

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
ESCUELA DE POSGRADO



**INFLUENCIA DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ARENAS Y CEMENTOS
PERUANOS EN EL DESEMPEÑO DE ADITIVOS PLASTIFICANTES PARA
CONCRETO**

Tesis para optar el grado de Magíster en Química que presenta:

LUIS JESÚS MIJAÍL SAMANIEGO ORELLANA

Dirigido por:

DR. MAYNARD JORGE KONG MORENO

San Miguel, 2018

RESUMEN

Los aditivos, presentes hace mucho tiempo en la tecnología de la construcción, pueden transmitir excelentes propiedades físicas y químicas, teniendo la capacidad de poder ser aplicados en muchos campos, para proporcionar nuevas funciones y características. Y esta es la razón por la cual, los últimos desarrollos en el campo de la construcción, están asociados con la evolución de estos aditivos, siendo necesarios para generar mezclas con alta resistencia a los sulfatos, con un contenido de aire óptimo, entre otras propiedades; manteniendo sin embargo hasta la actualidad como principal función, actuar como agente plastificante, dentro de las mezclas de concreto, retardando la pérdida del slump y de la fragua inicial, a través de complejas interacciones químicas.

Y es precisamente por este motivo, que cobra importancia esta investigación, titulada "Influencia de la composición química en los cementos y agregados peruanos, en el rendimiento de los aditivos plastificantes"; ya que de esta manera se puede saber, cómo las características de las principales materias primas del concreto, pueden determinar el rendimiento de los aditivos plastificantes, que se utilizan en ellas; ya que se podría pensar, que debido a sus marcadas características químicas, estos aditivos siempre mostrarán el mismo comportamiento, previsto por el fabricante; pero esta investigación demostrará, con los resultados de las pruebas realizadas a estas mezclas, que éstas generalmente varían, incluso con mínimos cambios en la composición del cemento y de los agregados (especialmente en las miles de partículas de arena), que lo componen.

Respecto a las arenas, notamos claramente la influencia de su módulo de finura, y de su contenido de arcillas (cuantificado por el método del azul de metileno), sobre el poder plastificante de los aditivos, y en la resistencia que obtendrán los morteros diseñados con ellos; ya que a menor M.F. y %Arcillas, el aditivo mostró una mayor intensidad plastificante dentro de los morteros, logrando que estos se vuelvan más fluidos por mayor tiempo, y con mejores resistencias.

Respecto a los cementos, se pudo observar, que aquellos con menor contenido de Alkalís y de Aluminato Tricálcico, maximizan el efecto de cada aditivo, ya que éstos presentaron una elevada intensidad plastificante en sus respectivos morteros; logrando que estos se vuelvan más fluidos y por mayor tiempo, además de que en ellos se obtuvieron las mayores resistencias; notándose claramente la influencia que presenta el tipo de cemento, en el comportamiento de los aditivos.

Y respecto a los aditivos, se pudo demostrar que el aditivo Naftalenosulfonato, es el que tiene mayor poder plastificante inicial, en casi todos los casos, salvo algunas excepciones; y el aditivo Policarboxilato en cambio, es el que mantiene por mayor tiempo su capacidad de mantener el slump, siendo el único que mantuvo la fluidez y trabajabilidad de cada mortero, por más de 120'.

Finalmente, luego de un análisis puntual por cada combinación, se hizo un análisis global de todo el Proyecto; obteniendo conclusiones lógicas, que se podrían aplicar a la vida real; verificando especialmente lo voluble y sensible a los cambios que es el concreto, y más aún los aditivos.

ABSTRACT

The additives, present a long time ago in the construction technology, can transmit physical and chemical properties, having the capacity to be applied in many fields, to offer new functions and characteristics. And this is the reason why, the latest developments in the field of construction, are associated with the evolution of these additives, and are needed to generate, with the resistance to high resistance to sulfates, with an appropriate content, among other properties; maintaining the embargo to date as the main function, act as a plasticizing agent, within concrete mixtures, return to the loss of the settlement and the initial force, through complex chemical interactions.

Precisely for this reason, that this research becomes important, entitled "Influence of chemical composition in Peruvian cements and aggregates, in the performance of plasticizers additives"; since in this way it is possible to know, how the characteristics of the main raw materials of the concrete, can determine the performance of the plasticizing additives, which are used in them; It could already be thought that due to its marked chemical characteristics, these additives will always show the same behavior, foreseen by the manufacturer; but this research shows, with the results of the tests carried out on these mixtures, that it traditionally varies, even with changes in the composition of the cement and the aggregates (especially in the miles of sand), which compose it.

Regarding the sands, we clearly noticed the influence of its modulus of fineness, and its content of clays, on the plasticizing power of the additives, and on the resistance that the mortars obtained with them; since at a lower M.F. and % Clays, the additive showed a greater plasticizing intensity within the parameters, achieving that these become more fluid for a longer time, and with better resistances.

Regarding the cements, it could be observed that those with a lower content of Alkalis and Tricalcium Aluminate, maximize the effect of each additive, since they come with a great plasticizing intensity in their respective mortars; achieve that these become more fluid and longer, in addition to which they obtained the greatest resistance; The influence of the cement type on the behavior of the additives is clearly noted.

And with regard to additives, it could be demonstrated that the additive is the one with the greatest initial plasticizing power, almost all cases, with some exceptions; and the additive Polycarboxylate in the change, is the time that maintains to maintain the volume, being the only one that maintains the fluidity and the workability of each mortar, for more than 120'.

Finally, after a punctual analysis for each combination, a global analysis was made to do the Project; obtaining logical conclusions, which can be applied to real life; verifying especially the fickle and sensitive to the changes that is the concrete, and even more the additives.

A Dios

A mi madre Semorina

A mi padre Luis Alberto

A mis abuelitos

A BASF Chemical Construction

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios Todopoderoso, por darme la fuerza necesaria para poder concluir satisfactoriamente esta etapa de mi vida, la gran Maestría en Química; y a la Virgen María, por rogar por mí en cada momento.

Agradezco a mi madre Semorina, por ser mi principal motivación, por siempre darme fuerzas para seguir, y por confiar siempre en mí; y a mi padre Luis Alberto, a mi abuelita Belsa, y a mis otros abuelitos, porque desde el cielo siempre me protegen y cuidan con su bendición.

También agradezco de sobremanera, a CIENCIA ACTIVA de CONCYTEC, impulsora de los Programas de Maestría en Universidades Peruanas, mediante el Convenio FONDECYT; por el apoyo brindado mediante la financiación de estudios de Maestría en la PUCP (En sus 3 diferentes especialidades), al brindar una gran oportunidad para los jóvenes de esta generación, que deseen adquirir más conocimientos especializados, en las diferentes áreas de la Ciencia e Ingeniería.

Mi más profundo y sincero agradecimiento a mi asesor, el Dr. Maynard Kong Moreno; por su vital apoyo, sus útiles sugerencias, y por su preocupación fraterna; en pro de concluir satisfactoriamente, la realización de este Proyecto.

Agradezco a la empresa BASF Chemical Construction S.A.C., por la posibilidad de realizar los ensayos químicos y mecánicos, a las muestras de pasta, mortero y concreto del presente trabajo, en sus Laboratorios e Instalaciones; en especial al Lic. César Ostos Ríos, Gerente general de BASF, quien me abrió las puertas de su tan ilustre Empresa, y a la Mg. Katia Rider, quien fue mi asesora interna en BASF, y me brindó su apoyo día a día, forjando la estructura de mi trabajo e investigación.

A los laboratorios de la Facultad de Ciencias e Ingeniería, en especial al Laboratorio LEDI, de la especialidad de Ing. Civil; así como también a la Mg. Laura Marina Navarro Alvarado y al Mg. Wilson Edgar Silva Berríos, quienes trabajan en el LEDI, y contribuyeron para que este trabajo pueda concretarse.

A la Dra. Patricia Morales Bueno, directora de la Maestría de Química, por su apoyo a lo largo de estos dos años en el ámbito académico, en la gestión de materiales, en trámites de documentarios y por sus buenos consejos.

A los miembros del jurado, por la revisión del presente trabajo, y por sus acertadas sugerencias.

A la Srta. Ana Farfán y compañía, del área de secretaría de la Especialidad de Química, por la gestión de recursos y documentación; y a los señores vigilantes, por su amabilidad en el trato, y brindarnos la seguridad necesaria a todos nosotros.

A mis amigos de la Maestría, de mi promoción, y de anteriores; por sus consejos, sugerencias y gratos momentos compartidos.

Finalmente, quisiera agradecer a todas aquellas personas, que de diversas maneras, colaboraron en la realización de este Proyecto, en el transcurso de mi tiempo de estudios; brindando comentarios de gran ayuda, y sugerencias de un aporte invaluable; a cada uno de ellos, realmente, gracias totales.

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	10
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS.....	17
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	18
I. INTRODUCCIÓN.....	20
II. OBJETIVOS.....	22
2.1. Objetivo general.....	22
2.2. Objetivos específicos.....	22
III. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	23
3.1. El Cemento.....	23
3.1.1. Antecedentes y características generales.....	23
3.1.2. El Cemento Portland.....	24
3.1.3. Adiciones minerales para el Cemento.....	27
3.2. La Arena.....	28
3.2.1. Definición e importancia.....	28
3.2.2. Las arenas como componentes de áridos, e influencia en los morteros....	28
3.3. La Arcilla.....	29
3.3.1. Definición y características.....	29
3.3.2. Influencia de las Arcillas en las Arenas.....	31
3.3.3. Medición del contenido de Arcillas.....	32
3.3.3.1 Antecedentes y características del Azul de Metileno.....	32
3.3.3.2 Azul de Metileno en las arcillas.....	34
3.3.3.3 Métodos para calcular el MBV.....	34
3.4. Los Aditivos.....	38
3.4.1. Antecedentes y características.....	38
3.4.2. Aditivos plastificantes y súperplastificantes.....	39
3.4.3. Análisis de la composición química, de los aditivos súperplastificantes.....	41

IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	51
4.1. Metodología de Trabajo.....	51
4.1.1. Pasos seguidos para la realización y culminación (Tesis)...	51
4.1.2. Descripción y caracterización de los materiales a emplear..	51
4.2. Reactivos, materiales accesorios y equipos.....	52
4.2.1. Reactivos.....	52
4.2.2. Materiales.....	52
4.2.3. Accesorios de trabajo.....	53
4.2.4. Materiales de seguridad.....	53
4.2.5. Equipos.....	53
4.3. Ensayos previos.....	55
4.3.1. Ensayo para calcular el contenido Humedad Natural.....	55
4.3.2. Ensayo para calcular el Módulo de Finura (MF).....	55
4.3.3. Ensayo de % de finos que pasa la malla N°200.....	55
4.3.4. Análisis de los Cementos peruanos elegidos.....	56
4.4. Desarrollo experimental.....	58
4.4.1. Método del Valor de Azul de Metileno (MBV).....	58
4.4.2. Diseño de Morteros y Prueba de Minislump.....	58
4.4.3. Diseño de cubos de mortero y Prueba de resistencia.....	61
V. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	63
5.1. Ensayos previos.....	63
5.1.1. Ensayo para calcular el contenido Humedad Natural.....	63
5.1.2. Ensayo para calcular el Módulo de Finura (MF).....	64
5.1.3. Ensayo de % de finos que pasa la malla N°200.....	64
5.1.4. Análisis de los Cementos peruanos elegidos.....	65
5.2. Desarrollo experimental.....	66
5.2.1. Método del Valor de Azul de Metileno (MBV).....	66
5.2.1.1. Método AASHTO.....	66
5.2.1.2. Método ASTM.....	67
5.2.2. Diseño de Morteros y Prueba de Minislump.....	68
5.2.2.1. Morteros diseñados con Cemento Tipo V.....	68
5.2.2.2. Morteros diseñados con Cemento Tipo I.....	81
5.2.2.3. Morteros diseñados con Cemento Tipo HE.....	93
5.2.3. Diseño de Cubos de mortero y Prueba de resistencia.....	105
5.2.3.1. Con Aditivo de Tecnología Naftalenosulfonato.....	105
5.2.3.2. Con Aditivo de Tecnología Policarboxilato.....	106
5.2.3.3. Con Aditivo de Tecnología Lignosulfonato.....	107

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	108
6.1. Ensayos previos.....	108
6.1.1. Ensayo para calcular el contenido Humedad Natural.....	108
6.1.2. Ensayo para calcular el Módulo de Finura (MF).....	108
6.1.3. Ensayo para calcular el % de finos que pasa la malla N°200.....	109
6.1.4. Análisis de los Cementos peruanos elegidos.....	109
6.2. Desarrollo experimental.....	115
6.2.1. Método del Valor de Azul de Metileno (MBV).....	115
6.2.1.1. Método AASHTO.....	115
6.2.1.2. Método ASTM.....	115
6.2.1.3. Análisis final de ambos Métodos.....	116
6.2.2. Diseño de Morteros y Prueba de Minislump.....	116
6.2.3. Diseño de cubos de mortero y Prueba de resistencia.....	124
VII. CONCLUSIONES.....	127
VIII. RECOMENDACIONES.....	129
IX. BIBLIOGRAFÍA.....	130
X. ANEXOS.....	133

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Rangos típicos de intervención de los óxidos en el cemento.....	25
Tabla 2: Porcentajes típicos de intervención de los óxidos, con su abreviatura correspondiente.....	25
Tabla 3: Resultados del análisis químico, realizado al Cemento Portland Tipo III.....	26
Tabla 4: Composición química típica, de los Cementos Portland.....	27
Tabla 5: Tamaño Granulométrico de las Partículas del Suelo, según AASHTO.....	30
Tabla 6: Propiedades Físicas y Químicas del Azul de Metileno.....	32
Tabla 7: Valor de Azul de Metileno, relacionado con el desempeño anticipado de la arena (AASHTO).....	36
Tabla 8: Valor de Azul de Metileno, relacionado con el desempeño anticipado de la arena (ASTM).....	37
Tabla 9: Clasificación de las arenas, según la Humedad natural encontrada.....	63
Tabla 10: Clasificación de las arenas, según su Módulo de Finura.....	64
Tabla 11: Clasificación de las arenas, según el % que Pasa la Malla N°200.....	65
Tabla 12: Clasificación de las arenas, según el Método AASHTO, para hallar el MBV.....	67
Tabla 13: Clasificación de las arenas, según el Método ASTM, para hallar el MBV.....	67
Tabla 14: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.0cc.....	68
Tabla 15: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.5cc.....	69
Tabla 16: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 6.0cc.....	70
Tabla 17: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 7.0cc.....	70
Tabla 18: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 8.0cc.....	71
Tabla 19: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V-Arena Huancayo-Adt.1).....	71
Tabla 20: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Huancayo – Aditivo 1).....	71
Tabla 21: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V-Arena Huancayo-Adt.2).....	72
Tabla 22: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Huancayo – Aditivo 2).....	72
Tabla 23: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V-Arena Huancayo-Adt.3).....	72
Tabla 24: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Huancayo – Aditivo 3).....	72
Tabla 25: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.0cc.....	73
Tabla 26: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.5cc.....	73
Tabla 27: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.0cc.....	74
Tabla 28: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.5cc.....	74
Tabla 29: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 10cc.....	75

Tabla 30: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V–Arena Jicamarca–Adt. 1)..	75
Tabla 31: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Jicamarca – Aditivo 1).....	75
Tabla 32: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V-Arena Jicamarca–Adt.2)...	76
Tabla 33: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Jicamarca – Aditivo 2).....	76
Tabla 34: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V-Arena Jicamarca–Adt.3)...	76
Tabla 35: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V – Arena Jicamarca – Aditivo 3).....	76
Tabla 36: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.0cc..	77
Tabla 37: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.5cc..	77
Tabla 38: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.0cc..	78
Tabla 39: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.5cc..	78
Tabla 40: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 9.0cc..	79
Tabla 41: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V–Arena Malanche–Adt. 1)...	79
Tabla 42: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V – Arena Malanche – Aditivo 1).....	79
Tabla 43: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V–Arena Malanche–Adt.2)...	80
Tabla 44: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Malanche – Aditivo 2).....	80
Tabla 45: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo V–Arena Malanche–Adt.3)...	80
Tabla 46: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo V - Arena Malanche – Aditivo 3).....	80
Tabla 47: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.0cc..	81
Tabla 48: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.5cc..	81
Tabla 49: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 6.0cc..	82
Tabla 50: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 7.0cc..	82
Tabla 51: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 8.0cc..	83
Tabla 52: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I - Arena Huancayo – Adt. 1)83	
Tabla 53: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Huancayo – Aditivo 1).....	83
Tabla 54: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I - Arena Huancayo – Adt.2)84	
Tabla 55: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Huancayo – Aditivo 2).....	84
Tabla 56: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I - Arena Huancayo – Adt.3)84	
Tabla 57: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Huancayo – Aditivo 3).....	84
Tabla 58: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.0cc..	85
Tabla 59: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.5cc..	85
Tabla 60: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.0cc..	86

Tabla 61: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.5cc..	86
Tabla 62: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 10cc...	87
Tabla 63: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I – Arena Jicamarca – Adt.1)	87
Tabla 64: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Jicamarca – Aditivo 1).....	87
Tabla 65: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I - Arena Jicamarca – Adt.2)	88
Tabla 66: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Jicamarca – Aditivo 2).....	88
Tabla 67: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I - Arena Jicamarca – Adt.3)	88
Tabla 68: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I – Arena Jicamarca – Aditivo 3).....	88
Tabla 69: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 6.5cc...	89
Tabla 70: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.0cc...	89
Tabla 71: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.5cc...	90
Tabla 72: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.0cc...	90
Tabla 73: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.5cc...	91
Tabla 74: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I – Arena Malanche – Adt.1)	91
Tabla 75: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I – Arena Malanche – Aditivo 1).....	91
Tabla 76: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I – Arena Malanche – Adt.2)	92
Tabla 77: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Malanche – Aditivo 2).....	92
Tabla 78: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento Tipo I – Arena Malanche – Adt.3)	92
Tabla 79: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo I - Arena Malanche – Aditivo 3).....	92
Tabla 80: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.0cc.....	93
Tabla 81: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.5cc.....	93
Tabla 82: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 6.0cc.....	94
Tabla 83: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 7.0cc.....	94
Tabla 84: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 8.0cc.....	95
Tabla 85: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE - Arena Huancayo – Adt.1)....	95
Tabla 86: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Huancayo – Aditivo 1).....	95
Tabla 87: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE - Arena Huancayo – Adt.2)....	96
Tabla 88: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Huancayo – Aditivo 2).....	96
Tabla 89: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE - Arena Huancayo – Adt.3)....	96
Tabla 90: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Huancayo – Aditivo 3).....	96
Tabla 91: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.0cc.....	97

Tabla 92: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.5cc.....	97
Tabla 93: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.0cc.....	98
Tabla 94: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.5cc.....	98
Tabla 95: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 10.0cc.....	99
Tabla 96: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE – Arena Jicamarca – Adt.1)...	99
Tabla 97: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Jicamarca – Aditivo 1).....	99
Tabla 98: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE - Arena Jicamarca – Adt.2)..	100
Tabla 99: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Jicamarca – Aditivo 2).....	100
Tabla 100: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE - Arena Jicamarca – Adt.3)	100
Tabla 101: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE – Arena Jicamarca – Aditivo 3).....	100
Tabla 102: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.0cc...	101
Tabla 103: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.5cc...	101
Tabla 104: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.0cc...	102
Tabla 105: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.5cc...	102
Tabla 106: Diámetro de los morteros, con Cemento HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 9.0cc...	103
Tabla 107: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE – Arena Malanche – Adt.1)	103
Tabla 108: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE – Arena Malanche – Aditivo 1).....	103
Tabla 109: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE – Arena Malanche – Adt.2)	104
Tabla 110: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Malanche – Aditivo 2).....	104
Tabla 111: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones (Cemento HE – Arena Malanche – Adt.3)	104
Tabla 112: Volúmenes de prueba para dosificar (Cemento Tipo HE - Arena Malanche – Aditivo 3).....	104
Tabla 113: Resistencia con Dosificación Mínima – Con 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1...	105
Tabla 114: Resistencia con Dosificación Máxima – Con 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1.	105
Tabla 115: Resistencia con Dosificación Mínima – Con 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1.	105
Tabla 116: Resistencia con Dosificación Máxima – Con 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1.	105
Tabla 117: Resistencia con Dosificación Mínima – Con 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2..	106
Tabla 118: Resistencia con Dosificación Máxima – Con 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2.	106
Tabla 119: Resistencia con Dosificación Mínima – Con 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2.	106
Tabla 120: Resistencia con Dosificación Máxima – Con 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2.	106
Tabla 121: Resistencia con Dosificación Mínima – Con 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2..	107

