Resistencia

Una vez aplicado en obra, el mortero debe actuar como unión resistente. Se requiere una alta resistencia a la compresión cuando al mortero deba soportar cargas altas y sucesivas. Siendo esta un indicio de las resistencias a tensiones de corte y a tensiones de tracción.

Hay dos leyes fundamentales que se aplican a la resistencia de un mortero compuesto de el mismo cemento con diferentes proporciones y tamaños de arena, la primera dice: con un mismo agregado, el mortero más resistente e impermeable, es aquel que tiene mayor porcentaje de cemento en un volumen dado de mortero; y la segunda: con el mismo porcentaje de cemento en un volumen de mortero, el más resistente y generalmente más impermeable es aquel que tenga la mayor densidad o sea aquel que en una unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos.



La primera ley es realmente muy clara, pero la segunda requiere de un mayor análisis. El valor de un cemento de primera clase sin impurezas es universalmente reconocido. Sin embargo las propiedades de un mortero hidráulico como durabilidad, permeabilidad y porosidad, no depende únicamente de la calidad del cemento sino también de la composición granular del mortero, o sea las dimensiones y posiciones relativas de los diferentes elementos que lo componen.

El tamaño de los granos de arena, está subordinado, en su influencia sobre la resistencia y otras cualidades de mortero, a la densidad del mortero producido. Se puede suponer que una arena densa o sea aquella que contenga seca el menor volumen de poros, al ser mezclada con una proporción dada de cemento, producirá el mortero más denso y en consecuencia resistente. Pero esto no ocurre necesariamente porque la adición de cemento y agua cambia la composición física. Una mezcla de arena fina y cemento requiere más agua que una de arena gruesa y el mismo cemento.

El volumen total de mortero de consistencia plástica será afectado por la cantidad de agua usada y por los volúmenes de los materiales secos. Por ello un mortero hecho de arena fina y cemento será menos denso que uno hecho con arena gruesa y el mismo cemento, aunque ambas arenas al ser pesadas secas contengan la misma proporción de sólidos y poros. La arena fina tiene más granos en su unidad de volumen por consiguiente un mayor número de puntos de contacto entre sus granos. Al agregar agua esta produce una película y separa los granos por tensión superficial.

El efecto del agua sobre la resistencia depende también básicamente de la densidad del mortero resultante. Morteros secos dan mayores resistencias que morteros húmedos, porque estos pueden ser más densamente compactos. Los morteros plásticos dan resultados más uniformes.



#### 3.2.3.2.4.- Durabilidad

Al igual que en el concreto, la durabilidad del mortero es la resistencia a los agentes externos tales como las bajas temperaturas, la penetración de agua, desgaste por abrasión, retracción al secado, eflorescencias, agentes corrosivos, o choques térmicos, entre otros, sin deterioro de sus condiciones fisico-químicas con el tiempo.

En general, se cree que morteros de alta resistencia a la compresión tienen buena durabilidad, sin embargo el uso de agentes inclusores de aire es de particular importancia en ambientes húmedos, ambientes marinos y en general en condiciones de ambiente agresivo.

#### 3.2.3.2.5.- Apariencia

Un aspecto generalmente olvidado del concreto que cobra mayor importancia en el mortero es su apariencia, especialmente en mamposterías de ladrillo a la vista. En este caso, la plasticidad de la mezcla, la selección y dosificación adecuada de sus componentes son de vital importancia en la colocación y el acabado de las superficies. El color y la textura pueden mejorarse con colorantes inorgánicos o con aditivos especiales.



### 3.3.- PUZOLANAS

En la historia de la civilización humana el descubrimiento de los materiales y de las acciones cementantes hidráulicas fue posterior al descubrimiento del fuego y debió ser poco posterior al descubrimiento de la cerámica.

De las obras antiguas realizadas con puzolanas que han llegado hasta nuestros días como inestimables reliquias de la civilización romana pueden citarse: panteones, coliseos, estadios, basílicas, acueductos, cisternas, puentes, puertos y las más diversas estructuras que han perdurado. Y lo han hecho como no han podido hacerlos muchas obras realizadas en la Edad Media, con materiales conglomerantes mal cocidos y exentos de puzolanas activas. Por el contrario, cuando el defecto de cocción y la falta de puzolana se subsanaron, las obras cobraron de nuevo el vigor y con él la longevidad.

Las puzolanas están formadas por fases activas capaces de reaccionar con la cal proveniente de la hidratación del cemento Portland. Esto lleva a que la puzolana se integre a dicho proceso de hidratación y dé como resultado más bajo contenido de portlandita e incremento en los silicatos cálcicos hidratados. Todas estas fases activas son termodinámicamente inestables y, en general, están constituidas por materiales amorfos (MASSAZZA, 1993). 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, entre otras (MEHTA, 1989).

El objetivo de utilizar puzolanas en la elaboración de concretos es para mejorar su desempeño en estado fresco y endurecido. Son principalmente utilizados para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia.

El uso de las puzolanas nos permite controlar la fisuración de algunas mezclas con alto contenido de cemento, además de reducir la generación de calor. Otro objetivo muy importante es la disminución de residuos subproductos de procesos industriales, que de no





utilizarse se depositarían en el suelo como desperdicios. La utilización de estos residuos vuelve más sustentable el proceso, ya que al utilizar puzolanas en adición o sustitución al cemento, reducimos el consumo de éste y por tanto las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmosfera, y por tanto, contribuimos a reducir el efecto invernadero, ya que anualmente se fabrican alrededor de 20,000 millones de toneladas utilizando cerca de 2,500 millones de toneladas de cemento portland (CP). El impacto ambiental resultante del uso de cemento es considerable ya que por 1 kg de CP se emite aproximadamente 1 kg de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, así de las más de 2,500 millones de toneladas anuales de  $\text{CO}_2$  cerca del 10% corresponde a la industria del CP (Escalante, Navarro, & Gómez, 2011).

Las puzolanas se clasifican en naturales y artificiales. Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparzones silíceos de animales (infusorios radiolarios) o plantas (algas diatomeas).

Todas las propiedades de las puzolanas naturales y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria del cemento, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación.

Los materiales puzolánicos naturales están constituidos principalmente por rocas eruptivas y en particular efusivas y volcánicas, y dentro de éstas, por extrusivas, salvo las de naturaleza orgánica que son de origen y formación sedimentaria (Salazar, 1968).

Las puzolanas más comúnmente empleadas hoy en día son los materiales procesados, los cuales se tratan por altas temperatura en los hornos y después se muelen hasta que se transformen en un polvo fino. Las arcillas calcinadas se pueden utilizar como substitutas parciales del cemento, normalmente entre 15% y 35% y también para aumentar la resistencia al ataque de sulfato, controlar la reactividad álcali-agregado y reducir la permeabilidad. Su masa específica relativa es de 2.40 a 2.61 y su finura Blaine es de 650  $\text{m}^2/\text{kg}$  a 1350  $\text{m}^2/\text{kg}$ . El esquisto calcinado puede contener del 5% al 10% de calcio,



resultando en un material con alguna propiedad cementante o hidráulica. Debido a la cantidad de calcita residual, la cual no es totalmente calcinada, y a las moléculas de agua adsorbida en el mineral de arcilla, esquisto calcinado tiene pérdida por ignición del 1% al 5%. La pérdida por ignición del esquisto calcinado no es una medida o indicación de la cantidad de carbono, como podría ser en la ceniza volante.

La metacaolinita, una arcilla calcinada especial, se produce por la calcinación a baja temperatura de la arcilla caolín de alta pureza. El producto se muele hasta un tamaño de partícula promedio de cerca de 1 a 2 micrómetros. La metacaolinita se usa en aplicaciones especiales, donde se necesita baja permeabilidad y muy alta resistencia. En estas aplicaciones, la metacaolinita se usa mas como un aditivo (adición) al concreto que como un sustituto del cemento. La adición típica es de aproximadamente 10% de la masa del cemento.

Las puzolanas naturales se clasifican por la ASTM C 618 (AASHTO M 295) como puzolana Clase N. El ACI 232 (2000) presenta una discusión sobre las puzolanas naturales. La tabla 3 enseña el análisis químico típico y las propiedades seleccionadas de las puzolanas.

	<b>Clase F (ASTM)</b>	<b>Clase C (ASTM)</b>	<b>Escoria granulada</b>	<b>Humo de sílice</b>	<b>Arcilla calcinada</b>	<b>Esquisto calcinado</b>	<b>Metacaolinita</b>
<b>SiO<sub>2</sub> %</b>	52	35	35	90	58	50	53
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	23	18	12	0.4	29	20	43
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> %</b>	11	6	1	0.4	4	8	0.5
<b>CaO %</b>	5	21	40	1.6	1	8	0.1
<b>SO<sub>3</sub> %</b>	0.8	4.1	9	0.4	0.5	0.4	0.1
<b>Na<sub>2</sub>O %</b>	1.0	5.8	0.3	0.5	0.2	-	0.05
<b>K<sub>2</sub>O %</b>	2.0	0.7	0.4	2.2	2	-	0.4
<b>Total Na eq. alc %</b>	2.2	6.3	0.6	1.9	1.5	-	0.3
<b>Pérdida por ignición</b>	2.8	0.5	1.0	3.0	1.5	3.0	0.7
<b>Finura</b>	420	420	400	20,000	990	730	19,000



<b>Blaine m<sup>2</sup>/kg</b>							
<b>Masa específica relativa</b>	2.38	2.65	2.94	2.40	2.50	2.63	2.50

**Tabla 3. Análisis Químico y Propiedades Seleccionadas de Ceniza Volante, Escoria, Humo de Sílice, Arcilla Calcinada, Esquisto Calcinado y Metacaolinita Típicos. (Diseño y Control de Mezclas)**

### 3.3.1.- METACAOLÍN (MK)

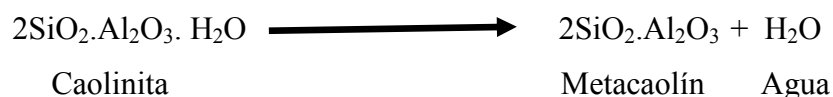
#### 3.3.1.1.- Obtención y Composición

Los Caolines son rocas formadas fundamentalmente por minerales del grupo del Caolín como son la caolinita, dickita, nacrita y halloysita, acompañados por impurezas de cuarzo, mica, anatasa, rutilo, ilmenita y pequeñas cantidades de turmalina, zircón y otros minerales pesados. Para su utilización en algunas de sus aplicaciones, deben ser refinados y procesados, para aumentar su blancura, pureza u otras características comerciales importantes.

El Metacaolín (MK) es un producto de síntesis, manufacturado mediante la calcinación del caolín, de gran finura (hasta 1-2  $\mu\text{m}$ ) y con elevada actividad puzolánica. Se ha demostrado en un gran número de estudios que el MK proporciona mejoras significativas en la resistencia (De Silva & Glasser, 1993).

De acuerdo con Moya (Moya, 1998), el tratamiento térmico de la caolinita da lugar a transformaciones estructurales, que llevan a la obtención de Metacaolín ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ) o Mulita ( $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ).

La reacción que nos indica la formación del Metacaolín es la siguiente:





De estos productos, el Metacaolín (MK), es un aluminosilicato de carácter amorfo y alta reactividad, que mezclado con cal o cemento actúa como puzolana y les concede a los morteros y concretos excelentes propiedades cuando se adiciona al cemento, tal como una resistencia a la compresión superior y excelentes propiedades de durabilidad. Así mismo, su color blanco lo hace muy interesante para aplicaciones arquitectónicas (Caldarone, Gruber, & Burg, 1994).

El Metacaolín (MK)<sup>1</sup> cuando se adiciona a morteros y concretos mejora sustancialmente el desempeño mecánico y de durabilidad, debido a que éste se combina químicamente con el hidróxido de calcio, procedente de la reacción de hidratación del cemento, para formar silicatos de calcio, sílico-aluminatos y aluminatos de calcio hidratados (CALDARONE, 1994), siendo considerado una puzolana de alta reactividad. Esta reactividad está relacionada con la naturaleza de la materia prima de la cual proviene (composición mineralógica y grado de cristalinidad de los minerales que formen el Caolín), las condiciones del proceso térmico (temperatura y tiempo de deshidroxilación) y sus características propias, tales como el tamaño de partícula, entre otros (KAKALI, 2001).

La norma ASTM C618 precisa como valor mínimo un índice resistente igual o superior al 75% a 28 días para considerar un material como puzolana en relación a su resistencia total.

En la tabla (4) se muestran los resultados de fluorescencia realizados al MK para obtener las cantidades de compuestos alúminos y silicatos que sirven como parámetro para identificar su propiedad puzolánica.

---

<sup>1</sup> Los proveedores más comunes de MK son los Chinos y Ucrania, los chinos con los costos de hasta 500 dólares por tonelada, ucrania más barato con precios de 240 dólares con pedidos de 1000 toneladas. Estos no son los únicos proveedores.

METACAOLÍN			
Componente	%	Componente	%
SiO <sub>2</sub>	51.09	SO <sub>3</sub>	0.036
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45.27	ZrO <sub>2</sub>	0
TiO <sub>2</sub>	1.749	Cl	0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.487	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.033
MgO	0	SrO	0
MnO	0	ZnO	0
CaO	0.032	PXC/PPI	0.913
Na <sub>2</sub> O	0.219	BaO	0
K <sub>2</sub> O	0.172	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0

**Tabla 4. Composición química porcentual del Metacaolín. (TESIS, Cipriano Bernabé Reyes, “Adiciones Minerales De Alta Temperatura A Morteros De Cemento Como Modificadores De Comportamiento Físico-Mecánico”)**

El caolín está constituido en esencia por silicatos aluminicos hidratados (Galan Huertos, 1974), las especies mineralógicas comúnmente presentes son principalmente caolinita ( $2\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), alunita ( $\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ ), feldespato potásico ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) y cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) (Kakali et al., 2001). La estructura de la caolinita es 1:1, conformada de una lámina de tetraedros de sílice y una de octaedros de alúmina.

El Metacaolín (MK) se obtiene de la calcinación del caolín a  $\approx 750^\circ$  (Shvarzmana et al., 2003), el tiempo y temperatura de exposición son factores determinantes en la transformación (Salvador, 1995). Durante la calcinación, la caolinita pierde la lámina de OH, y transforma a metacaolinita, la red de Si-O permanece intacta y la red de Al-O se colapsa; el Metacaolín resultante tiene una estructura altamente desordenada y su alto contenido de energía interna lo hace potencialmente reactivo como aditivo para el Cemento Portland. El Metacaolín es considerado una puzolana, reacciona con  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (CH, portlandita) para formar compuestos que poseen propiedades ligantes (Frias y Cabrera, 2001; Massaza, 2004). En combinación con Cemento Portland, el CH generado por la hidratación del Cemento Portland, reacciona con la puzolana formando más C-S-H



(silicatos de calcio hidratados) y otros productos como aluminatos de calcio hidratados ( $C_4AH_{13}$ ,  $C_3AH_6$ ) y  $C_2ASH_8$  (stratlingita) (Jones, 2001).

La utilización de arcillas calcinadas como materiales puzolánicos en morteros y concretos ha tenido una atención considerable en los últimos años (Jones, 2001). Estudios comparativos entre Metacaolín y la microsílíce (Zhang y Malhotra, 1995; Curcio et al., 1998), han reportado el Mc es ventajoso como el uso de la microsílíce, que es una de las puzolanas más reactivas. En general se ha reportado que la adición de Metacaolín mejora las propiedades de morteros y concretos de Cemento Portland puro, tales como la resistencia mecánica, impermeabilidad, durabilidad química, etc. (Jones, 2001; Zand y Malhotra, 1995; Sabir et al., 2001; Wild et al., 1996, Wild y Khatib, 1997). Esto se atribuye al efecto de reductor de porosidad (efecto rellenedor ó “filler effect”), a que acelera las reacciones de hidratación del Cemento Portland y a la reacción puzolánica. Se ha reportado que el uso de Metacaolín favorece el control de reacción expansiva sílice-álcali (Ramlochan et al., 2000), una importante patología de concreto a nivel mundial.

Por otro lado, las cantidades de Metacaolín empleadas oscilan generalmente entre 10-20% (Jones, 2001; Wild et al., 1996; Badogianinis, 2004), en sustitución de cemento portland, para obtener mejoras en las propiedades mecánicas.

### **3.3.1.2.- Antecedentes**

Del estudio de las puzolanas, surgen muchos autores que han estudiado su comportamiento en morteros y concretos, el MK ha sido uno de los de mayor estudio en diferentes lugares del mundo y con una gran variedad de aplicaciones. A continuación se mencionan algunos autores que han trabajado con Metacaolín en adiciones a morteros, destacando algunos de sus resultados.

En estudios de algunos autores se estudia y se comprueba que el MK cumple con las especificaciones para ser considerada como una puzolana, con un alto índice puzolánico y un efecto importante en las propiedades de permeabilidad capilar y penetración de cloruros de las mezclas cementicias producidas.



En estos estudios se han utilizado Caolines con contenidos de caolinita entre el 38 y el 52% con desempeños bastante aceptables (BADOGIANNIS, 2005).

Un estudio realizado en el año 2007 destaca por que, además de estudiar el comportamiento de las reacciones puzolánicas del MK en pruebas mecánicas, también se evaluaron las propiedades de absorción capilar y la permeabilidad de cloruros en morteros adicionados con el 10 y 20% de MK con respecto a la cantidad de cemento. En los resultados que se identificaron los mejores comportamientos se obtuvieron para las mezclas adicionadas con MK derivado del Caolín de mayor pureza, sin embargo la diferencia fue mínima con los porcentajes del 20% de adición. Por tal motivo en dicho trabajo se concluyó que el MK de menor pureza es óptimo para la realización de este tipo de puzolana (Torres Agredo & Mejía de Gutierrez, 2007).

Una publicación actual consta de un estudio en adiciones de puzolanas de MK y HS a concretos, en el que se hace una comparativa entre los resultados obtenidos para pruebas mecánicas y de durabilidad, obteniéndose así los mejores resultados para el Humo de Sílice (HS) y resultados muy satisfactorios para el MK. En éste estudio se puede destacar el uso de aditivos para aumentar la fluidez, dato que causa una cierta incertidumbre ya que no se establece su relación con el mejoramiento o afectación a las propiedades mecánicas. De ahí se estableció que al igual que con otros autores (WILD & KHATIB, 1996), que han realizado este tipo de estudio, el porcentaje óptimo de adición de MK es del 20% (Torres Agredo & Mejía de Gutierrez, 2011).<sup>2</sup>

---

<sup>2</sup> Con porcentajes mayores habrá un sobrante de puzolana de MK que no reaccionara quedando como relleno sin formar enlaces que aumenten su resistencia.





### 3.4.- AGREGADO (MATERIAL INERTE)

La importancia del uso del tipo y de la calidad correcta del agregado (árido) no se puede subestimar. Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto (70% a 80% de la nada) e influyen fuertemente en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, en las propiedades de la mezcla y en la economía del concreto.

Los agregados deben cumplir con algunas normas para que su uso en ingeniería se optimice: deben ser partículas limpias, duras, resistentes, durables y libres de productos químicos absorbidos, revestimiento de arcilla u otros materiales finos en cantidades que puedan afectar la hidratación y la adherencia a la pasta de cemento. Las partículas de agregados friables (disgregables, deleznales o desmenuzables) o capaces de rajarse son indeseables. Se deben evitar agregados que contienen cantidades apreciables de esquisto u otras rocas esquistosas, de materiales blandos y porosos. Se deben evitar, en especial, algunos tipos de cherts<sup>3</sup>, pues tienen poca resistencia al intemperismo y causan defectos superficiales tales como las erupciones.

Solamente la identificación de los constituyentes de un agregado no puede dar una base para el pronóstico del comportamiento del agregado en servicio. La inspección visual normalmente revela debilidades en los agregados gruesos. Los registros de servicio son inestimables en la evaluación de los agregados. En ausencia de registros de desempeño, se deben ensayar los agregados antes de que los use en el concreto.

---

<sup>3</sup>Chert, es una roca sedimentaria rica en sílice de grano fino microcristalina, criptocristalina o microfibrosa que pueden contener pequeños fósiles.



### 3.4.1.- Pruebas principales en los agregados

A la supervisión de concreto le conciernen, principalmente tres clases generales de pruebas al agregado:

1. Pruebas iniciales de aceptación, efectuados en el laboratorio, sobre granulometría, limpieza (limo e impurezas orgánicas), sanidad y durabilidad, resistencia a la abrasión, materiales nocivos, sustancias extrañas y composición mineral.
2. Pruebas secundarias de laboratorio, de muestras aprobadas, para determinar las propiedades físicas que se usan en la dosificación de mezcla. Se incluyen las de absorción, peso específico aparente, peso unitario, vacíos y expansión.
3. Pruebas de campo para control de aceptación secundaria, entre ellos limpieza, materiales nocivos y contenido de humedad.

ASTM STP 169-C (1994) trata sobre la importancia de las diferentes pruebas en los agregados.

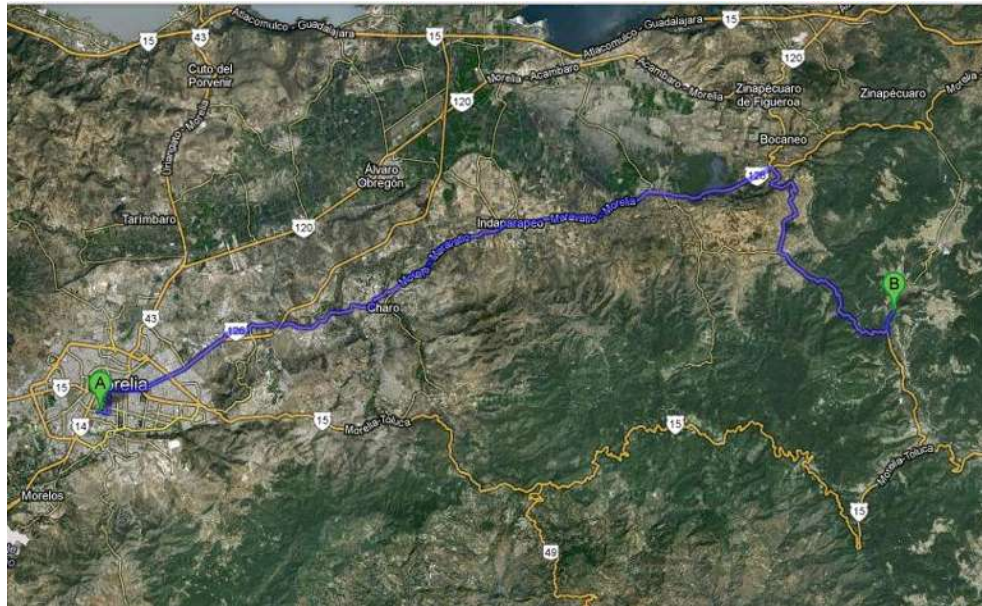
### 3.4.2.- Agregado utilizado en la Investigación

La arena al mezclarse con los aglomerantes constituye el soporte para el mortero y evita el resquebrajamiento que se produciría si se empleara el aglomerante solo, aparte de que su uso reduce a menos de un tercio el aglomerante.

Las arenas estarán libres de sustancias que impidan la adherencia o influyan desfavorablemente en el proceso de endurecimiento como ácidos, grasas, restos vegetales y cantidades perjudiciales de arcilla y sales minerales. En morteros de cal y cemento sólo se podrá usar arena lavada. Las proporciones de mezcla están dadas para cada caso en particular, según el uso que se vaya a dar al mortero, y la clase de arena empleada en su preparación (ARQHYS, 2012).

El material inerte utilizado para la elaboración de morteros es la arena de origen volcánico; el más comúnmente utilizado es la arena negra triturada proveniente de basalto, también la arena de río o las calizas funcionan bien.

La arena utilizada para la elaboración del mortero con adición de MK y en la sustitución con poliestireno fue del río Huajúmbaro proveniente del poblado del Cuervo perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán.



**Ilustración 9. Ruta. Saliendo de Morelia (A) por la salida Charo, tomando la carretera Morelia-Maravatío hasta llegar al entronque de cuatro caminos (distancia 45 kms), gira hacia la derecha rumbo a Huajúmbaro recorriendo 20 kms, se gira a la izquierda por la carretera rumbo a Zirándaro recorriendo alrededor de 1.5 kms llegando aguas abajo del río donde se obtuvo la arena (B).**

De la arena se usa solo el material que pasa la malla N°16 y se retiene en la malla N°30 y presentan características similares a las que se especifica en la norma ASTM C 91, 1995, arena de Ottawa, que nos indica que debe de tener alto contenido de sílice.



**Ilustración 10. Lugar donde se obtuvo la arena, Huajúmbaro, Mich.**

Las arenas de grano redondeado proporcionan un mortero más fácil de trabajar que las arenas trituradas (Rivera Flores). La del río Huajúmbaro es de grano redondeado.



**Ilustración 11. En la imagen se ilustra cómo nos tocó acarrear la arena de un lado al otro del río.**



### 3.5.- AGUA (LÍQUIDO DE AMASADO)

El agua potable es, en la mayoría de los casos, satisfactoria como agua de mezclado y este criterio de calidad que se especifica usualmente. Por lo general, se debe conocer la presencia de impurezas dañinas, como álcalis, ácidos, material vegetal en descomposición, aceite, aguas de albañal, o cantidades excesivas de limo. El agua de calidad dudosa deberá enviarse a un laboratorio para que se efectúen pruebas; o si no se dispone de tiempo, comparar la resistencia y durabilidad de especímenes de cemento o mortero hechos con dicha agua que se sabe que es satisfactoria.

La norma ASTM C 94 permite usar el agua de lavado que queda dentro de la mezcladora para la mezcla siguiente, siempre y cuando se pueda medir su cantidad con precisión.

El agua es un ingrediente fundamental en la elaboración de mortero y/o concreto debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que para usarla en el lavado de agregados, en la preparación de la mezcla o durante el curado del concreto, no solamente su cantidad es importante, sino también su calidad física y química. En la tabla 5. Se presenta las normas que tratan específicamente de la calidad del agua para el empleo en morteros y concretos

<b>País</b>	<b>Norma</b>	<b>Nombre de la norma</b>
Argentina	IRAM 1601	Agua para morteros y hormigones de cemento Portland
Chile	NCh 1498.Of1982	Hormigón-Agua de amasado-Requisitos
Colombia	NTC 3459	Concretos. Agua para la elaboración del concreto
Ecuador	1 855-1:01	Hormigón premezclado: requisitos
	1 855-2:02	Hormigón preparado en obra: requisitos
EE.UU.	ASTM C 94	Standard specification for ready mixed concrete





Perú	NSTP 339.088-1982	Hormigón (concreto). Agua para morteros y hormigones de cementos Portland. Requisitos
México	NMX-C-122-82	Agua para concreto
Venezuela	CONVENIN 2385:2000	Concreto y mortero. Agua de mezcla. Requisitos

**Tabla 5. Efectos negativos sobre el concreto si se superan los valores límites permisibles de sustancias en las aguas (Instituto del Concreto, 1997).**

### 3.5.1.- Agua utilizada en la Investigación

El agua que generalmente se utiliza es el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). En este caso el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas” 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.



## 3.6.- ADITIVOS

### 3.6.1.- Influencia de los Aditivos en el diseño de mezclas

El proporcionamiento de un concreto frecuentemente involucra la selección de los materiales y su combinación (Abrams, 1919). El conocimiento de las propiedades del concreto tanto en estado fresco como en estado endurecido tiene como finalidad primordial determinar el diseño de la mezcla (Instituto del Concreto, 1997).

El diseño de mezclas puede ser definido como el proceso de selección de los ingredientes adecuados para concreto (cemento, agregados, agua y ocasionalmente aditivos) y la determinación de sus proporciones relativas con el objeto de producir un concreto de cierta resistencia, consistencia y durabilidad de la forma más económica posible (Shetty, 2005).

Por lo general, para la aceptación de los aditivos, se efectúa el análisis de laboratorio, o se confía en lo que dicen los fabricantes. La supervisión de los aditivos incluye: ver que cumplan con las especificaciones adecuadas, que sean almacenados sin contaminación o deterioro; que sean medidos con precisión e introducidos en la mezcla según este especificado; y que se comporten como se esperaba al hacer la mezcla y por los resultados de las pruebas que se hagan.

### 3.6.2.- Aditivo utilizado en la investigación

Cuando la relación A/C 1.01, no cumple con la fluidez de  $110 \pm 5$  fue necesario agregar un aditivo fluidificante. El cual cumple con las siguientes características: el nombre comercial es SikaCem Fluidificante, Ilustración 12, aditivo fluidificante de concretos o morteros que incrementa el revenimiento o disminuye el consumo de agua en un 10% aprox. El fabricante recomienda la siguiente dosificación: Una bolsa de 200g de producto (SikaCem Fluidificante) por cada saco de 50 kg, es decir  $4\text{grs} \times \text{kg}$  de cemento.