Tabla 122: Resistencia con Dosificación Máxima – Con 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2.107

Tabla 123: Resistencia con Dosificación Mínima – Con 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2.107

Tabla 124: Resistencia con Dosificación Máxima – Con 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2.107

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Tamizadora eléctrica de Laboratorio y Estufa Universal UN-55.....	54
Figura 2: Balanza de Plataforma BA30Y-A5 y Balanza analítica AGN-220.....	54
Figura 3: Mezcladora Hobart N-50 y Agitador mecánico OS20-5.....	54
Figura 4: Gráfica de la Tabla 14, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	69
Figura 5: Gráfica de la Tabla 15, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	69
Figura 6: Gráfica de la Tabla 16, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	70
Figura 7: Gráfica de la Tabla 17, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	70
Figura 8: Gráfica de la Tabla 18, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	71
Figura 9: Gráfica de las Tablas 19 - 20, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	71
Figura 10: Gráfica de las Tablas 21 - 22, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	72
Figura 11: Gráfica de las Tablas 23 - 24, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	72
Figura 12: Gráfica de la Tabla 25, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	73
Figura 13: Gráfica de la Tabla 26, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	73
Figura 14: Gráfica de la Tabla 27, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	74
Figura 15: Gráfica de la Tabla 28, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	74
Figura 16: Gráfica de la Tabla 29, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	75
Figura 17: Gráfica de las Tablas 30 - 31, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	75
Figura 18: Gráfica de las Tablas 32 - 33, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	76
Figura 19: Gráfica de las Tablas 34 - 35, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	76
Figura 20: Gráfica de la Tabla 36, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	77
Figura 21: Gráfica de la Tabla 37, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	77
Figura 22: Gráfica de la Tabla 38, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	78
Figura 23: Gráfica de la Tabla 39, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	78
Figura 24: Gráfica de la Tabla 40, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	79
Figura 25: Gráfica de las Tablas 41 - 42, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	79

Figura 26: Gráfica de las Tablas 43 - 44, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	80
Figura 27: Gráfica de las Tablas 45 - 46, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	80
Figura 28: Gráfica de la Tabla 47, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	81
Figura 29: Gráfica de la Tabla 48, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	81
Figura 30: Gráfica de la Tabla 49, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	82
Figura 31: Gráfica de la Tabla 50, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	82
Figura 32: Gráfica de la Tabla 51, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	83
Figura 33: Gráfica de las Tablas 52 - 53, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	83
Figura 34: Gráfica de las Tablas 54 - 55, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	84
Figura 35: Gráfica de las Tablas 56 - 57, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	84
Figura 36: Gráfica de la Tabla 58, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	85
Figura 37: Gráfica de la Tabla 59, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	85
Figura 38: Gráfica de la Tabla 60, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	86
Figura 39: Gráfica de la Tabla 61, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	86
Figura 40: Gráfica de la Tabla 62, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	87
Figura 41: Gráfica de las Tablas 63 - 64, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	87
Figura 42: Gráfica de las Tablas 65 - 66, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	88
Figura 43: Gráfica de las Tablas 67 - 68, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	88
Figura 44: Gráfica de la Tabla 69, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	89
Figura 45: Gráfica de la Tabla 70, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	89
Figura 46: Gráfica de la Tabla 71, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	90
Figura 47: Gráfica de la Tabla 72, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	90
Figura 48: Gráfica de la Tabla 73, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	91
Figura 49: Gráfica de las Tablas 74 - 75, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	91
Figura 50: Gráfica de las Tablas 76 - 77, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	92
Figura 51: Gráfica de las Tablas 78 - 79, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	92
Figura 52: Gráfica de la Tabla 80, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	93
Figura 53: Gráfica de la Tabla 81, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	93
Figura 54: Gráfica de la Tabla 82, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	94
Figura 55: Gráfica de la Tabla 83, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	94
Figura 56: Gráfica de la Tabla 84, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	95

Figura 57: Gráfica de las Tablas 85 - 86, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	95
Figura 58: Gráfica de las Tablas 87 - 88, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	96
Figura 59: Gráfica de las Tablas 89 - 90, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	96
Figura 60: Gráfica de la Tabla 91, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	97
Figura 61: Gráfica de la Tabla 92, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	97
Figura 62: Gráfica de la Tabla 93, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	98
Figura 63: Gráfica de la Tabla 94, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	98
Figura 64: Gráfica de la Tabla 95, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	99
Figura 65: Gráfica de las Tablas 96 - 97, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	99
Figura 66: Gráfica de las Tablas 98 - 99, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	100
Figura 67: Gráfica de las Tablas 100 - 101, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	100
Figura 68: Gráfica de la Tabla 102, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	101
Figura 69: Gráfica de la Tabla 103, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	101
Figura 70: Gráfica de la Tabla 104, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	102
Figura 71: Gráfica de la Tabla 105, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	102
Figura 72: Gráfica de la Tabla 106, Diámetro del Mórtero (mm) vs Tiempo (min).....	103
Figura 73: Gráfica de las Tablas 107 - 108, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	103
Figura 74: Gráfica de las Tablas 109 - 110, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	104
Figura 75: Gráfica de las Tablas 111 - 112, Diámetro de Mórtero (mm) vs Dosificación empleada (cc).....	104

SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

ATR	<i>Reflexión total atenuada</i>
DMTA	<i>Análisis térmico mecánico dinámico</i>
DRX	<i>Difracción de Rayos X</i>
DSC	<i>Calorimetría diferencial de barrido</i>
FRX	<i>Fluorescencia de Rayos X</i>
FTIR	<i>Espectroscopía infrarroja con transformada de Fourier</i>
MB	<i>Blue Methylene</i>
MBV	<i>Blue Methylene Value</i>
Nano	<i>Nanopartículas</i>
SEM	<i>Microscopía electrónica de barrido</i>
UV – Vis	<i>Espectroscopía UV – Visible</i>

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Relación w/c: Relación Agua / Cemento.

Partículas aglomeradas: Forman una red en la estructura, en la cual las partículas están pegadas muy juntas.

Partículas dispersadas: Las partículas no se pegan juntas.

Adición directa del Superplastificante: Significa que el superplastificante, se agrega desde el inicio al agua de la mezcladora; una adición de superplastificante, algunos minutos después del inicio de la hidratación de cemento, se denomina adición retrasada del superplastificante.

False set: Ocurre en el instante en que se da un rápido desarrollo de la rigidez, en una suspensión mixta de cemento Portland; sin embargo esta rigidez se puede dispersar, y la mezcla podría volver a ser fluida, mediante un mezclado adicional, sin necesidad de agregar agua.

Flash set: Es el desarrollo rápido de la rigidez, en una pasta, mortero o concreto, diseñado con cemento portland, donde este proceso va generalmente acompañado de la evolución de un considerable calor; esta rigidez ya no puede disminuir, ni la fluidez puede controlarse mediante un mezclado adicional, si no se agrega agua previamente.

Fluidez: Es un término subjetivo, que define el comportamiento de flujo, de una pasta, mortero u hormigón, donde si la fluidez es alta, el mortero fluye fácilmente; las medidas de fluidez se realizan mediante diversas clases de pruebas (Por ejemplo, prueba de minislump, prueba de golpe ordinario, prueba de flujo de golpe, prueba del túnel, etc.).

Yeso: A menudo utilizado para adicionar Sulfatos de Calcio (Presentes en su estructura interna) a la mezcla, compuesto necesario de agregar, por su capacidad de retardar la fragua.

Fase Intersticial: Fase formada durante el proceso de fabricación del Clínter (Consistente de C_3A , C_4AF , y fases menores de cemento).

Fuerza iónica: Es referente a la concentración en peso, de los iones del agua porética; computada mediante la multiplicación de la concentración de cada ion en el agua, situada en su cuadrícula correspondiente (c); multiplicada por la concentración de carga de cada ion (z), y dividida por 2.

Yeso secundario: Precipitados durante las reacciones de hidratación inicial, debido a condiciones extraordinarias.

Flujo de caudal / Flujo de mortero: Propagación horizontal del concreto o mortero, después de que el cono de Abrams ha sido levantado; normalmente expresado como diámetro o área.

Viscosidad: Tendencia de un líquido para resistir al flujo, como resultado de la fricción interna.

Trabajabilidad: Relativa facilidad, para colocar y consolidar el mortero o concreto fresco, en poco tiempo y en diversas formas.

I. INTRODUCCIÓN

La construcción ha sido uno de los principales retos del ser humano, desde el principio de su existencia, gracias a lo cual, ha sido uno de los campos donde más se ha invertido, lo que le ha hecho evolucionar, desde las construcciones más básicas, hasta edificios de formas arquitectónicamente inverosímiles, y con alturas impensables; por lo que actualmente, la construcción es una actividad que demanda la inversión de recursos, que impactan de manera significativa el medio ambiente, ya sea para obtener o producir materiales, a través de una adecuada ejecución de los proyectos; por esta razón, la búsqueda de nuevas alternativas y tecnologías, son fundamentales para satisfacer la demanda de vivienda, de los sectores con menores ingresos, sin descuidar los aspectos de seguridad y comodidad, del ámbito inmobiliario.

Este progreso ha sido capaz gracias al avance de la química, la física y la ingeniería, y con ello, de la aparición de nuevos materiales e insumos, que han hecho realidad la imaginación de los arquitectos. Materiales e insumos, han ido apareciendo y evolucionando, de forma continua, dependiendo de las necesidades y retos que se planteasen. Así el cemento, material que se emplea desde la antigua Grecia y Roma, ha evolucionado de la mano de la nanotecnología, mejorando sus prestaciones; evolución que es necesaria, para lograr un desarrollo ecológico, y así disminuir su impacto ambiental; ya que según investigaciones afines, de fundaciones científicas, la fabricación de cemento produce entre el 5% y el 10% del CO₂ del mundo [1].

Un ejemplo que demuestra lo necesario que es optimizar el diseño del cemento y el concreto en la actualidad, es referente a uno de sus constituyentes más importantes, como lo es la sílice, ya que comprende más del 20% de su composición total; pero lamentablemente, el polvo producido durante su procesado contiene sílice en forma cristalina, la que es perjudicial para la salud; ya que, como nos recuerda un estudio elaborado por la Fundación Telefónica; luego de varios años de contacto con el polvillo, es probable que se genere en nuestro organismo, una grave enfermedad pulmonar conocida como silicosis, además de enfermedades a la piel [1].

Ante estos descubrimientos, cada vez se exige un mejor desempeño a los nuevos materiales, en cuanto a sus propiedades; y que cumplan con todas las reglamentaciones, que buscan el cuidado y la protección del medio ambiente. Y debido a que el concreto, es el material más usado actualmente en el mundo (incluso con un consumo superior al del agua), hoy por hoy, se desea tener cementos con altas resistencias mecánicas; por ejemplo, para construir edifi-

cios altos, en espacios muy pequeños (estructuras esbeltas); especialmente, en las ciudades desarrolladas, donde la presión inmobiliaria por el crecimiento poblacional es cada vez mayor.

Se busca que estos desarrollos tecnológicos, puedan cada vez ser más utilizados en las realidades cotidianas, de modo que con una capacitación adecuada, puedan ser utilizados no sólo en proyectos grandes, sino también en sectores de menor complejidad, como en el sector vivienda; es por eso, que algunos aditivos comerciales ya se ofrecen en el libre mercado; y es precisamente debido a este boom y democratización en el sector de la construcción, en todos los niveles socioeconómicos, que hay un mayor número de empresas que ofrecen sus aditivos en catálogos, para exponer sus productos nuevos y variados al público en general; buscando generar concretos de alto rendimiento, según los requisitos buscados; y así brindar mejores características y propiedades al concreto y a la estructura que con él se forme.

Por ello, uno de los principales objetivos de esta investigación, será facilitar la elección de un tipo específico de aditivo, que pueda cumplir con los requerimientos exigidos en cada obra o caso puntual; pero cuya metodología para lograr su elección (conociendo previamente las características químicas del cemento y la arena), sea fácil de entender y comprender, por cada uno de los integrantes del proceso constructivo, y no sólo por los profesionales encargados de los proyectos; en pro de conseguir finalmente diseñar el mejor concreto, con las mejores características físicas, químicas y mecánicas, como sea posible.

Es justamente, que para fabricar los concretos de altas prestaciones (resistencias por encima de las convencionales), se han ensayado diferentes soluciones ingenieriles; tanto físicas, que implican el uso de molienda ultrafina (con enriquecimiento en fases mineralógicas como la Alita y la Belita), y la incorporación de adiciones activas (como el Humo de Sílice, las cenizas volantes, el Metacaolín, las cenizas de la cascarilla de arroz y las escorias de alto horno); como químicas, que implican especialmente el uso de productos químicos (aditivos químicos), para la optimización y mejoramiento de la calidad del cemento y el concreto; que será justamente el tema que detallará este trabajo, ya que su estudio e influencia, en las propiedades del cemento y la arena, son el fundamento y fin de esta investigación.

Finalmente, resaltamos que en este proyecto se hace un análisis novedoso, para entender el mecanismo a través del cual, los superplastificantes incrementan la fluidez de los morteros; ya que anteriores investigaciones, solo cuantificaban la adsorción del aditivo, en función de las pruebas reológicas encontradas; pero en este proyecto también analizamos, la cantidad de superplastificante consumido realmente por el cemento, y la cantidad retenida en la interfaz cemento-aditivo, que es la única que podrá ser utilizada a futuro, para mantener la fluidez; sin embargo a su vez, el análisis de múltiples investigaciones, como la referente al Manual de

Tecnología de Aditivos para Hormigón [2], así como de otros artículos utilizados (detallados en la bibliografía adjunta), resultó muy importante para lograr completar este Proyecto (Esp. conclusiones); que Dios mediante servirá de fuente de consulta, para las generaciones venideras.

II. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL:

- En esta investigación, se buscará identificar la influencia de la química de los materiales (cemento y arena), sobre el desempeño de los aditivos para concreto de diferente tecnología; y así encontrar una relación, entre el desempeño de estos aditivos químicos, con las propiedades de los materiales que conforman al concreto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Caracterizar las distintas arenas, que están ubicadas en diferentes canteras de Lima; para poder tener una referencia de sus propiedades físicas y químicas, que servirá de fuente de consulta para futuras investigaciones.
- Definir el grado de robustez de la tecnología del aditivo, en función de la variación de la composición química de los materiales con los que interactúa.

III. FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 EL CEMENTO

3.1.1 ANTECEDENTES Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

El cemento, patentado como tal en 1927 por Joseph Aspdin, es uno de los materiales más empleados en la historia de la humanidad; diversas fuentes estiman, que se produce tanto cemento diario, como para construir aproximadamente 1000 edificios, de 100 pisos cada uno; sin embargo, debido al avance de la construcción, se estima que estos valores incluso aumentarán en el futuro, al incrementarse día a día, la producción de cemento alrededor del mundo.

Para definir al cemento, nos basamos en su interpretación técnica, cuyo resumen dice: “El cemento es un conglomerante, formado a partir de una mezcla de calizas y arcillas calcinadas, y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. El producto resultante de la molienda de estas rocas es llamada Clinker, y se convierte en cemento cuando se le agrega una pequeña cantidad de yeso, para que adquiera la propiedad de fraguar al añadirle agua y endurecerse posteriormente. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica, que fragua y se endurece” [3]; por todo ello, su uso está muy generalizado en construcción, y en todo lo referente a la Ingeniería Civil.

Tipos de cemento:

Según fuentes especializadas [4], se pueden establecer 2 tipos básicos de cemento; diferentes en su composición, en su resistencia, en su durabilidad; y por lo tanto, en sus destinos y usos:

1. “Cementos de origen calizo - arcilloso: Obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza, en proporción de 1 a 2 aproximadamente (según información de las industrias cementeras, estos cementos representan más del 75%, del total de producción cementicia en Perú)”.
2. “Cementos de origen puzolánico: Obtenidos a partir de puzolana; la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico (usado especialmente en construcciones edificadas en lugares con alto contenido de sulfatos, por su buena resistencia a Etringuita)”.

Desde el punto de vista químico, fuentes especializadas también nos dicen que: “La composición general de los Cementos está compuesta por una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio; obtenidos a través del cocido calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente. Puesto que la composición química de los cementos es compleja, se utilizan terminologías específicas para definir su composición; y entre las principales, se tienen las siguientes” [5]:

- 1) CaO , óxido de calcio, se abrevia en compuestos más grandes, como “C”.
- 2) SiO_2 , dióxido de silicio, se abrevia en compuestos más grandes, como “S”.
- 3) Al_2O_3 , trióxido de dialuminio, abreviado en compuestos grandes, como “A”.
- 4) Fe_2O_3 , trióxido de dihierro, abreviado en compuestos grandes, como “F”.

3.1.2 EL CEMENTO PORTLAND

Se hace un hincapié especial en este tipo de cemento, porque es el más usado en la industria de la construcción; y por tanto, es con el que se trabajará en esta investigación.

La Norma Técnica Peruana, guiada por la ASTM C-150, hace la siguiente definición: “El cemento Portland, es el cemento más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón; producto que se obtiene por la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de yeso (sulfato de calcio). Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales, como el yeso, deben ser pulverizados conjuntamente con el Clinker” [6].

El yeso se agrega generalmente al Clinker para regular el fraguado. Su presencia hace que el fraguado se concluya aproximadamente en 45 minutos. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico, para formar una sal expansiva llamada Etringita. Con el agregado, de materiales particulares al cemento (especialmente cal), se obtiene el cemento plástico, que fragua más rápidamente y es más fácilmente trabajable. Este material es usado para el revestimiento externo de edificios [6].

La magia del concreto empieza, cuando el cemento Portland es mezclado con agua; ya que se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes, que solidifica en algunas horas (fragua inicial); e increíblemente, se endurece progresivamente durante un período de varias semanas, hasta adquirir su resistencia característica (fragua final). Esta “mágica” solidificación, se debe a un proceso químico conocido como “hidratación mineral” [6].

A continuación, en la tabla 1, se muestra la composición química aproximada de un cemento típico; teniendo que estar en estos rangos, para ser considerado un cemento Portland característico (dependiendo del tipo de Cemento):

Tabla 1: Rangos típicos de intervención de los óxidos en el cemento [6]

% de Oxidos (peso)	Rango
CaO	60-67
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3-8
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0
Na ₂ O + K ₂ O	0.2-1.3
MgO	0.1-4.0
Cal libre	0-2
SO ₃	1-3

Un cemento típico tiene la siguiente composición aproximada, que se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2: Porcentajes típicos de intervención de los óxidos, con su abreviatura correspondiente [6]

	Oxido componente	Porcentaje Típico	Abreviatura
Cal combinada	CaO	62.5%	C
Silice	SiO ₂	21%	S
Alúmina	Al ₂ O ₃	6.5%	A
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.5%	F
Cal Libre	CaO	0%	
Azufre	SO ₃	2%	
Magnesio	MgO	2%	
Alcalis	Na ₂ O y K ₂ O	0.5%	
Perdida al Fuego	P.F.	2%	
Residuo insoluble	R.I.	1%	

Tipos de cementos Portland:

Según las Normas vigentes, los cementos se dividen en 5 clases, que se diferencian por sus características, y por las condiciones donde son requeridas [7].

- TIPO I: cemento de uso general, no requiere de propiedades y características especiales (usado en más del 90% de las construcciones peruanas).
- TIPO II: Resistente al ataque moderado de sulfatos, como por ejemplo en las tuberías de drenaje (usado en muros de contención, pilas, represas).
- TIPO III: Muestra altas resistencias a edades tempranas (a 1, 3 y 7 días).
- TIPO IV: Presenta muy bajo calor de hidratación (ideal para Presas, etc).
- TIPO V: Muy resistente a la acción de los sulfatos y cloruros (en el litoral marino).