Para esta investigación se utilizó excediendo la cantidad especificada por el fabricante, utilizando en dos porcentajes de sustitución de poliestireno  $8\text{grs} \times \text{kg}$  de cemento, en el tercer porcentaje (30% en sustitución de arena) se usó  $10\text{grs} \times \text{kg}$  de cemento.



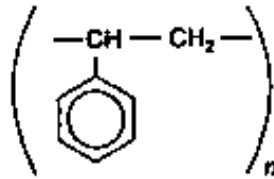
**Ilustración 12. Fluidificante SikaCem**

### **3.6.3.- ADITIVO REDUCTOR DE PESO**

#### **3.6.3.1.- Poliestireno (PS)**

El poliestireno es uno de los polímeros más fáciles de obtener. Tanto es así que ya en 1839 fue descrito por el boticario alemán Simon. Pero aunque hubo algún tímido intento de utilización en años posteriores no empezó a tomarse en serio hasta 1925 por la empresa norteamericana Naugatuck.

Esta relativamente sencilla obtención, junto a su brillo y transparencia, su fácil moldeo y su precio económico (hasta hace pocos años), hizo que el poliestireno fuese un plástico muy popular, a pesar de sus dos características negativas considerables; su gran fragilidad (derivada en parte de su rigidez) y su sensibilidad a prácticamente todos los disolventes.



**Ilustración 13. Estructura química representativa del PS (n = 650-1400)**

Una vez frío el conjunto, se obtiene un bloque esponjoso en el que es fácil distinguir su constitución globular y que denominamos poliestireno expandido, aunque vulgarmente se denomine con nombres derivados de sus marcas comerciales (Estiropor, Porexpan, etc.). Este bloque puede ser cortado en placas de aislamiento térmico o en formas adecuadas para construir decorados cinematográficos, pues su densidad puede estar alrededor de 500 kg/m<sup>3</sup>.

Introduciendo dicho producto en una máquina de inyección, la masa que sales de la inyectora es una mezcla de poliestireno fundido y un disolvente que, a esta temperatura, es prácticamente gas y que intenta escaparse. Así, de la primera masa que sale, el gas (disolvente) puede escaparse y deja una masa de poliestireno fundido más compacta; la masa que entra a continuación queda cubierta por la de antes; en consecuencia, el gas, tiene más dificultades para escaparse y cuanto más masa entra y mas va llenando el molde, mas difícil se hace la pérdida de gas. En resumen, las capas externas de la pieza prácticamente no tiene gas, y a medida que vamos hacia el centro de la pieza, cada vez hay más gas.

La consecuencia de este proceso será que una pieza moldeada es estas condiciones presentara una corteza así compacta y, a medida que nos acercamos a su centro, irán apareciendo burbujas cada vez mayores. Si se guardan unas ciertas proporciones de espesor de la pieza, puede conseguirse una sección que, cortada por la mitad, presenta una estructura en bóvedas continuas progresivas y que, indudablemente, es una de las estructuras más solidas que se conocen.



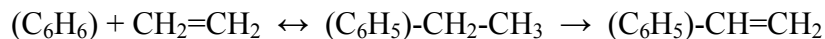
Así, aquel poliestireno tan frágil, inyectado por ese sistema, se convierte en unas piezas de buena resistencia mecánica, tales como muebles y elementos para los mismos, cajas para televisores u otros aparatos similares, con una apariencia física (peso y textura) similar a la madera.

Por otro lado se encuentra expandido, típico del poliestireno ya descrito hace poco, y que se caracteriza por su particular estructura de bolas expandidas y soldadas entre sí.

Una de las particularidades del poliestireno es su gran resonancia acústica. Esta característica ha sido muy bien aprovechada en radio y televisión haciendo las cajas de estos aparatos con PS (compacto o celular), con lo que se esfuerza potencia de sonido de altavoces más bien pequeños. Por lo mismo, PS expandido puede utilizarse como aislamiento térmico, pero no como aislamiento acústico; más bien deberíamos calificarlo de transmisor acústico.

### 3.6.3.2.- Obtención del Poliestireno

El monómero,  $\text{CH}_2=\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}$  se obtiene por reacción del benceno con el etileno, dando etilbenceno, que posteriormente se deshidrogena y purifica.



cataliz.  $\text{AlCl}_3$  95°C                      630°C cat, MgO o FeO

Es un líquido incoloro que se disuelve a su polímero, es inmisible en agua; muy reactivo.

Polimerización.

El polímero,  $\text{-(CH}_2\text{-}\underset{\text{C}_6\text{H}_5}{\text{CH}}\text{)}_n\text{-}$  se puede obtener por polimerización en bloque, suspensión, disolución o emulsión del estireno.



El poliestireno es el más antiguo de los “tres grandes” termoplásticos, es decir, polietileno, policloruro de vinilo y poliestireno.

### ***3.6.3.3.- Estructura y propiedades.***

El poliestireno es un polímero lineal, termoplástico. Tiene más segmentos sindiotáticos que atáticos, pero estos impiden la cristalización. El anillo bencénico confiere alta rigidez a la cadena, y una elevada Tg (90 – 100°C); es duro.

Tiene un parámetro de solubilidad  $\delta = 18,6 \text{ (MJ/m}^3\text{)}^{0,5}$ ; lo disuelven el benceno y el tolueno.

El anillo bencénico lo hace mas reactivo que otras poliolefinas; se puede clorar, hidrogenar, nitrar y sulfonar. Efectos adicionales de estas reacciones son la degradación de la cadena y la decoloración.

Es buen aislante eléctrico aun en condiciones húmedas.

Arde con llama muy oscura debido a la alta relación C/H que le confiere el anillo bencénico.

Transmite todas las longitudes de onda del visible y su elevado índice de refracción le comunica mucho brillo. Amarillea por envejecimiento.

El polímero es de bajo costo y se moldea con facilidad. Como es quebradizo se han desarrollado los poliestirenos modificados con caucho, los de alto impacto, y los materiales complejos ABS, AMBD Y MBS. Además está el poliestireno expandido, que sirve de material aislante y empaquetador.



### *3.6.3.3.- Agregados de peso ligero.*

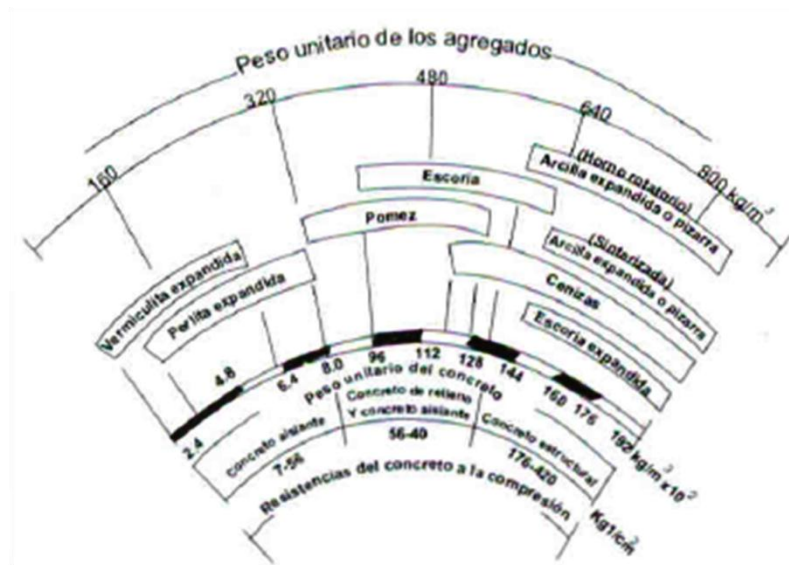
Los agregados que pesan menos de  $1,120 \text{ kg/m}^3$  se consideran generalmente de peso ligero y encuentran su aplicación en la producción de varios tipos de concreto de peso ligero. El peso ligero se debe a su microestructura celular altamente porosa.

Puede notarse que los materiales orgánicos celulares tales como los fragmentos de madera no deben usarse como agregado, debido a su poca durabilidad en un ambiente húmedo alcalino en el concreto de cemento Portland.

Los agregados naturales de peso ligero son elaborados procesando rocas ígneas volcánicas tales como la raca pómez, la escoria o la turba. Los agregados sintéticos de peso ligero pueden manufacturarse por tratamiento térmico de una variedad de materiales, por ejemplo: lutita, arcilla, pizarra, diatomita, perlita, vermiculita, escoria de alto horno y ceniza volante.

En realidad, hay todo un espectro de agregados de peso ligero que pesan de 80 a  $900 \text{ Kg/m}^3$ . Los agregados muy porosos, que son los más ligeros del espectro, son en general débiles y por lo tanto, los más adecuados para producir concretos aislantes no estructurales.

Al otro extremo del espectro se encuentra aquellos agregados de peso ligero que son relativamente menos porosos; cuando la estructura del poro consta de poros finos uniformemente distribuidos, el agregado es generalmente resistente y susceptible de utilizarse en concreto ligero estructural (Ilustración 14).



**Ilustración 14. Agregados de peso ligero (K. Metha y P. Monteiro, Concreto: estructura, propiedades y materiales)**

La ASTM tiene especificaciones por separado que cubren los agregados de peso ligero para su uso en concreto estructural (ASTM C 330), concreto aislante (ASTM C 332) Y concreto para la producción de unidades de mampostería (ASTM C 331). Estas especificaciones contienen los requisitos para el graduado, el tipo de sustancias indeseables y los pesos unitarios de los agregados, así como para el peso unitario y resistencia del concreto.

Las perlas de poliestireno se obtienen por polimerización del estireno con introducción de un agente de expansión: el pentano.

Este polímero se presenta en forma de perlas esféricas de diámetros entre 0,3 y 2 mm. El poliestireno expandido se obtiene a partir del poliestireno expandible después de las siguientes etapas de transformación: pre-expansión, maduración, reposo, expansión y moldeo. Este material se caracteriza por tener una composición química definida, alta porosidad, baja dureza y bajo peso específico (alrededor de  $10 \text{ kg/m}^3$ ).

El poliestireno se presenta comercialmente en bloques prismáticos de diferentes tamaños para aligeramiento de elementos estructurales, principalmente losas, además se producen



para otros propósitos en forma de esferas pequeñas de 1 a 2 milímetros de diámetro. Estas esferas tienen la peculiaridad de ser muy lisas superficialmente lo que afecta considerablemente la adherencia con la pasta de cemento y la escasa trabazón entre perlitas, esto sumado a la baja densidad de la perlita hacen que alguna de ellas "floten" en la mezcla de concreto, generando así un esqueleto granular defectuoso.

Debido a la estructura interna del poliestireno expandible, celdillas de aire cerradas y no conectadas entre sí, las perlitas presentan niveles de absorción muy bajos.

#### ***3.6.3.4.- Aditivo utilizado en la investigación (SIKA ELEMIX).***

El aditivo Sika Elemix tiene por objetivo producir concretos livianos de alto desempeño, que ayudan a la confección de infraestructuras complejas o de alto requerimiento estructural en base a su peso. Esta tecnología se centra en proporcionar un concreto rentable que entregue una mayor capacidad resistente al menor peso posible. Los concretos livianos estructurales presentan una razón de resistencia/peso muy superior al concreto tradicional, lo que permite la construcción de infraestructura con mayor luz, ya que la pérdida de capacidad soportante que se podría experimentar por el uso de agregados livianos es proporcionalmente menor a la disminución de densidad.

##### **3.6.3.4.1.- Composición y características**

Está conformado por innovadoras esferas poliméricas formuladas especialmente para su uso en concretos livianos. Por sus propiedades, se distribuye de modo uniforme en la matriz del concreto, siendo excelente su dispersión, consistencia y resistencia a la compresión estructural, gracias a su pequeño tamaño. Permite un concreto más durable y sustentable, ya que tiene gran resistencia a las grietas y menor peso propio, lo que posibilita mejorar la eficiencia energética y reducir costos de construcción por medio de rediseños estructurales y logísticos.





Cabe señalar que variados productos han sido utilizados en otras ocasiones en la fabricación de concretos livianos, pero con ciertos problemas (poca dispersión, flotan, se separan, las mezclas se segregan y las resistencias a la compresión son muy bajas, no-estructurales), lo que no ocurre con Elemix®, premiado como el producto más innovador en la categoría de materiales productores de concreto durante el World of Concrete 2009.

#### 3.6.3.4.2.- Beneficios

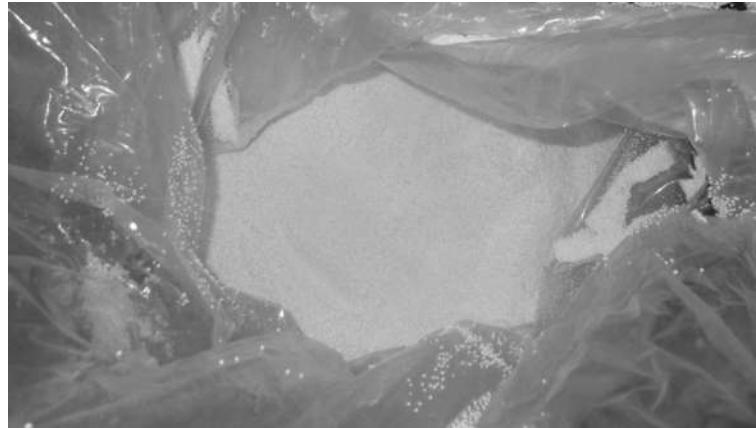
En cuanto a su peso, reduce el peso del concreto hasta un 35% con suficiente resistencia a la compresión para ser estructural; tiene el potencial de reducir los costos de logística en un 20%; puede aumentar la eficiencia del trabajador y del equipo en más de un 15%; disminuye los costos totales de la estructura para edificación entre un 2% a un 16%; y garantiza que el peso volumétrico sea consistente en todas las mezclas, aun después de ser bombeado a grandes alturas.

En materia de rendimiento, aumenta las propiedades térmicas del concreto; tiene un excelente rendimiento en ciclos de congelamiento y, por ende, produce concretos más durables; eleva la resistencia a las fisuras y reduce la amenaza de laminación al reemplazar el aire incorporado.

Elemix está disponible globalmente con una calidad consistente, reemplazando a otros productos aligerantes que no se encuentran económicamente disponibles en todas las regiones geográficas; y aporta a la sustentabilidad, ya que reduce el consumo de materiales, como aceros y concretos, logrando ahorros logísticos y menos emisiones; disminuye el impacto ambiental y los concretos producidos con él pueden ser reciclados.

Aumenta el valor-R térmico, reduciendo los costos de energía para los propietarios. A los arquitectos les ofrece flexibilidad en el diseño, resultante de la reducción de peso y de los metros cuadrados de uso adicional; a los ingenieros, una reducción del peso, con un mejor diseño (disminuye la cantidad de acero de refuerzo y costos de cimentación); y facilita y agiliza a los constructores la colocación y bombeo de hormigones aumentando la eficiencia

de equipo y de personal. Por último, a los productores de concreto les permite elaborar productos consistentes, reduciendo variabilidad y aumentando la garantía de mantener la calidad en los mismos.



**Ilustración 15. Aditivo SIKA ELEMIX utilizado en la investigación**



**Ilustración 16. Las perlas de poliestirenos fueron retenidas en la malla numero 16 (1.19 mm o 11.90 micras) con lo que nos damos una aproximación de cuanto tienen de diámetro.**



## 4.- PROGRAMA DE PRUEBAS

### 4.1.- PRUEBAS NO DESTRUCTIVAS

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

Los ensayos no-destructivos se basan en la medición de las propiedades de los materiales, y en el caso de los métodos ultrasónicos lo que se busca es establecer relaciones entre los diferentes parámetros de las constantes de propagación y la existencia de posibles defectos en un material. Las propiedades que se miden son de diferente índole y van desde la ecogenicidad (capacidad de producir ecos) para formar imágenes hasta la determinación de constantes elásticas, a veces mediante el estudio de modos de propagación complejos. Las técnicas de inspección no destructiva tienen las siguientes limitaciones (Gaete, et al, 2001):

En algunos casos se requiere una inversión inicial bastante alta, aunque se puede justificar si se analiza correctamente la relación costo-beneficio, especialmente en lo referente a tiempos muertos en las líneas productivas.

La propiedad física a controlar es medida de forma indirecta y es evaluada cualitativamente o por comparación. Esto se puede evitar si se preparan patrones de referencia que permitan una calibración correcta de los sistemas de inspección.

Una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores en el caso en el que no existan procedimientos de inspección preparados y cualificados debidamente o no se cuente con patrones de calibración adecuados.



Aunque las pruebas son fáciles de realizar, se requiere que el personal encargado de ello esté debidamente capacitado y calificado. Además deberá contar con la experiencia necesaria para interpretar y evaluar correctamente los resultados, evitando el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo.

Sin embargo, para el estudio de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, en las técnicas no destructivas se han tratado de introducir dos o más parámetros para mejorar la estimación de la resistencia del concreto, algunos incluso sugieren la predicción de la resistencia del concreto en base a datos de peso y de velocidad de pulso de los especímenes, mediante regresión múltiple y redes neuronales artificiales (Kewalramani, Gupta, 2005).

Existe una relación entre la velocidad ultrasónica en el material y la resistencia del mismo, se han realizado estudios para determinar la resistencia del concreto mediante una técnica no destructiva llamada velocidad de pulso ultrasónico (VPU), en combinación con otra técnica no destructiva llamada relación de la amplitud relativa (RAR), obteniendo que las mediciones de velocidad de pulso tienen una buena correlación con la resistencia a la compresión del concreto con humo de sílice de donde obtienen resultados que indican que para concretos con resistencias grandes la sensibilidad de las mediciones para la velocidad de pulso decrece (Hamid, et al, 2009).

De igual forma en otros trabajos se ha investigado sobre la predicción de la resistencia del concreto con base en la velocidad de pulso ultrasónico y a la calidad de los materiales, en dicha investigación el objetivo del estudio fue identificar variables adicionales a la velocidad que expliquen la varianza independiente en la resistencia (Solís, et al, 2004).

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



utilizados específicamente para realizar éstas y otras inspecciones, y esta técnica de inspección ahora se llama prueba por líquidos penetrantes (Charles, 2001).

Sin embargo con el desarrollo de los procesos de producción, la detección de discontinuidades ya no era suficiente. Era necesario también contar con información cuantitativa sobre el tamaño de la discontinuidad, para utilizarla como fuente de información, con el fin de realizar cálculos matemáticos y poder predecir así la vida mecánica de un componente. Estas necesidades, condujeron a la aparición de la Evaluación No Destructiva (NDE) como nueva disciplina. A raíz de esta revolución tecnológica se suscitarían en el campo de las técnicas no destructivas una serie de acontecimientos que establecerían su condición actual (Charles, 2001).

En el año de 1941 se funda la Sociedad Americana para Ensayos No Destructivos (ASNDT por sus siglas en inglés), la cual es la sociedad técnica más grande en el mundo de pruebas no destructivas. Esta sociedad es promotora del intercambio de información técnica sobre las técnicas no destructivas, así como de materiales educativos y programas. Es también creadora de estándares y servicios para la Calificación y Certificación de personal que realiza ensayos no destructivos, bajo el esquema estadounidense (Charles, 2001).

La entidad que reúne a todas las instituciones debidamente constituidas es el Comité Internacional de Ensayos No Destructivos (ICNDT, por sus siglas en inglés) con sede en Viena.

La globalización en los mercados mundiales ha marcado el desarrollo de los ensayos no destructivos, los cuales tienen ya un alcance en cada rincón del planeta, y actualmente existen sociedades de ensayos no destructivos en la mayoría de los países como por ejemplo, La Sociedad Argentina de Ensayos No Destructivos (AAENDE), El Instituto Australiano para Ensayos No Destructivos (AINDT), La Sociedad Austriaca de Ensayos No Destructivos (OGFZP), La Asociación Belga de Ensayos No Destructivos (BANT), La Sociedad Brasileña de Ensayos No Destructivos (ABENDE), La Sociedad Canadiense de Ensayos No destructivos (CSNDT), La Sociedad China para Ensayos No Destructivos (ChSNDT), El Instituto Mexicano de Ensayos No Destructivos A.C. (IMENDE A.C.) (Charles, 2001).



#### 4.1.2.- Prueba de velocidad de pulso ultrasónico

En muchos países y por muchos años, se han realizado estudios de correlación con la intención de obtener modelos que permitan predecir la resistencia a la compresión uniaxial del concreto con base en la velocidad ultrasónica (Sturup, et al, 1984; Anderson and Seals, 1981; Hisham, 2000; Qindan et al, 2011). Como resultado de esto, se han obtenido múltiples modelos diferentes, debido principalmente al carácter compuesto del material y a la falta de controles rígidos en los procesos constructivos.

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

Los tecnólogos del concreto se han interesado en determinar las propiedades del concreto mediante pruebas no destructivas por décadas. A principios de 1930 algunos métodos de prueba se propusieron para probar especímenes de laboratorio usando métodos de vibración. Los investigadores Powers, Obert, Hornibrook y Thompson fueron los primeros en llevar a cabo una amplia investigación usando técnicas de vibración tales como el método de frecuencia de resonancia (Powers, 1938; Obert, 1939; Hornibrook, 1939; Thomson, 1940).

La segunda guerra mundial aceleró las investigaciones con respecto a las pruebas no destructivas usando métodos de propagación de onda de estrés. El desarrollo del método de velocidad de pulso comenzó en Canadá e Inglaterra alrededor del mismo tiempo. En Canadá los investigadores Leslie y Cheesman desarrollaron un instrumento llamado

soniscope (Leslie and Cheesman, 1949). En Inglaterra, otro investigador desarrolló un instrumento llamado probador ultrasónico (Jones, 1948). En un principio, ambos, el soniscope y el probador ultrasónico, fueron bastante similares, con pequeñas diferencias en detalle. Desde 1960, los métodos de velocidad de pulso han sido llevados fuera de los laboratorios, a las construcciones u obras civiles (Whitehurst, 1966). El investigador Malhotra cuenta con una lista extensa de artículos publicados sobre este tema (Malhotra, 1976). Algunas naciones han adoptado procedimientos estandarizados para medir la velocidad de pulso en el concreto.

#### 4.1.2.1.- Teoría de propagación de onda

Cuando un medio sólido es alterado por una carga dinámica o vibratoria, se producen tres tipos de propagación de ondas mecánicas, Ilustración 17, (también llamadas ondas de esfuerzo): 1) ondas de compresión (también llamadas longitudinales u ondas P), 2) ondas cortantes (también llamadas transversales u ondas S), y ondas superficiales (también llamadas ondas Rayleigh). Las ondas de compresión se propagan a través del medio sólido de manera análoga a las ondas sonoras que se propagan a través del aire. Cada tipo de onda se propaga con una velocidad característica. Para un sólido dado, las ondas de compresión tienen la mayor velocidad mientras que las ondas de superficie tienen la menor. En el concreto, las velocidades de las ondas de cortante y de superficie son típicamente 60 y 55%, respectivamente, de la velocidad de las ondas de compresión (ACI Committee 228, 1998). La velocidad particular de una onda depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio. Para un medio sólido homogéneo elástico la velocidad de la onda de compresión está dada por la siguiente expresión:

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

Dónde:

$V$  = Velocidad de la onda de compresión

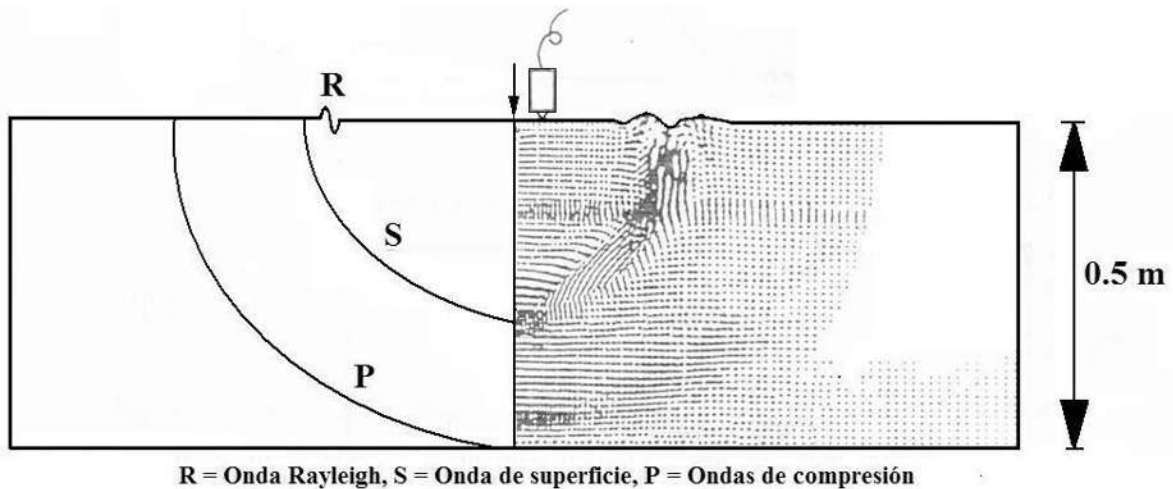
$K = (1 - \mu)/((1 + \mu)(1 - 2\mu))$



$E$  = Módulo de elasticidad dinámico

$\rho$  = Densidad

$\mu$  = Relación dinámica de Poisson



**Ilustración 17. Tipos de propagación de onda de mecánicas (Malhotra and Carino, 2004)**

El valor de  $K$  varía en un rango muy estrecho. Por ejemplo, cuando  $\mu$  incrementa de 0.15 a 0.25 (67% de incremento) el valor asociado de  $K$  aumenta de 1.06 a 1.20 (12% de incremento). Por lo tanto variaciones en  $E$  y en  $\rho$  tienen un efecto más significativo sobre  $V$  que las variaciones en  $\mu$ . Para el concreto, los rangos típicos de  $V$  van de 3000 a 5000 m/s.

La frecuencia  $f$  y la longitud de onda  $\lambda$  del movimiento de propagación de onda están relacionados por la velocidad de propagación:  $V = f\lambda$ . La frecuencia es reportada en unidades de hertz (o ciclos por segundo) y la longitud de onda en unidades de distancia (por ejemplo mm). En un medio dado, un incremento en la frecuencia de onda dicta un decremento en la longitud de onda, y viceversa. Cuando un pulso de propagación de onda incide en una interfase con un medio que tiene distintas propiedades de material, una porción de la energía de onda se dispersa fuera de la trayectoria de la onda original. Por ejemplo, vacíos, grietas y partículas de agregados en el concreto actúan dispersando parte



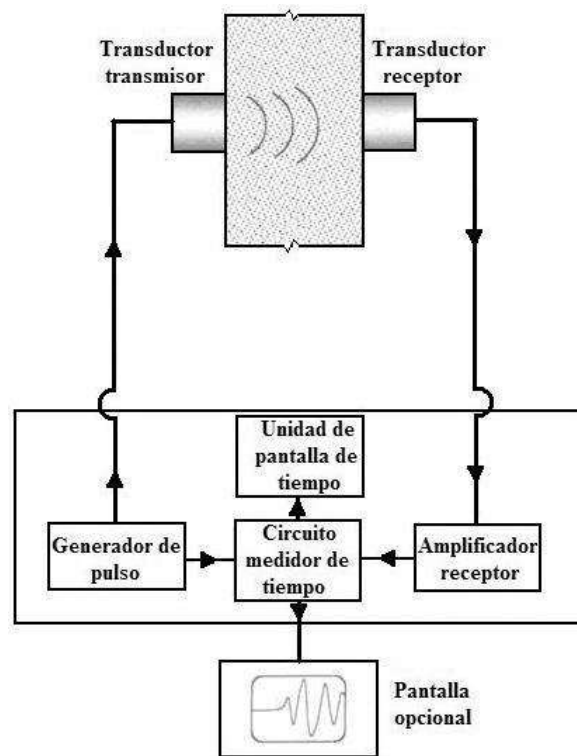
de la energía inicial del pulso de la onda de compresión fuera de la trayectoria de onda original. La magnitud de la dispersión es especialmente intensa si la longitud de onda de propagación es del mismo tamaño o menor que el tamaño del dispersor, resultando en una atenuación de onda rápida (Jones, 1962). Para el concreto, el límite superior de frecuencias que se usan es de alrededor de 500khz el cual es asociado a una longitud de onda de aproximadamente 10mm, lo cual está en un rango de tamaño de las partículas secundarias de agregado. Como resultado, la longitud del camino puede ser efectivamente recorrida en este límite superior de frecuencia antes de que el pulso de onda se disperse completamente en tan sólo unos centímetros. Se pueden recorrer mayores longitudes de camino usando menores frecuencias (por lo tanto mayores longitudes de onda): una frecuencia de 20khz puede generalmente recorrer hasta 10m de concreto (Jones, 1962).

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

#### ***4.1.2.2.- Instrumento de prueba de velocidad de pulso.***

El instrumento de prueba consiste de un medio para producir un pulso de onda en el concreto (generador y transmisor de pulso) y un medio de sensibilidad de llegada de pulso (receptor) y medir con precisión el tiempo tomado por el pulso que viaja a través del concreto. El equipo puede ser conectado a un osciloscopio o a otro dispositivo de pantalla, para observar la naturaleza del pulso recibido. En la Ilustración 18 se muestra un diagrama esquemático. Se tiene una descripción del método en la norma ASTM C597, (2003). Se tienen equipos portátiles de prueba de velocidad de pulso ultrasónico, los cuales son simples de operar, además pueden incluir baterías recargables o una unidad de carga. Típicamente, los tiempos de pulso son de hasta 6500 $\mu$ s y pueden ser medidos con una

resolución de  $0.1\mu s$ . La medición del tiempo de viaje es promediada. El instrumento cuenta con 2 transductores, uno para recibir y uno para transmitir el pulso ultrasónico. Estos transductores tienen frecuencias de 25 a 100kHz y son los usados para realizar pruebas en el concreto. Se tienen también transductores con diferentes frecuencias de resonancia para aplicaciones especiales: transductores de alta frecuencia (arriba de 100kHz) son usados para muestras pequeñas, trayectorias relativamente cortas, o concreto de alta resistencia, mientras que los transductores de bajas frecuencias (por debajo de 25kHz) son usados para especímenes grandes y trayectorias relativamente grandes, concreto con tamaño de agregado grande. Estos transductores principalmente generan ondas de compresión en una frecuencia predominante, con la mayor parte de la energía de onda dirigida a lo largo del eje normal a la cara del transductor.



**Ilustración 18. Diagrama esquemático del circuito de prueba de velocidad de pulso  
(Malhotra and Carino, 2004).**



#### 4.1.2.3.- El método de velocidad de pulso.

La velocidad de pulso ultrasónico es una alternativa de prueba no destructiva para evaluar la calidad del concreto, la cual se ha utilizado desde hace aproximadamente 50 años. La técnica fue desarrollada por Leslie y Cheesman en Canadá y se utilizó con gran éxito desde la década de los sesentas para diagnosticar el estado del concreto utilizado en cortinas de presas; casi simultáneamente Jones desarrolló en Inglaterra una técnica basada en el mismo principio (Malhotra and Carino, 2004).

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. 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 (Rose, 1999).

La idea básica del método de velocidad de pulso es establecer que la velocidad de un pulso de onda de compresión a través de un medio depende de las propiedades elásticas y de la densidad del medio, como se mostró en la ecuación 1.

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

$$V = \frac{L}{\Delta t} \quad (2)$$

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



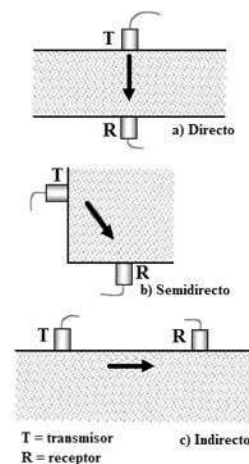
Para transmitir o recibir el pulso, los transductores deben estar en completo contacto con el objeto de prueba; de otro modo el aire entre el objeto de prueba y el transductor puede introducir un error en el tiempo de tránsito indicado. Este error es introducido por que sólo una insignificante cantidad de energía de onda puede ser transmitida a través del aire. Se pueden usar muchos acopladores del mercado para eliminar el aire y asegurar un buen contacto entre la muestra y los transductores. Jalea a base de petróleo nos da uno de los mejores acoplamientos. Tenemos también, otros acopladores como grasas, jabón, pasta de caolín-glicerol. Las capas del acoplador deben de ser tan delgadas como sea posible. Aplicando una presión constante en los transductores, se podrán tomar lecturas repetidas en una ubicación hasta obtener un mínimo valor de tiempo de tránsito. Si la superficie del concreto está muy rugosa, se debe usar grasa espesa como acoplador. En algunos casos, que se tenga que suavizar la superficie rugosa o establecer una superficie lisa se puede hacer con el uso de yeso de París, o con una pasta de cemento de fraguado rápido o con un mortero epóxico de fraguado rápido. La nivelación de la pasta debe realizarse antes de la prueba de velocidad de pulso. En superficies muy rugosas, también puede emplearse un receptor exponencial con un diámetro de punta de sólo 6mm, como por ejemplo, superficies de mortero dañadas por fuego o por la acción de la intemperie. Sin embargo, hay que destacar que esta prueba es buena sólo para recibir la señal. Se requiere una superficie lisa para el transductor transmisor (Malhotra and Carino, 2004).

La velocidad de pulso para un concreto ordinario es típicamente de 3700 a 4200m/s. Por tanto, para un trayecto de 300mm el tiempo de viaje es aproximadamente de 70 a 85 $\mu$ s. Es obvio que el instrumento debe ser muy exacto para mediciones con pequeños tiempos de tránsito. La trayectoria debe ser medida también con cuidado. Debido a que el método de velocidad de pulso es una técnica de propagación de onda, debe ser eliminada cualquier fuente (como por ejemplo martillos neumáticos) del menor movimiento de onda durante la prueba.

Existen tres configuraciones en las cuales se pueden arreglar o acomodar los transductores, como se muestra en las figuras 18a, 18b y 18c. Tenemos entonces, 1) transmisión directa; 2) transmisión semidirecta; y 3) transmisión indirecta o método de superficie. El método de transmisión directa, figura 18a, es el más deseable y el arreglo más satisfactorio, debido a

que con este arreglo, se transmite y recibe el máximo de la energía del pulso. El método de transmisión semidirecta, figura 18b, puede ser usado satisfactoriamente también. Sin embargo, se debe tener cuidado de que los transductores no estén muy alejados; de otro modo la transmisión del pulso podría disminuir y por tanto la señal podría no detectarse. Este método es usado donde se tienen concentraciones de refuerzos. El método de transmisión indirecta o método de superficie, figura 18c, es el menos satisfactorio por que la amplitud de la señal que se recibe es significativamente menor que la señal que se recibe por el método de transmisión directa. Este método es más propenso a errores y se requiere un procedimiento especial para determinar la velocidad de pulso (Qixian and Bungey, 1996).

El procedimiento para el método indirecto consiste en: Primero, la localización del transductor transmisor se fija y la localización del receptor se cambia en incrementos fijos a lo largo de una línea, y se toma una serie de lecturas de tiempo. La distancia directa entre los dos transductores se traza en el eje de las “x” y el correspondiente tiempo de tránsito del pulso se traza en el eje “y” como se muestra en la Ilustración 19. La inversa de la pendiente de este gráfico es la velocidad de pulso a lo largo de la línea.



**Ilustración 19. Configuraciones para medición de velocidad de pulso, a) Método directo, b) Método semidirecto, c) Método indirecto o de superficie (Malhotra and Carino, 2004).**



Cuando se usa este método de superficie, el pulso se propaga en la capa de concreto cercana a la superficie. La proximidad de la superficie del concreto en ocasiones está compuesta ligeramente diferente al concreto en las capas inferiores. Por ejemplo, el concreto cercano a la superficie de una losa tiene mayores cantidades de material fino que el concreto de las porciones interiores de la losa. Entonces, las mediciones de velocidades por el método de superficie son típicamente menores que las transmisiones tomadas con el método de transmisión directa. Este comportamiento, sin embargo, puede convertirse en un medio para detectar y estimar el espesor de una capa de calidad diferente del material. Una capa de concreto de menor calidad puede darse debido a prácticas inapropiadas de construcción (como por ejemplo una vibración y terminado pobre, un curado pobre, juntas frías debido a retrasos en la construcción, una colocación incorrecta), daños debidos a la acción del desgaste (por ejemplo congelación y deshielo, ataque de sulfatos, y corrosión del acero de refuerzo) y el daño por el fuego. Los espesores de las capas pueden ser determinados mediante el procedimiento indirecto o de superficie. Cuando los dos transductores están cercanos, el camino más rápido es viajar por la capa superior del concreto, y como los transductores se apartan más, el camino de viaje más rápido es la ruta combinada a través de ambas capas. La velocidad de pulso a través de la capa superior ( $V_1$ ) y la de la capa inferior ( $V_2$ ) será indicada en la gráfica por las diferentes pendientes de las dos líneas rectas ajustadas a los datos, figura 20.

La distancia  $X$  en la Ilustración 20 muestra cuando se da el cambio de pendiente es medida y el espesor de la capa superior,  $t$ , es estimado a partir de la siguiente ecuación:

$$t = \frac{X}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \quad (3)$$

Este método es solamente adecuado cuando la capa superior, (la capa de baja calidad) es distinta, es razonablemente del mismo espesor, y  $V_2 > V_1$ .



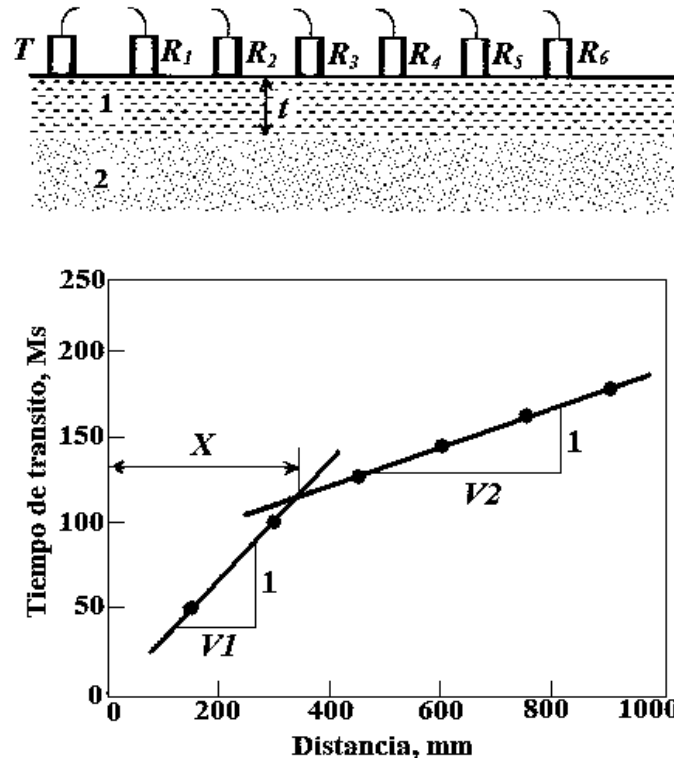
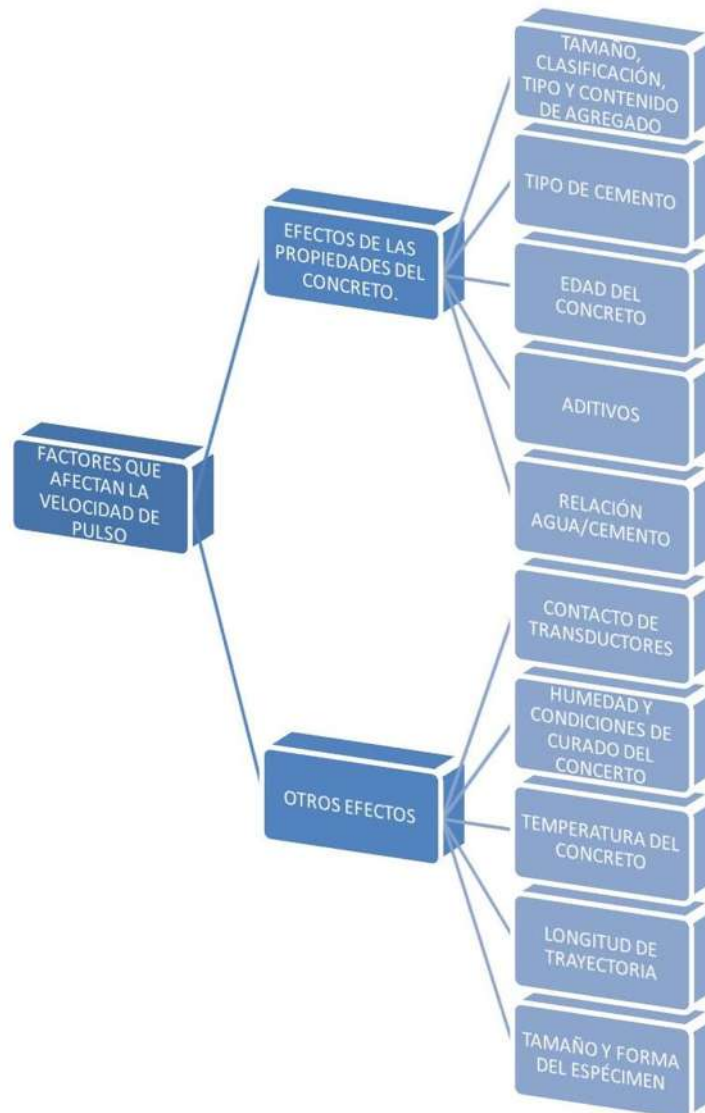


Ilustración 20. Empleo del método de superficie para determinar la profundidad de deterioro (Malhotra and Carino, 2004).

#### 4.1.2.4.- Factores que afectan la velocidad de pulso

Aún que es relativamente fácil realizar la prueba de velocidad de pulso, es importante que la prueba a ser realizada sea tal que las lecturas de velocidad de pulso sean reproducibles y que estas sean afectadas solamente por las propiedades del concreto que se está probando y no por otros factores. Los factores que afectan la velocidad de pulso pueden ser divididos en dos categorías: 1) Factores que resultan directamente de las propiedades del concreto; y 2) otros factores.



**Ilustración 21. Factores que afectan la velocidad de pulso.**



### 4.1.3.- Prueba de resistividad eléctrica

Los primeros intentos de utilización de los métodos eléctricos datan desde Robert W. Fox en 1830, quien observó corrientes eléctricas fluyendo en las minas de cobre en Cornish, resultado de las reacciones químicas dentro de las vetas de los depósitos (Ward, 1980).

A principio de 1882, Carl Barus condujo experimentos en Comstock Lode, Nevada, que lo convencieron de que este método podía ser usado para la búsqueda de sulfato de oro oculto (Ward, 1980).

Fred H. Brown en la era de 1883 a 1891, Alfred Williams y Leo Daft en 1897, hicieron el primer intento en determinar la diferencia en la resistividad de la Tierra asociada con los depósitos de oro, le fueron otorgadas patentes por esos métodos. La primera aproximación práctica de los métodos eléctricos, donde la tierra es estimulada por una fuente controlada y son medidos los potenciales artificiales que resultan fue hecha por Schlumberger en 1912. En esa época él introdujo los métodos de líneas equipotenciales de corriente directa (Ward, 1980).

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915, por dos personas principalmente, Wenner en 1912 del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en 1920. Las técnicas de campo fueron desarrolladas por O. H. Gish y W. J. Rooney del Carnegie Institution of Washington y por Marcel Schlumberger, E. G. Leonardon, E. P. Poldini y H.g. Doll del grupo Schlumberger. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aún lleva su nombre), mientras que el grupo Schlumberger estandarizó una configuración en que los electrodos de potencial están muy pegados, y la medida de campo eléctrico es hecha en la mitad de la distancia de los electrodos de corriente (llamado arreglo Schlumberger).



#### 4.1.3.1.- Ley de ohm

La conductividad eléctrica es la facilidad con que puede moverse la carga eléctrica. La habilidad de diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia. Ya que un electrón es una cantidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada Culombio (Q). Un culombio corresponde a 6.24 trillones de electrones ( $6.24 \times 10^{18}$ ). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (densidad (I)). El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones y por iones, el flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones (corriente eléctrica).

$$A = \frac{Q}{s} \quad (4)$$

Dónde:

A = Amperio, 1 Amperio = 1 Culombio/segundo

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (J), cuando 1 Q de electricidad se mueve de un punto al otro (Ávila, 2003). A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama voltio (V) y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 voltio cuando se realiza un trabajo de 1 J por cada culombio de electricidad que transita de un punto al otro, por tanto:

$$V = J/C \quad (5)$$

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en voltios y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda. Esta fem representa el trabajo total efectuado en julios por los culombios de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada. La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es



proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos (Ávila, 2003). El conductor que siga esta relación obedece la ley de Ohm expresada como:

$$V = RI \quad (6)$$

Dónde R es la resistencia o habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor tiene baja resistencia y un mal conductor tiene alta resistencia. Un ohmio se define como la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio en sus extremos y una corriente de 1 A fluye por él.

$$\Omega = V / A \quad (7)$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero por ejemplo en el carbón la resistencia baja con esta. La resistencia al flujo de corriente es mínima cuando:

- 1.El medio presenta baja resistividad (alta conductividad)
- 2.Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
- 3.Se tiene un área transversal grande para el flujo de corriente

En cambio la resistencia al flujo de corriente es máxima cuando:

- 1.El medio presenta alta resistividad (baja conductividad)
- 2.Las distancias son grandes para el flujo de corriente
- 3.El área transversal es pequeña para el flujo de corriente

#### **4.1.3.2.- Resistividad eléctrica**

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



efectuarse en el laboratorio sobre testigos de concreto extraídos de la estructura o directamente sobre la estructura en campo (Torres Acosta, et al, 2010).

#### 4.1.4.- Densidad

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

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

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

La densidad del mortero dependerá fundamentalmente de la que tengan sus componentes: arenas, adiciones, etc. También es determinante la granulometría y volumen que éstos ocupen en su dosificación. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento del mortero. A medida que aumenta dicha relación más poroso es el mortero.

Se considera que un mortero es ligero, cuando su densidad es igual o menor que  $1.300 \text{ kg/m}^3$ .

Para la hidratación del cemento en el mortero sería suficiente incorporarle una pequeña cantidad de agua, sin embargo, de esta forma se obtendrían consistencias demasiado secas y no trabajables. Por ello es necesaria mayor cantidad de agua de amasado que la estrictamente necesaria para el fraguado.



Esto explica que, durante el fraguado y endurecimiento del mortero, se produzca una pérdida del agua sobrante, que no se combina con las partículas de cemento para la formación y endurecimiento de cristales.

De lo anteriormente comentado se deduce que, al utilizar de forma proporcional idénticas materias primas e incorporar aproximadamente la misma cantidad de agua de amasado, se observan, en general, mayores pérdidas de agua e inferiores densidades en aquellos morteros con más bajo contenido en cemento.

Es lógico pensar que a menor número de partículas de cemento a hidratar mayor pérdida de agua. La pérdida de agua resulta, por lo comentado, un indicador de variaciones accidentales en el contenido de cemento en el mortero.

#### **4.1.5.- Gravedad específica**

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

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

#### **4.1.6.- Absorción de agua**

La absorción depende de la estructura capilar del material, por tanto, cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará.





La incorporación de aditivos hidrofugantes, plastificantes y aireantes también contribuye notablemente a disminuir la absorción capilar en los morteros que los incorporan.

## 4.2.- PRUEBAS DESTRUCTIVAS

### 4.2.1.- Adherencia

La adherencia se basa en la resistencia a tracción de la unión entre un mortero y un soporte definido.

Esta propiedad se determina por un ensayo de arrancamiento directo perpendicular a la superficie del mortero.

Lógicamente, la adherencia depende de tres aspectos fundamentales:

- El mortero.
- El soporte y su preparación.
- La forma de aplicación.

Constituye una propiedad fundamental pues determina la unión solidaria entre las piezas o partes unidas influyendo en la resistencia del conjunto de, por ejemplo, una fábrica. Así mismo, una baja adherencia puede causar desprendimientos de las piezas de revestimientos interiores o exteriores fijadas por el mortero. En el caso de revocos los desprendimientos del mortero ocasionan la desprotección de la fachada.

Existen dos tipos adherencia: química, basada en los enlaces, y física, fundamentada en el anclaje mecánico entre las piezas (adhesión).

La adherencia de tipo físico-mecánico está fundamentada en la trabazón entre sólidos. El mortero se aplica en estado plástico sobre la superficie del soporte. Ésta debe ofrecer



suficientes posibilidades de anclaje -porosidad-, para que el cemento disperso y disuelto del mortero penetre en los poros del soporte. Después, al irse formando las agujas de cemento hidratado e ir completándose el proceso de fraguado, se crean nuevos puntos de anclaje entre el mortero y la pieza sobre la que se une.

Por tanto, al aplicar un mortero sobre un soporte, para la formación de un revestimiento es imprescindible que el mortero ancle en la superficie que lo recibe. No son efectivas resistencias elevadas en el mortero si no se produce este efecto.

Los soportes muy absorbentes sustraen el agua del mortero y no permiten la hidratación del cemento en la superficie que los une. Por el contrario, los soportes totalmente impermeables impiden la formación del suficiente agarre entre ambos materiales.

La adherencia química se fundamenta en la formación de enlaces químicos localizados en la superficie de contacto entre el mortero y el soporte. Este tipo de adherencia en los morteros cola está causada por el empleo de aditivos de resinas poliméricas. En estos casos resulta en combinación con la adherencia mecánica o adhesión.

#### **4.2.2.- Determinación de la resistencia a la compresión simple**

La compresión se puede definir como el índice de resistencia a compresión a la ruptura del mortero, compresión medida en un espécimen de mortero (de 4×4×4 cms), generalmente se expresa (en kg/cm<sup>2</sup>).

Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cubos moldeados a una velocidad que está dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de la muestra se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante la prueba entre el área transversal de la muestra.

Se debe tener cuidado en la interpretación de la importancia de las determinaciones de resistencia a la compresión por este método de prueba ya que el esfuerzo no es una



propiedad fundamental o intrínseca de mortero a partir de determinados materiales. Los valores obtenidos dependerán de la forma y tamaño de la muestra, de la dosificación, de procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo y la fabricación, de la edad, la temperatura y las condiciones de humedad durante el curado.

La carga debe ser aplicada de forma continua y sin impacto. Se debe aplicar la carga hasta que el espécimen falle, y registrar la carga máxima soportada por el espécimen durante la prueba. Tenga en cuenta el tipo de falla y la apariencia del mortero.

#### **4.2.3.- Determinación de la resistencia a la flexión**

Este método de prueba determina la resistencia a la flexión del mortero con el uso de un prisma con carga en dos puntos tercios de la longitud.

El método de carga en dos puntos tercios se utiliza en la realización de pruebas de flexión del mortero empleando unos rodillos (varillas de acero) de apoyo para asegurar que las fuerzas aplicadas al prisma sean perpendiculares a la cara de la muestra y sean aplicadas sin excentricidad.

Centrado. Si se usan muestras moldeadas, es necesario girar la muestra de ensayo con respecto a su posición como se moldeó y se centrará en los rodillos de soporte. Después hay que centrar el sistema de carga en relación con la fuerza aplicada.

Velocidad de carga. Cargue la muestra en forma constante y sin impacto. La carga se aplicará a un ritmo constante hasta el punto de ruptura.

Medidas. Al determinar las dimensiones de la sección transversal de la muestra para su uso en el cálculo de módulo de ruptura, se toman medidas a través de una de las caras fracturadas después de la prueba. Para cada dimensión, se toma una medición en cada lado y una en el centro de la sección transversal. Se utilizan las tres mediciones en cada dirección para determinar el ancho promedio y la profundidad o espesor promedio.



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

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

Dónde:

R = Módulo de ruptura, kg/cm<sup>2</sup>

P = Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, kg

L = Longitud de la muestra, cm

b = Ancho promedio de la muestra, cm

d = Espesor promedio de la muestra, cm

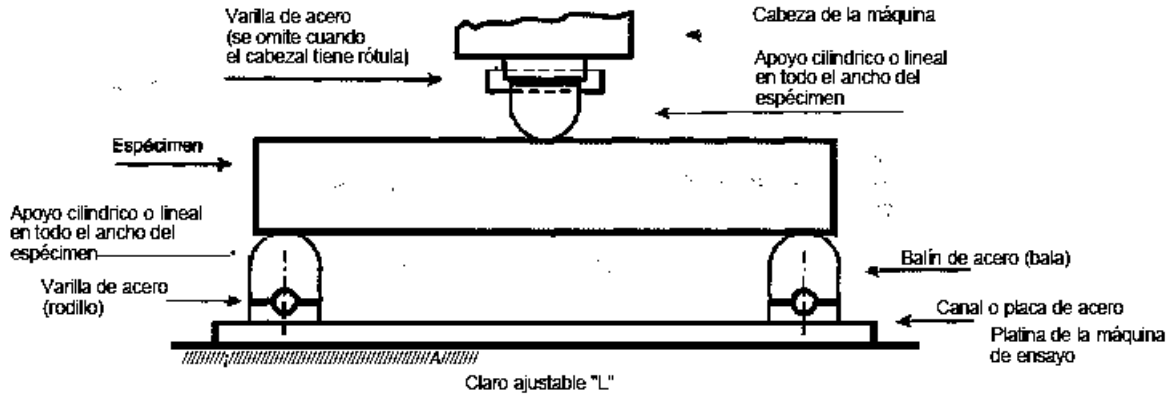
Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en no más que 5% de la longitud del tramo, el Módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Dónde:

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

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



La presente figura es ilustrativa

**Ilustración 22. Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.**

#### 4.2.4.- Ataque por sulfatos

##### 4.2.4.1.- Durabilidad

La durabilidad del concreto se puede definir como la habilidad del concreto en resistir a la acción del medio ambiente, al ataque químico y a la abrasión, manteniendo sus propiedades de ingeniería. Los diferentes tipos de concretos necesitan de diferentes durabilidades, dependiendo de la exposición del medio ambiente y de las propiedades deseables. Los componentes del concreto, la proporción de estos, la interacción entre los mismos y los métodos de colocación y curado determinan la durabilidad final y la vida útil del concreto.

##### 4.2.4.2.- Sulfatos y cristalización de sales

Muchos sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (por ejemplo sulfato de calcio, sulfato de sodio y sulfato de magnesio) pueden atacar el concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en desintegración del



concreto (perdida de cohesión de la pasta y la resistencia). El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado, formando etringita o yeso. El sulfato de magnesio ataca, de manera similar, al sulfato de sodio y forma etringita, yeso y también brucita (hidróxido de magnesio). La brucita se forma primeramente en la superficie del concreto, consume el hidróxido de calcio, baja el pH en la solución de los poros y entonces descompone el silicato de calcio hidratado (Santhanam y otros 2001).

La taumasita se puede formar durante el ataque de sulfato en condiciones de humedad con temperatura entre 0°C y 10°C (32°F Y 50°F) y ocurre como resultado de la reacción entre silicato de calcio y agua (Report of the Thaumassite Expert Group 1999). En los concretos, donde el deterioro está asociado al exceso de taumasita y un halo de taumasita blanca puede encontrarse alrededor de los agregados. En la superficie entre el concreto y el suelo, la superficie del concreto puede ser “mole” con tal sustitución de la pasta de cemento por taumasita (Hobbs 2001).

Como las rocas naturales, tales como las piedras calizas, el concreto poroso está susceptible al ataque de las intemperies causado por la cristalización de sales. Estas sales pueden o no contener sulfatos y pueden o no reaccionar con los compuestos hidratados en el concreto. Algunas sales conocidas por causar deterioro en concreto con el carbonato de calcio y el sulfato de sodio. El mayor daño ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables expuestos a condiciones de secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por acción de los capilares y, posteriormente, como resultado de la evaporación de la superficie, la fase de la solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, algunas veces generando presiones suficientes para causar la fisuración. Si la tasa de migración de la solución a través de los poros es menor que la tasa de evaporación se forma una zona de secado debajo de la superficie ocurriendo cristalización en los poros causando expansión o descascaramiento (Mehta 2000). Ambas las partículas de agregado y la pasta de cemento pueden ser atacadas por sales.

El ataque de sulfatos y la cristalización de sales son más severos donde el concreto está expuesto a ciclos de mojado y secado, que donde el concreto está constantemente mojado. Esto normalmente puede ser visto en postes de concreto donde el concreto se ha deteriorado solo pocos centímetros encima y abajo del nivel del suelo, la porción del concreto en la parte más profunda del suelo (donde está continuamente mojado) está en buenas condiciones (Ilustraciones 23 y 24). Sin embargo, si la exposición al sulfato es muy severa, las secciones continuamente mojadas pueden incluso, con el tiempo, ser atacadas por los sulfatos si el concreto no ha sido adecuadamente diseñado.



**Ilustración 23. El ataque de sulfatos es frecuentemente más severo en la región sometida a mojado y secado, la cual es, normalmente, cerca del nivel del suelo. Aquí los postes han sido atacados por sulfatos cerca del nivel del suelo.**



**Ilustración 24. Vigas de concreto después de muchos años de exposición a un suelo con alta concentración de sulfatos en Sacramento, California, terreno de ensayo. Las vigas en mejores condiciones tienen bajas relaciones agua-materiales cementantes y muchas de ellas tienen cemento resistente a los sulfatos. La foto menor, a la derecha en la**





**parte superior, enseña dos vigas inclinadas sobre sus laterales para mostrar niveles decrecientes de deterioro con la profundidad y el nivel de humedad.**

Para que se obtenga la mejor protección contra el ataque externo por los sulfatos, (1) diseñar el concreto con baja relación aguamateriales cementantes (aproximadamente 0.4) y (2) use cementos especialmente formulados para ambientes con sulfatos, tales como ASTM C 150 (AASHTO M 85) cementos tipo II y tipo V, C595 (AASHTO M 240) cementos con moderada resistencia a los sulfatos o C 1157 tipos MS O HS.