En la tabla 3, se muestra la composición aproximada, de un tipo específico de cemento:

Tabla 3: Resultados de un análisis químico realizado al cemento Portland tipo III [7]

Especie química	Porcentaje (%)
SiO ₂	19,43
Al ₂ O ₃	4,11
Fe ₂ O ₃	3,48
CaO	65,13
MgO	2,19
K ₂ O	0,29
Pérdidas por calcinación (P.P.C.)	3,07
Residuo insoluble (R.I.)	0,74
SO ₃	2,34
C ₃ A	5,00

En la tabla 4 se muestran las composiciones químicas, generadas por la combinación de los óxidos componentes (C, S, A y F), de los 5 tipos de cementos descritos anteriormente:

Tabla 4: Composición química típica, de los cementos Portland [8]

Tipo de cemento	Compuesto %						Pérdida por Calcificación %	CaO Libre %
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃		
I	55	19	10	7	2.8	2.9	1	1
II	51	24	6	11	2.9	2.5	0.8	1
III	57	19	10	7	3	3.1	1	1.6
IV	28	49	4	12	1.8	1.9	0.9	0.8
V	38	43	4	9	1.9	1.8	0.9	0.8

3.1.3 ADICIONES MINERALES PARA EL CEMENTO

Aunque en esta investigación, no se utilizará adiciones minerales, con la intención de modificar las propiedades de nuestras mezclas de concreto, si es bueno precisar, que se utilizó filler en el diseño inicial de la mezcla; ya que con ello, en la práctica, se logra abaratar costos, al reemplazar parte del contenido de cemento con filler (La norma ASTM C595 indica, que se puede reemplazar hasta el 30% del peso total de cemento con filler, sin que la mezcla final pierda sus propiedades conglomerantes; pero en este caso, sólo se reemplazará el 15% del contenido total de cemento [9]); ya que en promedio, el costo del filler es casi 10 veces menor que el valor del cemento comercial.

Es necesario notar que el filler usado, es extraído de los residuos que la cementera UNACEM desecha en el proceso de producción de cemento (en Perú, sólo cementos Lima, produce filler a nivel comercial); sin embargo, al igual que en el caso de las arcillas, se suele aplicar el término filler, a algunas partículas de diámetro menor o igual a (1/400)"; lo que se explicará a continuación, con la siguiente definición, brindada por la Asociación Española de Carreteras.

“El filler, o polvo mineral, es la fracción que pasa por el tamiz de 0,063mm (Nº230, según la Norma ASTM E-11/95) por lo que tiene una elevada superficie específica. Precisamente por esto, desempeña un papel fundamental en el comportamiento de las mezclas bituminosas, en función de su naturaleza, finura, actividad y proporción en la que entra a formar parte de la mezcla. La unión del ligante y polvo mineral se denomina mástico. El término filler hace referencia a que se trata de una fracción, que supuestamente rellena los huecos dejados por las partículas más gruesas, aunque esta no es su misión fundamental” [10].

3.2 LA ARENA

3.2.1 DEFINICIÓN E IMPORTANCIA

Se puede definir a las arenas como “Materiales granulares inertes formados por fragmentos de roca o arenas utilizados en la construcción (edificación e infraestructuras) y en numerosas aplicaciones industriales” [10]. En contraste, el Instituto Geológico Minero de España (IGME), en la publicación Panorama Minero, define los áridos como "Una serie de rocas, que tras un proceso de tratamiento industrial (simple clasificación por tamaños, en el caso de los áridos naturales, u obtenidos por trituración, molienda y clasificación en el caso de los áridos de machaqueo); se emplean en la industria de la construcción en múltiples aplicaciones, que van desde la elaboración (junto con un material Ligante) de hormigones, morteros y aglomerados asfálticos; hasta la construcción de Bases y Sub-bases para carreteras, Balasto y Sub-balasto para vías de ferrocarril, o escolleras para la defensa y construcción de puertos marítimos” [11].

En función del tipo del origen de la roca, las arenas se pueden clasificar en arenas naturales, recicladas o artificiales. Sus aplicaciones van desde el sector de la industria, formando parte de la fabricación del cemento, o como material abrasivo; hasta el sector de la construcción, con múltiples aplicaciones, como balasto para la construcción de vías férreas, o para fabricación de hormigón estructural [10].

Existen muchas definiciones sobre el concepto de arena, unas breves y otras concisas, unas que manejan conceptos sencillos, y otras que definen de forma más detallada su origen y aplicaciones; por lo que se resumirán las principales definiciones, de un trabajo detallado de la U. SCIC, que serán brindados espaciadamente, en distintos momentos del siguiente acápite [10].

3.2.2 LA ARENA, COMO COMPONENTE DE LOS ÁRIDOS, E INFLUENCIA EN LOS MORTEROS

Según el artículo 31º, de la Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, un hormigón (Como llaman en España al concreto), es “La mezcla de cemento, agua, áridos (arenas y gravas), aditivos y adicciones (Minerales u orgánicas). Donde la composición elegida, para las mezcla destinadas a la construcción de estructuras, o elementos estructurales, deberá estudiarse previamente, con el fin de asegurarse de que sea capaz de proporcionar características mecánicas, reológicas y de durabilidad que satisfagan las exigencias del proyecto” [12].

Además se menciona “Las arenas tienen un papel muy importante en las características del concreto, porque son ellas, las que más han ayudado a lograr la evolución del concreto, ya que conocer la reacción superficial que se produce entre éstos y la pasta de cemento, a dado lugar a una mejora importante en la adherencia entre estos materiales” [12]; recordando que las arenas no forman parte activa en el fraguado (es decir, en el endurecimiento del concreto); siendo el requisito esencial, que deben cumplir las arenas en las mezclas, es que permanezcan estables dentro del concreto, sin modificar sus características, para lo cual no deben reaccionar con el cemento; además su importancia radica, en que junto a la grava ocupan más del 80% del volumen del concreto, siendo el último 20% ocupado por la pasta de cemento, que llena los huecos existentes, creando una capa que envuelve los gránulos, y los mantiene unidos.

Según Villarino, los áridos cumplen en el concreto tres funciones fundamentales [13]:

- “Disminuyen las retracciones propias de la pasta de cemento. La disminución de volumen que sufre el hormigón en las primeras edades de endurecimiento, puede provocar grietas y fisuras, lo que facilita un debilitamiento mecánico del hormigón; los áridos que intervienen en el hormigón, evitan o disminuyen esta fisuración”.
- “Igualmente, abaratan el costo del producto por unidad de volumen; al ser los áridos, materiales baratos, en comparación con el cemento”.
- “Y por último, los áridos también ejercen una influencia muy positiva en la resistencia mecánica; en lo que respecta a la fluencia, a la abrasión, y a la durabilidad del concreto”.

Finalmente es necesario recordar, que según la Norma Española UNE-EN12620:2002+A1:2008, los áridos para construcción deben ser obtenidos por rodado o por machaqueo; y además en general, las arenas deben mostrar evidencia de buen comportamiento, para que se logre justificar que será segura su utilización, que es lo que se analizará en el siguiente acápite [14].

3.3 LA ARCILLA (PRESENTE EN LAS ARENAS)

3.3.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

La definición más general de las arcillas, es la que presenta la Enciclopedia Británica, que nos dice que: “Las arcillas son restos de rocas sedimentarias descompuestas, constituidas por agregados de silicatos de aluminios hidratados, procedentes de la descomposición de

rocas que contienen feldespato, como el granito. Presenta diversas coloraciones según las impurezas que contiene, desde el rojo anaranjado hasta el blanco (Cuando la arcilla es pura). Físicamente se considera un coloide, de partículas extremadamente pequeñas y superficie lis (el diámetro de las partículas de arcilla son inferiores a 2 μ m), pero químicamente es un silicato hidratado de alúmina, cuya fórmula es $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ (Con partículas no minerales, los fitolitos)” [15].

En la tabla 5, se muestra el tamaño granulométrico, que deben tener las partículas para ser consideradas como tales; recordando que, las partículas importantes para la construcción son: las arenas y las gravas, y las que se tienen que evitar son: las arcillas y los limos.

Tabla 5: Tamaño Granulométrico de las Partículas del Suelo, según Wenk y Bulakh [16].

<i>Granulometría</i>	
<i>Partícula</i>	<i>Tamaño (Diámetro)</i>
<i>Arcillas</i>	<i>< 0,0029 mm</i>
<i>Limos</i>	<i>0,0029-0,0625 mm</i>
<i>Arenas</i>	<i>0,0625-2 mm</i>
<i>Gravas</i>	<i>2-64 mm</i>
<i>Cantos rodados</i>	<i>64-256 mm</i>
<i>Bloques</i>	<i>>256 mm</i>

Wenk y Bulakh también señalaron que: “Los minerales de la arcilla son filosilicatos de aluminio hidratados, a veces con cantidades variables de hierro, magnesio, metales alcalinos, tierras alcalinas y otros cationes, y como la arcilla, son en general microscópicos. En la naturaleza los minerales de la arcilla son importantes componentes de la lutita y de los suelos. Se originan a partir de la meteorización o alteración hidrotermal de Feldespatos, Piroxenos y Micas” [16]. Sin embargo en términos ingenieriles, también se le llama arcilla a algunos materiales plásticos, y a partículas de tamaño igual o menor a 2 μ m, que es el tamaño único o más común de todos los minerales de arcilla, lo que en ocasiones genera confusiones (otras fuentes señalan 4 μ m) [17].

No obstante lo anterior, la clasificación SUCS, que es utilizada habitualmente en ingeniería, usa los límites de tamaños máximos de 4,75mm para las arenas, y de 0,075mm para las arcillas y limos [15]; por lo que en el presente análisis se supondrá, que toda partícula de tamaño inferior a 0.075mm es un material fino (que será cuantificado, con el método de pasante de la Malla N^o200); es decir, esa cantidad incluirá a los limos y a las arcillas; pero para cuantificar y

detectar solamente a las arcillas, se empleará el Método del Valor de Azul de Metileno (MBV); para lograr ello, existen 3 métodos de análisis, que serán descritos en los siguientes acápite.

3.3.2 INFLUENCIA DE LAS ARCILLAS EN LAS ARENAS

Se ha mencionado anteriormente que a mayor contenido de arcillas, las muestras de arena se “empobrecerán” cada vez más; debido a los efectos dañinos que se ha demostrado producen las arcillas, cuando interactúan con la arena y cemento, en el momento del diseño y producción de la mezcla; esto en lo referente, a la pérdida de resistencia y durabilidad.

Esto es explicado, debido a que las interacciones químicas, que se deben producir entre el cemento y el agua, y especialmente entre el cemento y los aditivos (cuando se utilizan); se ven afectadas debido a la presencia de arcillas que están inmersas entre ellas, ya que los aditivos justamente reaccionan con el cemento (que es lo que especialmente se busca, para que se generen en el concreto las propiedades características, que le brinda el uso de aditivos) y no con la arena, debido a que las moléculas de los aditivos buscan unirse a los materiales con mayor área superficial (que contienen partículas de menor diámetro), ya que con ellas tendrán mayor afinidad electroquímica.

Pero cuando existe la presencia de arcillas, éstas por tener menor diámetro, le quitarán en algo su posición privilegiada al cemento (cuyo diámetro promedio es de 10 μ m); reemplazando en algún porcentaje su interacción con el aditivo (por su pequeño tamaño, similar al cemento, las arcillas reaccionarán con el aditivo, pero en este caso no generarán mayores efectos, y sólo disminuirán la cantidad de aditivo disponible, para reaccionar con el cemento correctamente).

Por lo que lo anterior provocará a priori, una disminución en la eficiencia del “poder” del aditivo en la mezcla de concreto, ya que además las arcillas disminuyen la adherencia entre la pasta y los agregados; afectando sus propiedades resultantes, y variando las características de la mezcla final; por lo que la atenuación de estas consecuencias, será uno de los objetivos de esta investigación, brindando información necesaria para disminuir estos efectos negativos, donde el correcto uso del azul de metileno (MB), será gran ayuda, para lograr este propósito.

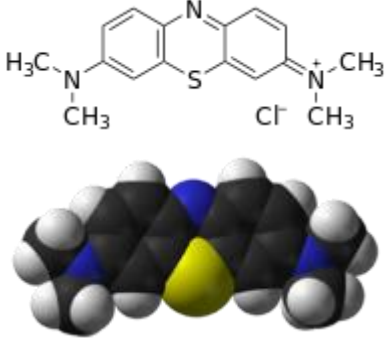
3.3.3 MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE ARCILLAS

3.3.3.1 ANTECEDENTES Y CARACTERÍSTICAS DEL AZUL DE METILENO (MB)

El azul de metileno es un compuesto químico, cuyo nombre científico es cloruro de metiltionina; es un colorante orgánico que se usa para un sinnúmero de aplicaciones, que van desde Medicina y Biología, hasta aplicaciones en Geología, Minería; y para nuestro beneficio, también son útiles en la industria de la Construcción.

El azul de metileno es un compuesto químico heterocíclico aromático (es decir, está formado por ciclos aromáticos, que contienen en su estructura, como mínimo a un elemento químico diferente al Carbono e Hidrógeno), con fórmula molecular: $C_{16}H_{18}ClN_3S$; a continuación, se mostrarán otras propiedades interesantes de este compuesto, las que se resumen en la tabla 6:

Tabla 6: Propiedades físicas y químicas del azul de metileno [18].

Azul de Metileno	
	
Nombre químico	3,7-bis (dimetilamino)- Cloruro de fenazationio Cloruro de tetrametiltionina
Fórmula química	$C_{16}H_{18}N_3ClS$
Masa molar	319,85 g/mol
Número CAS	[61-73-4]
Número EC	200-515-2
Densidad	1.757 g/cm ³
Punto de fusión	100 °C
Punto de ebullición	Se descompone
SMILES	<chem>CN(C)c3ccc2nc1ccc(N(C)C)cc1[s+](c2c3.[Cl-])</chem>

Propiedades:

Por sus características físicas, se puede definir al Azul de Metileno como “Una sustancia que tiene forma de cristales o polvo cristalino, y presenta un color verde oscuro, con brillo bronceado; siendo inodoro y estable al aire, es fácilmente soluble en el agua y en cloroformo, y moderadamente soluble en el alcohol, donde sus disoluciones en agua o en alcohol, son de color azul intenso; también sirve contra los hongos de las uñas, y otro uso común, es para tinter la ropa blanca, cuando se vuelve amarillenta. En países de la ex Unión Soviética, se utiliza aún para desinfectar heridas, y también para aliviar el ardor de las picaduras de mosquito” [19].

Sin embargo, en este trabajo interesará estudiar las propiedades del azul de metileno, como cuantificador y marcador de la cantidad de arcilla, presente en una muestra de arena; esto gracias a sus propiedades fluoróforas y cromóforas, que serán analizadas más adelante.

A continuación, se muestra la Ficha Técnica del azul de metileno (MB), en sus 2 formas de presentación más comunes, tanto con su estructura trihidratada, como con su forma anhidra.

Datos técnicos:

En su forma de trihidrato [20]:

- Número CAS: [7220-79-3]
- $C_{16}H_{18}N_3ClS \cdot 3H_2O$
- PM: 373,90
- Soluble en agua, etanol, cloroformo y piridina; e insoluble en éter.

En su forma de anhidro [20]:

- Número CAS: [61-73-4]
- $C_{16}H_{18}N_3ClS$
- PM: 319,85
- Soluble en agua, etanol, cloroformo; insoluble en éter; y ligeramente soluble en piridina.

Para esta investigación se utilizará la forma anhidra; por ser la que en solución tiene las mayores posibilidades de generar nuevos enlaces puentes de hidrógeno, y/u otros enlaces afines.

3.3.3.2 AZUL DE METILENO EN LAS ARCILLAS

El uso del azul de metileno será gran ayuda, para detectar de una forma sencilla y práctica, el contenido de arcillas en toda muestra de arena, su funcionamiento puede ser resumido de la siguiente manera, las propiedades fluoróforas del componente cloruro del azul de metileno, interactuarán con los componentes superfinos de las arenas (en este caso las arcillas), especialmente con los distintos aluminatos que componen a las arcillas, lo que generará un halo celeste - azulino, alrededor de las partículas arcillosas, al hidratarse los aluminatos y silicatos, con los componentes nitrogenados y con el ión cloruro de las moléculas del azul de metileno (para lograr eso, se usará el reactivo en solución acuosa diluida, tomando así el color azulino).

Finalmente, vale la pena resaltar, que este halo se intensificará, y recién será perfectamente visible a simple inspección, cuando todas las partículas de arcilla presente en el cúmulo de arena, estén completamente hidratadas por el azul de metileno; y es justamente por ello, que este método no sólo es cualitativo (marcando si hay o no arcillas en las arenas), sino también cuantitativo; ya que midiendo la cantidad de reactivo azul de metileno (Methylene Blue o MB, por su nombre o siglas en inglés, respectivamente) consumido por el cúmulo de arena (hasta la aparición del halo azulino), se podrá saber indirectamente, que cantidad de arcilla había originalmente, en la muestra de arena; conceptos respaldados por Beixing, Mingkai y Jiliang [20].

3.3.3.3 MÉTODOS PARA CALCULAR EL MBV

Existen en la actualidad 3 normas técnicas, creadas para cuantificar la cantidad de arcilla, en una muestra de arena: 2 son americanas, la norma AASHTO (normas elaboradas por la Asociación Americana de Vías, para el estudio de suelos y pavimentos), y la norma ASTM (normas que mayoritariamente sirven como fuente, para la elaboración de las normas peruanas NTP); y la otra es europea, que son las normas UNE (normas creadas por el Reyno Español, muy utilizada en la península hispánica); siendo las 3 Normas muy parecidos entre si, y con el mismo.

A continuación describiremos las tres normas, y resumiremos cada procedimiento.

- **Norma AASHTO: TP 57-01 (2004)**

Al igual que todos los procedimientos, esta norma describe cómo se usa el azul de metileno para la cuantificación de la arcilla, en síntesis, se puede decir que primero se tamiza la arena hasta obtener el Pasante de la Malla N°200; luego se obtienen 10g del material pasante, y se

colocan en 30mL de agua, mezclando la muestra con un agitador magnético; para después de 1 minuto, se agrega 0.5mL de azul de metileno a la mezcla (por lo que se genera una solución de concentración 0.5%, con 5g de polvo de Azul de Metileno, por cada 1000mL de agua).

Luego de 1 minuto de agitación, se extrae una gota de la mezcla, y se coloca en un papel de Filtro Whatman N°2, obteniéndose un círculo de arena de color gris; se repite el mismo procedimiento cada minuto (añadiendo cada vez, 0.5 mL de solución de azul de metileno y agitando por 1 minuto), hasta que el círculo gris empiece a ser rodeado de un halo celeste azulino; en ese momento se marca el círculo elegido, pero se continua agregando la solución de azul de metileno por un par de minutos (para comprobar que efectivamente, ya llego la muestra a su punto de saturación, porque hay casos en que aparece un aparente halo azul, pero luego éste desaparece en los siguientes minutos).

Finalmente, se cuantifica la cantidad de azul de metileno (en mililitros) que se añadió a la mezcla, hasta el momento de la aparición del primer halo azul; y se calcula el valor de azul metileno (valor relativo según esta Norma), de la siguiente manera:

$$VA = (C \cdot V) / W$$

Donde:

VA: valor de azul de metileno, en mg de azul por gramo de material seco, para el tamiz de 75um (Malla N°200).

C: Concentración de la solución de azul de metileno, en “mg” de azul por “mL” de solución.

V: “mL” de solución de azul de metileno requerida en la titulación.

W: Gramos de material seco de los finos, utilizados en la prueba.

Cuando se utilizan la concentración de la solución de azul de metileno, y el peso de material seco que pasa el tamiz de 75um (N°200), indicados en esta norma (5mg de azul de metileno por “mL” de solución y de 10g de material), el valor de VA se simplifica de la siguiente manera:

$$VA = 5 \cdot V / 10 = 0.5 \cdot V$$

Donde el valor de azul de metileno (VA), se calcula con aproximación al 0.1 mg/g.