#### ***4.2.4.3.- Etringita y expansión retardadas por calor incluido***

La etringita una forma sulfoaluminato de calcio, se encuentra en cualquier parte de cemento. Las fuentes de sulfato de calcio, tal como yeso, se adicionan al cemento portland durante la molienda final en el molino de cemento para prevenir el fraguado rápido y para mejorar el desarrollo de resistencia. El sulfato presente, también, en los materiales cementantes suplementarios y en los aditivos. El yeso y otros compuestos de sulfatos reaccionan con el aluminato de calcio en el cemento y forman etringita durante un periodo de pocas horas después del mezclado con el agua. La mayoría de los sulfato en el cemento normalmente se consume para formar etringita o monosulfoaluminato en un periodo de 24 hrs (Klemm y Miller 1997). En esta etapa, la etringita se dispersa uniforme y discretamente por la pasta de cemento en un nivel submicroscópico. Esta etringita se llama frecuentemente etringita primaria.

Si el concreto se expone a la humedad por un periodo largo de tiempo (muchos años), la etringita puede disolverse lentamente y volver a formarse en áreas menos limitadas. En el examen de microscopio, se pueden observar los cristales de itringita blancos y en forma de agua formando los vacios de aire. Esta etringita que ha vuelto a formarse se llama normalmente intringita secundaria. (Ilustración 25)

El deterioro del concreto acelera la velocidad en la cual la etringita deja su posición original en la pasta para entrar en la solución y recrystalizarse en espacios grandes, tales como los

vacíos de aire o los agrietamientos. Hay que tener suficiente agua y espacio para la formación de los cristales. Los agrietamientos pueden formarse debido al daño causado por la acción del congelamiento, reactividad álcali-agregado, contracción (retracción) por secado, efectos térmicos, deformaciones resultante de esfuerzos excesivos u otros mecanismos.



**Ilustración 25. Depósitos blancos de etringita secundaria en un vacío. Ancho del campo 64  $\mu\text{m}$ .**

Los cristales de etringita en los vacíos de aire y en las fisuras son típicamente de dos hasta cuatro micrómetros en sección transversal y de veinte hasta treinta micrómetros de largo. Bajo condiciones de deterioro extremo o décadas de ambiente húmedo, los cristales de etringita blanca pueden rellenar completamente vacíos y las fisuras. Sin embargo, la etringita secundaria, como cristales grandes en forma de agujas, no se debe considerar peligrosa para el concreto (Detwiler y Power Couche 1997).

#### ***4.2.4.4.- Expansión retardada por calor inducido***

La expansión retardada por calor inducido (ERCI), también llamada de formación retardada de etringita (FRE), se refiere a una condición rara de ataque de sulfatos internos a través de la cual el concreto maduro se expande y se fisura. Solo los concretos con composiciones químicas particulares son afectados cuando alcanzan temperaturas altas, después de algunas horas de su colocación (entre 70 °C y 100°C [158°F y 212°F], dependiendo de los componentes del concreto y del tiempo transcurrido desde su colocación

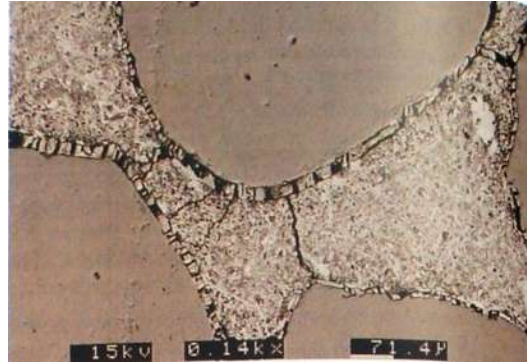


hasta que la temperatura se alcance). Esto puede ocurrir pues altas descomponen cualquier etringita que inicialmente se forme y retienen fuertemente el sulfato y el alumina en el gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H) de la pasta de cemento. Se impide, entonces, la formación normal de etringita.

En presencia de humedad, el sulfato se libera del confinamiento del C-H-S y reacciona con el monosulfoaluminato de calcio, formando etringita en el concreto frío y endurecido. Después de meses o años de liberación, la etringita se forma en lugares confinados a lo largo de la pasta. Tal etringita puede ejercer presión de cristalización pues se forma en un espacio limitado bajo supersaturación. Una teoría: como el concreto es rígido y si no hay suficientes vacíos para acomodar la etringita, puede ocurrir aumento de volumen, expansión y agrietamiento. Además, parte de la etringita inicial (primaria) puede convertirse en monosulfoaluminato bajo altas temperaturas y bajo enfriamiento revertirse nuevamente en etringita. Como la etringita ocupa más espacio que el monosulfoaluminato del cual se forma, esta transformación es una reacción expansiva. El mecanismo que causa la expansión a un no es totalmente entendido y la real influencia de la formación de etringita en la expansión todavía está siendo investigada. Algunas investigaciones indican que hay poca relación entre la formación de la etringita y la expansión.

En la expansión retardada por calor inducido, se observa una separación se caracteriza por el desarrollo de bordes de etringita alrededor de los agregados (Ilustración 26). En las etapas iniciales de la expansión retardada por calor inducido, los vacíos entre pasta y agregado no están llenos (no hay etringita presente). Se debe observar que el concreto sostiene una pequeña cantidad de expansión sin daño. Solo en casos extremos resultan en fisuración y normalmente la expansión retardada por el calor inducido está asociada con otros mecanismos de deterioro, especialmente reactividad álcali-sílice.

Solo los concretos en elementos masivos que retienen el calor de hidratación elementos expuestos a muy altas temperaturas en edades tempranas corren el riesgo de FRE y de ellos solo pocos tienen una composición química o un perfil de temperatura para causar expansión perjudicial.



**Ilustración 26.** La expansión retardada inducida por calor se caracteriza por la expansión de la pasta que se suelta de los componentes no-expansivos, tales como los agregados, creando espacios interfaz pasta-agregado. El espacio se puede llenar posteriormente posteriormente por cristales oportunistas de etringita más grandes, como mostrado aquí. Esta foto es cortesía de Z, Zhang y J. Olek (Purdue University).

Elementos de concreto de tamaños normales colocados y mantenidos en temperaturas próximas a las temperaturas ambientes no pueden sufrir ERCI, si los materiales usados son sanos.

Las cenizas volantes y las escorias pueden ayudar a controlar la expansión retardada por calor inducido, juntamente con el control del desarrollo de la temperatura en edades tempranas.

#### ***4.2.4.5.- Prueba de Ataque por Sulfatos y Cristalización.***

Los Sulfatos presentes en el suelo y en el agua pueden atacar y destruir un concreto que no fue adecuadamente diseñado. Los sulfatos (de calcio, de sodio, de magnesio) pueden atacar un concreto pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. Estas reacciones pueden crear presiones suficientes para romper la pasta de cemento, resultando en la desintegración del concreto.



El sulfato de sodio reacciona con el hidróxido de calcio y aluminato de calcio hidratado y forma etringita y yeso.

El mayor daño producido por estas sales ocurre con el secado de las soluciones saturadas de estas sales, normalmente en ambientes con ciclos de cambios de humedad relativa y de temperatura que alteran las fases mineralógicas. En concretos permeables, expuestos a estas condiciones de humedad y secado, las soluciones de sales pueden ascender hacia la superficie por acción capilar y posteriormente como resultado de la evaporación en la superficie, la fase de solución se vuelve supersaturada y la cristalización de la sal ocurre, generando presiones suficientes para causar la fisuración [PCA, Boletín de ingeniería EB201].

El procedimiento de prueba de ataque por sulfatos en concreto se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-452-95 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate.

#### **4.3.- Correlación de pruebas destructivas y no destructivas**

Existen tres técnicas comúnmente usadas para predecir la resistencia a la compresión del concreto hidráulico basadas en algunas pruebas no destructivas, como por ejemplo ultrasonido y esclerometría: modelado por computadora, inteligencia artificial, modelos paramétricos de regresión multi-variable. El modelado por computadora generalmente no es práctico debido al tiempo consumido en el cálculo numérico y a la complejidad del modelo; la inteligencia artificial solo proporciona el mejor ajuste entre las predicciones y las observaciones, no proporciona significado físico entre los datos de entrada y de salida; los modelos paramétricos de regresión multi-variable pueden ser implementados más fácilmente y además la estadística del modelo puede proveer información de cómo cada variable en el modelo influye en la predicción (Qindan et al, 2011).



Debido a que los modelos de regresión pueden ser aplicados a concreto con las mismas características que se calibro estos modelos no son lo suficientemente validos por el rango limitado de datos de calibración. Por lo tanto se requiere de modelos de regresión robustos basados un rango mayor de propiedades de concreto para tener una aplicación más general (Qindan et al, 2011).

Con la abundancia de posibles predictores en los modelos de regresión, que la acumulación de información actual permite, se hace necesario un método automático de selección de variables en vistas al establecimiento de un modelo sencillo, que logre la predicción o explicación de la variable de respuesta, junto a una estimación eficiente de los coeficientes.

El llamado Principio de Parsimonia, nos lleva a que un modelo, cuanto más simple, mejor. Mejor desde el punto de vista de la comprensión del fenómeno en estudio, y mejor también, porque predictores redundantes afectan a la precisión de las estimaciones de los coeficientes. Este último aspecto es verdaderamente importante en el caso de variables correlacionadas (Bradley et al, 2003).

Cabe afirmar que tres son los principales métodos de selección de variables en un modelo, a saber: el método manual, el automático y una combinación de ambos. El método manual es el realizado por el experto, tanto en el ámbito de la estadística como en el de la propia especialidad. El automático se ha plasmado en los tres métodos básicos siguientes: All subsets regressions; Backward elimination y Forward selection. El objetivo en los tres métodos es el mismo: el establecimiento de un modelo que sobre la base de un mismo conjunto de datos sea parsimonioso y, a la vez, eficiente en la estimación de los coeficientes y en la predicción ajustada de la variable respuesta. Cada uno de estos procedimientos realiza su función por etapas, utilizando un determinado criterio para decidir sobre la inclusión o exclusión de una determinada variable, así como para determinar el momento de finalizar el proceso. La crítica generalizada a los procedimientos no manuales, se centra en su automatismo y en el hecho de buscar el modelo óptimo sobre la base de criterios exclusivamente estadísticos, que pueden hacer olvidar la finalidad del modelo (Bradley et al, 2003).



Recientemente se han desarrollado otros procedimientos, que bajo las siglas LARS engloba los algoritmos siguientes:

- Lasso: Least absolute shrinkage and selection operator,
- Stagewise: Forward Stagewise linear regression, y
- LAR: Least angle regression.

El nombre LARS es consecuencia del hecho de que el algoritmo en LAR, debidamente modificado, se transforma en el Lasso y en el Stagewise, y esta relación se resalta con la S añadida a LAR. LARS es entonces un nuevo procedimiento que se encuadra en el enfoque forward antes mencionado, pero con la particularidad de que se procede por etapas mínimas, y no por saltos, como en el tradicional. Otra peculiaridad de LARS es la de su mínimo coste, en términos computativos (Bradley et al, 2003).

LARS describe Lasso como un procedimiento Stagewise por etapas. Comenzando en cero coeficientes, Lasso actualiza las estimaciones hasta terminar con el ajuste de mínimos cuadrados de todos los coeficientes, siendo lineal, por segmentos, en las sucesivas etapas. La actualización se realiza en la dirección equiangular, como se describe en Bradley et al. (2003).

LARS es un nuevo algoritmo para la selección de variables, menos agresivo que el tradicional forward selection. Además, presenta las siguientes ventajas (Bradley et al, 2003):

1. Con una simple modificación, se obtiene el algoritmo Lasso, una versión atractiva de los mínimos cuadrados ordinarios (MCO), basada en la suma de los valores absolutos de los coeficientes. Esta modificación de LARS calcula todos los Lasso posibles en un tiempo inferior al de los anteriores métodos;
2. Una modificación diferente de LARS implementa el procedimiento Forward Stagewise;





3. Obtiene una aproximación a los grados de libertad, a partir de los cuales se obtiene el estadístico  $C_p$ , una estimación del error cuadrático medio de la predicción, que permite seleccionar modelos;
4. Es computacionalmente eficiente, pues requiere el mismo esfuerzo que se exige para estimar un modelo por mínimos cuadrados;
5. Por último, el algoritmo es de dominio público, y se encuentra implementado en los programas estadísticos R y S-PLUS.

## 5.- DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 5.1.- Diagrama de actividades

A continuación se presenta un diagrama de secuencia de las actividades realizadas para el desarrollo del proyecto.



**Ilustración 27. Cronograma de actividades.**

## 5.2.- Elaboración de los Especímenes

Se eligió una dosificación de un mortero tipo II, con una parte de cemento y 2.75 partes de arena, el valor típico de resistencia nominal en compresión es de  $75 \text{ kg/cm}^2$ . Teniendo este dato como partida, previo a realizar nuestras mezclas, nos basamos en las investigaciones de los Ingenieros Cipriano Bernabé, José Luis Rodríguez y Miguel Ángel Villicaña, quienes trabajaron con morteros en sustitución del cemento para su tesis de licenciatura utilizando una relación de agua cemento de 1.01.

Teniendo nuestro proporcionamiento, siempre antes de colar los especímenes, se calculo la cantidad de agua necesaria para cada mezcla, en la mesa de fluidez (Ilustración 28), en donde se realizaron la prueba para determinar la cantidad de agua necesaria para que el mortero tuviese una fluidez de  $110\% \pm 5\%$  en la mesa de fluidez en donde se realiza dicha prueba (ASTM C 109M I, 2002), (NMX-C-061, 2010).



**Ilustración 28. Mesa de fluidez**

La prueba consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular (mesa de fluidez), haciéndolo en dos capas, agregando a cada una de estas aproximadamente la mitad del volumen del molde, después a cada capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla, distribuidos en toda la superficie, en la primer capa guiándose en la forma troncocónica de molde para poder cubrirla, como se observa en la Ilustración 29.



**Ilustración 29. Pisón prueba de fluidez**

Después de apisonar la segunda capa se debe tener el cuidado de dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, para proceder a enrazar el molde, ayudándonos de una espátula; enseguida se retira el molde lentamente cuidando no alterar la mezcla y 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 30.



**Ilustración 30. Medición de la mezcla con ayuda del Vernier especial para esta medición.**

Cada mezcla para determinar la cantidad de agua necesaria se realizó dentro de una cubeta con capacidad de 18 litros aproximadamente (Ilustración 31), esto debido a las cantidades de materiales usados.



**Ilustración 31. Cubetas utilizadas para elaborar nuestras mezclas, enumeradas para poder identificarlas.**

Para el mezclado de dichos materiales se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, adicionado de unas Aspas Mezcladoras, Ilustración 32.



**Ilustración 32. Taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM.**

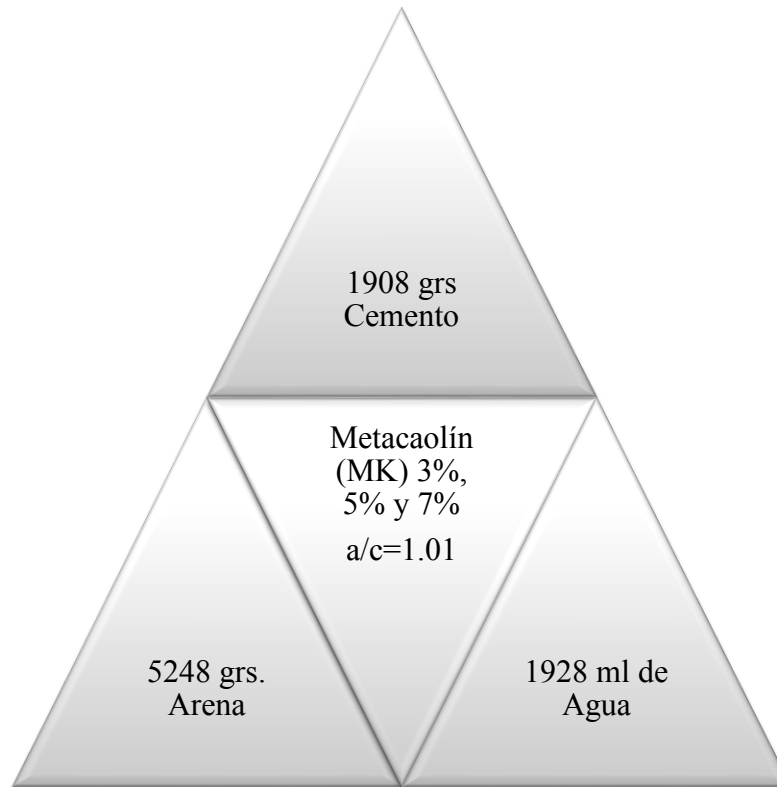
Cabe destacar que determinada la cantidad de agua necesaria para elaborar cada mezcla, esta se establecería para elaborar todas las mezclas con las diferentes adiciones, verificando siempre que esta estuviera cumpliendo nuestra fluidez y poder comenzar con el colado de los diferentes especímenes para realizarles después las pruebas correspondientes.

Las cantidades de cementante, así como de arena y agua se determinaron de un estudio previo, debido a que también se había realizado ya una mezcla para cuantificar el agua necesaria para cumplir con la fluidez especificada.

Se fijo usar la cantidad de 1908 grs de cementante, puesto que se cuantificó el volumen que se debía llenar en los especímenes que se elaborarían, ya que después de algunos tanteos y observaciones se determinó que el rendimiento de cementante era de  $0.47\text{gr}/\text{cm}^3$ , 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 nuestros especímenes.

Se elaboraron tres mezclas por cada adición, con cantidades iguales de material. En la primera mezcla siempre se verifico obtener la fluidez deseada.

A continuación se muestran las cantidades de material utilizadas para la adición de Metacaolín indicadas en la siguiente tabla, en adición para cada porcentaje.



**Ilustración 33. Proporcionamiento adiciones de Metacaolín.**

En el caso del poliestireno, debido a que se decidió sustituir nuestro agregado en tres diferentes porcentajes, se tuvo que modificar nuestra relación agua cemento de 1.01, debido a que no existía buena cohesión en la mezcla, para cada porcentaje se vario, con ayuda del fluidificante Sika Cem, para poder bajarla y obtener nuestra fluidez especificada.





### Polestireno 10% (PL SC 10%)

Cemento 1908 grs	Poliestireno 28.62 grs	Arena 4723 grs	Fluidificante 15 grs	Agua 1300 ml	Fluidificante 8grs/kg cemento Poliestireno 15grs/kg cemento Relación a/c = 0.68
---------------------	---------------------------	-------------------	-------------------------	-----------------	--

**Tabla 6. Proporcionamiento adición de poliestireno PL SC 10%.**

### Polestireno 20% (PL SC 20%)

Cemento 1908 grs	Poliestireno 28.62 grs	Arena 4198 grs	Fluidificante 15 grs	Agua 1275ml	Fluidificante 8 grs/kg cemento Poliestireno 15grs/kg cemento Relación a/c = 0.67
---------------------	---------------------------	-------------------	-------------------------	----------------	---





**Tabla 7. Proporcionamiento adición de poliestireno PL SC 20%.**

## Polestireno 30% (PL SC 30%)

Cemento 1908 grs	Poliestireno 28.62 grs	Arena 3674 grs	Fluidificante 19 grs	Agua 1145 ml	Fluidificante 10 grs/kg cemento Poliestireno 15grs/kg cemento Relación a/c = 0.60
---------------------	---------------------------	-------------------	-------------------------	-----------------	--

**Tabla 8. Proporcionamiento adición de poliestireno PL SC 30%.**

Dichas mezclas sirvieron para el llenado de los siguientes especímenes:

	<p>Cubos de 5 x 5 x 5 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba: Compresión axial</li> <li>• No. de especímenes :18</li> </ul>
	<p>Cilindros de 10 x 20 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba: Ataque por Sulfatos</li> <li>• No. de especímenes : 18</li> </ul>
	<p>Prismas de 4 x4 x16 cm</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba: Flexión</li> <li>• No. de especímenes : 20</li> </ul>
	<p>Briquetas</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Prueba: Tensión</li> <li>• No. de especímenes : 18</li> </ul>

**Tabla 9. Numero de especímenes elaborados con la bachada por porcentaje.**



Dichas proporciones de mezclas sirvieron de base para la elaboración de todos los especímenes de Prueba para las 8 edades: 7,14, 28, 45, 90, 150, 210, 300 días.

### **5.2.1.- Elaboración de losas de concreto para pruebas de adherencia**

En nuestro proyecto también se elaboraron las losas para realizar la prueba de adherencia, estas con unas dimensiones de  $1\text{m}^2$  por 7 cms de espesor, las cuales se cubrirían con cada una de nuestras adiciones y sus respectivos tres porcentajes, con una capa aproximadamente de 7mm a 10 mm de espesor.

Para su elaboración previamente se preparo la cimbra, está hecha de madera, adaptada de manera tal que nos salieran tres losas por molde, se cuidó que el suelo donde fuera colocada la cimbra se le pusiera una bolsa de plástico que nos sirviera como aislante (Figura 32), previo a esto se hizo un diseño de mezcla para nuestras losas con una resistencia de  $150\text{ kg/cm}^2$  por el Método del ACI, utilizando agregado triturado, arena volcánica del banco de Joyitas, agua del laboratorio de Materiales y cemento CPC 30R RS, para dicha dosificación nos basamos en un estudio previo para una competencia de cilindros que participamos representando a la Universidad. Se procedió a pesar los materiales (Ilustración 34), con ayuda de una charola se fue mezclando para elaborar losa por losa, así hasta juntar las seis necesitadas para completar los porcentajes de cada uno de los integrantes del equipo. Se tuvo siempre previo cuidado de humedecer todo el equipo utilizado, las losas se llenaron en dos capas, después de poner la primera capa se colocó una malla electro soldada utilizada como acero de refuerzo para nuestras losas. Al término de elaborarlas se les dio un pequeño acabado con una llana de madera solo para evitar que nuestra superficie quedara demasiado rugosa, Ilustración 35.



**Ilustración 34. Molde de losas y peso de materiales.**

A continuación se muestra la tabla con la dosificación utilizada por losa y considerando un factor de 10% de desperdicio:

MATERIAL	No. DE ELEMENTOS	PESO TOTAL (kg)
GRAVA	1 Losa	66.99
ARENA		66.13
CEMENTO		22.75
AGUA		18.10

**Tabla 10. Proporcionamiento para una losa por el método el ACI.**

Los días posteriores de haber colado las losas se procedió a curarlas, el procedimiento fue agregar agua en la superficie de las losas, esto durante 28 días aproximadamente, cumpliendo esta edad (Ilustración 35), las losas se descimbraron, para posteriormente agregarles las capas de mortero de las diferentes adiciones.



**Ilustración 35. Acabado a las losas y curado hasta los 28 días.**

### 5.2.2.- Elaboración de Cubos

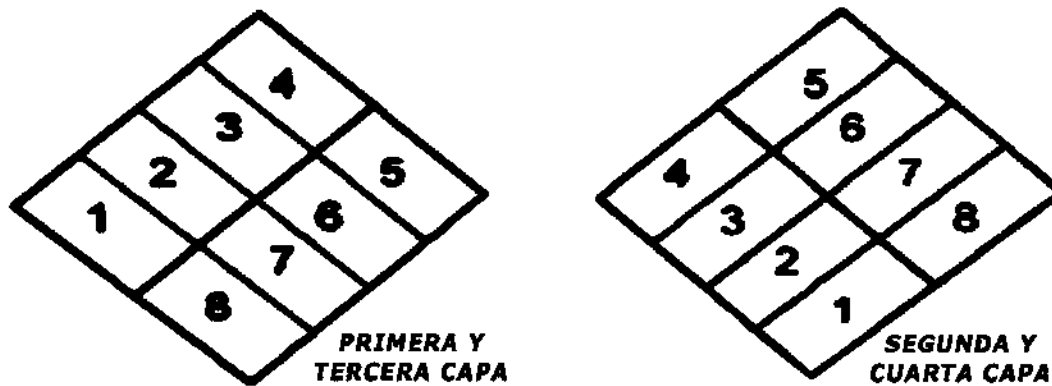
Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma.

En la fabricación de los cubos de mortero, se recubrieron los moldes un desmoldante (Ilustración 36), esto con la finalidad de que al día siguiente cuando se descimbraran, el mortero no se adhiriera a las paredes del molde y fuera sencillo el retirarlos del mismo sin que se desmoronaran, para tal fin se utilizó aceite para transmisión mezclado con diesel en una parte más pequeña que el aceite para la mezcla no fuera tan líquida pero tampoco muy viscosa.



**Ilustración 36. Moldes engrasados.**

Una vez que los moldes estaban engrasados y que la mezcla se le había determinado la fluidez y verificado que estuviese dentro del rango, se procedió al llenado de los mismos (figura 4-8), el llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109M I. 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se le dieron 8 golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, como se ilustra en la Ilustración 37.



**Ilustración 37. Etapas de llenado del cubo de 5cm x 5cm x5cm**

Esto con ayuda de un pisón, este de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5cm x 1.25cm (Ilustración 38), después del llenado de la última capa, se tenía el cuidado



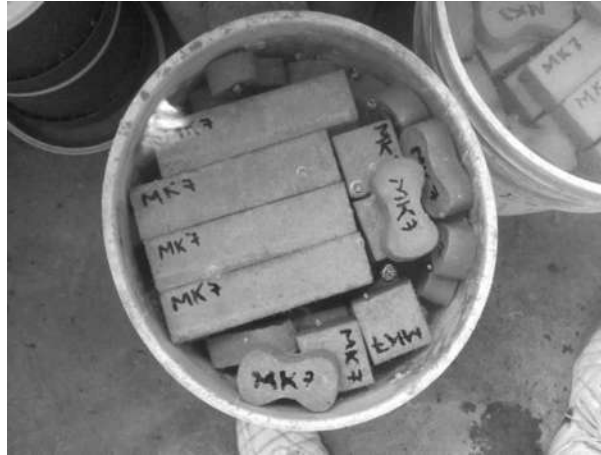
de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula.



**Ilustración 38. Elaboración de Cubos.**

Una vez fabricados el número de cubos correspondientes a las primeras 6 edades de prueba especificadas y con la adición correspondiente, se dejaban fraguar en sus moldes, al transcurso de 24 hrs aproximadamente, los cubos se desmoldaban, teniendo siempre el cuidado de hacerlo sin causarle daño al espécimen, en la superficie de cada cubo se les puso con ayuda de un marcador indeleble su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura fue la misma para todos los especímenes: cubos, cilindros, prismas y briquetas), en dicha nomenclatura llevaba la abreviatura de la adición y el porcentaje respectivo, después se procedió a curar los cubos de mortero (el curado para todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue el mismo) el curado que se dio a los especímenes fue por inmersión (Ilustración 39), en agua hasta el día de la prueba (ASTM C 511, 2003).





**Ilustración 39. Curado de los especímenes por inmersión en cubetas.**

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.

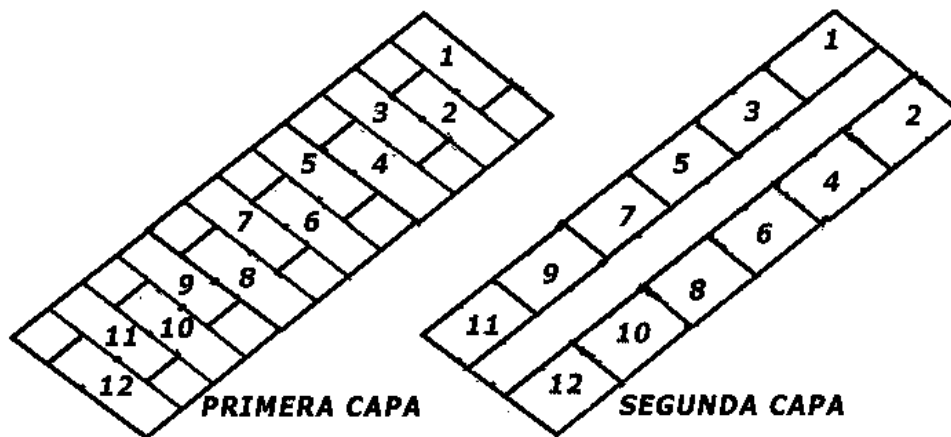
Cabe destacar que para la realización del poliestireno el curado no fue a las 24 hrs, ya que al agregarle el fluidificante (Sika Cem) retardaba el fraguado de los especímenes, en este caso para esta sustitución se tuvieron que quedar 48 hrs. para posteriormente comenzar a desmoldar.

### 5.2.3.- Elaboración de Prismas

Para la fabricación de los prismas con dimensiones 4cm x 4cm x 16cm con las mezclas y sustituciones correspondientes, se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma.

Para la fabricación de los prismas, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

El llenado de los prismas se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente lo cual se ilustra en la Figura 38, es decir a la mitad de la altura del prisma, en cada capa se le dieron 12 golpes con un pisón, el cual es el mismo que se utiliza para la elaboración de especímenes cúbicos, los golpes se dieron en diferente sentido, a cada capa, como se ilustra en la Ilustración 40.