Para relacionar de alguna manera, el valor de azul de metileno (VA), con la implicancia que se tendrá en la arena, se presenta la siguiente tabla elaborada por la AASHTO:

Tabla 7: Valor de Azul de Metileno, relacionado con el desempeño anticipado de la arena (AASHTO)

Valor de azul de metileno (mg/g)	Desempeño anticipado de la arena
≤ 6	<i>Excelente</i>
7 – 12	<i>Marginalmente aceptable</i>
13 – 19	<i>Con problemas / Posibles fallas</i>
≥ 20	<i>Falla segura / arena fallada</i>

Se coloca la Norma AASHTO TP 57-01 (2007), por completo, en la sección de Anexos [21].

- Norma ASTM: C-03 (2003)

Prácticamente tiene el mismo procedimiento que la norma AASHTO, salvo algunas modificaciones, que se resumen a continuación:

- a) Se pesa 5 g de material seco, pasante por la Malla N°200 (No 10 g, como requería la norma AASHTO).
- b) Se coloca en un vaso 150 mL de agua.
- c) Se espera 5 minutos para hacer la primera adición de azul de metileno.
- d) Cada minuto se añade 1mL de azul de metileno.
- e) La concentración de azul de metileno es 0.32%, con 1.6 g de azul de metileno, por 500 mL de solución.

Con estas modificaciones, el valor de azul de metileno, queda de la siguiente manera:

$$VA = (C \cdot V \cdot 100) / W$$

Utilizando los datos presentados previamente, podemos reducir el cálculo del VA a la siguiente expresión:

$$VA = 0.0640 \cdot V$$

Donde:

C: Concentración de la solución de azul de metileno (g/mL).

W: Masa del material seco de los finos de la arena (g).

V: Volumen de la solución de azul de metileno utilizada (mL).

VA: Valor de azul de metileno (% de arcilla en la muestra).

Donde el valor de azul de metileno (VA), se calcula con aproximación al 0.01%.

Para relacionar de alguna manera, el valor de azul de metileno (VA), con la implicancia que se tendrá en la arena, se presenta la siguiente tabla, elaborada tras diversas investigaciones:

Tabla 8: Valor de Azul de Metileno, relacionado con el desempeño anticipado de la arena (ASTM).

Valor de azul de metileno (mg/g)	Desempeño anticipado de la arena
$\leq 0.7\%$	Excelente
0.7 – 1.4%	Marginalmente aceptable
1.4 – 2%	Con problemas / Posibles fallas
$\geq 2\%$	Falla segura / arena fallada

La actualización de esta Norma es la C03-2009, teniendo básicamente el mismo contenido [22].

- **Norma UNE: EN 933-9 (1999)**

Esta norma es muy similar a la Norma AASHTO, por lo que no se realizó este ensayo; sin embargo, se coloca la Norma UNE: EN 933-9 (1999), resumida, en la sección de Anexos [23].

Es importante señalar, que en esta norma se presenta un anexo, para los casos en que el contenido de acilla es inferior al límite visual, y no pueda ser detectado. Aquí se emplea Meta-caolinita, que también es un tipo de arcilla, como material intermedio de cuantificación, ya que se agrega a la mezcla, y luego se resta, del VA de la solución total, el VA de la Metacaolinita [24].

3.4 LOS ADITIVOS

3.4.1 ANTECEDENTES Y CARACTERÍSTICAS

Recordemos que aunque los componentes básicos del concreto son: cemento, agua y los agregados (arena y piedra); existen otros componentes minoritarios que se pueden incorporar, los cuales principalmente son: adiciones minerales, fibras, pigmentos y aditivos.

Es por ello que desde la década del 80, el uso de aditivos se ha extendido en todo el ámbito constructivo, generando mejoras en lo referente a la productividad y al tiempo de ejecución; además, de que aunque se podría pensar lo contrario, su uso representa un ahorro económico para el sector de la construcción. Se gasta algo adicional en la compra del aditivo, pero se recupera mucho más por el ahorro de cemento, por el ahorro de tiempo, etc; y en el caso de los plastificantes, por el ahorro de agua, que aunque no representa un gran ahorro económico, si representa un beneficio para el medio ambiente, que logra disminuir el potencial gran consumo, de este elemento no renovable.

Aditivos para concreto:

Respecto a los aditivos para concreto, Ramachandran los define como: “Componentes orgánicos y/o inorgánicos, que presentan propiedades físicas y químicas excepcionales, y que han sido aplicadas en muchos campos, para diseñar nuevos tipos de concreto, con funciones y características novedosas; cuya inclusión tiene como objeto, generar concretos de alta resistencia, con alta trabajabilidad, con alta resistencia a los sulfatos, con aire incorporado, con rápida o lenta fragua inicial, entre otras propiedades” [25].

Grupos:

Físicamente y químicamente, se pueden distinguir dos grupos principales en los aditivos [25]:

- Aditivos modificadores de la reología, son los que cambian el comportamiento del concreto en estado fresco, como son la consistencia, la docilidad, etc.
- Aditivos modificadores del fraguado, son los que adelantan o retrasan el fraguado (rigidización de las fibras internas, que se forman en el concreto).

Dentro de este grupo, se pueden distinguir dos grupos también principales [25]:

- Aditivos que logran incrementar la fluidez del concreto, haciéndolo más manejable; los aditivos que aceleran el fraguado, son especialmente diseñados para obras o construcciones, donde las condiciones climáticas evitan un curado rápido; como en regiones con clima frío y/o en invierno.
- Aditivos retardantes, que son usados en los lugares donde el concreto fragua rápidamente, especialmente en regiones con clima cálido, o en situaciones, donde el concreto debe ser transportado a grandes distancias; esto con la intención de manipular la mezcla mayor tiempo, antes de la fragua.

3.4.2 ADITIVOS PLASTIFICANTES Y SUPERPLASTIFICANTES

Introducción:

Se hace un hincapié especial en estos 2 tipos de aditivos, porque son los más usados en la industria de la construcción y por tanto, con los que más se trabajará en esta investigación.

De acuerdo a la Norma EN 934, “Los aditivos plastificantes y superplastificantes, que se usan en el concreto, se emplean para conferir al hormigón fresco un mejor comportamiento, en cuanto a trabajabilidad y bombeabilidad; pero también se busca con su uso, mejorar significativamente la resistencia, la durabilidad y otras propiedades del hormigón final” [26].

Además, la Norma EN 934 menciona que: “Según su intensidad, estos aditivos se denominan reductores de agua simples (plastificantes o fluidificantes), y/o reductores de agua de alta acti-

vidad (superplastificantes o superfluidificantes)” [26]; definiciones similares, presentan las Normas ACI116 [27] y ASTM C125 [28], cuyos contenidos son explicados en acápite posteriores.

Clasificación:

De acuerdo con su función principal, los aditivos para concreto, pueden clasificarse de la siguiente manera [25]:

- **“Aditivo reductor de agua/plastificante:** aditivo que sin modificar la consistencia, permite reducir el contenido de agua de un determinado hormigón, o que sin modificar el contenido de agua, aumenta el asiento (Cono de Abrams), el escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez”.
- **“Aditivo reductor de agua de alta actividad (Aditivo superplastificante):** aditivo que sin modificar la consistencia del hormigón, o que sin modificar el contenido de agua, aumenta considerablemente el asiento (Cono de Abrams), el escurrimiento, o que produce ambos efectos a la vez”.
- **“Aditivo reductor de agua:** aditivo que reduce la pérdida de agua, disminuyendo la exudación del concreto”.
- **“Aditivo inclusor de aire:** aditivo que permite incorporar durante el amasado, una cantidad determinada de burbujas de aire, uniformemente repartidas, que permanecen después del endurecimiento”.
- **“Aditivo acelerador de fraguado:** aditivo que reduce el tiempo de transición de la mezcla, para pasar del estado plástico al rígido”.
- **“Aditivo acelerador del endurecimiento:** aditivo que aumenta la velocidad de desarrollo de las resistencias iniciales del hormigón, con o sin modificación del tiempo de fraguado”.
- **“Aditivo retardador de fraguado:** aditivo que retrasa el comienzo de la transición de la mezcla, cuando pasa del estado plástico al estado rígido”.
- **“Aditivo hidrófugo:** Reduce la absorción capilar del hormigón endurecido”.
- **“Aditivo hidrófilo:** Aumenta la absorción capilar del hormigón endurecido”.

- **“Aditivo multifuncional:** Aditivo que afecta diversas propiedades del hormigón fresco y/o endurecido; actuando sobre más de una de las funciones principales, ya definidas en los aditivos mencionados anteriormente”.

Además, en el mercado existen otra variedad de productos, que sin ser propiamente aditivos, y por tanto sin clasificarse como ellos, podrían considerarse como tales, ya que modifican las propiedades físicas o químicas del concreto, ya que aunque no hacen variar su comportamiento reológico, si alteran sus características externas; como ocurre con los colorantes o pigmentos (que modifican el color del concreto, evitando decoloraciones en su fabricación) [25].

3.4.3 ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES

Es necesario hacer el análisis de la composición química de los aditivos superplastificantes, ya que sus propiedades y características, varían en función de algunos cambios, que podrían darse en su composición química; y estos cambios a su vez, modificarán el comportamiento de los morteros, en los que estos aditivos superplastificantes formen parte.

Es por ello que con este análisis, se espera facilitar la elección de la base química; que asegure el mejor comportamiento de los morteros, de acuerdo a las características de los materiales a utilizar, para cada caso particular.

Clasificación:

Desde el punto de vista de su composición química, la Norma EN 934 señala que: “Los aditivos plastificantes y superplastificantes, pueden y suelen clasificarse en 3 clásicas categorías (aunque éstas pueden subdividirse en algunas más)” [26]:

Según la composición de la cadena polimérica: “Pueden ser copolímeros vinílicos y acrílicos, siendo estos últimos, los más comúnmente utilizados en la actualidad. Estas cadenas poliméricas, se producen debido a una reacción de esterificación, donde interviene un ácido policarboxílico y un poliol (Alcohol en cuya estructura, está ubicado más de un radical hidroxilo), en presencia de un aceite o de un ácido graso” [29].

A continuación, se describe en primera instancia, las características y funcionalidades de estos tipos de aditivos; que son los que prioritariamente, se emplearán en esta investigación.

- **Lignosulfonatos:**

Pertenece a la primera generación de aditivos plastificantes para el concreto, y son aún bastante utilizados dentro de la tecnología más simple de aditivos. Se obtienen de un proceso natural, a través de la producción y extracción de celulosa, dentro de la industria del papel y madera; con este proceso, se consigue una reducción de agua de aproximadamente el 10% [25].

- **Naftalenosulfonatos y Melaminasulfonatos:**

Son la segunda generación de plastificantes para concreto. Los Naftalenosulfonatos se extraen del proceso de refinado del carbón; comparados con los Lignosulfonatos, proporcionan una mayor reducción de agua, de hasta un 25%. Los Melaminasulfonatos están basados en polímeros sintéticos (obtenidos de fuentes no naturales), su reducción de agua es similar a la de los Naftalenosulfonatos, con una reducción de agua similar; pero mostrando un considerable aumento en las resistencias de las mezclas, esto especialmente a edades tempranas [25].

Ambas tecnologías, suelen clasificarse entre la segunda y tercera generación de aditivos; en algunos casos, se mezclan con copolímeros vinílicos (polímeros sintéticos, con moléculas de grandes tamaños, incluso superiores, a las moléculas de los polímeros descritos anteriormente); ya que éstos le ayudarán a proporcionar mayor efecto plastificante, una mejor dispersión de las partículas de cemento, y una mayor reducción de agua (aproximadamente = 30%) [25].

- **Policarboxilatos:**

La tercera tecnología de polímeros dispersantes es la diseñada con éteres de Policarboxilato (ellos pertenecen a la última generación, hasta ahora conocida de superplastificantes); estas moléculas (PCE), son producidos por polimerización de radicales de monómeros avanzados.

“Químicamente se basan en copolímeros de ácido acrílico, y ésteres de estos ácidos (comúnmente denominados Policarboxilatos modificados); y a diferencia de los plastificantes tradicionales, éstas son macromoléculas con cadenas laterales, que le confieren forma de peine” [25].

“La síntesis específica de estas macromoléculas, especialmente de las cadenas laterales, es lo que los hace mucho más específicos, ya que dependiendo de la aplicación concreta que se busque, son capaces de variar enormemente la trabajabilidad del hormigón, pudiendo retrasar o acelerar de forma importante el fraguado; a la vez que permite mejorar las resistencias

iniciales y/o finales de las pastas, morteros, hormigones, etc.” [29].

“Con este tipo de aditivos, se pueden alcanzar reducciones de agua de hasta el 40%. Todas estas características ofrecen nuevas aplicaciones y hacen que se trate de aditivos óptimos para la confección de: hormigones autocompactantes, hormigones prefabricados, concretos de altas prestaciones, y muchos más” [29].

Análisis de las interacciones Cemento – Aditivo:

A continuación, haremos un análisis más detallado de los 3 tipos de superplastificantes que fueron usados en esta investigación; y se intentará explicar la estructura química del componente principal, de cada uno de ellos.

De forma similar a los cementos, los aditivos químicos frecuentemente contienen muchos componentes internos, los cuales son inherentes a la naturaleza de sus materias primas, y al resultado de su proceso de manufactura. Por ejemplo, los reductores de agua de Lignosulfonato, están formados internamente de complejas mezclas de componentes químicos, derivados de la degradación química de la Lignina.

Y mientras tanto, los aditivos químicos sintéticos, como por ejemplo los Policarboxilatos (definidos como reductores de agua de alto rango), frecuentemente contienen componentes químicos, con una amplia variedad de pesos moleculares; y también contienen, especies producto de reacciones químicas, y/u otros componentes adicionales, que se adhieren al cemento, conformando sistemas químicos súper complejos, para lograr un propósito específico. Ahora bien, analizando los tipos de interacción (Electrostática y Estérica), que ocurren entre los superplastificantes; se puede observar que la repulsión electrostática, que se da principalmente en los Lignosulfonatos y Naftalenosulfonatos, depende de la composición de la fase acuosa, y del monto adsorbido del superplastificante (cuanto más grande sea el monto de aditivo adsorbido, mejor será la repulsión); y por otro lado, la repulsión estérica, que se da principalmente en los Policarboxilatos, depende de la longitud de la cadena principal, y del largo y número de las cadenas laterales.

En el caso de los aditivos basados en los Policarboxilatos; para mejorar la retención de la fluidez, la cadena principal debería ser corta, pero con un amplio número de largas cadenas laterales; es por esto, que si se lograra sintetizar de manera correcta al Policarboxilato, se conseguirá generar un fuerte mecanismo de repulsión estérica; que será seguramente más fuerte, que los aditivos químicos basados en los sulfonatos (Lignosulfonatos, Naftalenosulfo-

atos, y Melaminosulfonato); y generalmente, no experimenta muchos problemas, incluso en mezclas con baja relación agua – cemento (w/c); además que presenta menos incompatibilidades (respecto a los aditivos con sulfonatos), cuando se mezclan con cementos más finos, lo que evita que se puedan alterar, sus propiedades retardantes.

Como se mencionó anteriormente, la estructura química de los Policarboxilatos, es de tipo “peine” y el efecto del impedimento estérico es atribuido a las cadenas de injertos moleculares, que presentan este tipo de aditivos; un ejemplo, es el caso de los copolímeros de anhídrido maleico y de PEG - Éteralílico (PEG: Polietilglicol), cuyos monómeros son polimerizados recíprocamente, y que forman la típica estructura de peine, mostrando una buena performance, incluso a bajas relaciones agua – cemento.

Otro ejemplo es el caso de los copolímeros de ácido acrílico, y los de acrilato – Mt – PEG – éster, pero en este caso, los monómeros son polimerizados aleatoriamente; y en algunos casos, bajo condiciones adecuadas para realizar las síntesis, el grupo metoxi es desmantelado al final de las cadenas de PEG, para que desde ese punto ex - metoxi, otra cadena troncal puede crecer, hasta que en conjunto, con otras cadenas, lleguen a constituir un nuevo tipo de Policarboxilato, en este caso, de forma irregular.

Existen buenas aproximaciones, con simulaciones computacionales, que muestran que la adsorción del policarboxilato por parte del cemento posiblemente se inicializa al final de estas cadenas troncales (investigación efectuada por Kazuo Yamada y Shunsuke Hanehara [29]).

Sin embargo, a pesar de las ayudas computacionales, descubrir cuál es la forma final del aditivo, y entender a la perfección, cómo se logrará la interacción final entre el aditivo y el cemento, tampoco ha sido posible a cabalidad; pero a pesar de esta falta de información, esta investigación demostró que todas las formas de superplastificantes, prácticamente reaccionan de la misma manera, salvo a muy bajas relaciones agua – cemento (menores a 0.25); ya que en estos casos, se necesita un poder plastificante superior, y sólo el efecto estérico del Policarboxilato tipo peine, logrará tal efecto dispersante.

Nuevas investigaciones también indican, que haciendo cálculos teóricos, el espesor de la capa de adsorción de cada cadena tiene que ser mayor que 10nm, para partículas de 1µm de radio; y este espesor corresponde a unas 20 a 30 repeticiones, del diámetro de una cadena de Oxietileno de PEG; por ello, en estos casos, la concentración de PEG en la superficie de la fase sólida, será el punto crítico.

Además, estas nuevas investigaciones asumieron que en el caso de los Policarboxilatos, la intensidad del efecto de impedimento estérico, es proporcional a la cantidad adsorbida de Policarboxilato; pero mostraron que esto se cumple sólo en condiciones específicas, que son las siguientes: 1) que los copolímeros tengan grupos carboxílicos libres para la adsorción; 2) que la relación agua - cemento sea mayor a 0.3; 3) que el espesor de las cadenas de Policarboxilato sea 20 veces el espesor de una molécula de Oxietileno y 4) que el monto de adsorción del Policarboxilato, sea inversamente proporcional, al área superficial de cada fase sólida, pero que en cambio, no sea inversamente proporcional, a la masa de cada fase.

Por lo que se puede concluir respecto al sistema de adsorción de los Policarboxilatos, que hay 2 importantes factores que no han sido reconocidos claramente; el primero es referente al tema del área superficial de la fase sólida, y el segundo es referente a la competitividad, para llegar a la adsorción de equilibrio, de los superplastificantes con los aniones; recordando que la adsorción del Policarboxilato en cementos hidratados, usualmente ocurre sólo en una fase determinada.

De forma general, los Policarboxilatos han sido diseñados en su mayoría, para ser adsorbidos por el Aluminato Tricálcico (C_3A), y no tanto por los Silicatos de Calcio, de forma similar a los aditivos sulfonatados; es por ello, que lo importante no es la cantidad adsorbida de aditivo, en función de la masa de cada mineral del Clínker, sino la cantidad adsorbida de aditivo, en función del área superficial de los compuestos hidratados (de lo que se puede deducir, que las fases más finas, serán las más reactivas).

Además, debido a que la fuerza en la adsorción del superplastificante, por parte de las partículas de cemento, no es muy intensa, se puede deducir que la adsorción del Policarboxilato es reversible, aunque esto podría suceder, dependiendo de la composición química de la fase acuosa; por lo que en cada caso, será muy importante prestar atención, a las características químicas de cada solución.

Considerando estos puntos, se puede deducir acerca de la interacción de los Policarboxilatos sobre las partículas de cemento hidratadas; que mientras haya una mayor concentración de iones de sulfato en la muestra, habrá una menor cantidad adsorbida de Policarboxilato; esto debido a que mientras menos sulfato hay en la muestra, el cemento se vuelve más reactivo; y por tanto, adsorbe una cantidad superior de aditivo de forma innecesaria (tomando como referencia, la cantidad total de aditivo añadida a la mezcla); lo que es

perjudicial, ya que este aditivo malgastado, posteriormente hará falta, cuando la mezcla necesite más aditivo, en pro a mantener la trabajabilidad.