**Ilustración 40. Etapas de llenado del prisma de 4cm x 4cm x16cm**

Después de la elaboración del número de los especímenes prismáticos correspondiente a las edades de prueba especificadas y con las diferentes adiciones, se dejaron fraguar durante 24 hrs aproximadamente, (al igual que en cubos de cubos para el poliestireno 48 hrs.) después se descimbraron y se les puso la misma nomenclatura anteriormente descrita, después se procedió a curar por inmersión los prismas de mortero.

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 adición correspondiente.

#### **5.2.4.- Elaboración de Cilindros**

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

Para la fabricación de los cilindros, se siguió el mismo procedimiento que se describió en la elaboración de los especímenes anteriores, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente.

El llenado de los moldes cilíndricos se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente, por mitad de la altura del cilindro Ilustración 41, 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<sup>4</sup>.



**Ilustración 41. Elaboración de cilindros.**

Después de la elaboración del número de cilindros correspondiente a las edades de prueba especificadas y con las diferentes adiciones, se dejaron fraguar durante 24 hrs y 48 hrs en el caso del poliestireno aproximadamente, después de esto se descimbraron y al igual que en los especímenes anteriores se les puso la misma nomenclatura, después se procedió a curar por inmersión los cilindros de mortero.

---

<sup>4</sup> El procedimiento de elaboración se basa en los requerimientos que marca la norma NMX-C-083-ONNCCE, en el que se establece la relación de esbeltez 2:1, para poder realizar la prueba a compresión

Después de sumergir en agua los especímenes cilíndricos, 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 cilíndricos, requeridos para cada edad de prueba y adición correspondiente.

### 5.2.5.- Elaboración de Briquetas

Para la fabricación de las briquetas (especímenes en forma de cacahuete) con las mezclas y adiciones correspondientes, se utilizaron moldes de bronce.

Para la fabricación de las briquetas, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente. 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 (Ilustración 42), el molde se puso sobre una superficie de cristal, engrasado previamente para evitar que la mezcla se adhiriera a éste.



**Ilustración 42. Elaboración de Briquetas.**

Después de la elaboración del número correspondiente de briquetas para las edades de prueba especificadas, se dejaron fraguar durante 24 hrs y 48 hrs caso poliestireno aproximadamente, después se les puso la misma nomenclatura descrita anteriormente y se les aplico el curado por inmersión hasta la fecha de prueba.



**Ilustración 43. Briquetas de mortero con adición de Metacaolín.**

### 5.3.- Curado

De acuerdo la norma NMX-C-148-2010; ASTM-C-511-2003, el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el mortero con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el espécimen fresco. La remoción de los moldes debe efectuarse a  $24 \pm 8$  horas luego de elaborado el elemento, procediendo a el almacenaje en un medio que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser  $23 \pm 2$  °C desde el momento del desmolde hasta el día de falla (Ilustración 44). Todos los especímenes fueron curados sumergiéndolos en agua, a la cual se le monitoreo la temperatura y poder cumplir con la normatividad (NMX-C-148, 2010).



**Ilustración 44. Curado por inmersión.**

#### 5.4.- Elaboración de mezclas para la realización de pruebas de adherencia

Para la realización de las pruebas de adherencia (ASTM C 1583, 2004), se elaboraron mezclas de mortero para las diferentes adiciones y materiales, del mismo proporcionamiento que la usada con los especímenes, gastando el sobrante para completar las edades tardías.

Anterior a la realización de dichas mezclas, las losas de concreto sobre las cuales se pondría el revestimiento se dividieron en 3 partes iguales aproximadamente, también se saturó de manera continua la losa para evitar que absorbiera el agua de la mezcla y se lograra una buena unión de las fases, ya una vez elaboradas las mezclas, se colocaron sobre ellas, cuidando mantener un espesor constante y darles un pequeño acabado con una llana, lo cual se ilustra en la Ilustración 45, de manera que en cada losa se buscó acomodar una adición, para después realizarle la prueba de adherencia correspondiente a la edad especificada.



**Ilustración 45. Colocación de la mezcla sobre la losa de concreto.**



**Ilustración 46. Colocación de la mezcla de Poliestirenos en sus tres porcentajes.**



## 5.5.- DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

### 5.5.1.- Pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido.

Las pruebas realizadas a los morteros en estado endurecido se pueden clasificar en destructivas y no destructivas. Las adiciones de Metacaolín se probaron a 7, 14, 28, 45, 90, 150 y 210 días; tanto para pruebas no destructivas como para destructivas. En las adiciones de Poliestirenos se probó 7, 14, 28, 45, 90 y 150 días. Para los Testigos se probaron a las 8 edades de prueba (7, 14, 45, 90, 150, 210 y 300 días).

Antes de comenzar a realizar cualquier prueba siempre se sacó de curar a las muestra, tomando tres especímenes de cada uno para realizarles las pruebas programadas, se procedió a marcarlas con un crayón, enumerándolas y buscando una de las caras para señalar el sentido al cual se le aplicaría la carga (Ilustración 47), teniendo identificadas las probetas se procedió a realizar primeramente las pruebas no destructivas, para proceder al final con las destructivas, siempre teniendo la precaución de mantener las muestras húmedas y/o sumergidas en agua.

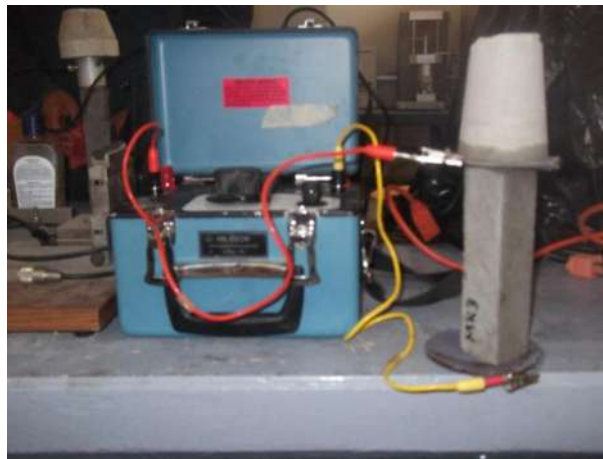


**Ilustración 47. Especímenes marcados para realizar las pruebas programadas.**

## 5.5.2.- Pruebas no destructivas

### 5.5.2.1.- Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cúbicos, cilíndricos y prismáticos, los especímenes se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson (Ilustración 48).



**Ilustración 48. Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.**

El procedimiento seguido se resume en los siguientes números:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra (Ilustración 49):
  - Cubos: lado 1, lado2 y espesor.
  - Prismas: base (lado1), espesor (lado2) 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.
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).



**Ilustración 49. Medición de los especímenes.**

La resistencia eléctrica (R) se calcula como  $E/I$  y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente).

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left( \frac{A}{L} \right) \quad (3)$$

Dónde:

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

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

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

$L =$  Longitud del espécimen en cm



**Ilustración 50. Prueba de Resistividad.**

#### ***5.5.2.2.- Velocidad de Pulso Ultrasónico***

Los especímenes empleados para determinar lecturas de resistividad eran pasados en seguida a una mesa contigua en donde se la determinaba el tiempo de tránsito de pulso ultrasónico.

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, Ilustración 51; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; 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 1500V; 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 a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel antibacterial, haciendo comparaciones de las lecturas obtenidas con ambos geles y las diferencias fueron mínimas, fue entonces que se decidió el empleo del gel antibacterial para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones planeadas tomar, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.



**Ilustración 51. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico, marca CONTROLS, modelo 58-E0049/B.**

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas.

El grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo.



**Ilustración 52. Realización de la Prueba de Velocidad de Pulso.**

Después de un tiempo el aparato antes descrito en la prueba se descompuso, motivo por el cual hubo cambio de aparato, utilizando ahora el equipo medidor de velocidad de pulso ultrasónico, Ilustración 53 modelo 58-E0048 marca CONTROLS, funciona con baterías recargables internas, al igual que el equipo anterior también tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel.



**Ilustración 53. Equipo de velocidad de pulso ultrasónico, modelo 58-E0048 marca CONTROLS.**





### 5.5.2.3.- Densidad

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

- Los especímenes se sacan de los recipientes de curado y se enumeran, posteriormente se secan superficialmente con una franela y registrando su masa como masa de la muestra (M).
- Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada esperando a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) del espécimen (Ilustración 54).

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

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

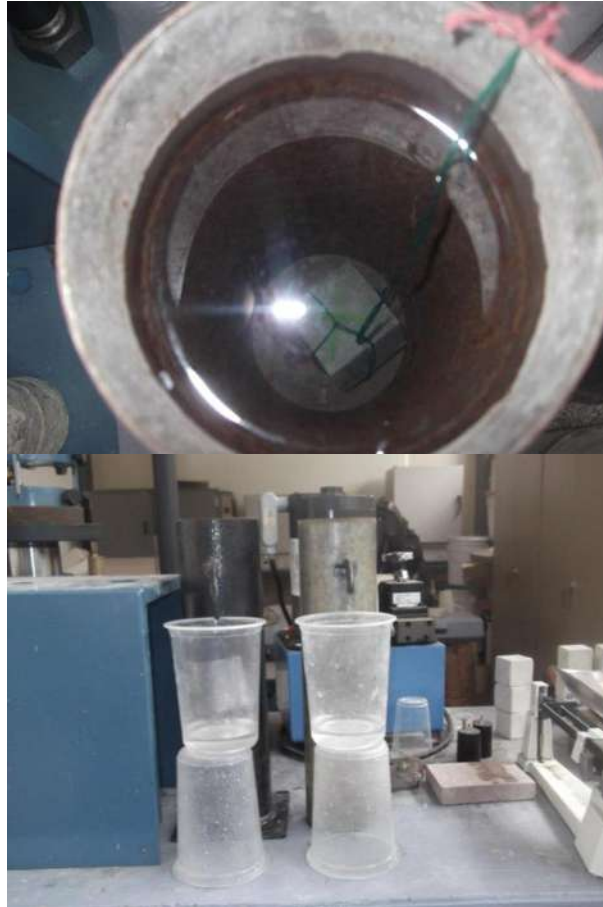
Dónde

$\rho$ =densidad en g/cm<sup>2</sup>

$m$ =masa del espécimen en g.

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





**Ilustración 54. Determinación de la densidad de especímenes cúbicos.**

#### **5.5.2.4.- Gravedad específica**

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

El procedimiento es el que se describe a continuación:

1. Se secan las muestras superficialmente con una franela y se determina su masa superficial seca ( $M_{ss}$ =Masa superficialmente seca).
2. Se adapta una canastilla a la balanza y se sumerge en agua para determinar su masa.

3. Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla (Ilustración 55).
4. Se determina la masa sumergida del espécimen ( $M_a$ =Masa sumergida).
5. Se secan las muestras en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.
6. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa seca con ayuda de una balanza ( $M_s$ =Masa seca).

Los cálculos para la obtención de la gravedad específica se hacen con la siguiente fórmula:

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



**Ilustración 55. Determinación de la gravedad específica.**

### 5.5.2.5.- Absorción

La prueba de porcentaje de Absorción se le realiza a los especímenes cúbicos, esta prueba se lleva con forme se indica en el manual de Análisis de Materiales, de la UMSNH, tercera edición.

El procedimiento se describe a continuación:

1. Nuestros especímenes se extraen del curado.
2. Se secan de manera superficial con una franela y se procede a pesar anotando este valor como (Mh) masa saturada y superficialmente seca.
3. Después se procede a colocar nuestros especímenes en una charola para secarlo durante 24 hrs en el horno a una temperatura de 110° C, se sacan y se dejan enfriar un poco y se procede a pesarlo registrando como masa seca (Ms), Ilustración 56.

CÁLCULOS:

$$\% \text{ H. ABSORCIÓN} = \frac{Mh - Ms}{Ms} \times 100$$

Dónde: Mh = Masa saturada y superficialmente seca de la grava en gramos.

Ms = Masa seca de la grava en gramos.



**Ilustración 56. Especímenes en el horno para obtener el peso seco.**

### 5.5.3.- Pruebas Destructivas.

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

#### 5.5.3.1.- Compresión en Cubos (5x5cm)

Como ya se mencionó, en la prueba de resistividad se tomaron las dimensiones de cada espécimen cúbico, la prueba de compresión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se comenzó a aplicar carga lo cual se puede observar en la Ilustración 57, a una velocidad constante en el rango de 50000kg, el cual tiene 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).



**Ilustración 57. Prueba de Resistencia en cubos utilizando la máquina universal Tinius Olsen.**

Se probaron 3 cubos a compresión (Ilustración 58) a las edades antes mencionadas para cada adición 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.



**Ilustración 58. Espécimen probado a compresión utilizando la máquina universal  
Tinius Olsen.**

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

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

Dónde:

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

$P$  = Carga, kg.

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

### 5.5.3.2.- Resistencia a Flexión

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

Se marcó el prisma a 1” de sus extremos, también se marca con una línea al centro del claro del prisma, la cual deberá ser donde se aplique la carga (Ilustración 59).



**Ilustración 59. Se puede apreciar cómo se marco el espécimen y el tipo de falla presentado en esta investigación de la prueba de flexión en prismas.**

La prueba de flexión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen, se montó en los soportes adecuados para esta prueba, se aplica carga sin impacto y a una velocidad constante en el rango de 50000kg, el cual tiene una aproximación a 0.5kg, (ASTM C 293, 2002) (Ilustración 60)



**Ilustración 60. Prueba de flexión se realizó utilizando la máquina universal Tinius Olsen.**

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.

Como la falla presente fue la del tercio marcado en los prismas los cálculos se realizaron con el empleo de la siguiente ecuación:

$$MR = \frac{3WL}{2BD^2} \quad (5)$$

Dónde:

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

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

L= Longitud entre apoyos de la muestra, cm

B = Ancho promedio de la muestra, cm

D=Espesor promedio de la muestra, cm



### 5.5.3.3.- Tensión 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 61).



**Ilustración 61. Máquina Michaelis para prueba a tensión en briquetas.**

El procedimiento seguido se describe a continuación:

1. Se sacaron de la pila de curado las muestras a probar a la edad correspondiente.
2. Se tomaron las medidas de la sección media ( $S_m$ ) de la briqueta.
3. Se colocó la briqueta en la máquina la cual debe quedar perfectamente nivelada.
4. Se aplicó la carga lenta y constantemente por medio de las municiones hasta la falla de la muestra (Ilustración 62).



**Ilustración 62. Aplicación de la carga lentamente por medio de las municiones hasta la presencia de falla en la briqueta.**

Después de la falla de la muestra se retiraron la municiones pesándolas al decimo de de gramo, el peso de las municiones ( $P_m$ ) fue considerado como la carga que soportó la sección media de la briqueta (Ilustración 63).



**Ilustración 63. Peso de las municiones en la bascula con aproximación al decimo de gramo.**

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

$$R = P_m \frac{x50}{sm} \quad (7)$$

**Donde:**

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

Pm = peso de las municiones o carga de ruptura en kg.

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

50 = constante de la máquina.



**Ilustración 64. Tipo de falla presente en la gran mayoría de las briquetas probadas, al centro de la briqueta.**

#### **5.5.3.4.- Adherencia**

El estudio de una propiedad intangible como es la adherencia, requiere de una prueba física que pueda cuantificar un parámetro de resistencia de la unión e identificar un tipo de falla. Se han hecho numerosas investigaciones sobre la unión en sistemas cementicios y muchas de ellas se han preocupado por el desarrollo de una prueba adecuada.

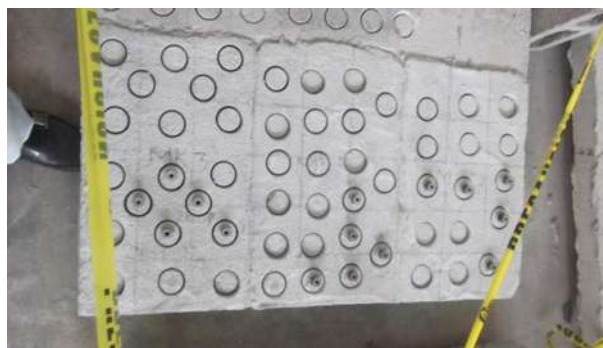
La prueba Pull Off se ha ido incrementando favorablemente y se ha convertido en una prueba in situ para el control de calidad [Simon Austin et al, 1995].

Una vez que obtuvo la edad correspondiente para realizar las pruebas de adherencia, se comenzó por hacer una perforación en la superficie del revestimiento lo cual se observa en la Ilustración 65. Esta se hizo mediante la ayuda de 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 65. Perforación de las losas para la prueba de adherencia.**

Una vez que se realizaron las perforaciones a las mezclas correspondientes se procedió a pegar los dollys de acero inoxidable, esto se ilustra en la Ilustración 66, los cuales sirvieron para realizar dicha prueba, los dollys se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico, (Ilustración 67), el epóxico utilizado es marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel. Después de la aplicación se dejó secar el epóxico aproximadamente 24 horas.



**Ilustración 66. Dolls listos para realizar la prueba de adherencia.**



**Ilustración 67. El epóxico utilizado es marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel.**

Una vez que el epóxico estuvo seco se procedió a realizar la prueba de adherencia, esto se observa en la Ilustración 68, la cual consistió en insertar el perno con cabeza cilíndrica en el disco de metal pegado a la superficie de la muestra, después se colocó el instrumento de medición Pull Off (Ilustración 69) de carga en el perno con cabeza de pelota (Ilustración 70) para después apretar ligeramente hasta sentir una ligera tensión, se comenzó a aplicarle carga lenta y constante en el rango que indica la norma, hasta que se obtuvo la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004), es decir hasta que hubo desprendimiento del revestimiento o sustrato de concreto.



**Ilustración 68. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off.**



**Ilustración 69. Equipo para prueba Pull Off marca DYNA.**

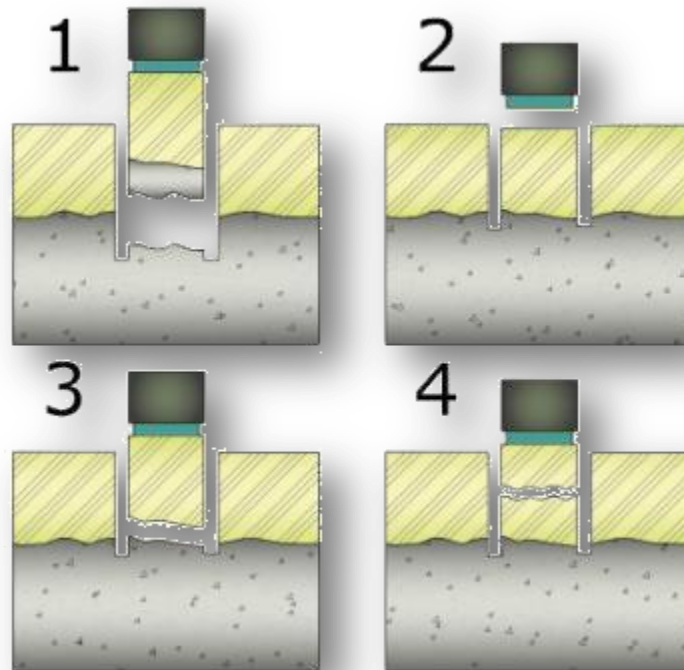


**Ilustración 70. Perno con adaptador para el aparato de Prueba Pull Off.**

Cuando la prueba se realiza en la superficie de una reparación o un material de revestimiento, se determina la fuerza de adherencia con el sustrato o la resistencia a la tensión de cualquiera, del recubrimiento o del sustrato, lo que sea más débil.

A continuación en la Ilustración 71 se observa el tipo de falla que puede ocurrir o presentarse al momento de realizar la prueba con el equipo Pull Off.





**Ilustración 71. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.**

Posteriormente se tomó la lectura de carga necesaria para desprender el revestimiento y se registró como carga de ruptura, también se observó y registró el tipo de falla, el cual podrían ser:

- Falla 1. En el sustrato.
- Falla 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.
- Falla 3. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
- Falla 4. En el material de reparación o revestimiento.



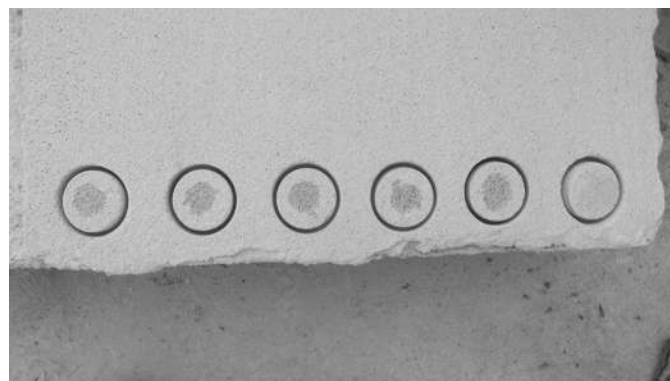
Cuando se presentó la falla entre el dolly de acero y el epóxico como se muestra en la Ilustración 72, la prueba se tuvo que repetir (ASTM C 1583, 2004).



**Ilustración 72. Falla entre epóxico y el dolly metálico.**



**Ilustración 73. Falla entre revestimiento y el estrato. Tipo (3). Material Poliestireno.**



**Ilustración 74. Falla en el revestimiento. Tipo (4). Material Mk.**



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, y resistencia a la tensión cuando el fallo se produce en el sustrato o el material de reparación o revestimiento.

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.

#### ***5.5.3.5.- Ataque por Sulfatos.***

La prueba fue realizada de acuerdo con la normativa ASTM C 88-99a, “Standard Test Method for Soundness of aggregates by use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate”.

Para esta investigación la solución concentrada de sulfato fue la de sulfato de sodio.

La prueba consiste en medir la pérdida de solidez del concreto debida a la acción de las sales a las que se encuentra sometido el concreto en ambientes marinos donde se tienen eventos de humedecimiento y secado del elemento.

Esta prueba trata de simular esos eventos de manera acelerada mediante ciclos de saturación en solución saturada de sulfato de sodio y de secado de los elementos sujetos a prueba.

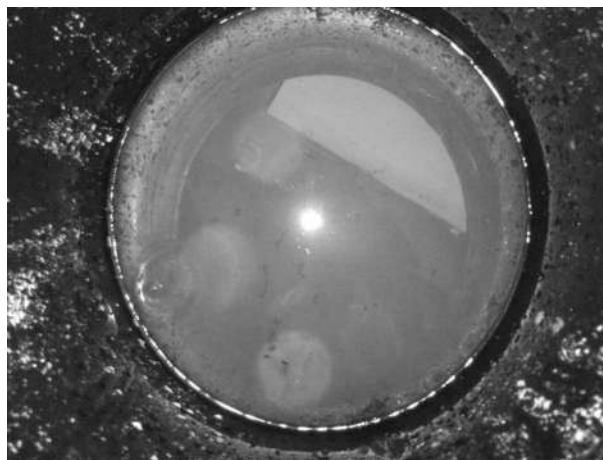
Los especímenes sometidos a esta prueba fueron lotes de 15 especímenes cilíndricos de  $5 \times 10$  cm. Para cada una de los porcentajes por adición realizadas para esta investigación.

El procedimiento de prueba es el siguiente:

- Primeramente se tiene que realizar una solución saturada de sulfato de sodio suficiente para realizar los 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes. Para la prueba fue necesario destilar 200 litros de agua (la cual fue proporcionada por el laboratorio de ingeniería ambiental de la FIC); la solución saturada de sulfato de sodio se logró disolviendo 350 gramos de sulfato de sodio (Sosa caustica) por cada litro de agua, para que la solución este lista se tiene que disolver completamente el sulfato de sodio en el agua evitando que queden polvos en el interior del recipiente.



**Ilustración 75. Elaboración de la solución con el equipo de protección adecuado para evitar accidentes.**



**Ilustración 76. Solución saturada de sulfatos de Sodio.**

- Los especímenes deberán de secarse hasta peso constante antes de iniciar la prueba.  
Para este caso los especímenes permanecieron en el horno a temperatura de 110°C durante un mes aproximadamente sin lograr el peso constante, aunque las variaciones de peso en los últimos días eran mínimas se tomó este tiempo como el necesario para iniciar la prueba.

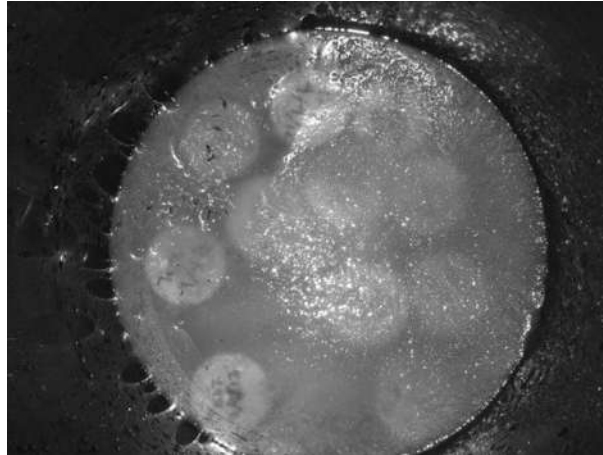


**Ilustración 77. Especímenes cilíndricos en el horno de secado.**

- Se pesan los especímenes para obtener el peso seco o peso inicial de cada espécimen, y se prepara un recipiente capaz de contener todos los especímenes durante la prueba con un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la parte superior de los especímenes, la parte inferior de los especímenes deberá estar en contacto con la solución.



**Ilustración 78. Para cada ciclo de prueba, se pesaron todos los especímenes.**



**Ilustración 79. Inmersión de los especímenes en la solución de sulfato de sodio cuidando que nuestro tirante de agua quedara 2 cms encima de los cilindros.**

- Los especímenes deberán de permanecer en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniendo los a una temperatura en promedio de 21°C.
- Una vez pasadas las 16 horas se sacan los especímenes y se dejan escurrir durante 15 minutos para después colocarlos en el horno previamente calentado a una temperatura constante de 110°C, durante 24 horas.



**Ilustración 80. Especimen sacado de la solución después de 17 hrs.**

- Pasado el tiempo de secado se sacan del horno los especímenes y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener su peso seco. Todos los pasos mencionados hasta ahora generan un ciclo de saturación y secado de los especímenes, se deberá hacer lo mismo hasta completar 5 ciclos que es lo que nos marca la normativa.
- Como último paso a los cilindros que no se afectaron tanto de su base superior e inferior se les aplica una carga de compresión para después cotejar con los cilindros que se probaron sanos y ver cuál es la disminución de resistencia.



**Ilustración 81. Espécimen de MK sometido a compresión 2º Ciclo.**



**Ilustración 82. Espécimen Testigo sometido a compresión 2º Ciclo.**



- El tiempo total que se empleó en esta prueba fue de 15 días por adición.



**Ilustración 83. Comportamiento del poliestireno durante los 5 ciclos de prueba, como se puede notar no están destruidos por lo que se nos permitió probar a compresión cada ciclo.**



**Ilustración 84. Comportamiento de los cilindros de MK, estos no resistieron los 5 ciclos de prueba.**

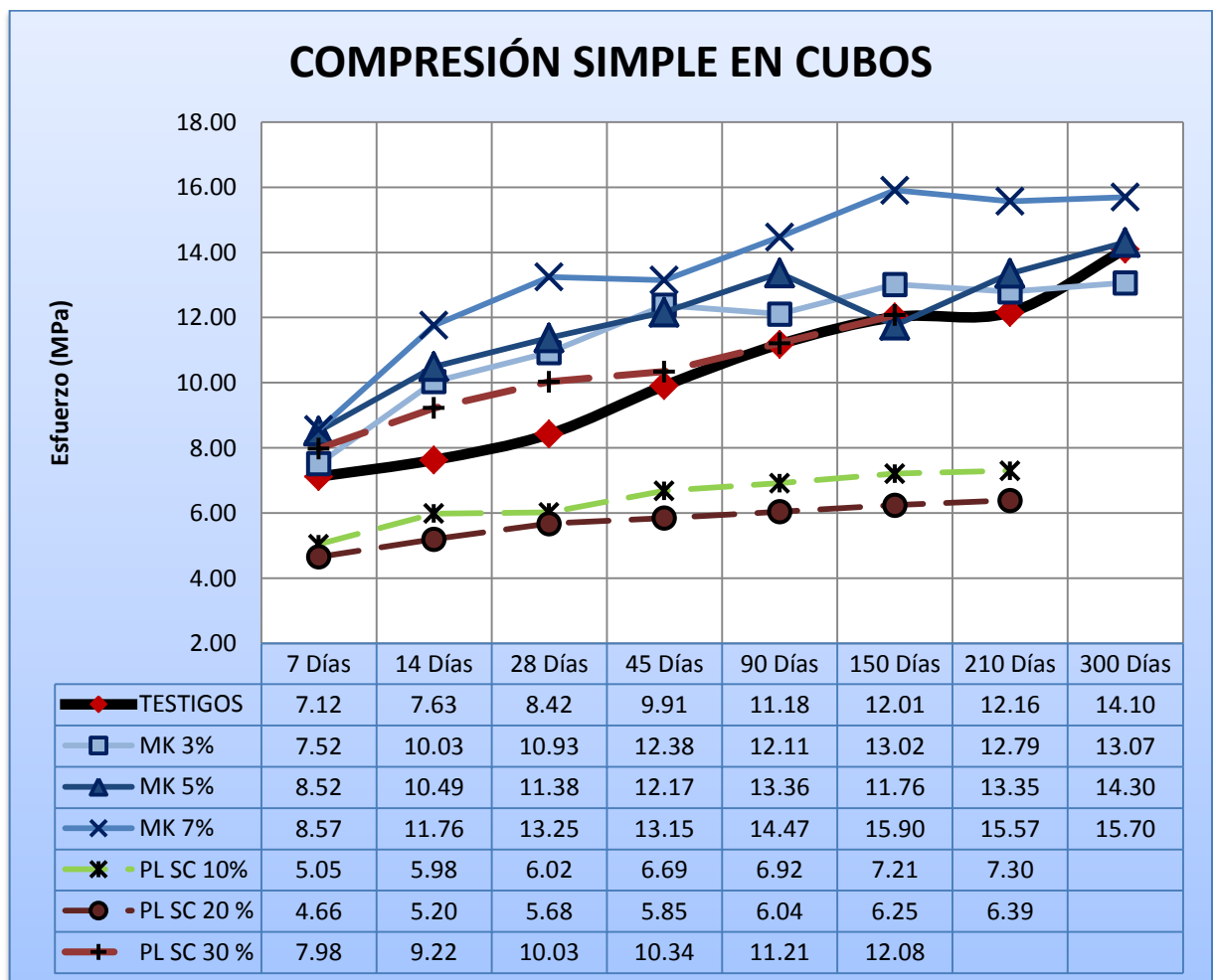


## 6.- RESULTADOS

Para cada prueba se hizo una comparación con los morteros testigo para determinar la eficiencia de las formulaciones con adición de Metacaolín y Poliestireno.