Continuando con el análisis de los Policarboxilatos, se puede concluir que el comportamiento de las mezclas de mortero, no sólo depende del efecto por la cantidad de aditivo adsorbido; sino que también tienen mucha influencia, las características químicas de la solución; y sólo analizando estos múltiples aspectos, se podrá explicar los efectos que presentará el aditivo dentro de la mezcla; por lo que resumiendo se puede decir, que el caso donde mayor importancia tienen las características químicas de la solución, se localiza en el comportamiento que afecta la adsorción de los Policarboxilatos, más que la de los aditivos sulfonados.

Sin embargo, también ha sido demostrado, que la adsorción de superplastificantes (ya sea Policarboxilato, Naftalenosulfonato o Lignosulfonato), llegará a un punto de equilibrio tarde o temprano. Se debe recordar que la porción que es absorbida por el Policarboxilato, es el grupo carboxilo, y ellos son adsorbidos por los terminales de calcio de los hidratos de cemento, y además por los aniones; demostrando el Policarboxilato de esta manera, afinidad por el calcio, por los iones sulfato, por los iones carbonatos y por los iones fosfato; sin embargo, en esta investigación, para facilitar el entendimiento de la compleja interacción cemento – aditivo, se asumirá que las características químicas y reológicas de la mezcla, sólo dependen de la cantidad adsorbida de cada aditivo (desde los Policarboxilados, hasta los sulfonados).

Ahora bien, como se describió anteriormente, se presume que la adsorción del Policarboxilato, se efectúa de una manera distinta en cada fase sólida del cemento (cada partícula de cemento adsorbe Policarboxilato a su propio ritmo); por ejemplo, desde el comienzo, el C_3A absorbe 5 veces más que el C-S-H, y cuando se hidrata el cemento y forma Etringita, ésta molécula adsorbe 3 veces más que el mismo C-S-H; esto significa que el área superficial de cada fase es importante, para el cálculo de la adsorción del Policarboxilato en la mezcla.

Sin embargo, debido a que es difícil estimar el área superficial de cada fase en el cemento, se puede hacer una aproximación, calculando la cantidad o porcentaje de cada componente del cemento; por lo que se puede afirmar, que el comportamiento dispersante de los Policarboxilatos, depende del tipo de cemento con el que interactúa (especialmente según la cantidad de álcalis del cemento), realizando un distinto mecanismo de trabajo, según sea el tipo cementicio con el que interactúa el Policarboxilato.

Los otros superplastificantes (los sulfonatados), pueden ser diseñados a partir de la Melamina o del Naftaleno, son producidos por un proceso de reacción química llamado policondensación, es decir, por la creación de cadenas poliméricas dentro de una solución acuosa, donde se observa que las moléculas poliméricas, cuentan con muchos segmentos aniónicos (esto proceso es mucho más común en estos días, debido a que en la actualidad, una amplia variedad de monómeros pueden ser utilizados para formar polímeros, que cumplen con la propiedad de dispersar las partículas del cemento hidráulico).

Respecto al modo de acción de estos superplastificantes, y a su interacción con los distintos cementos que se utilizan para diseñar pastas, morteros y concretos; se puede decir, que tienen algunas semejanzas generales con los superplastificantes de Policarboxilato, aunque también presentan algunas diferencias de comportamiento (especialmente en los cementos con mucho álcalis).

Cuando un superplastificante aniónico, es adherido a los segmentos negativos de los polímeros, que sobresalen en la superficie de las partículas de cemento, se incrementa la carga negativa de cada partícula, y esto causa que las partículas se repelan una con la otra, lo que rompe la floculación cementicia, y libera el agua atrapada. Esta dispersión del cemento, libera el agua atrapada, lo que resulta en la reducción de la viscosidad plástica del concreto, del mortero, o de la pasta; por lo que la trabajabilidad es mejorada, y la relación agua – cemento (w/c), puede ser reducida.

Para entender la estructura molecular de los superplastificantes, es de importancia capital analizar primero el modo de acción y performance de los 3 tipos de superplastificantes utilizados; ya que la densidad de carga de los polímeros, debe estar afinada con el cemento, para poder acoplarse también con las cargas positivas de las partículas de cemento; causando la continua dispersión del cemento, que de otro modo, retornarían rápidamente al estado de floculación; alargando por largo tiempo la vida del slump y la fluidez de las mezclas, mejorando la afinidad de los polímeros al cemento; con lo que se incrementa, la eficiencia en la dispersión de los superplastificantes, y mejora a su vez, la reología de la pasta, mortero o concreto.

Los mecanismos de dispersión, muestran que en las dispersiones estéricas y electroestéricas, el largo de las moléculas y la densidad de carga son de particular importancia; pero en el caso de los superplastificantes basados en Melamina y Naftaleno, estos funcionan por repulsión electrostática; por lo que en este tipo de aditivos, los polímeros aniónicos se adsorben

en la superficie de las partículas de cemento, e incrementan la densidad de carga negativa lo que causa que las partículas de cemento, comiencen con una mutua repulsión y floculación.

Respecto a la dispersión estérica, ésta puede ser encontrada en los primeros superplastificantes basados en Policarboxilatos (e incluso también se observa en algunos tipos de aditivos sulfonados); e igual que en el caso anterior, los poliméricos no iónicos también pueden ser adsorbidos en la superficie de las partículas de cemento, y se extienden incluso fuera de su superficie, lo que aumenta la eficiencia del proceso (las partículas se aproximan entre sí, reduciendo la rotabilidad libre de las cadenas, que resulta en una disminución de la entropía).

Sin embargo, existe una tercera fuerza de dispersión, la dispersión electroestérica, la cual es una combinación de la dispersión electrostática, y la dispersión estérica; esta interacción, sólo puede ser encontrada en los superplastificantes basados en Policarboxilatos de alta rango y desempeño; y al ser una combinación de los casos anteriores, las moléculas poliméricas construyen sus interacciones, tanto aniónicas como no iónicas, por medio de cadenas laterales bien afinadas, que son adsorbidas por la superficies de las partículas de cemento; y como era de esperarse, este tipo de interacción produce las mejores dispersiones, y por tanto, producen el mejor comportamiento reológico posible, en pastas, morteros y concretos; mostrando una fluidez y trabajabilidad mayor, en cada instante, y que se mantiene por mayor tiempo.

Los superplastificantes pertenecen a un grupo de químicos conocidos como dispersantes, la meta de los dispersantes es prevenir la floculación de las partículas de cemento. Estos dispersantes, son básicamente superficies químicas activas, que consisten en largas cadenas de moléculas orgánicas; conteniendo un grupo hidrofílico polar (como por ejemplo, $-\text{COO}^-$, $-\text{SO}_3^-$, $-\text{NH}_4^+$), que está unida a cadenas orgánicas hidrofóbicas no polares; y éstas a su vez, vienen acompañadas de algunos grupos polares, como por ejemplo, de los iones hidróxido OH^- .

Diversas investigaciones han comprobado, que el impedimento estérico, es un mecanismo más efectivo que la repulsión electrostática, lo que se detallará y explicará más adelante.

Estas explicaciones son compatibles, y permiten entender, porque esta interacción cemento – aditivo - copolímero, puesta para poner en marcha la hidratación del cemento, es menos sensitiva en los Policarboxilatos; y esto es porque aquí, la capa polimérica sólo puede crecer hasta en promedio el tamaño de las cadenas laterales (crecen directamente desde la super-

ficie de las partículas de cemento, por su naturaleza estérica); a diferencia de los otros tipos de superplastificantes, donde es necesaria una interacción lineal polielectrónica: Cemento – copolímero - aditivo, como en los Naftalenosulfonatos y Lignosulfonatos (donde es necesario el puente polimérico, para que se dé la interacción electrostática cemento - aditivo).

Además, se puede afirmar, que un aumento de sulfato soluble, puede ayudar a prevenir una temprana precipitación de yeso; esto es muy importante, ya que es de vital importancia que se mantenga una cantidad considerable de yeso en la interfaz líquida, debido a que es justamente el sulfato de calcio (Ca_2SO_4), el que retrasa la formación de Etringita, que es el principal componente responsable, de las fraguas de las pastas y/o los morteros.

En efecto, se ha demostrado que las cadenas laterales del Policarboxilato (usualmente de Óxido de Polietileno) mantienen la trabajabilidad; hasta que las capas de hidratación que van creciendo, son incorporadas en su totalidad, sobre la superficie del cemento; que es cuando recién se podría afirmar, que el aditivo empezará a decaer en su propiedad fluidificante.

Algunos investigadores se han preocupado y han demostrado, la importancia de encontrar el momento correcto de añadir el aditivo; ya que adicionar de manera retardada un superplastificante, permite retrasar de manera directa la fragua inicial del mortero; demostrando de esta manera, que una adición no simultánea del aditivo, influye largamente en el comportamiento de la mezcla, dando como resultado, una elevada fluidez y trabajabilidad, por mayor tiempo.

Adicionalmente, Uchikawa y sus colaboradores, en 1995, continuaron vinculando la mejora en la fluidez de los morteros, con las adiciones retardadas de superplastificantes, ya que de este modo, se lograba mantener una mayor disponibilidad del aditivo en solución, con el paso del tiempo; y también encontró, que los aditivos químicos basados en Naftalenosulfonatos, eran más sensibles a una adición tardía, en comparación con los Policarboxilatos y los Lignosulfonatos, esto debido a su misma naturaleza química, [30].

Respecto al efecto dispersante en las partículas, y a la fluidez resultante en las mezclas, aunque podemos asumir que el efecto dispersante del superplastificante, es proporcional a la fluidez de la pasta, estas proporciones son distintas, para los diferentes tipos de superplastificantes, y/o para las distintas proporciones de dosificación. Además, y aunque esto se discutirá en el acápite de arenas, se sabe que el efecto de los agregados, en la hidratación del cemento es muy grande, y tiene múltiples efectos; además estos efectos también pueden

ser evaluados, en el área superficial de la fase sólida, ya sea de la pasta, del mortero, o del concreto. Por ejemplo, se probó de los resultados obtenidos, que las arcillas minerales también afectan la adsorción del Policarboxilato, aunque la relación entre la adsorción de los Policarboxilatos por estas arcillas, y la fluidez de la mezcla, no llegó a ser comprendida al 100%.

Dentro de las complejas interacciones presentes, entre un aditivo reductor de agua y el cemento; existe el efecto de los componentes “pseudoinertes” (arenas, por ejemplo), en la trabajabilidad de la mezcla, que podría ser significativa; por ejemplo, cuando hay alguna interacción entre un superplastificante y los finos de la arena, se sufre una alta pérdida de trabajabilidad durante el transporte; además, aumenta la posibilidad de un agrietamiento a temprana edad, incluso en concretos de supuesta alta calidad (llamados así, por tener alta resistencia mecánica); ya que puede ocurrir, que los poros del concreto absorban el agua de sangrado, causando mayores fallas en el estado plástico, además que un alto contenido de cemento causa un contragolpe térmico excesivo; y nuevas investigaciones mostraron, que incluso un contenido mínimo de finos de la arena de río, podría afectar el rendimiento reológico del aditivo en los morteros.

Finalmente, se puede concluir, que aun cuando el comportamiento de los superplastificantes en los sistemas cementicios, depende de muchos factores (entre los que destacan, la finura y la composición química del cemento, la finura de la arena, el modo de introducción de los aditivos a la mezcla, etc.), los que fueron estudiados detalladamente en este Proyecto; el principal factor, que guía el comportamiento de los aditivos, siempre será el referente a su propia composición química; por lo que ahondar en el estudio de sus propiedades, para relacionarlo con lo ya hallado, tiene que ser el siguiente paso a buscar, en investigaciones futuras afines.

IV. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1.1 PASOS SEGUIDOS PARA LA REALIZACIÓN Y CULMINACIÓN DE LA TESIS

- a) Se obtendrán las características físicas y mecánicas de las diferentes arenas, que son materia de este estudio.
- b) Se validará la equivalencia en la determinación de contenido de arcillas en las arenas, con el método de valor de azul de metileno (MBV), según las normas AASHTO TP 57-2000 y ASTM C03-2003.
- c) Se analizarán las características químicas de todos los cementos y aditivos, que formarán parte de los morteros a diseñar.
- d) Se prepararán morteros, con diferentes combinaciones cemento - arena – aditivo – Dosis de Aditivo (Total 135 combinaciones, replicadas por triple), las que serán equivalentes a un diseño de mezcla de uso cotidiano.
- e) Se evaluará el desempeño de cada uno de los morteros preparados, con la prueba de mini slump y del diámetro externo.
- f) Se prepararán cubos de 4" de arista, a base de morteros con diferentes combinaciones cemento - arena – aditivo – Dosis de Aditivo (Total 54 combinaciones, replicadas por triplicado).
- g) Se obtendrán los valores de resistencia a la compresión, de cada uno de los morteros preparados, con la prueba de mini slump y del diámetro externo.

4.1.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES A EMPLEAR

- a. Se evaluarán 3 tecnologías diferentes de aditivos: Base Naftalenosulfonato, Base Lignosulfonato y Base Policarboxilato.

- b. Los 3 cementos sobre los cuales se dosificará el aditivo, serán de diferente tipo y procedencia; los cementos serán caracterizados, de acuerdo al ASTM C150 [6] y al ASTM C1157 [7].
- c. Las 3 arenas, que serán parte de los diferentes morteros para evaluación, provendrán de diferentes canteras, buscando tener variedad en sus características físicas y en su composición química (contenido de material fino, arcillas, limos, etc).

4.2. REACTIVOS, MATERIALES, ACCESORIOS Y EQUIPOS

4.2.1. REACTIVOS

- Azul de Metileno diluido, concentración A (Para las especificaciones AASHTO):
 $1.599\text{gr}_{(\text{MB})}/100\text{gr}_{(\text{H}_2\text{O})}$.
- Azul de Metileno diluido, concentración B (Para las especificaciones ASTM y UNE): $2.500\text{gr}_{(\text{MB})}/100\text{gr}_{(\text{H}_2\text{O})}$.

4.2.2. MATERIALES

- Cemento Tipo I
- Cemento Tipo HE
- Cemento Tipo V

- Arena Jicamarca (Procedente de la Mina)
- Arena Huancayo (Procedente de la Mina)
- Arena Malanche (Procedente de la Mina)
- Arena Orcopampa (Procedente de la Mina)
- Arena Pallancata (Procedente de la Mina)

- Aditivo 1 – Tecnología Naftalenosulfonato
- Aditivo 2 – Tecnología policarboxilato
- Aditivo 3 – Tecnología Lignosulfonato

4.2.3. ACCESORIOS DE TRABAJO

- Viales de 20mL, de 10ml, y de 5 mL
- Recipientes de vidrio de 100mL y de 50mL
- Pipeta de 30mL, con bombilla incluida
- Pie de Rey, con una precisión de 0.05mm
- Cilindro metálico normado, de diámetro interior de 4cm
- Paletas, cucharones, y cucharitas
- Papel de Filtro Wattman N°2
- Cronómetro marca Casio, con temporizador

4.2.4. MATERIALES DE SEGURIDAD

- Guantes de nitrilo
- Guantes de seguridad
- Gafas de seguridad
- Mascarilla anti-polvo
- Casco anti-impacto

4.2.5. EQUIPOS

- Balanza analítica AGN 220, con precisión de $\pm 0,00001$ g (Fig. 4).
- Balanza de plataforma BA30Y - A5, con precisión de $\pm 0,01$ g (Fig. 4).
- Agitador mecánico OS20-S, con velocidad máxima de 500rpm (Fig. 5).
- Agitador magnético, con calentador MS7 – H550.
- Horno Microondas Philips, con temperatura máxima de 150°C.
- Estufa universal UN 55, con temperatura máxima de 250°C (Fig. 3).
- Mezcladora Hobart N-50, con velocidad máxima de 100rpm (Fig. 5).
- Tamizadora Eléctrica de Laboratorio, con mallas de 4" hasta 0.075mm(N°200) (Fig. 3).



Figura 01: Tamizadora Eléctrica de Laboratorio y Estufa universal UN 55



Figura 02: Balanza de plataforma BA30Y - A5 y Balanza analítica AGN 220



Figura 03: Mezcladora Hobart N-50 y Agitador mecánico OS20-5

4.3. ENSAYOS PREVIOS

4.3.1. ENSAYO PARA CALCULAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

Hallar el contenido de la humedad natural de las arenas es importante, ya que este valor junto con el de la humedad de absorción, y el peso específico; constituyen los 3 valores básicos y determinantes, para construir una tabla de diseño, tanto para morteros como para el diseño de concreto; sin embargo hay que recordar, que los resultados que se mostrarán en la sección de presentación de resultados son referenciales, ya que estos dependerán de muchos factores, que serán descritos paso a paso, en la sección de discusión de resultados.

4.3.2. ENSAYO PARA CALCULAR EL MÓDULO DE FINURA (MF)

La clasificación de las arenas respecto a su módulo de finura, es un parámetro de suma importancia para poder identificarlas, ya que permite conocer el tamaño promedio de las partículas de arena; es decir, a mayor módulo de finura, se debe entender que la arena es más gruesa, y viceversa; claro está, que este es un valor relativo, ya que no garantiza un comportamiento preciso de arena; ni que el mortero o concreto que se fabrique con ella, tendrá un comportamiento específico; sin embargo, si dará un indicio de cómo podría resultar el diseño del mortero a futuro, porque en forma general, hay parámetros como éste, que marcan si una arena “funcionará” bien o no dentro de un mortero, o en una mezcla de concreto.

Se hace notar, que no existe una norma específica, para calcular el módulo de finura (MF); ya que este factor se obtiene del Ensayo de Granulometría, que fue desarrollado previamente en esta investigación, para 5 arenas de diferentes zonas del Perú; de las que fueron elegidas 3, por ser las que presentaron un MF más acorde, con los valores promedio que requiere una arena para construcción.

4.3.3. ENSAYO PARA CALCULAR EL % DE FINOS QUE PASA LA MALLA N°200

Finalmente, la clasificación de las arenas, respecto al “porcentaje” de finos que pasa la malla N°200; también es muy importante, ya que muestra un indicio más real de la finura de las arenas; y más importante aún, muestra el contenido de finos de las arenas; no completamente, pero sí de forma aproximada; ya que el analizar el % de finos pasante por la malla N°200 por lavado, permite ver que parte de la arena es en realidad material fino; y a partir de esto, y de aplicar los demás métodos (como el MBV), se logrará calcular el porcentaje de arcilla en la arena, que es lo que debilitará a los concretos y/o morteros, fabricados con ésta.

Se hace notar, que éste método calculará el porcentaje de la totalidad de finos presentes en las arenas (lo que incluye a los limos, a las arcillas, entre otras partículas principalmente bituminosas); mientras que el método del valor de azul de metileno (MBV), sólo detecta a las partículas de arcillas (que estén presentes en las muestras de arena); y aunque como se mencionó anteriormente, ambos valores (% de finos y MBV), generalmente tienen la misma tendencia; se podría encontrar por ejemplo, una arena con un alto contenido de finos, pero con un bajo contenido de arcillas (en estos casos, la mayoría de los finos serían limos), por lo que esta arena no tendría problemas, en formar parte del diseño de un mortero o de una mezcla de concreto; y el mismo análisis podría hacerse en sentido contrario, ya que arenas con poco % finos, podrían tener un mal comportamiento dentro de un mortero.

4.3.4. ANÁLISIS DE LOS CEMENTOS PERUANOS ELEGIDOS

Como se explicó anteriormente, existen 5 tipos de cementos disponibles en el mercado mundial (I, II, III, IV, V); además, de casi 30 otros tipos de cementos, modificados a partir de los otros 5; sin embargo, en Perú no están disponibles todos estos tipos de cementos (así como en otros países, tampoco están presentes algunos de los cementos, que sí están presentes en Perú); por lo que se analizará, sólo los que se producen aquí.