La forma en que se presentan los resultados es gráfica y tabla de resumen que muestran los datos con que se elaboraron y los resultados obtenidos para cada edad.

### 6.1.- Resultados de la Prueba a compresión en cubos de 5cm x 5cm.



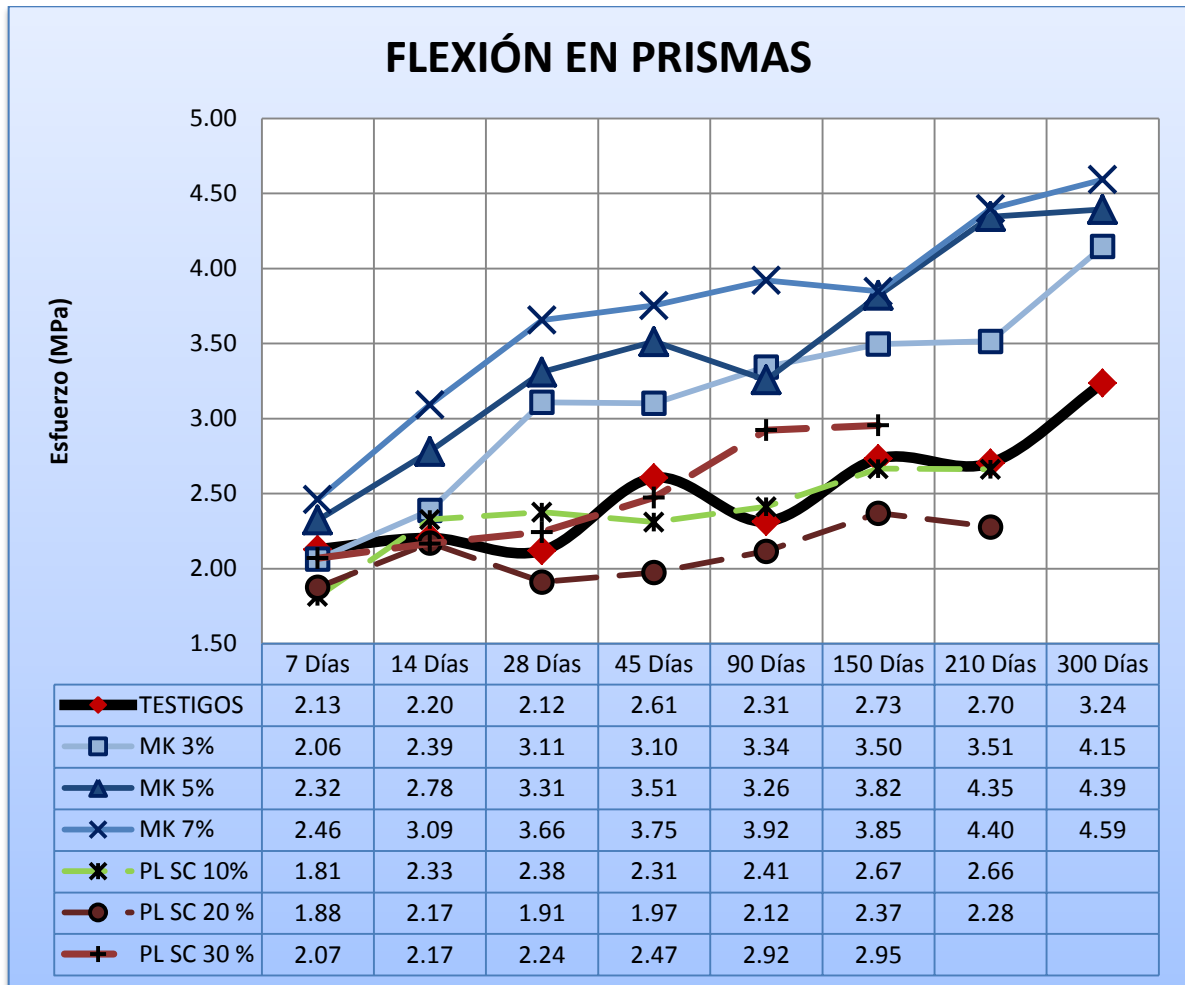
**Ilustración 85. Resultados de la Prueba a la compresión en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**



Con los resultados obtenidos en esta prueba nos percatamos que la adición del Metacaolín nos arroja resultados positivos por encima de nuestro mortero testigo, teniendo resultados de incremento en cada porcentaje, siendo el del MK 7% el de mayor rango de resistencia, por lo que podemos decir que si necesitamos incrementar nuestra resistencia a compresión esta es una buena opción utilizando porcentajes bajos y obteniendo buenos resultados.

En cuanto al poliestireno en dos porcentajes de PL SC 10% y 20% están por debajo de nuestro mortero testigo, sin embargo tenemos resultados positivos para el PL SC 30% logrando estar por encima del testigo, teniendo en cuenta que este porcentaje se utilizó mayor cantidad de fluidificante, además de que posee la relación agua cemento más baja de los tres, se puede decir que los resultados son esperados ya que al sustituir nuestro agregado por poliestireno la resistencia a compresión baja, buscamos equilibrar esta pérdida con la reducción de nuestra relación agua cemento, sin embargo solo se obtuvo buenos resultados para uno de los porcentajes (PL SC 30%).

### 6.2.-Resultados de Flexión Estática en Prismas.



**Ilustración 86. Resultados de la Prueba a la flexión en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

Los resultados obtenidos para flexión en las adiciones de Metacaolín al igual que en la compresión salvo en la edad de 7 días del MK 3% son por encima de nuestro testigo, se obtiene mejores resultados para el porcentaje de MK 7%; para el caso de las adiciones de Poliestireno solo el porcentaje de PL SC 30% logra pasar en algunas edades y estar por encima de nuestro mortero testigo, los otros dos porcentajes están por debajo de este.

También tienen un comportamiento homogéneo en cuanto aumentar su resistencia conforme la edad del espécimen, salvo en la edad de 90 días tanto en el testigo como en el



porcentaje de MK 5%, que se presenta una caída pero es recuperada para la siguiente edad y continua con el mismo comportamiento.

A continuación se presentan los resultados del análisis por porcentaje y por edad del porcentaje obtenido para la flexión con respecto a los resultados de compresión:

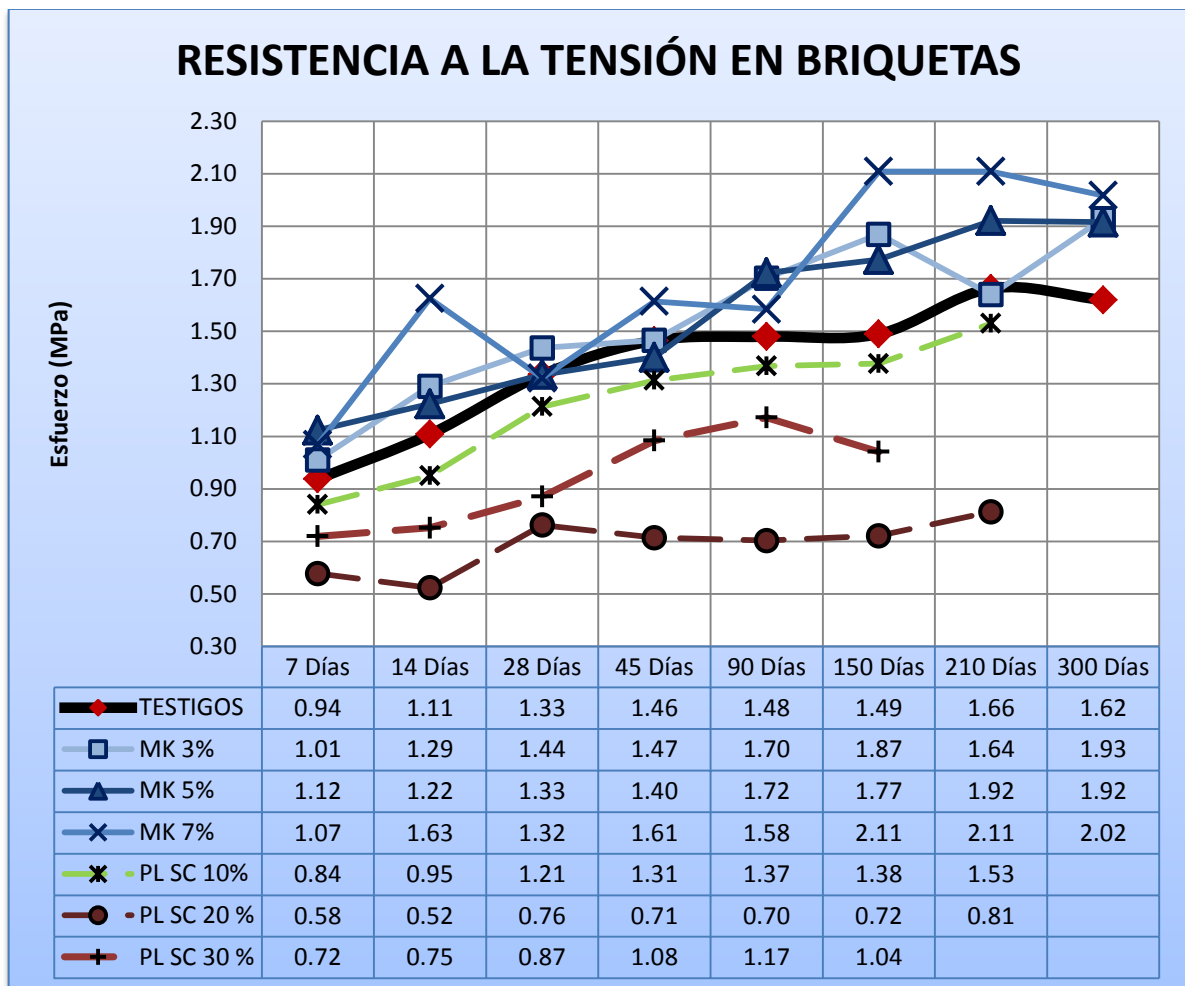
PORCENTAJE RESPECTO A LA COMPRESIÓN OBTENIDA PARA EL MODULO DE RUPTURA (17%)									
	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS	210 DIAS	300 DIAS	PROMEDIO
<b>TESTIGOS</b>	29.91	28.89	25.16	26.30	20.70	22.75	22.24	22.95	24.86
<b>MK 3%</b>	27.45	23.80	28.44	25.06	27.61	26.86	27.47	31.74	27.31
<b>MK 5%</b>	27.29	26.50	29.09	28.87	24.38	32.49	32.54	30.72	28.98
<b>MK 7%</b>	28.73	26.29	27.60	28.55	27.09	24.19	28.25	29.26	27.50
<b>PL SC 10%</b>	35.96	38.89	39.48	34.56	34.87	36.98	36.48		36.74
<b>PL SC 20 %</b>	40.29	41.77	33.67	33.74	35.02	37.95	35.64		36.87
<b>PL SC 30 %</b>	25.93	23.50	22.37	23.92	26.08	23.48			24.21
							PROMEDIO TOTAL		29.50

Los resultados de la tabla están expresados en porcentaje (%).

**Tabla 11. Porcentaje obtenido para la prueba de Modulo de Ruptura respecto a la compresión.**

Revisando este análisis y teniendo claro que un valor aceptable es alrededor del 17%, se observa que en todos los porcentajes y edades de prueba se supera, de un rango del 22% al 37%, teniendo como promedio general un 29.50 %.

### 6.3.- Resultados de la Resistencia a Tensión en Briquetas



**Ilustración 87. Resultados de la Prueba a la tensión en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

Los resultados obtenidos para la prueba de la tensión, para el caso del MK obtenemos resultados por encima de nuestro mortero testigo, solo en las edades de 28 y 45 días presenta un bajón, el cual es superado en edades tardías, para el caso del poliestireno se obtuvieron resultados por debajo de nuestro mortero testigo, teniendo resultados más bajos para nuestro PL SC 20%, por la adición del poliestireno podemos notar pérdida de resistencia a la tensión, ganancia con la adición de MK para los tres porcentajes, siendo el del MK 7% el de mejores resultados.



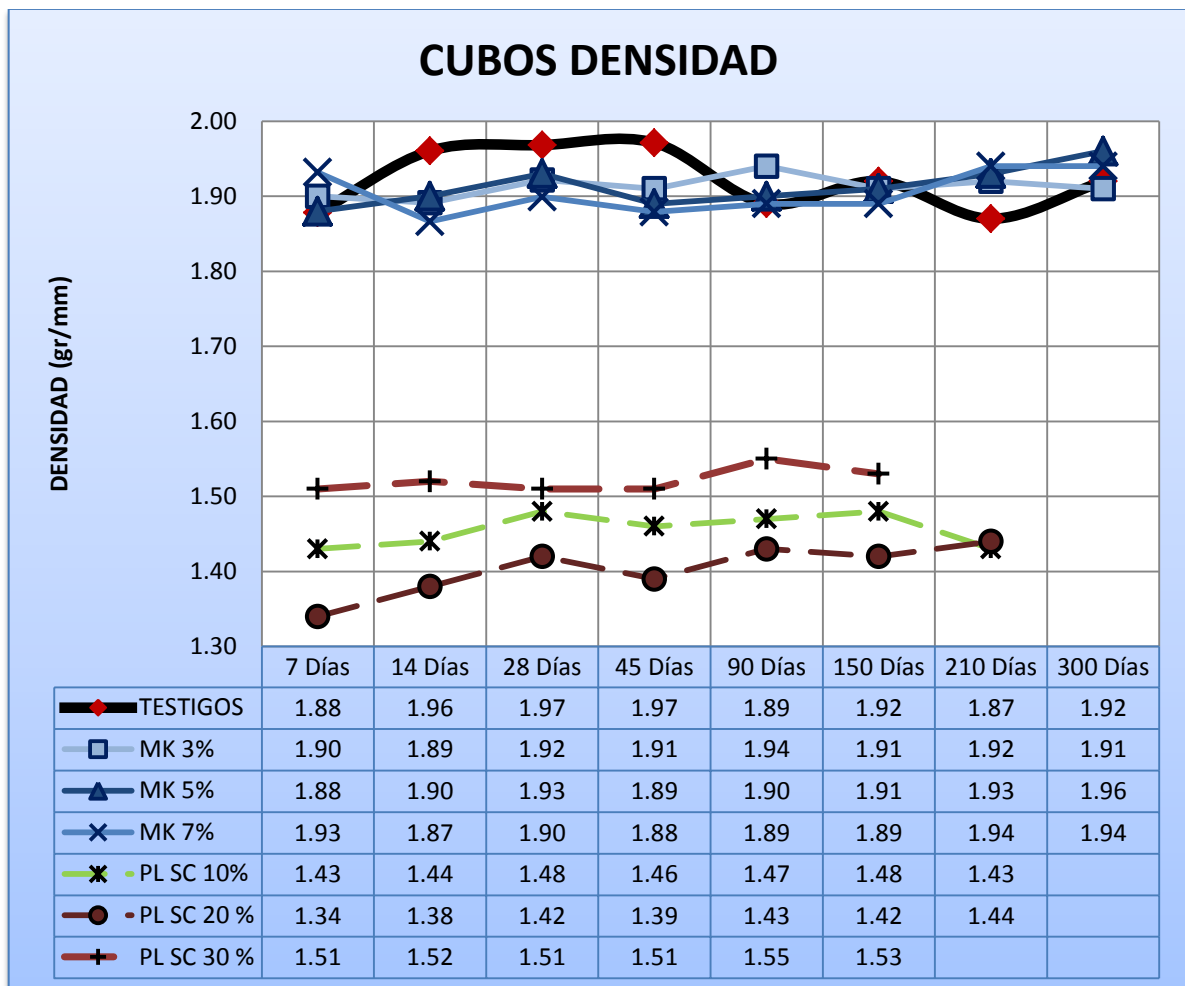
PORCENTAJE RESPECTO A LA COMPRESIÓN OBTENIDA PARA LA TENSIÓN (10%)									
	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS	210 DIAS	300 DIAS	PROMEDIO
<b>TESTIGOS</b>	13.17	14.52	15.85	14.79	13.24	12.40	13.68	11.48	13.64
<b>MK 3%</b>	13.44	12.86	13.15	11.84	14.06	14.36	12.82	14.76	13.41
<b>MK 5%</b>	13.19	11.66	11.73	11.52	12.89	15.08	14.39	13.39	12.98
<b>MK 7%</b>	12.48	13.82	9.98	12.27	10.94	13.26	13.54	12.85	12.39
<b>PL SC 10%</b>	16.66	15.88	20.15	19.64	19.78	19.09	20.97		18.88
<b>PL SC 20 %</b>	12.41	10.08	13.42	12.20	11.64	11.56	12.72		12.00
<b>PL SC 30 %</b>	9.02	8.15	8.68	10.48	10.45	8.28			9.18
							PROMEDIO TOTAL		13.21

Los resultados de la tabla están expresados en porcentaje (%).

**Tabla 12. Porcentaje obtenido para la prueba de Modulo de Ruptura respecto a la compresión.**

Revisando el análisis de la prueba de tensión, comparando con la prueba de compresión donde se toma como un buen resultado el 10% de esta prueba, podemos notar claramente que para la mayoría de las adiciones se cumple esta recomendación, excepto para el porcentaje PL SC 30% los cuales están por debajo en la mayoría de las edades de prueba, incluso en el promedio de todas, pero en general se puede tomar como resultados positivos para esta prueba en nuestros morteros.

### 6.4.- Resultados de la Densidad en Cubos.



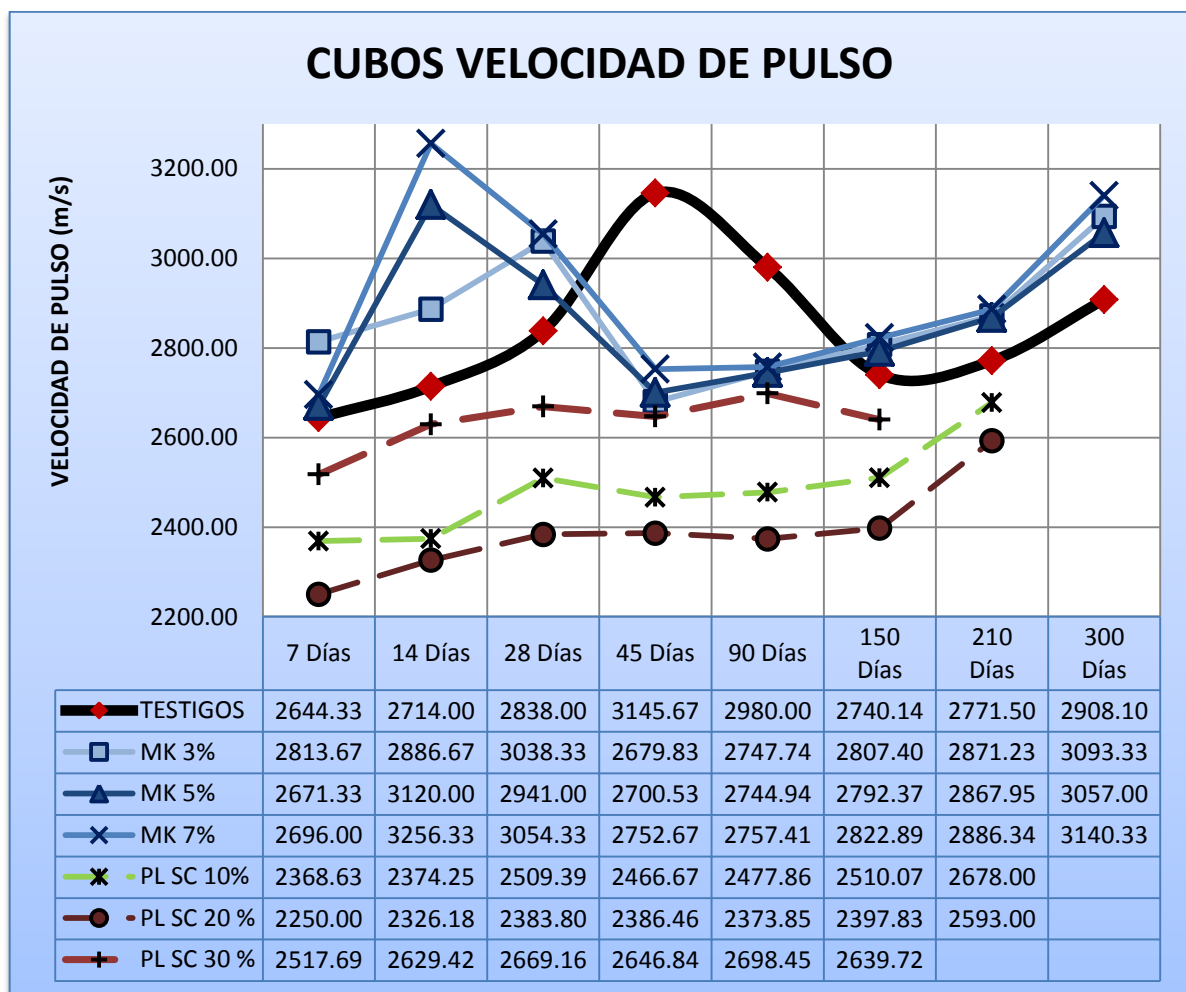
**Ilustración 88. Resultados de la Prueba de la Densidad en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

En cuanto a esta prueba no destructiva se obtuvieron para nuestra adición de MK en nuestros tres porcentajes, resultados muy parecidos a nuestro mortero testigo, teniendo resultados un poco mas variables para nuestras edades de 14, 28 y 45 días en nuestro mortero testigo, para nuestros tres porcentajes de MK los resultados se mantienen muy constantes y parecidos. Donde sí ocurre una disminución considerable es para el caso del poliestireno donde la adición de este material impacta de manera considerable en la pérdida de disminución de la densidad, haciendo más ligeros nuestros morteros por la sustitución del agregado, aquí cabe destacar que dicha disminución se presenta en mayor rango para el



porcentaje de PL SC 20%, siendo que se esperaba ocurriera en el porcentaje de PL SC 30% por ser nuestro mayor porcentaje de sustitución, sin embargo como se utilizo un porcentaje mayor de fluidificante, este aditivo ayudo a que nuestros cubos quedaran menos porosos, incluso presentando un peso húmedo mayor que los del porcentaje PL SC 20%. De acuerdo con los datos obtenidos en esta prueba podemos concluir que nuestro porcentaje en adición menos porosa es el MK 7%, el porcentaje de adición con más porosidad el PL SC 20%.

**6.5.- Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico en Cubos.**

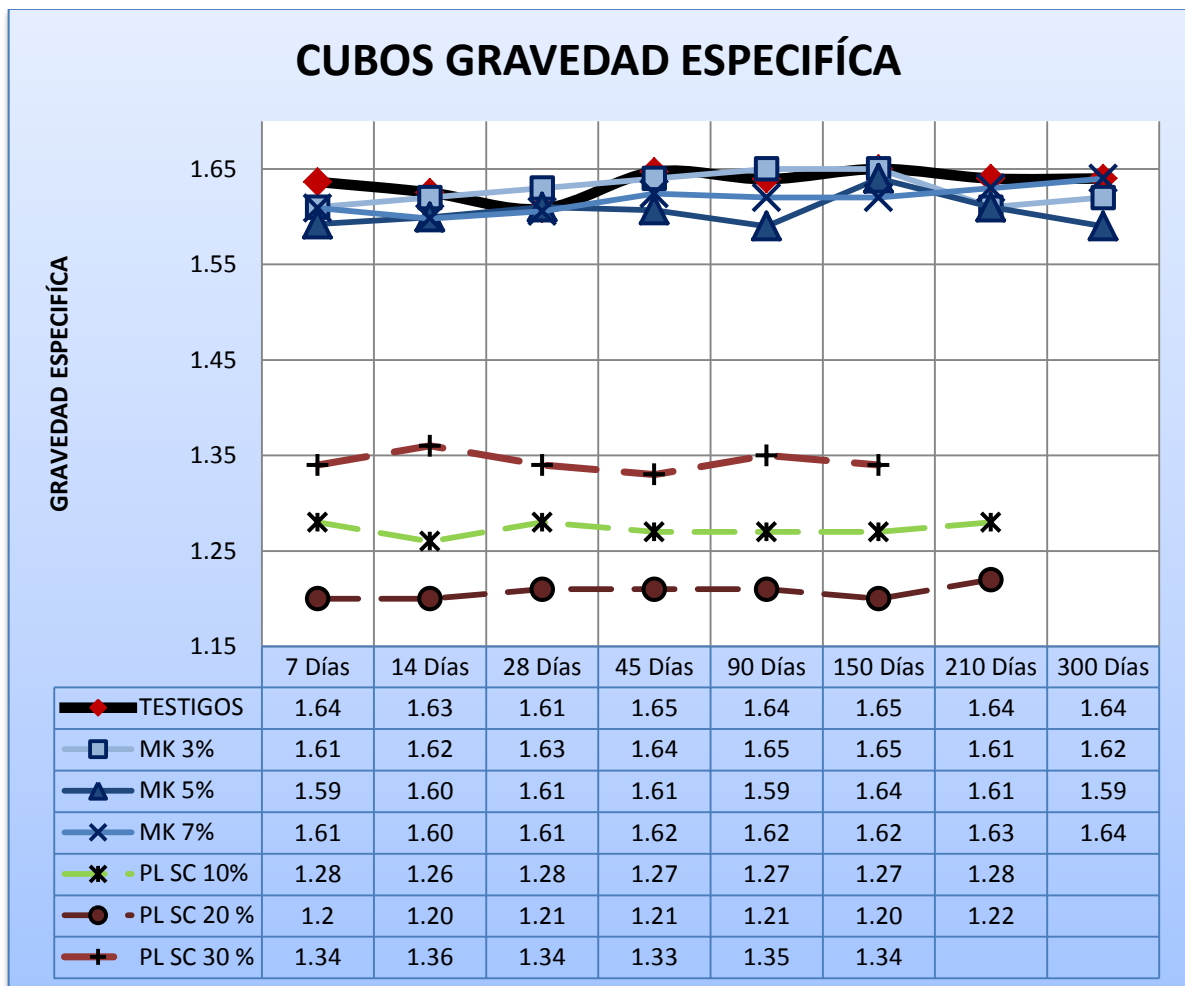


**Ilustración 89. Resultados de la Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**



Para el caso de la velocidad de Pulso, los resultados obtenidos nos dan una referencia de los resultados obtenidos en la compresión, teniendo mayores rangos para la adición del MK en sus tres porcentajes, siendo para el caso del poliestireno el porcentaje de PL SC 30% el de mejores resultados, aunque los tres porcentajes por debajo del mortero testigo. Podemos observar que existe una caída a partir de la edad de 45 días para los testigos, así mismo para las adiciones de MK a la edad de 14 días, sin embargo esto se debe al cambio de aparato causado por la descompostura del mismo, sin embargo a partir de este suceso, como es notorio en los tres porcentajes de poliestireno, la velocidad de pulso va en aumento con la edad de prueba, comportamiento también visible en los porcentajes de MK a partir de la edad de 45 días, donde se da también que superan al testigo como ocurre con la resistencia a compresión, siendo el MK 7% el de mayor resultado, como podemos notar esta prueba se puede correlacionar con la resistencia a compresión. También podemos concluir que al adicionar esferas de poliestireno a nuestro mortero la velocidad disminuye, ya que hay más oposición del desplazamiento de onda a través del espécimen provocado por el poliestireno, un material que se opone a la conductividad, motivo por el cual los resultados están por debajo del mortero testigo.