A continuación, para ampliar lo mencionado anteriormente, se muestra un análisis detallado de la situación de los cementos en Perú, presentado por la Portland Cement Association (PCA) [31]:

“Perú tiene una gran variedad de cementos, definidos por las normas NTP 334.009 (Cementos. cemento Portland – requisitos), NTP 334.090 (Cementos. cemento Portland adicionado – requisitos) y NTP 334.082 (Cementos Portland, especificación de la performance). Los cementos Portland, definidos en la norma NTP 334.009 (Norma que contiene tanto requisitos químicos como físicos para estos cementos), son:

- Tipo I (Normal), con resistencia a los 7 días de 19MPa (190kg/cm²).
- Tipo II (Moderada resistencia a los sulfatos), con resistencia a los 7 días de 17MPa (170kg/cm²), y C₃A máximo 8%.
- Tipo III (Alta resistencia inicial).
- Tipo IV (Bajo calor de hidratación), con resistencia a los 28 días de 17MPa (170kg/cm²).
- Tipo V (Alta resistencia a los sulfatos) con resistencia a los 28 días de 21MPa (210kg/cm²), y C₃A máximo 5%.

Y la Portland Cement Association, menciona que en Perú, los cementos adicionados son:

- El cemento portland puzolánico (IP y P), el cual puede tener de 15 a 40% de puzolana en masa.
- El cemento portland puzolánico modificado – I(PM), que tiene hasta el 15% de puzolana.
- El cemento portland de escoria, el cual tiene de 25% a 70% de adición de escoria de alto horno.
- El cemento portland de escoria modificado – I(SM), que puede tener hasta 25% de escoria.
- El cemento portland compuesto (ICo), que puede tener una adición de caliza o material inerte de hasta 30%, siempre y cuando este material tenga como mínimo, 75% de CaCO_3 .

Estos cementos pueden presentar una combinación de otras propiedades, como la moderada resistencia a los sulfatos y moderado calor de hidratación, a través de la adición de los sufijos MS y MH, respectivamente. El requisito de resistencia a los 28 días de estos cementos es de 25MPa (260kg/cm^2), a excepción de los cementos IS(MH) e IP(MH), los cuales deben presentar, por lo menos 20MPa (200kg/cm^2), y del cemento P, el cual debe presentar, por lo menos, 21MPa (210kg/cm^2) a los 28 días.

La norma NTP 334.082 trae los requisitos de desempeño para los cementos Portland, para aplicaciones generales y especiales; sin restricciones a la composición o a los constituyentes de los cementos. Esta norma tiene como base la ASTM C1157 [7], y diferencia los cementos portland modificados (con hasta 15% de adiciones), de los cementos adicionados (con más del 15% de adiciones); y los clasifica según sus propiedades, de la siguiente manera:

- Tipo GU (Construcciones generales).
- Tipo HE (Alta resistencia inicial).
- Tipo MS (Moderada resistencia a los sulfatos).
- Tipo HS (Alta resistencia a los sulfatos).
- Tipo MH (Moderado calor de hidratación).
- Tipo LH (Bajo calor de hidratación).
- Tipo R (De baja reactividad a los álcalis, con agregados reactivos)".

4.4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.4.1. VALOR DE AZUL DE METILENO (MBV)

Se realizó el ensayo de valor de azul de metileno, a 5 muestras de arena (que a la vez, previamente ya habían sido escogidas de un banco de casi de 20 clases de arenas), para según los resultados, realizar la elección final de 3 de ellas. Para lograr ello, se realizó este ensayo por 2 métodos distintos, primero con la Metodología AASHTO y luego con la Metodología ASTM; es decir, se hizo la comparación entre 2 de los 3 métodos conocidos y/o disponibles, para la determinación del contenido de arcillas. No se realizó la Metodología UNE, por la similitud de resultados entre ASTM y AASHTO, lo que nos hizo suponer que los resultados obtenidos al ser coherentes, eran suficientes para clasificar correctamente las arenas).

Aunque ya se describieron previamente los 2 métodos, se hace notar que el segundo método (Método ASTM) fue modificado ligeramente, al obviar la adición de HCl a la muestra; ya que esto no fue necesario, por ser la muestra lo suficientemente reactiva y uniforme, y podía reaccionar por sí sola con el azul de metileno (es sólo por este pequeño cambio, que el Método ASTM, es llamado en esta investigación Método Pasquel; por ser el Ing. Enrique Pasquel, el primero en fundamentar y validar este método, sin la necesidad de la adición de HCl [32]).

4.4.2. DISEÑO DE MORTEROS Y MINISLUMP

Una vez elegidos los 3 cementos y las 3 arenas más eficientes; se diseñaron morteros (mezclas de cemento, agua y arena; sólo si se les añadiera grava, pasarían a llamarse “concreto”). Debido a que se realizaron todas las combinaciones posibles, se tuvieron 9 morteros blanco (sin la presencia de aditivos); y cuando se hizo la adición de cada uno de los 3 aditivos a investigar, se tuvieron 27 combinaciones, lo que representó 27 distintos tipos de mortero, que fueron analizados y estudiados, física y químicamente.

En todos los casos, se tomó la humedad de absorción de las 3 arenas cada 21 días, para realizar los diseños iniciales; y la humedad natural cada 2 días, debido que las condiciones ambientales, pueden hacer variar este valor más rápidamente; lo que hubiera modificado en gran medida, el diseño de los morteros a posteriori.

En el caso del cemento, su peso específico fue tomado directamente de la ficha técnica de cada cemento, brindada por cada uno de los 3 fabricantes. Para el caso de la arena, el peso específico de las 3 arenas fueron tomadas al empezar el proyecto.

En el caso de los aditivos, todas las características físicas fueron brindadas por BASF, salvo el nombre comercial de los 3 productos; las dosificaciones empleadas fueron las recomendadas inicialmente, pero fueron variando, conforme se medía experimentalmente su poder plastificante en los morteros, intentando llegar a un valor referencial a futuro requerido.

Luego de haber indicado las condiciones generales, de los materiales, que conforman el mortero; a continuación, se describe el proceso más común, para la elaboración de morteros [33].

PROCEDIMIENTO PARA PREPARAR MORTEROS (HUMEDAD DE LA ARENA: 9.0 +/- 1.0%)

- Elegir un diseño de fabricación para el mortero (Tabla previamente elaborada, donde se especifican las cantidades de cada material que se van a emplear).
- Modificar el volumen (m^3) del mortero a trabajar, y colocar la humedad de la arena correspondiente, en la hoja de diseño.
- Pesar los componentes del mortero equivalente, es decir: Arena, agua, cemento, filler (Si es que se utilizara) y aditivo; según la hoja de diseño, obtenida previamente.
- Pesar el agua en el bowl, y separar en un vaso de precipitado, entre el 10% y el 15% en peso, de agua, para el lavado del envase que contiene el aditivo.
- Prender el equipo mezclador Hobart, a velocidad 1.
- Adicionar la arena al bowl que contiene entre el 80% y el 90% restante de agua, y mezclar por 2 minutos.
- A los 2 minutos agregar el cemento, y mezclar por 1 minuto más, a velocidad 1.
- Agregar el aditivo a los 3min, y enjuagar el vaso con el porcentaje de agua separada, continuar mezclando por 1 minuto.
- A los 4min, apagar y raspar el contorno y el fondo del bowl, por algunos segundos, para asegurarse que la mezcla continúe homogénea.
- Volver a prender el equipo a velocidad 1, y continuar mezclando por 2 minutos.
- Apagar el equipo a los 6 minutos.
- Antes de realizar los ensayos correspondientes (fluidez, contenido de aire ocluido, etc.); tener listos y húmedos, los equipos de medición; como el Vernier, la placa de vidrio, etc.
- Finalmente, lavar los equipos, vasos, y cualquier otro equipo utilizado en este ensayo.

Resumiendo el procedimiento, se puede decir que se preparó el mortero equivalente, de manera similar al diseño de un concreto estándar, respetando el orden de adición definido para tal caso. Una vez preparado el mortero, se realizó el ensayo de mini slump (necesario para ver las características físicas de la mezcla); que consistió en colocar una muestra del mortero en un cilindro metálico, que al ser levantado, dejó fluir el mortero en forma circular, cuyos diámetros fueron registrados.

Para culminar finalmente con este procedimiento, se realizó el ensayo de mini slump, el cual consistió en colocar una muestra del mortero, en un cilindro metálico de 4cm de diámetro; varillando, primero cuando se coloca una tercera parte del volumen ($1/3$), luego a las dos terceras partes ($2/3$), y finalmente al rellenar el total del cilindro, enrasando luego de colocar la última capa; para luego en 3 segundos, levantar el cilindro, midiendo inmediatamente con el Pie de Rey, el mayor y menor diámetro del mortero resultante (cuyas líneas ejes, deben ser perpendiculares entre sí).

A mayor diámetro del mortero, se puede suponer a priori, que el aditivo tiene mayor poder plastificante; aunque cuantificar el poder del aditivo, dependerá también del tiempo de duración de este poder plastificante, y no sólo del "Valor plastificante o de fluidez inicial", hallado con el diámetro.

Más adelante, la influencia de la temperatura será analizada, y para lograr un mayor entendimiento de este acápite, se citaron otras investigaciones reológicas, que fueron realizadas en pastas y morteros de cemento, quienes también utilizaron una máquina revolvedora rotacional Howart (Figura 5a), hallando en todos los casos, que trabajando las muestra a temperatura constante, aproximadamente a 20°C , se podían obtener excelentes resultados; sin embargo, en la práctica, otras investigaciones también han demostrado, que la temperatura del ambiente puede variar fácilmente de 5°C a 30°C , sin causar cambios aparentes en el comportamiento de los morteros.

En este trabajo se estudió intensivamente el comportamiento reológico (el comportamiento del flujo) de tres superplastificantes (Polilignosulfonato, Polinaftalenosulfonato, y Policarboxilato), en combinación con varios cementos; donde el objetivo fue determinar los parámetros más importantes, que influyen en el comportamiento reológico de las mezclas, especialmente durante las primeras dos horas de hidratación del cemento (etapa en que generalmente se da el mezclado, y es transportada y colocada la mezcla).

Para lograr ello, los parámetros reológicos más importantes fueron:

- La cantidad de C_3A .
- La cantidad de álcalis solubles (Na^+ , K^+).
- El tipo y la cantidad de Superplastificantes utilizados.
- La temperatura del mortero o cemento.
- La relación w/c.

Respecto al contenido de C_3A y álcalis solubles, depende del tipo de cemento; en el caso de esta investigación, los cementos investigados tuvieron un contenido de C_3A que varió entre 1.5 a 12.6, y un contenido de álcalis solubles entre 0.48 a 1.44. La influencia de estos dos parámetros sólo puede ser comparada con cementos diferentes, o simulada por la adición de materiales similares.

En lo referente a la influencia de la adición de Na_2SO_4 sobre el comportamiento del mortero, esto podría explicarse en base a un modelo de adsorción del superplastificante; pero se debe recalcar que de todas maneras, la fluidez de la mezcla siempre va estar principalmente determinada, por la cantidad de superplastificante adsorbido en la superficie de partículas de cemento; aunque esta cantidad por lo expuesto anteriormente, está influenciada por la cantidad de C_3A contenida en el cemento; la que a su vez depende de la cantidad de moléculas superplastificantes incorporadas en los hidratos, y del contenido de iones sulfato en los poros llenos de agua.

4.4.3. DISEÑO DE CUBOS DE MORTERO Y PRUEBA DE RESISTENCIA

Una vez, que se analizó el grado de plasticidad y trabajabilidad (concepto ingenieril, que describe la capacidad de un concreto a ser moldeable y trabajable, antes del fraguado inicial, que generalmente se aplica al concreto, pero que también puede tener un equivalente para el caso de los morteros) de los morteros, se procedió a diseñar cubos a partir de estas mezclas; es decir, luego de que el concreto deje de ser moldeable y trabajable, se procedió a preparar los especímenes necesarios, para evaluar su resistencia a la compresión; para este fin, se diseñó un cubo por cada tipo específico de mortero, esto quiere decir, que se diseñó 54 cubos distintos (18 con los morteros diseñados con el cemento tipo 1, 18 con los morteros diseñados con el cemento tipo 2, y 18 con los morteros diseñados con el cemento tipo 3); esto en pro a cubrir la mayoría de las mezclas diseñadas, tomando 2 dosis distintas de aditivos para análisis (la mínima y la máxima dosis, de cada diseño de los morteros). Para realizar el diseño de los cubos correctamente, se siguió el procedimiento descrito por la norma ASTM.

Luego de moldear los cubos en unas probetas metálicas (Cubos de 2" x 2"), y de esperar 1 día para su fragua, estos especímenes se desmoldaron, y se procedió a llevarlos a una cámara de curado por inmersión, donde esperaron por 28 días; para luego de este periodo tiempo salir a la superficie, y ser ensayadas por compresión hasta la rotura, con el fin de medir su resistencia a fuerzas externas; e igual que en el caso anterior, para realizar este ensayo, se siguió el procedimiento descrito por la norma ASTM. Este diseño es equivalente al diseño de probetas de concreto, que se realiza para medir la resistencia de sus respectivas mezclas, y la equivalencia entre los resultados obtenidos, también resulta similar.

Este procedimiento corresponde al ensayo: "MÉTODO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, DE MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND"; que se efectuó de acuerdo, a la Norma ASTM C109 [34] y a la Norma Peruana NTP 334.051 [35].

V. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1. ENSAYOS PREVIOS

Antes de mostrar los resultados de esta investigación, se presentan los resultados de los ensayos físicos, que se realizaron en las 5 arenas escogidas, en los que se obtienen entre otras cosas: la humedad natural (%w), el módulo de finura (M.F.), la granulometría, el porcentaje de finos que pasa la malla #200, etc.; resultados que fueron resumidos en este acápite y que serán explicados en la sección 6, referente a la discusión de resultados.

5.1.1. ENSAYO PARA CALCULAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

En la tabla 9, se muestra la clasificación de las 5 arenas elegidas, según la humedad natural encontrada:

Tabla 9: Clasificación de las arenas, según la humedad natural encontrada

Clasificación de las arenas, según la humedad encontrada:								
Procedencia de la Arena	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio (%)	Clasificación de la Arena
Arena Pallancota	11,84	11,42	11,55	11,67	11,36	11,29	11,522	Rango de Humedad Aproximado 10% < %H < 12%
Arena Orcopampa	6,16	6,15	6,27	6,22	6,24	6,18	6,203	Rango de Humedad Aproximado 5,5% < %H < 6,5%
Arena Jicamarca	5,16	5,49	4,56	4,96	*****	*****	5,043	Rango de Humedad Aproximado 4,5% < %H < 5,5%
Arena Huancaayo	1,67	1,69	1,73	1,71	1,65	1,67	1,687	Rango de Humedad Aproximado 1,5% < %H < 2,5%
Arena Malanche	0,90	0,92	0,84	0,96	*****	*****	0,905	Rango de Humedad Aproximado 0,5% < %H < 1,5%

Este procedimiento para el ensayo: humedad natural del agregado fino, se efectuó de acuerdo a la Norma ASTM C566-13 [36], y a la Norma Peruana NTP 339.185 [37].

Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad, de la empresa BASF Chemical Construction S.A., en el Área de Desempeño de Materiales.

5.1.2. ENSAYO PARA CALCULAR EL MÓDULO DE FINURA (MF)

En la tabla 10, se muestra la clasificación de las 5 arenas elegidas, según el módulo de finura (MF) encontrado:

Tabla 10: Clasificación de las arenas, según su módulo de finura

Tabla Resumen de Arenas - BASF PERU								
Clasificación de las arenas, según el Módulo de Finura:								
Procedencia de la Arena	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio	Clasificación de la Arena
1) Arena Malanche	3,03	3,06	3,04	3,09	*****	*****	3,055	Arena Mediana 2,4 < M.F. < 3,1
2) Arena Jicamarca	3,22	3,19	3,17	3,16	*****	*****	3,185	Arena Gruesa 3,1 < M.F.
3) Arena Huancayo	3,52	3,49	3,49	3,52	*****	*****	3,505	Arena Gruesa 3,1 < M.F.
4) Arena Pallancata	3,82	3,82	3,87	3,90	*****	*****	3,853	Arena Gruesa 3,1 < M.F.
5) Arena Orcopampa	3,82	3,91	3,76	3,89	3,85	3,94	3,862	Arena Gruesa 3,1 < M.F.

Este procedimiento, para el ensayo: GRANULOMETRIA DEL AGREGADO FINO, se efectuó de acuerdo a la Norma ASTM C136M - 14 [38], y a la Norma Peruana NTP 400.012 [39].

Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Concreto, de la empresa BASF Chemical Construction S.A. en el Área de Desempeño de Materiales.

5.1.3. ENSAYO PARA CALCULAR EL % DE FINOS QUE PASA LA MALLA N°200

En la tabla 11, se muestra la clasificación de las 5 arenas elegidas, según el % de finos que pasa la malla N°200, que haya sido encontrado:

Tabla 11: Clasificación de las arenas, según el % que Pasa la Malla N°200

Clasificación de las arenas, según el % Pasa Malla N°200:								
Procedencia de la Arena	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Promedio (%)	Clasificación de la Arena
1) Arena Orcopampa	2,49	2,53	2,52	2,46	2,48	2,40	2,480	Aceptable contenido de finos %Pasa Malla N°200 < 6%
2) Arena Huancayo	3,53	3,21	3,58	3,31	3,51	3,33	3,412	Aceptable contenido de finos %Pasa Malla N°200 < 6%
3) Arena Pallancata	4,27	4,34	4,64	4,48	4,43	4,30	4,410	Aceptable contenido de finos %Pasa Malla N°200 < 6%
4) Arena Jicamarca	5,05	5,62	5,26	5,39	*****	*****	5,330	Aceptable contenido de finos %Pasa Malla N°200 < 6%
5) Arena Malanche	6,78	7,17	6,58	7,05	*****	*****	6,895	Excedente contenido de finos %Pasa Malla N°200 > 6%

Este procedimiento, para el ensayo: % QUE PASA LA MALLA #200 EN AGREGADO FINO, se efectuó de acuerdo a la Norma ASTM C117 - 17 [40], y a la Norma Peruana NTP 400.018 [41].

Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad, de la empresa BASF Chemical Construction S.A. en el Área de Desempeño de Materiales.

5.1.4. ANÁLISIS DE LOS CEMENTOS PERUANOS ELEGIDOS

Recordando que los cementos comercialmente disponibles, en el mercado peruano, son:

- Cemento Tipo I
- Cemento Tipo IA (Bajo contenido de álcalis)
- Cemento Tipo II
- Cemento Tipo IIA (Bajo contenido de álcalis)
- Cemento Tipo V
- Cemento Tipo IP
- Cemento Tipo I(PM)
- Cemento Tipo MS
- Cemento Tipo ICo
- Cemento de Albañilería

Se hizo a estos 10 tipos de cementos, un análisis más detallado; a través de una lectura más minuciosa y especializada, de las 2 normas ASTM que explican el comportamiento de estos tipos de cemento; la norma ASTM C150, detalla las características de los cementos típicos (I, II, III, IV, V) [6]; y la norma ASTM C1157, detalla las características de los cementos modificados o adicionados [7]; y aunque se pudieron leer las NTP correspondientes a cada tipo de cemento, esto ya no fue necesario, porque estas 2 normas ASTM resumen y abarcan todas las NTP's, descritas anteriormente.

Y entonces, por todo lo argumentado anteriormente, los cementos elegidos fueron:

- Cemento Yura Tipo HE (Alto contenido de Álcalis y C_3A , alta resistencia inicial [High Early]).
- Cemento Sol Tipo I (Mediano contenido de Álcalis, es el cemento más vendido y usado).
- Cemento Andino Tipo V (Bajo contenido de Álcalis y C_3A , alta resistencia a los sulfatos).

Recordando que el contenido relativo de álcalis, es definido como la suma de los porcentajes relativos de los compuestos Na_2O y K_2O , aunque algunas fuentes sólo consideran al Na_2O , como el factor que tiene influencia en el comportamiento del mortero; y respecto al contenido de C_3A (Aluminato Tricálcico), recordamos que también es importante su presencia, ya que a mayor cantidad de este compuesto, el mortero presentará una fragua inicial más rápida y potente.

5.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

5.2.1. VALOR DE AZUL DE METILENO (MBV)

5.2.1.1. MÉTODO AASHTO

Se validó la equivalencia en la determinación de contenido de arcillas, con el Método del valor de azul de metileno (MBV), según AASHTO TP 57-2000 [21], de las siguientes 5 arenas; resultados que se muestran en la tabla 12:

Tabla 12: Clasificación de las arenas, según el Método AASHTO, para hallar el MBV

Clasificación de las arenas, según el Método AASHTO del Valor de Azul de Metileno:					
Procedencia de la Arena	Muestra 1	Muestra 2	Promedio (mg/g)	Clasificación de la Arena	
1) Arena Orcopampa	7,50	*****	7,50	Margi. aceptable contenido de arcillas	6mg/g < Contenido de Arcillas < 12mg/g
2) Arena Huancayo	5,75	*****	5,75	Excelente contenido bajo de arcillas	Contenido de Arcillas < 6mg/g
3) Arena Pallancata	7,75	*****	7,75	Margi. aceptable contenido de arcillas	6mg/g < Contenido de Arcillas < 12mg/g
4) Arena Jicamarca	8,50	*****	8,50	Margi. aceptable contenido de arcillas	6mg/g < Contenido de Arcillas < 12mg/g
5) Arena Malanche	10,00	*****	10,00	Margi. aceptable contenido de arcillas	6mg/g < Contenido de Arcillas < 12mg/g

Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad, de la empresa BASF Chemical Construction S.A. en el Área de Desempeño de Materiales.

5.2.1.2. MÉTODO ASTM

Se validó la equivalencia en la determinación de contenido de arcillas, con el Método del valor de azul de metileno (MBV), según ASTM C03 - 2003 [22], de las siguientes 5 arenas; resultados que se muestran en la tabla 13:

Tabla 13: Clasificación de las arenas, según el Método ASTM, para hallar el MBV

Clasificación de las arenas, según el Método Pasquel del Valor de Azul de Metileno:					
Procedencia de la Arena	Muestra 1	Muestra 2	Promedio (%)	Clasificación de la Arena	
1) Arena Orcopampa	1,088	*****	1,088	Tolerable contenido de arcillas	0,6% < Contenido de Arcillas < 1,2%
2) Arena Huancayo	0,576	*****	0,576	Excelente contenido bajo de arcillas	Contenido de Arcillas < 0,6%
3) Arena Pallancata	0,768	*****	0,768	Tolerable contenido de arcillas	0,6% < Contenido de Arcillas < 1,2%
4) Arena Jicamarca	0,833	*****	0,833	Tolerable contenido de arcillas	0,6% < Contenido de Arcillas < 1,2%
5) Arena Malanche	1,344	*****	1,344	Posible falla por contenido de arcillas	1,2% < Contenido de Arcillas < 2%

Estas mediciones, se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad, de la empresa BASF Chemical Construction S.A. en el Área de Desempeño de Materiales.

Como fuente de información adicional, se remarca que comparando estas 2 tablas (diseñadas con 2 métodos distintos), se pudieron analizar por última vez, las 5 arenas disponibles de una forma más detallada, resultados que sirvieron para una elección final correcta, de las 3 arenas.

5.2.2. DISEÑO DE MORTEROS Y PRUEBA DE MINISLUMP

Lo que se mide en cada caso, es el diámetro del mortero, una vez que es levantado el cilindro metálico, para 5 dosificaciones distintas, y para 5 momentos de tiempo distintos; se presenta la tabla con los resultados obtenidos y una gráfica Diámetro vs Tiempo, para cada caso particular.

Además, se presentan 3 gráficas, que muestran como varía el diámetro del mortero, conforme va aumentando la dosificación de cada aditivo tomando como referencia el instante inicial (a los 7min); y adicionalmente se presentan tabulaciones, para ver cuáles son las dosificaciones de aditivo necesarias, en pro de obtener ciertos diámetros genéricos; lo que tiene como meta, brindar una mayor cantidad de datos, que podrán ser usadas a futuro, para nuevas investigaciones.

Nota:

- **Aditivo 1:** Aditivo con base Naftalenosulfonato.
- **Aditivo 2:** Aditivo con base Policarboxilato.
- **Aditivo 3:** Aditivo con base Lignosulfonato.

5.2.2.1. MORTEROS DISEÑADOS CON CEMENTO TIPO V (CEMENTO CON BAJO CONTENIDO DE ÁLCALIS)

a) CON ARENA HUANCAYO (ARENA CON BAJO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 14: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.0cc

Tiempo (Vol. 5.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	98,50	96,70	93,60
30 min	82,40	88,20	83,60
60 min	61,10	79,70	59,90
90 min	46,60	75,80	45,70
120 min	41,50	66,90	40,80

Figura 4: Gráfica de la Tabla 14, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

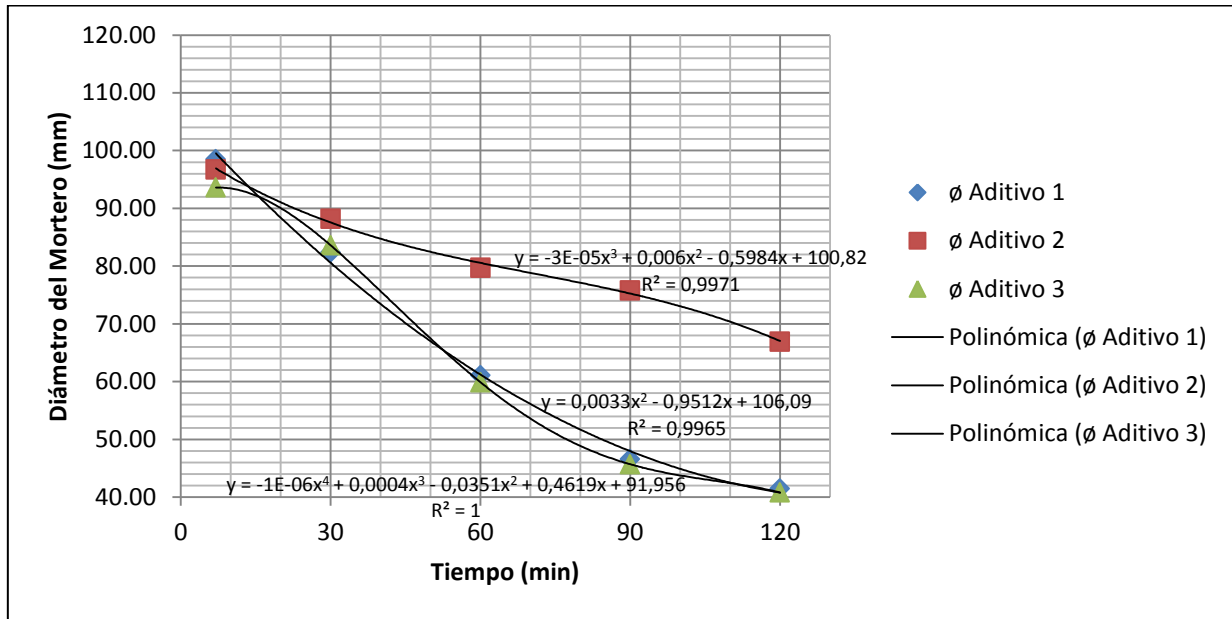


Tabla 15: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.5cc

Tiempo (Vol. 5.5 cc)	Ø aditivo 1 (mm)	Ø aditivo 2 (mm)	Ø aditivo 3 (mm)
7 min	106,30	102,00	102,50
30 min	86,10	95,10	85,80
60 min	63,50	82,90	69,10
90 min	48,30	77,30	53,00
120 min	42,60	69,40	41,80

Figura 5: Gráfica de la Tabla 15, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

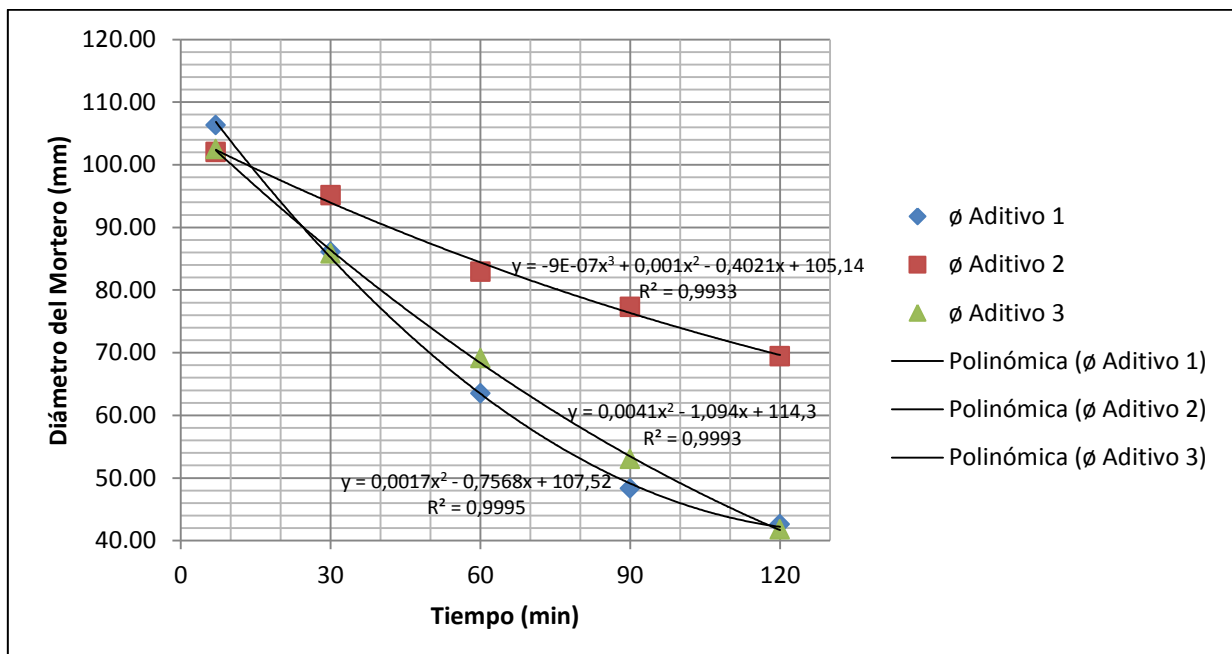


Tabla 16: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 6.0cc

Tiempo (Vol. 6.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	111,30	111,00	106,90
30 min	89,40	97,10	90,40
60 min	66,50	90,10	73,40
90 min	52,00	78,50	56,60
120 min	43,90	71,80	43,00

Figura 6: Gráfica de la Tabla 16, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

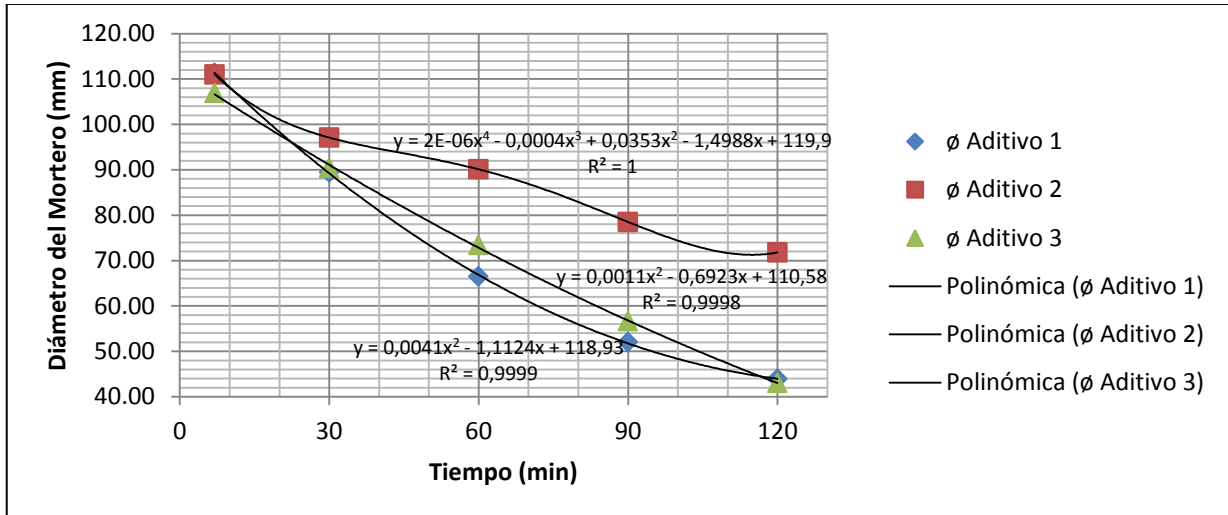


Tabla 17: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 7.0cc

Tiempo (Vol. 7.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	114,90	115,20	111,40
30 min	91,00	105,20	100,40
60 min	68,80	97,30	79,30
90 min	57,10	81,70	58,60
120 min	46,30	75,20	44,50

Figura 7: Gráfica de la Tabla 17, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

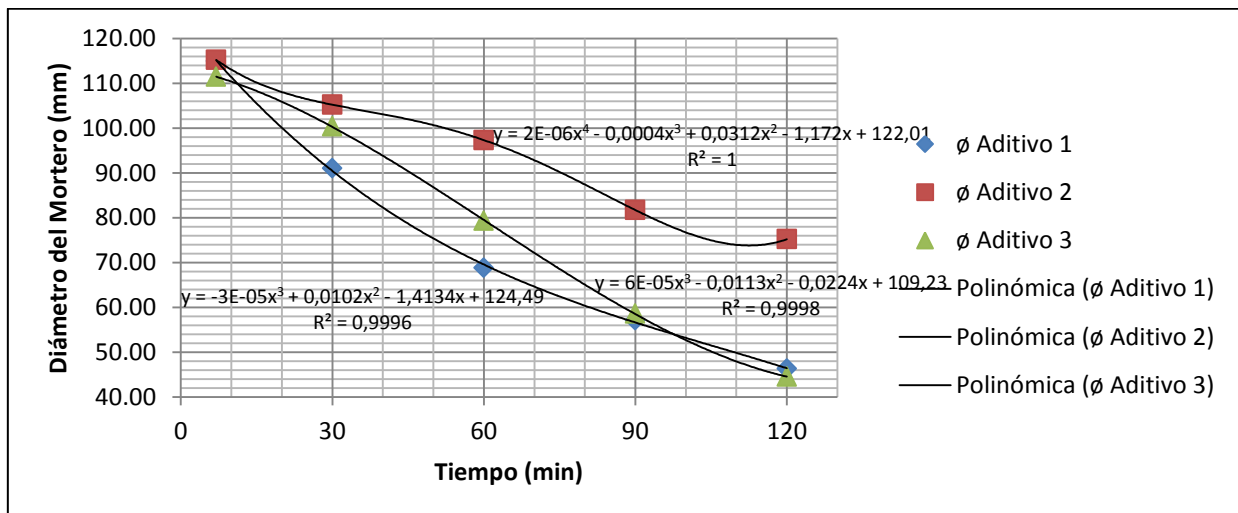
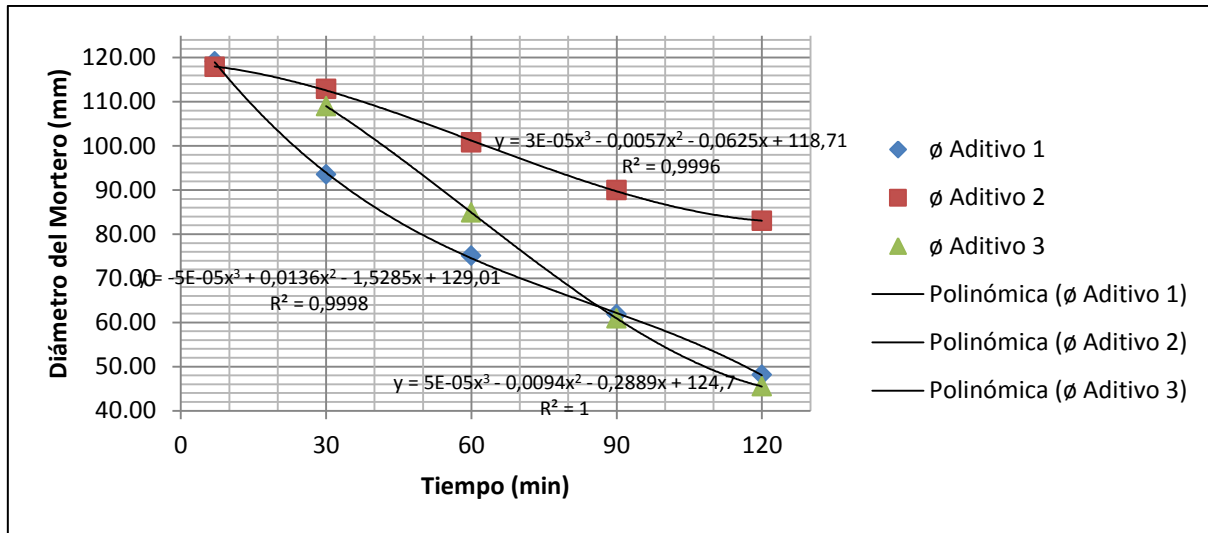


Tabla 18: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1	∅ aditivo 2	∅ aditivo 3
7 min	119,10	117,90	SEGREGADO
30 min	93,50	112,90	109,00
60 min	75,10	100,80	84,90
90 min	61,80	90,00	60,90
120 min	48,10	83,00	45,50

Figura 8: Gráfica de la Tabla 18, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

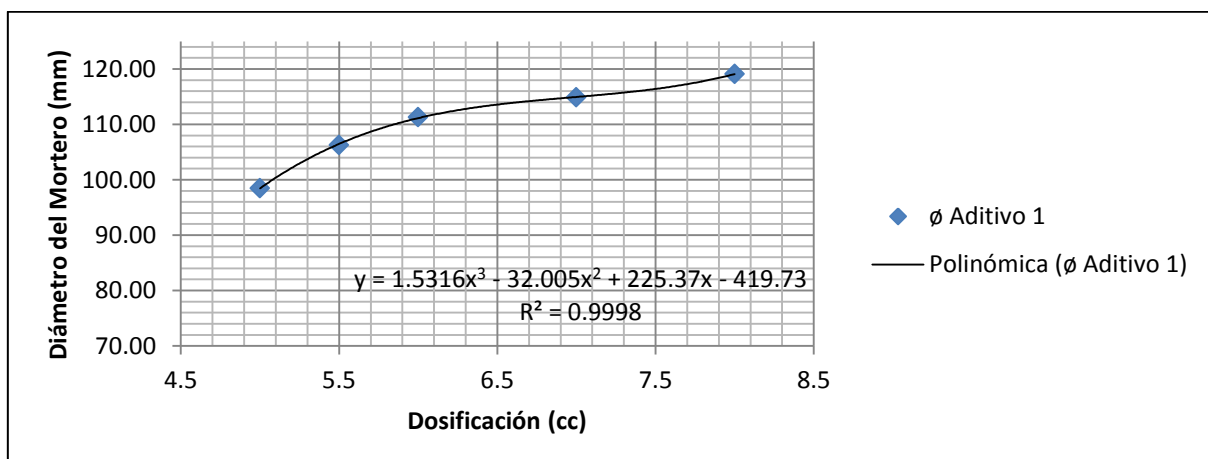


Tablas 19-20: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
5,0 cc	98,50
5,5 cc	106,30
6,0 cc	111,30
7,0 cc	114,90
8,0 cc	119,10

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	4,32 cc
90 mm	4,64 cc
100 mm	5,08 cc
110 mm	5,85 cc
120 mm	8,12 cc

Figura 9: Gráfica de las Tablas 19-20, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