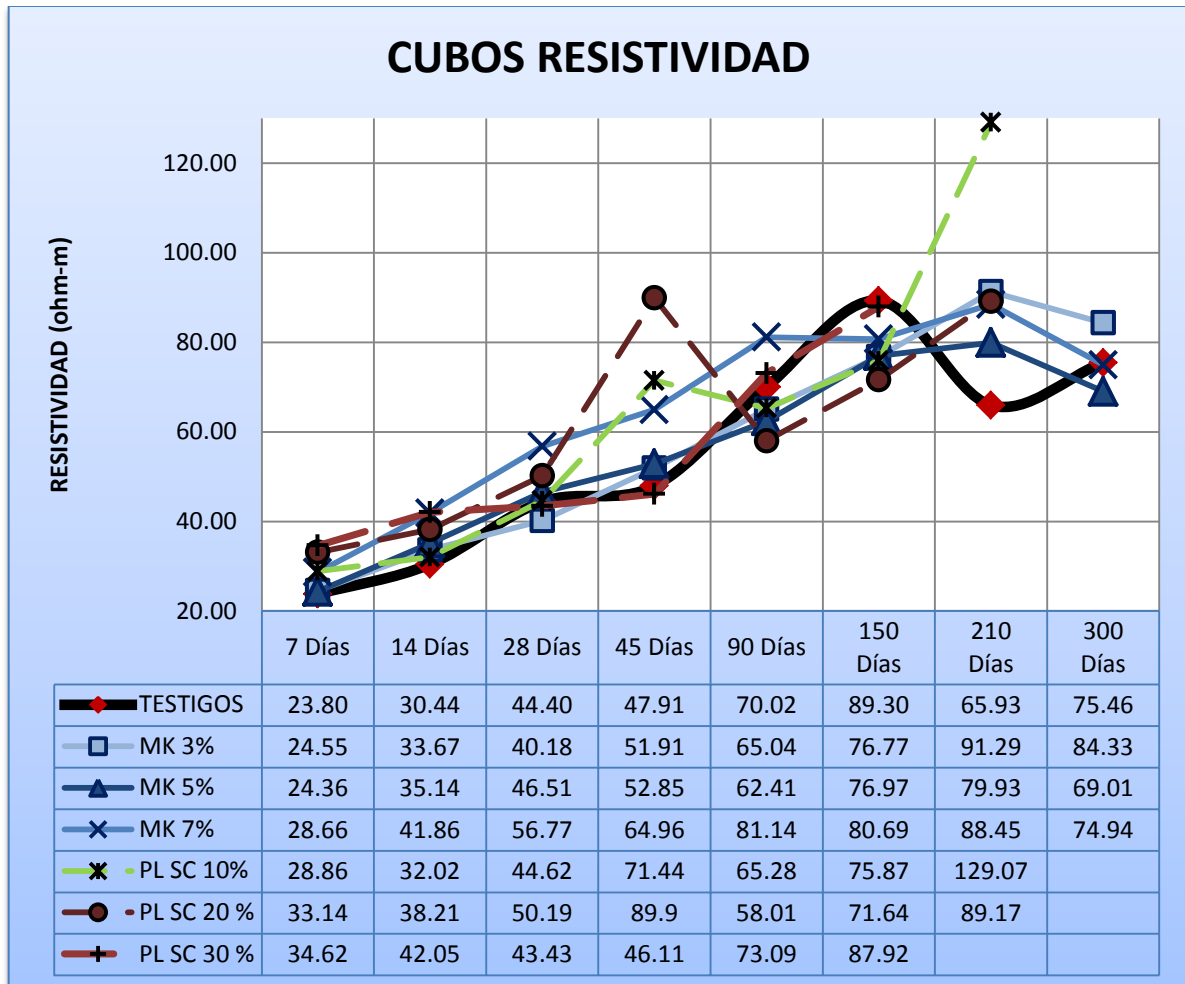
6.6.- Resultados de la Gravedad Específica en Cubos.



**Ilustración 90. Resultados de la Prueba de Gravedad Específica en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

Los resultados obtenidos para esta prueba, tenemos que para ambas adiciones se encuentra por debajo de nuestro mortero testigo, para el caso del MK muy cercanas al testigo siendo el MK 5% el que logra bajar un poco más la gravedad específica, en cuanto al poliestireno, ocurre una disminución considerable, esto debido a la pérdida de densidad, a que nuestros especímenes quedan más porosos, se ve reflejado en los resultados, siendo el PL SC 20% el porcentaje con valor más bajo, el mismo que en varias pruebas se ha comportado con los resultados más bajos en cuanto a los rangos presentados en cada prueba.

### 6.7.-Resultados de la Resistividad en Cubos.

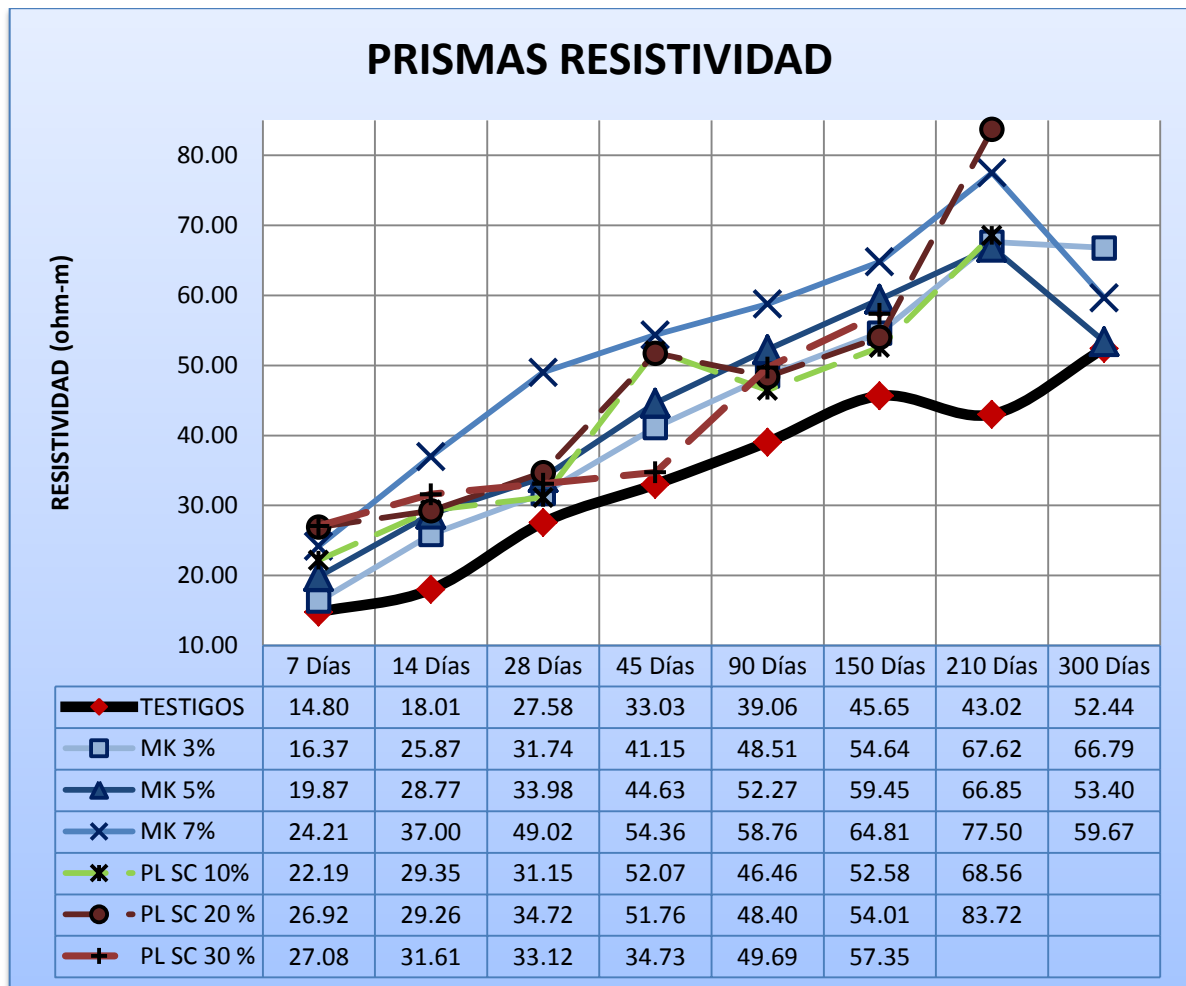


**Ilustración 91. Resultados de la Prueba de Resistividad en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

Los resultados presentados por esta prueba son un poco sorprendentes para el caso del poliestireno, se puede notar que todos los porcentajes de ambas adiciones están en la mayoría de edades por encima de los valores obtenidos para nuestro mortero testigo, ocurren muchos saltos. Para el caso del MK los resultados son más esperados, debido a que esta adición ayuda a que nuestra matriz del espécimen quede menos porosa, ayudado con la reacción química que provoca reducir poros en nuestro espécimen; pensando esto se contradice con el poliestireno el cual nos ayuda a que nuestra matriz quede más porosa, sin

embargo como este material es un aislante, un material inerte que evita la exista conductividad, puede que se comporte como una barrera por lo cual los resultados son incluso mucho mayores que los obtenidos en los porcentajes de MK para varias edades.

### 6.8.- Resultados de la Resistividad en Primas.

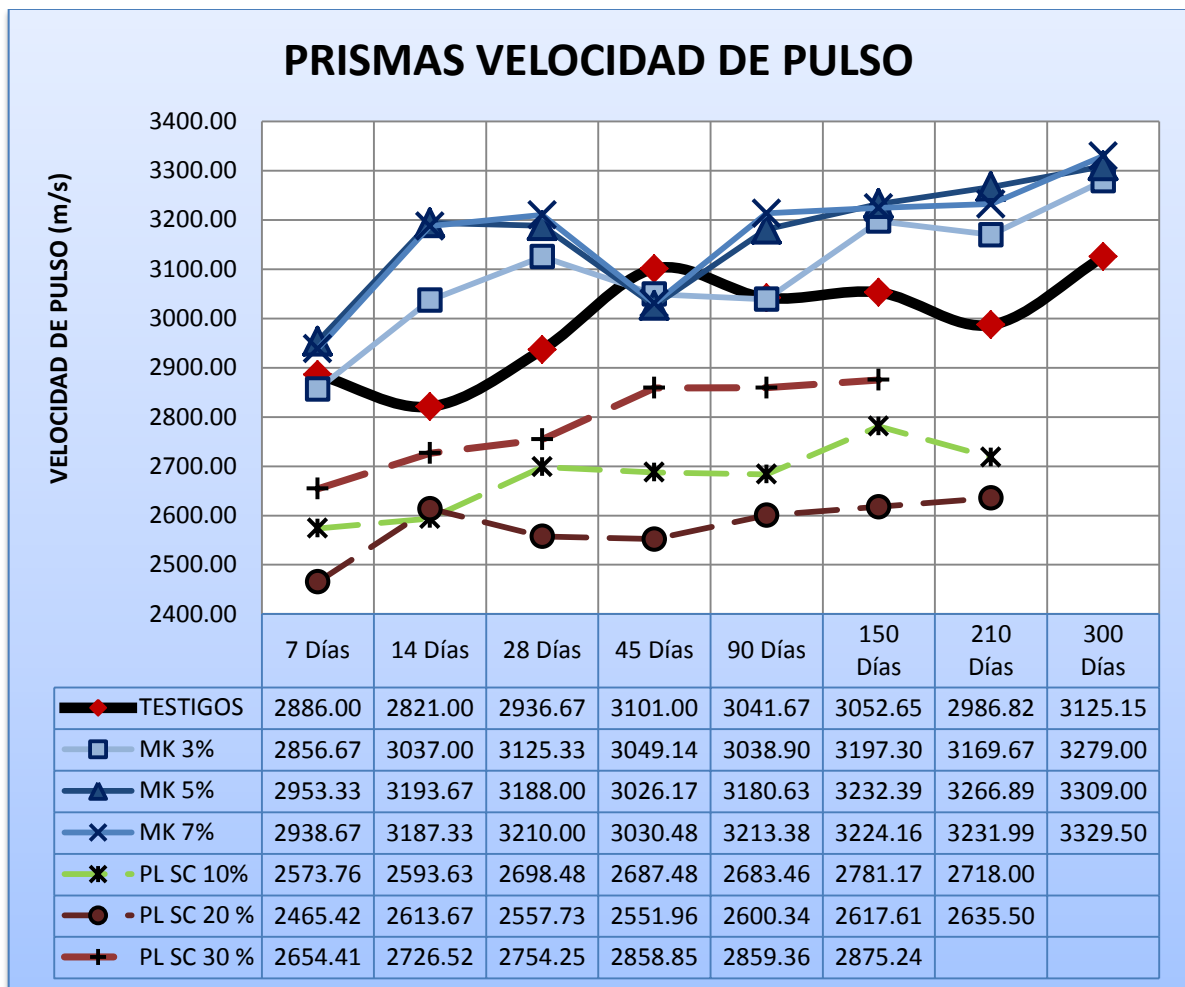


**Ilustración 92. Resultados de la Prueba de Resistividad en prismas para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

Para el caso de los prismas el comportamiento es mucho más homogéneo, aquí se nota inmediatamente que los resultados obtenidos para ambas adiciones en sus tres porcentajes son mayores que nuestro mortero testigo, al igual que en cubos sorprendiendo los resultados obtenidos para la adición del poliestireno, sin embargo podemos tomar como

referencia el que es un material utilizado como aislante, que evita la conductividad por lo que sus resultados de resistividad son altas, aun así descartando que la matriz sea muy porosa, pero también cabe recordar que el uso del fluidificante nos ayuda para que esta matriz quede aun menos porosa, ambas situaciones se pueden ver beneficiadas en los resultados presentados, Aquí también podemos notar que el rango de valores más altos es para el caso del MK 7%, comportamiento mucho más estable y en aumento conforme la edad de prueba avanza.

### 6.9.- Resultados de la Velocidad de Pulso Ultrasónico en Prismas.



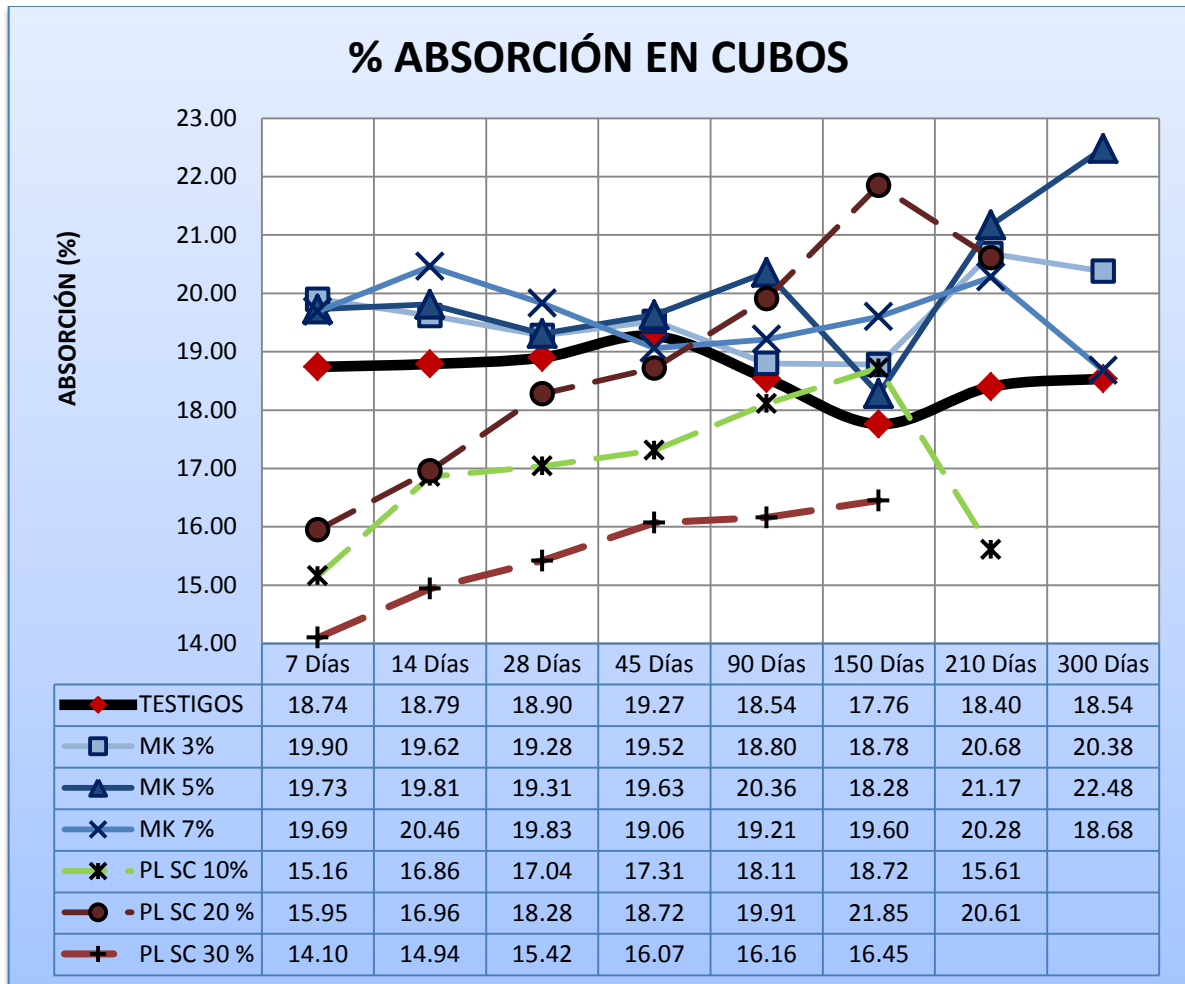
**Ilustración 93. Resultados de la Prueba de Velocidad de Pulso Ultrasónico en prismas para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**



Los resultados obtenidos para la velocidad de pulso en prismas nos muestran de nueva cuenta una tendencia a los ya vistos en cubos, correlacionándolos con los obtenidos en la compresión. Ese mismo comportamiento lo notamos inmediatamente en los prismas, siendo el porcentaje de MK 7% el de rango más alto por encima de nuestro testigo, el mismo que obtuvo mejores resultados para la prueba de flexión, también se nota rápidamente que los tres porcentajes de poliestirenos están por debajo de nuestro mortero testigo, siendo el PL SC 30% el que se acerca más a los rangos del mortero testigo, son embargo no logra superarlo para ninguna edad; el comportamiento en general para esta prueba es de ascenso en los valores conforme va aumentando la edad, el bajón presentado a la edad de 45 días como ya se explico anteriormente fue debido al cambio de aparato por descompostura de este.



### 6.10.- Resultados del Porcentaje de Absorción en Cubos.

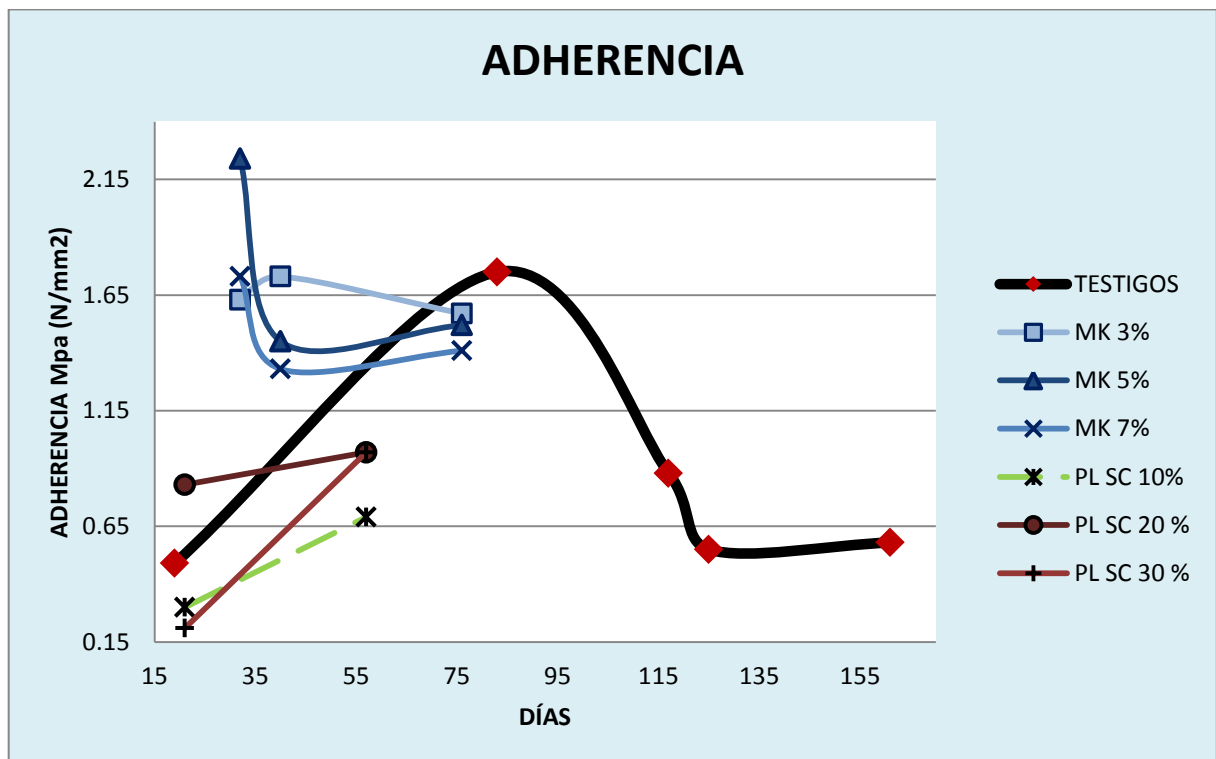


**Ilustración 94. Resultados de la Prueba de Porcentaje de Absorción en cubos para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

Aquí los resultados obtenidos realmente no son los esperados, la tendencia presentada en general es que conforme aumenta la edad de prueba, nuestros especímenes aumentan el porcentaje de absorción, sin embargo este comportamiento va respaldado con los resultados obtenidos para la masa húmeda de cada edad, siendo notorio que conforme la edad de prueba avanza este peso aumenta, así mismo la pérdida de humedad para obtener nuestra masa seca y obtener nuestro porcentaje de absorción se mantiene constante, logrando así este comportamiento en ascenso del porcentaje de absorción conforme

aumenta la edad, otro motivo importante a considerar es que nuestras muestras se mantienen constantes a una temperatura y siempre curadas por inmersión, condiciones lo más parecido a las ideales, motivo por el cual nuestra masa húmeda se mantiene en progresivo aumento conforme avanza el tiempo.

### 6.11.- Resultados de la prueba de Adherencia.



**Ilustración 95. Resultados de la Prueba de Adherencia para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**



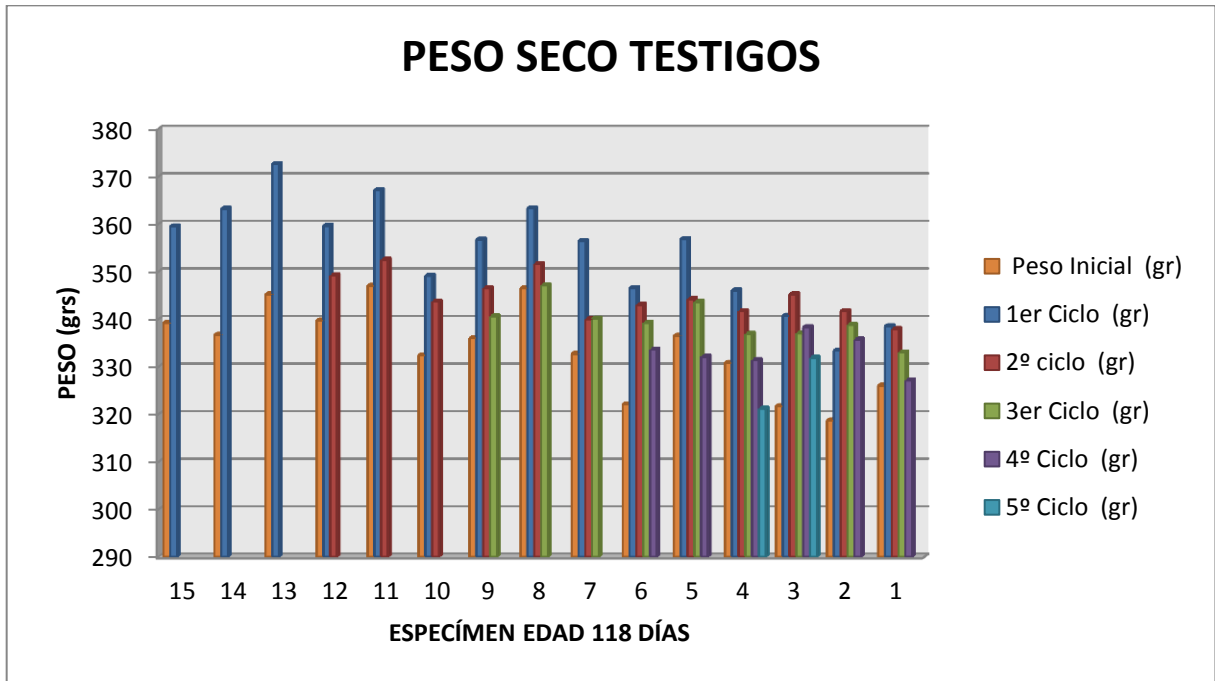
Días	19	83	117	125	161
<b>TESTIGOS</b>	0.49	1.75	0.88	0.55	0.58
<b>Días</b>	<b>32</b>	<b>40</b>	<b>76</b>		
<b>MK 3%</b>	1.63	1.73	1.57		
<b>MK 5%</b>	2.24	1.45	1.52		
<b>MK7 %</b>	1.73	1.33	1.41		
<b>Días</b>	<b>21</b>	<b>57</b>			
<b>PL SC 10%</b>	0.30	0.69			
<b>PL SC 20 %</b>	0.83	0.97			
<b>PL SC 30 %</b>	0.21	0.97			

**Tabla 13. Resultados de la Prueba de Adherencia para las adiciones de Metacaolín y Poliestireno.**

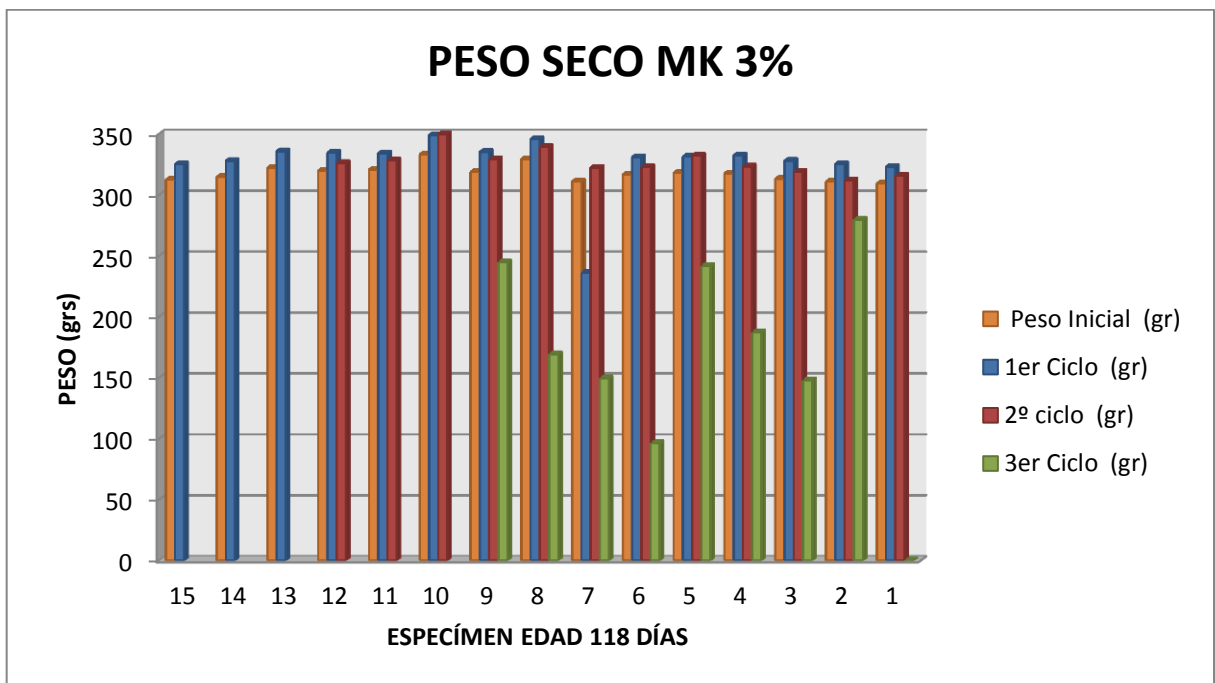
Para la realización de esta prueba se presentaron un poco de complicaciones, motivo por el cual nuestras edades de prueba no coinciden de entrada, así mismo se obtuvieron pocos datos debido a que no se contaba con el equipo un largo periodo de tiempo, dejando de lado las circunstancias presentadas, se obtuvieron resultados positivos para ambas adiciones presentando mejores resultados en general comparados con nuestra mezcla de adherencia de mortero tradicional para el caso de nuestra adición de MK presentando los rangos más altos, para el caso del poliestireno obteniendo rangos menores pero un poco por encima de la mezcla testigo.

#### **6.12.- Resultados de la prueba de Ataque por Sulfatos.**

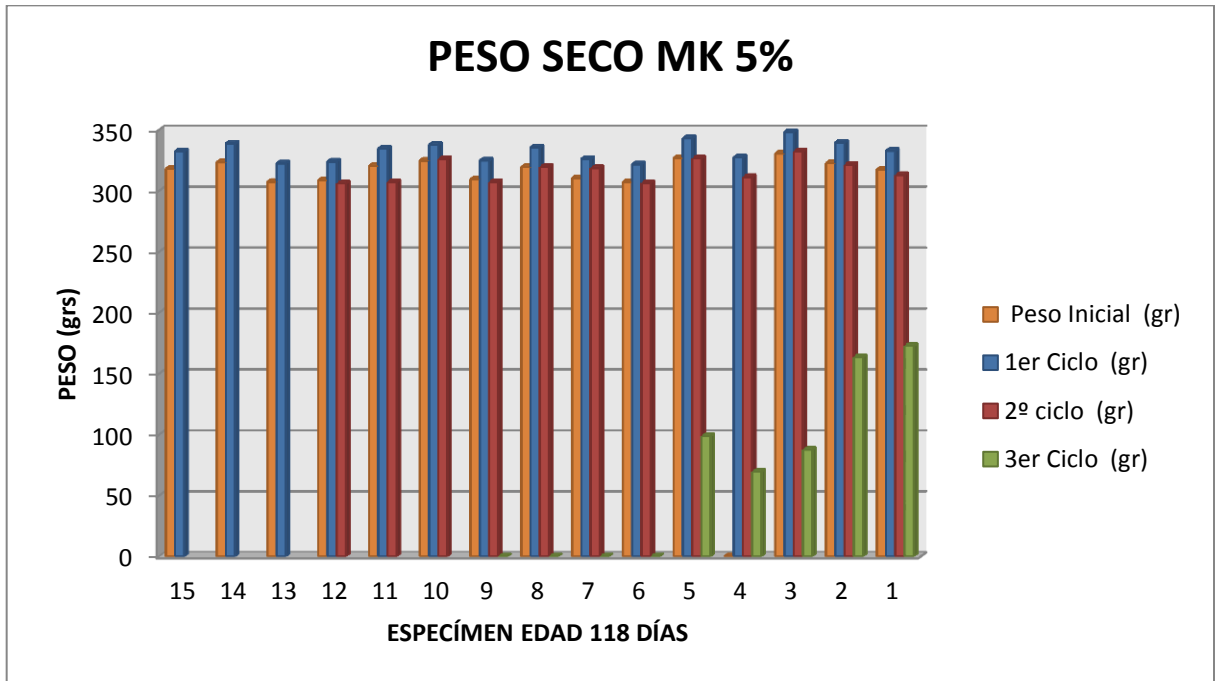
La forma de presentar los resultados para esta prueba será primeramente mediante el grafico de la evolución de los pesos secos obtenidos después del término del periodo para cada ciclo de secado, seguidos al finalizar la grafica y tabla resumen de la prueba a la compresión para ambas adiciones y testigos.



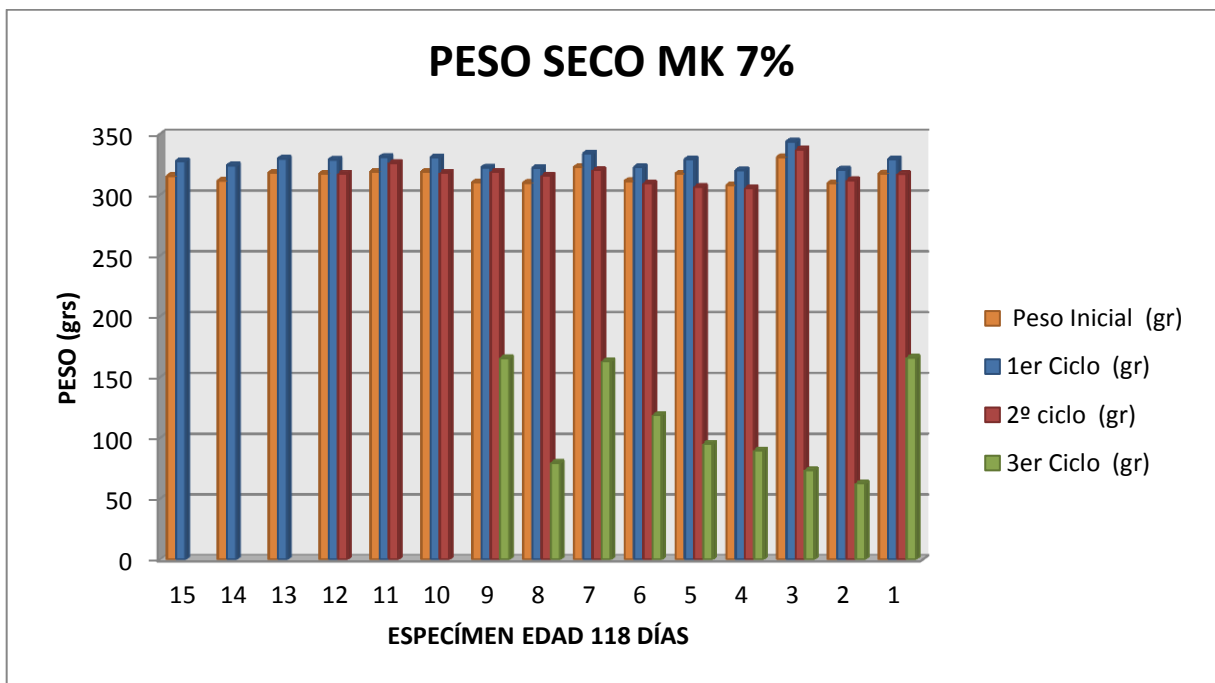
**Ilustración 96. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en los Testigos.**



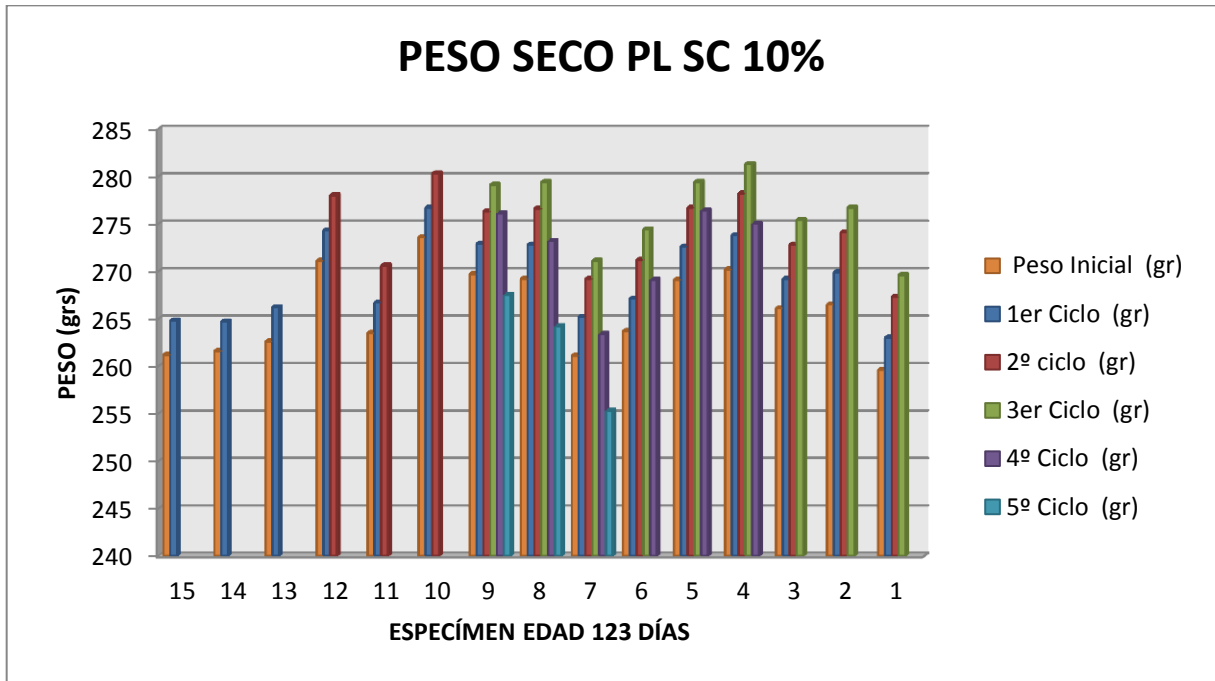
**Ilustración 97. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del 3% de Metacaolín.**



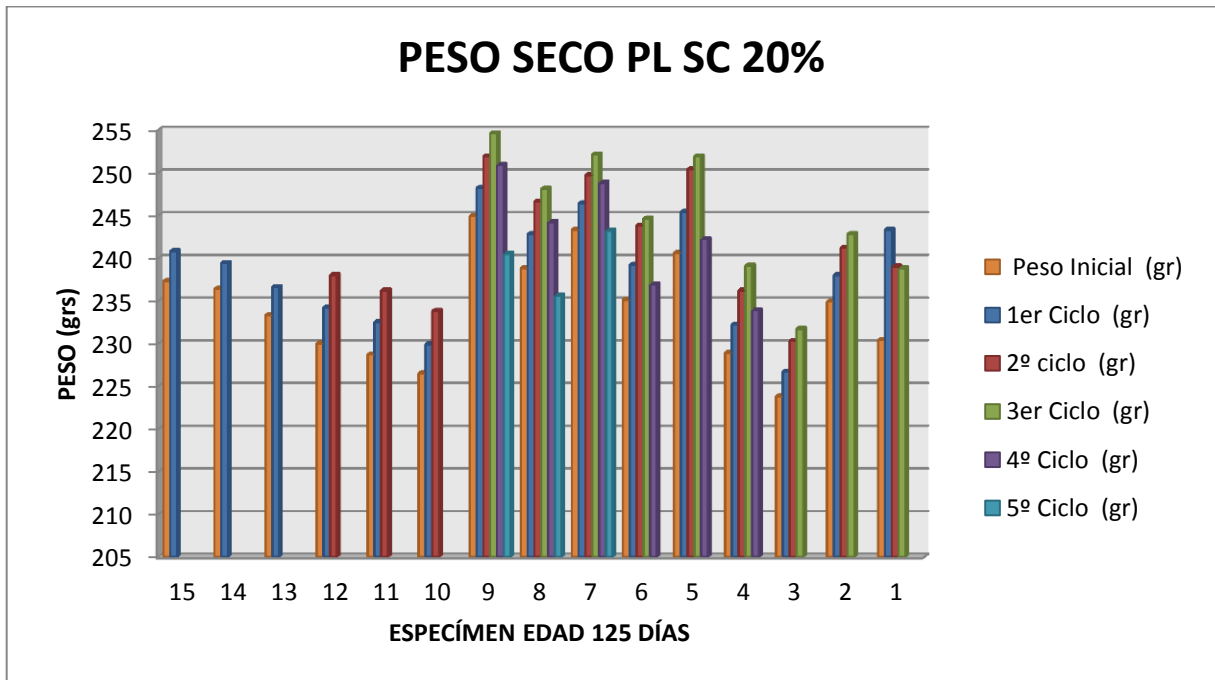
**Ilustración 98. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del 5% de Metacaolín.**



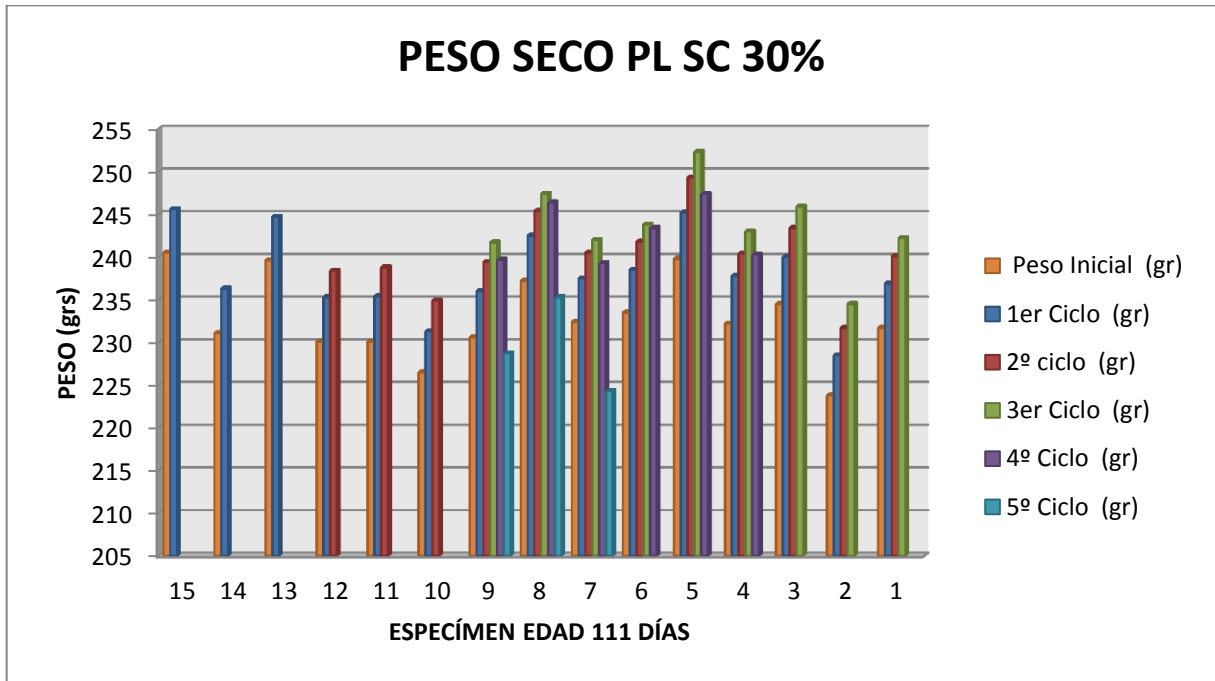
**Ilustración 99. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del 7% de Metacaolín.**



**Ilustración 100. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del poliestireno para sustituir el 10% del agregado.**

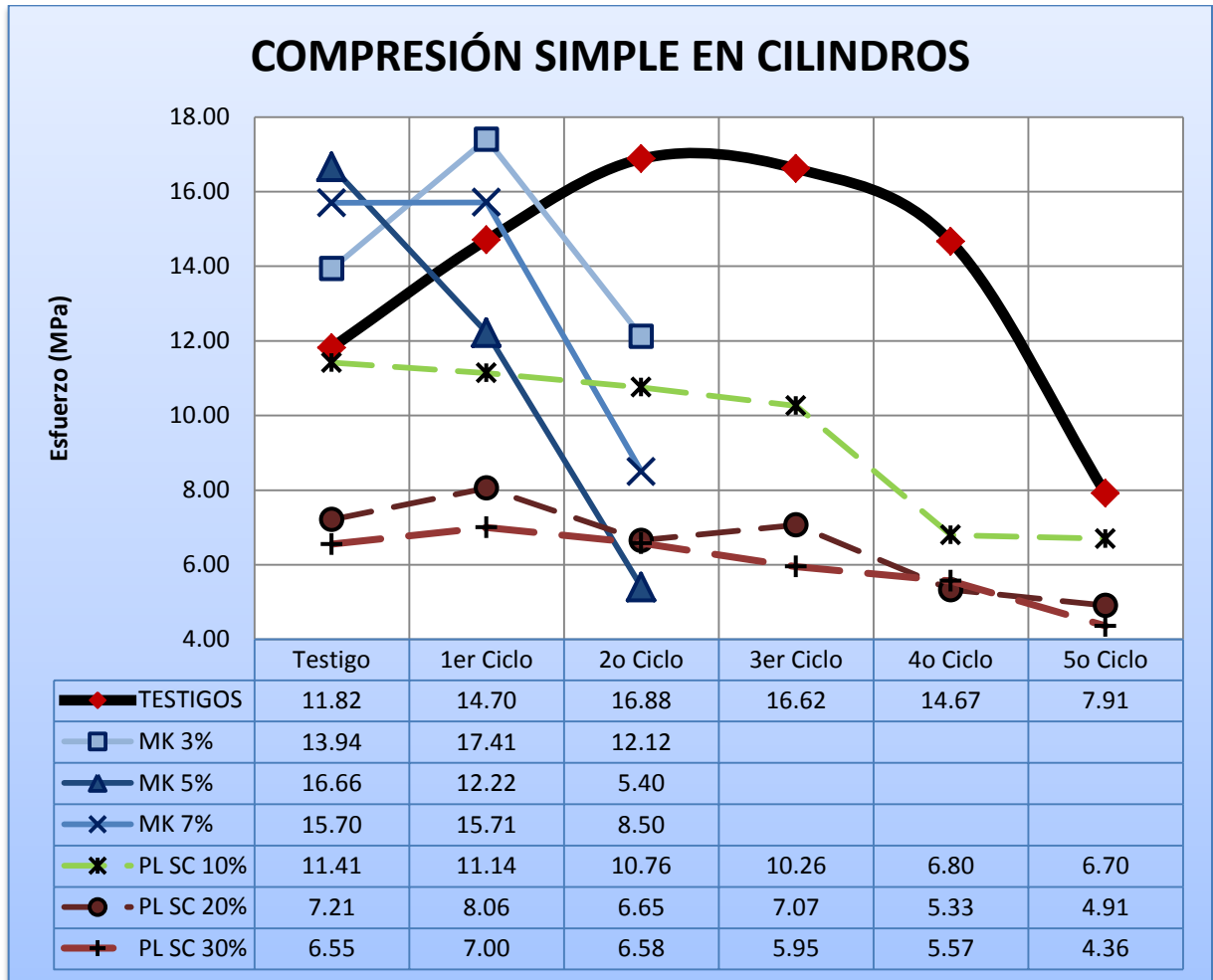


**Ilustración 101. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del poliestireno para sustituir el 20% del agregado.**



**Ilustración 102. Resultados del peso seco para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en la adición del poliestireno para sustituir el 30% del agregado.**





**Ilustración 103. Resultados de la prueba a la Compresión en Cilindros para los ciclos de la Prueba de Ataque por Sulfatos en las adiciones de Metacaolín, Poliestireno y Testigos.**

Los resultados de esta prueba de durabilidad obtenidos para el caso de nuestros testigos, los cuales resistieron los 5 ciclos de prueba, en la grafica del peso se muestran un comportamiento en forma ascendente y posteriormente descendente, es decir al someterlos al primer ciclo viene un incremento en peso por la saturación de sulfato en los poros, logrando así un aumento en el peso, aumento que conforme avanzan los ciclos viene disminuyendo hasta lograr incluso estar por debajo del peso inicial antes de ser sumergidos a los ciclos de ataque, esto debido a la degradación presente conforme se sometían a los



ciclos de prueba, cabe señalar que este comportamiento se presentó tanto para la adición de MK como para la del poliestireno en todos los porcentajes de prueba.

El comportamiento de los testigos en la prueba de compresión ocurrió parecido al del peso seco, un aumento y luego un decremento, dicho aumento hasta el segundo ciclo, ya a partir del tercero vino un descenso logrando un descenso incluso por debajo de nuestra carga inicial hasta el quinto y último ciclo de prueba, puede concluirse que para el caso de los morteros testigos los resultados son óptimos, un comportamiento muy bueno durante el desarrollo de la prueba, solo destruyéndose 2 de los especímenes, teniendo que el uso de cementos resistentes a los sulfatos son adecuados para combatir este problema presentado en la durabilidad del concreto.

Para el caso de los tres porcentajes del Metacaolín, como se comentó en los testigos el comportamiento para el peso seco es de aumento al inicio del ciclo, de pérdida conforme aumentan los ciclos de prueba, aquí cabe destacar que los tres porcentajes de MK no resistieron los cinco ciclos de la prueba, resistiendo solo dos ciclos de esta, aquí se podría esperar como lo menciona en la literatura un comportamiento diferente, ya que este mineral nos ayuda a mejorar la durabilidad, sin embargo debido a que este mismo mineral nos ayuda a que nuestra matriz de resistencia sea menos porosa, la muestra al ser sometida a condiciones extremas de humedad y secado, es saturada al ser sumergida en la solución, luego posteriormente al pasarla al ciclo de secado sufre el fenómeno de la expansión de la solución de sulfatos provocando que el espécimen truene debido a que es menos poroso en su estructura interna, tiene menos campo para resistir esta expansión por lo cual hace que nuestros especímenes se desintegren de manera rápida, fenómeno que se presentó pelándolos como si tuvieran cascara a partir del primer ciclo. En el tercer ciclo al sacarlos de la solución fue ya imposible porque se presentaba la desintegración de todos los especímenes motivo por el cual se concluyó la prueba en este ciclo. En cuanto a la prueba de compresión el comportamiento fue en descenso inmediatamente a partir del resultado inicial para los porcentajes del 3% y 5%, solo para el caso del 7%, hubo un aumento pero enseguida vino la caída drástica e incluso debajo del resultado inicial. Como conclusión general el comportamiento de la adición del Metacaolín en la prueba no fue bueno, no



soportando los ciclos de prueba y afectando de manera importante en la resistencia a la compresión.

Para el caso de los tres porcentajes de poliestireno se presentó una evolución muy similar a los testigos en cuanto al peso seco, el aumento y decremento, nada más donde los resultados variaron fue en la resistencia a la compresión donde inmediatamente pasando el primer ciclo la curva de resistencia vino en decremento siendo en el tercer ciclo donde incluso se rebasó el resultado inicial para todos los porcentajes, aquí cabe destacar que en cuanto a degradación de las especímenes a través de los ciclos de la prueba fue el menos afectado, incluso ninguno de los especímenes fue destruido, el comportamiento de manera general para esta adición fue buena, esto se pudo deber a que la matriz al ser más porosa tenía más espacio para el desarrollo de la expansión, motivo por el cual no se vio afectado de manera significativa en la destrucción de los especímenes, sin embargo el comportamiento en la resistencia a la compresión no fue tan ideal como en los testigos. A diferencia de lo ocurrido con los cubos a compresión aquí sí se obtuvo mejores resultados para el porcentaje del 10% de sustitución de arena, caso contrario a lo ocurrido en los cubos donde el de mejores resultados fue el del 30%.

De manera global los resultados obtenidos en esta prueba nos ayudan a conocer el comportamiento de un cemento resistente a los sulfatos, el cual ayuda de manera importante a resistir el ataque, esto corroborándolo con investigaciones previas hechas en el laboratorio, donde se utilizaron cementos sin esta característica que no lograron soportar los ciclos de prueba, así mismo notamos como conforme avanza la prueba el sulfato va ocupando y saturando los poros de nuestras probetas, degradándolas poco a poco, viéndose reflejados en la disminución de resistencia ya que vuelve más frágil nuestra matriz de soporte.



## 7.- CONCLUSIÓN

Con los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a los morteros para ver su desempeño, como benefician o decrecen las sollicitaciones físico-mecánicas a las que fueron expuestos, podemos concluir que la utilización del Metacaolín trae grandes beneficios a las pruebas mecánicas, actúa como una adición que ayuda a mejorar la resistencia a la compresión, tensión, flexión, y cortante; así mismo nos ayuda a reducir la cantidad de poros en nuestra matriz resistente. Siendo el porcentaje del MK 7% el que de manera global tiene mejor desempeño en la investigación, teniendo presente que es un material costoso, además de lograr beneficio significativos con el porcentaje más bajo, el del 3% podemos recomendar usarlo también como un buen medio para incrementar nuestra resistencia.

En cuanto a la adición del poliestireno en los resultados obtenidos se busco equilibrar esa perdida en peso por la reducción de resistencia, se tuvo que modificar nuestra relación agua cemento, ayudarse del fluidificante para lograr este equilibrio, el cual sin embargo no fue del todo posible, sin embargo uno de los principales objetivos era el de aligerar nuestro elemento con el cual se logra de manera significativa al sustituir el agregado por las esferas poliméricas, que nos ayuda a ocupar mayores volúmenes dentro del espécimen. Nuestro porcentaje de manera global con los rangos más bajos es el PL SC 20%, logrando que nuestro porcentaje PL SC 30% tuviera mejores resultados sobre todo a compresión por utilizar en un porcentaje más alto nuestro fluidificante, logrando así que nuestra matriz resistente fuera menos porosa por lo que se vio reflejado en los resultados obtenidos.

Durante el desarrollo de la experimentación y con el uso de las pruebas no destructivas nos percatamos que van mucho de la mano con los resultados obtenidos en las sollicitaciones mecánicas, así mismo estas nos ayudan a predecir como son internamente nuestras muestras, como van saturándose esos vacíos internos con ayuda del paso del tiempo y las reacciones que ocurren internamente para ir mejorando la resistencia de nuestro espécimen, logrando también siempre mejoras conforme la edad va avanzando. El uso de estas pruebas es una herramienta fundamental para conocer que adición nos arroja mejores resultados, así mismo que nos ayudan a predecir el porqué de los resultados obtenidos.



## 8.- BIBLIOGRAFÍA

ANTONIO MIRAVETE DE MARCO; EMILIO LARRODE PELLICER; LUIS CASTEJON HERRER. (200). *MATERIALES COMPUESTOS I*. Zaragoza: MIRAVETE DE MARCO, ANTONIO.

ASTM C 109M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*1. Estados Unidos.

ASTM C 1583. (2004). *Standard Test Method for Tensile Strength of Concrete Surfaces and the Bond Strength or Tensile Strength of Concrete Repair and Overlay Materials by Direct Tension (Pull-off Method)*. Estados Unidos.

ASTM C 293. (2002). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)*. Estados Unidos.

autor, S. (s.f.). Morteros. *Biblioteca Digital IMCYC* , 395-412.

autor, S. (s.f.). Morteros. *Biblioteca Digital IMCYC* , 49-60.

Donoso, J. P. (2009). Aditivo para Concreto Elemix. *EMB Construcción* .

Hernández, S. d. (2013). *Tesis: "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"*. Morelia.

Institute, A. C. (2002). *Manual para Supervisar Obras de Concreto ACI 311-99*. México, D.F.: IMCYC.

Instituto del Concreto. (1997). *"Manual Tecnología y Propiedades"* (Tercera reimpresión ed.). (A. c. ASOCRETO, Ed.) Colombia.

J. Iván Escalante, A. Navarro, L. Y. Gómez. (2011). Caracterización de morteros de cemento portland substituido por metacaolín de baja pureza. *Revista ALCONPAT* , 156-169.



M. en I. Luis Rocha Chiu, M. en I. Jesus Antonio Flores Bustamante, M. en C Francisco Gonzalez Diaz. (s.f.). OPTIMIZACION DE MEZCLAS DE CONCRETO LIGERO ESTRUCTURAL. *Biblioteca Digital IMCYC* , 9-14.

María Cinta Vicent Vela, Silvia Alvarez Blanco y José Luis Zaragozá Carbonell. (2006). *Libro Principales Polímeros Comerciales*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

MARIA CINTA VICENT VELA; SILVIA ALVAREZ BLANCO; JOSE LUIS ZARAGOZA CARBONELL. (2006). *CIENCIA Y TECNOLOGIA DE POLIMEROS*. UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA.

NMX-C-061. (2010). *Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos*. MEXICO: ONNCCE.

NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la construcción – agua para concreto – especificaciones*.

NMX-C-148. (2010). *Curado de Especímenes*. MEXICO: ONNCCE.

NMX-C-414-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción-Concreto-Concreto Hidráulico Industrializado-Especificaciones*. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción S.C.

Reyes, C. B. (2012). *Tesis: “Adiciones Minerales De Alta Temperatura A Morteros De Cemento Como Modificadores De Comportamiento Físico-Mecánico”*. Morelia.

S., J. F. (1991). REVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS. *Biblioteca Digital IMCYC* , 26-29.

Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, William C. Panarese, y Jussaraet. (2004). *Diseño y Control de Mezclas*. Portland Cement Association (PCA).

ASTM C 188, I. (1995). Standard test method for Density of Hydraulic Cement. Estados Unidos de America.



ASTM C 33, I. (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates. Estados Unidos de America.

ASTM C 469. (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. Estados Unidos.

ASTM C 511. (2003). Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. Estados Unidos.

NMX-C-061. 2010. Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos. MEXICO: ONNCCE, 2010.

NMX-C-061-ONNCCE-2010. 2010. INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-CEMENTO HIDRAULICO-DETRMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CEMENTATES HIDRAULICOS. MÉXICO: ONNCCE, 2010.

NMX-C-109. 2010. Determinación del Cabeceo de los Especímenes. México: ONNCCE, 2010.

NMX-C-122-ONNCCE. 2004. Industria de la construcción – agua para concreto – especificaciones. 2004.

NMX-C-403-ONNCCE. 1999. Industria de la construcción – concreto-hidráulico para uso estructural. 1999.