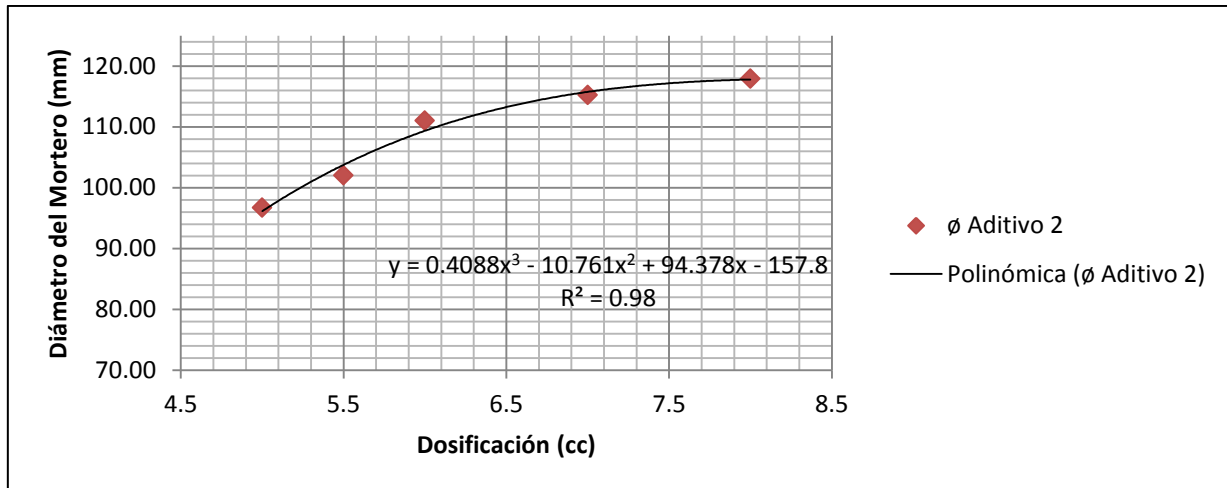


Tablas 21-22: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
5,0 cc	96,70
5,5 cc	102,00
6,0 cc	111,00
7,0 cc	115,20
8,0 cc	117,90

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	4,24cc
90 mm	4,68cc
100 mm	5,23cc
110 mm	5,97cc
120 mm	8,18cc

Figura 10: Gráfica de las Tablas 21-22, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



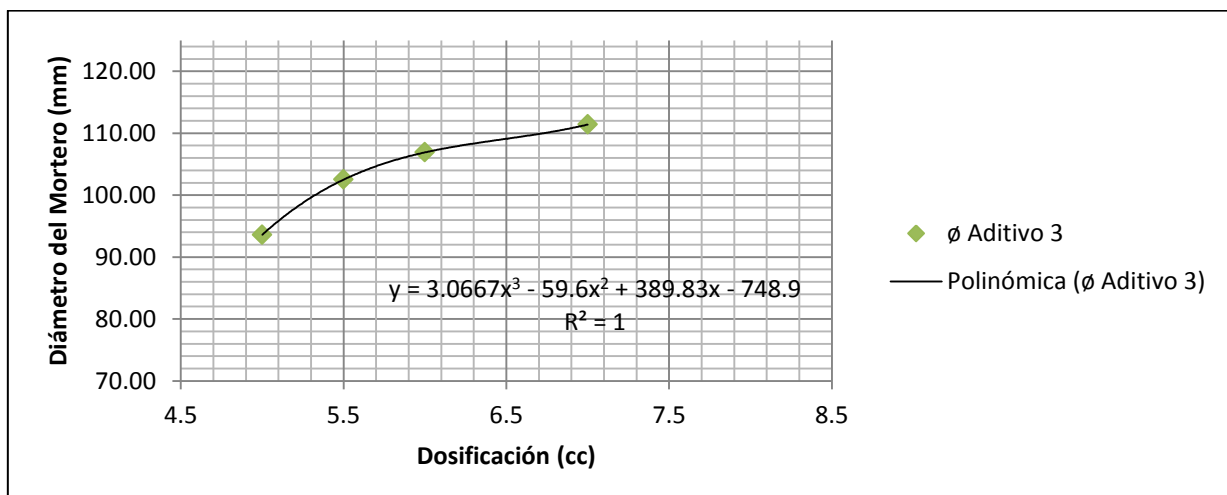
Tablas 23-24: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
5,0	93,60
5,5	102,50
6,0	106,90
7,0	111,40
8,0	SEGREGADO

Diámetro buscado	Dosificación
80mm	4,55cc
90mm	4,86cc
100mm	5,33cc
110mm	6,73cc
120mm	7,75cc*

* Muy probablemente, segregará la muestra

Figura 11: Gráfica de las Tablas 23-24, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



b) CON ARENA JICAMARCA (ARENA CON INTERMEDIO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 25: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	91,80	91,10	82,55
30 min	77,40	83,20	69,65
60 min	60,95	77,05	55,05
90 min	44,35	70,55	44,10
120 min	40,50	65,33	40,25

Figura 12: Gráfica de la Tabla 25, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

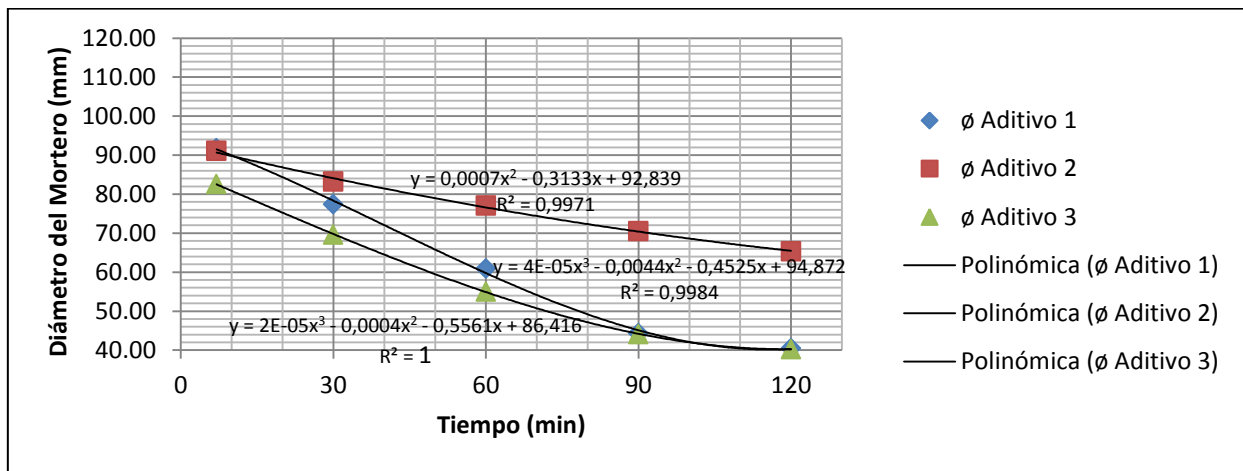


Tabla 26: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.5cc

Tiempo (Vol. 8.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	100,55	97,90	90,10
30 min	85,30	87,45	74,75
60 min	69,25	83,10	60,05
90 min	46,85	79,75	47,00
120 min	41,05	70,70	41,03

Figura 13: Gráfica de la Tabla 18, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

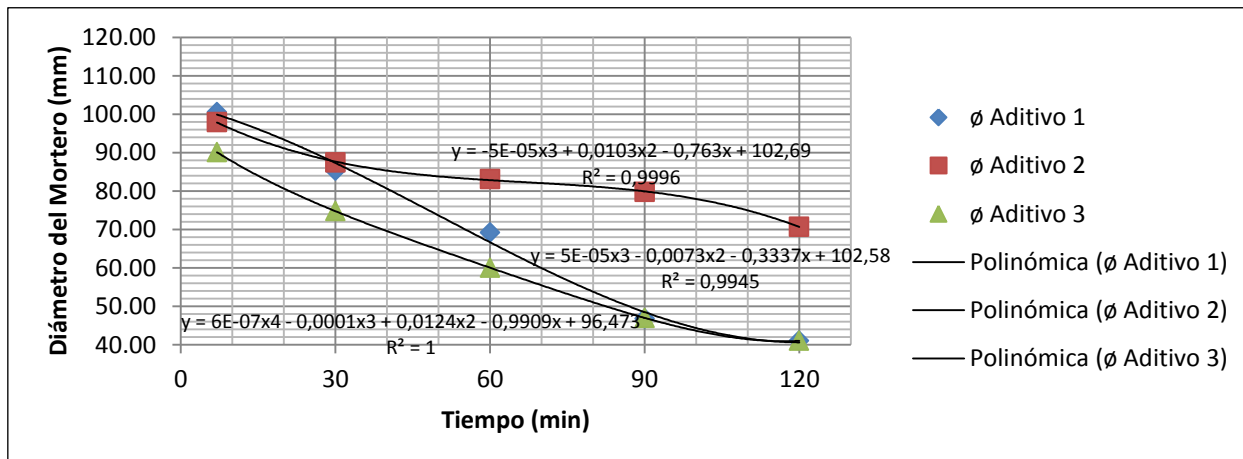


Tabla 27: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.0cc

Tiempo (Vol. 9.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	101,85	101,00	92,25
30 min	88,70	90,85	77,10
60 min	71,10	87,55	62,33
90 min	49,35	84,45	47,75
120 min	41,60	74,85	41,80

Figura 14: Gráfica de la Tabla 27, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

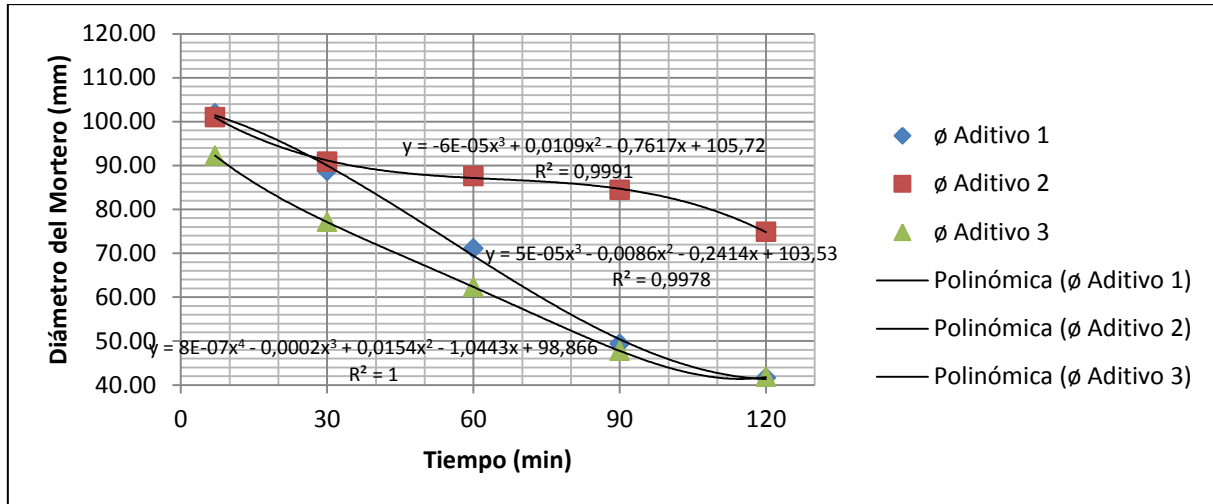


Tabla 28: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.5cc

Tiempo (Vol. 9.5 cc)	∅ Aditivo 1 (mm)	∅ Aditivo 2 (mm)	∅ Aditivo 3 (mm)
7 min	109,90	105,90	96,75
30 min	92,85	97,35	79,15
60 min	74,60	93,20	64,30
90 min	51,35	87,60	50,30
120 min	42,38	79,80	42,55

Figura 15: Gráfica de la Tabla 28, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

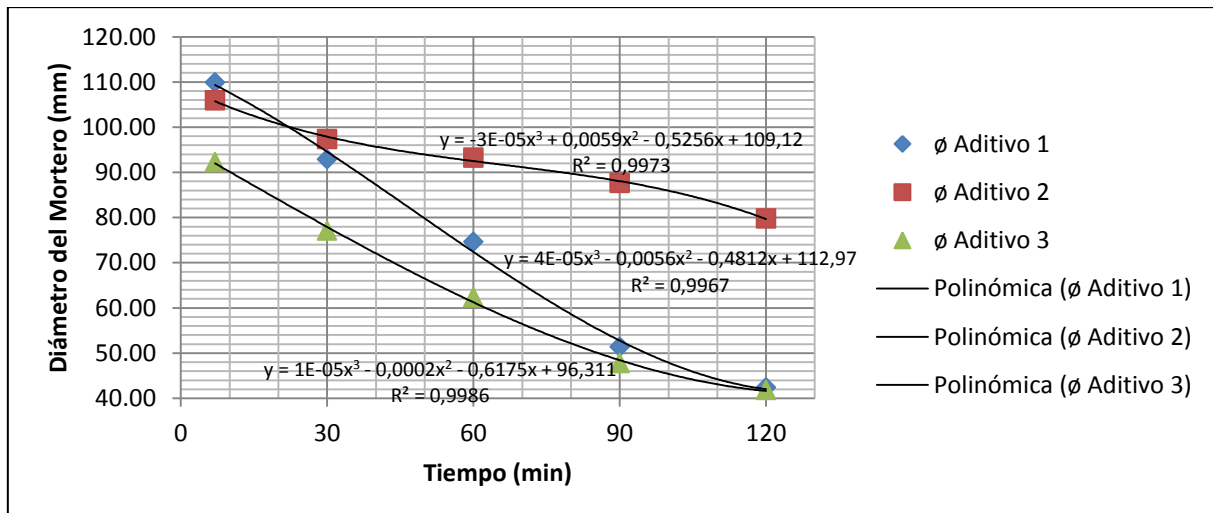
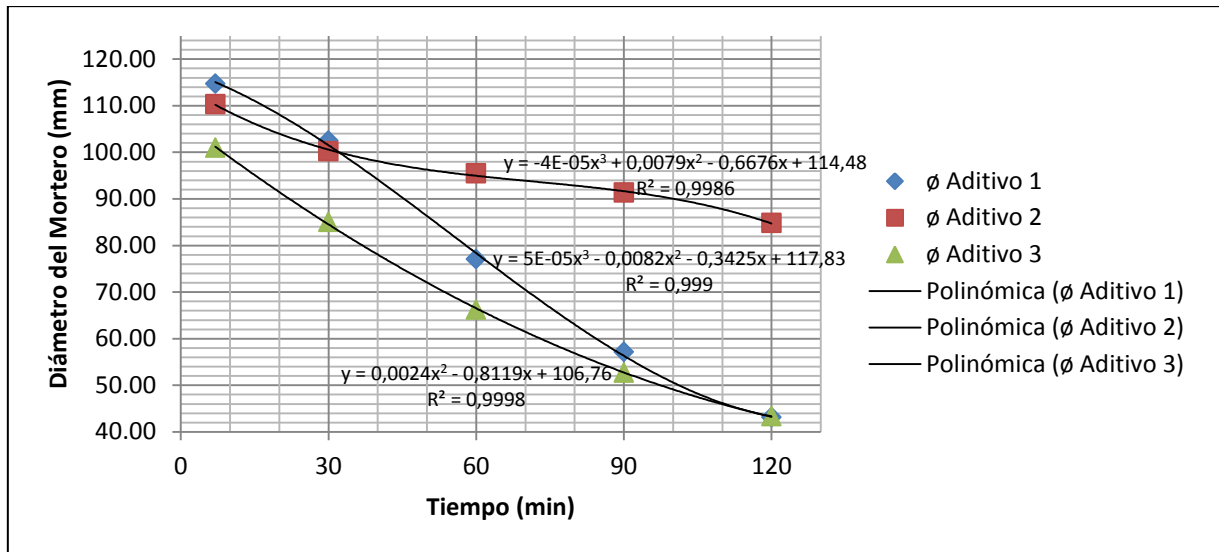


Tabla 29: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 10.0cc

Tiempo (Vol. 10.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	114,73	110,30	100,95
30 min	102,50	100,20	85,05
60 min	77,05	95,45	66,23
90 min	57,15	91,35	52,70
120 min	43,15	84,80	43,30

Figura 16: Gráfica de la Tabla 29, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

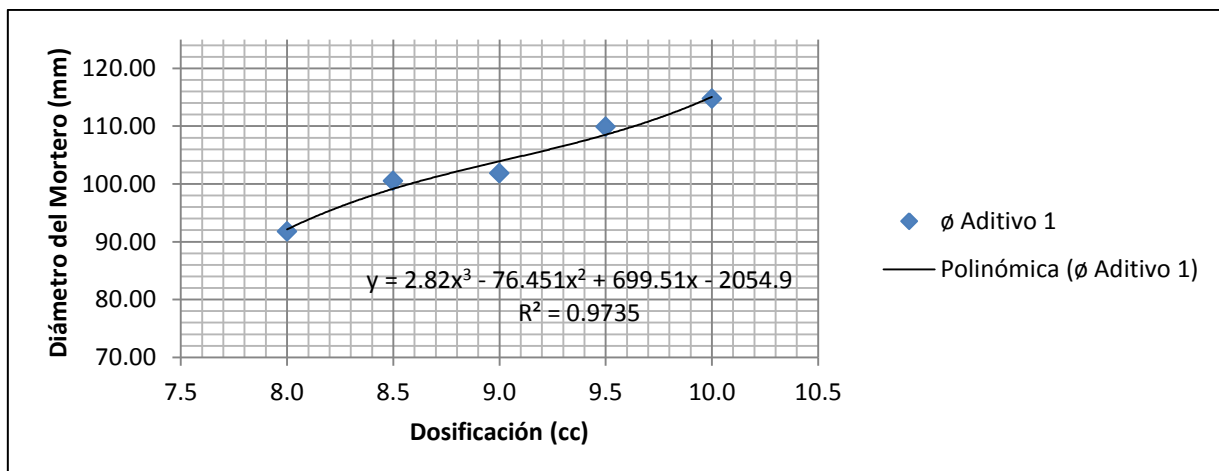


Tablas 30-31: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
8,0 cc	91,80
8,5 cc	100,55
9,0 cc	101,85
9,5 cc	109,90
10,0 cc	114,73

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	7,47 cc
90 mm	7,89 cc
100 mm	8,58 cc
110 mm	9,63 cc
120 mm	10,26 cc

Figura 17: Gráfica de las Tablas 30-31, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

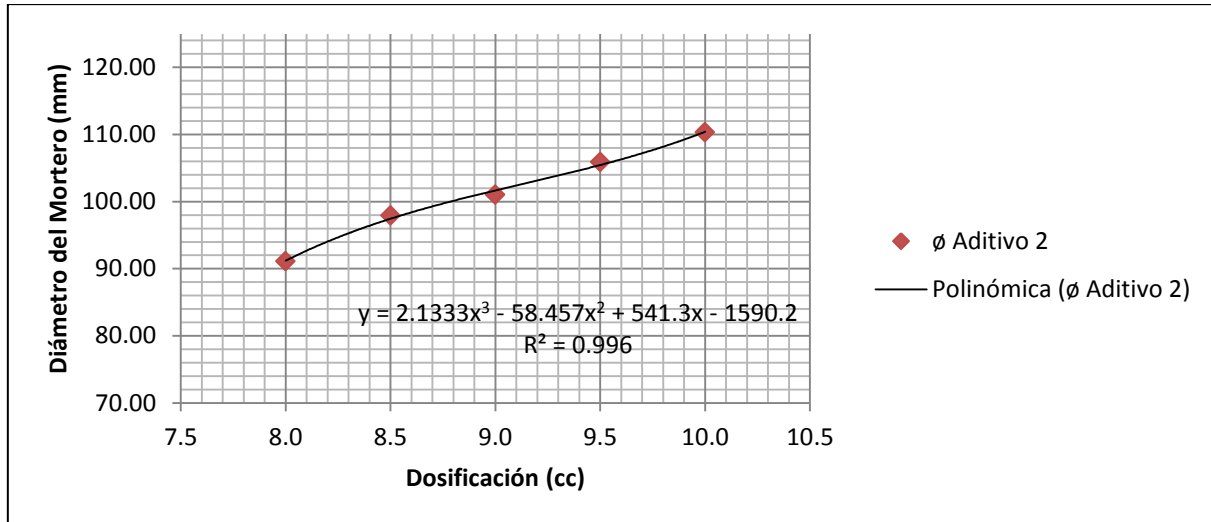


Tablas 32-33: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
8,0 min	91,10 cc
8,5 min	97,90 cc
9,0 min	101,00 cc
9,5 min	105,90 cc
10,0 min	110,30 cc

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	7,45 cc
90 mm	7,93 cc
100 mm	8,79 cc
110 mm	9,97 cc
120 mm	10,59 cc

Figura 18: Gráfica de las Tablas 32-33, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

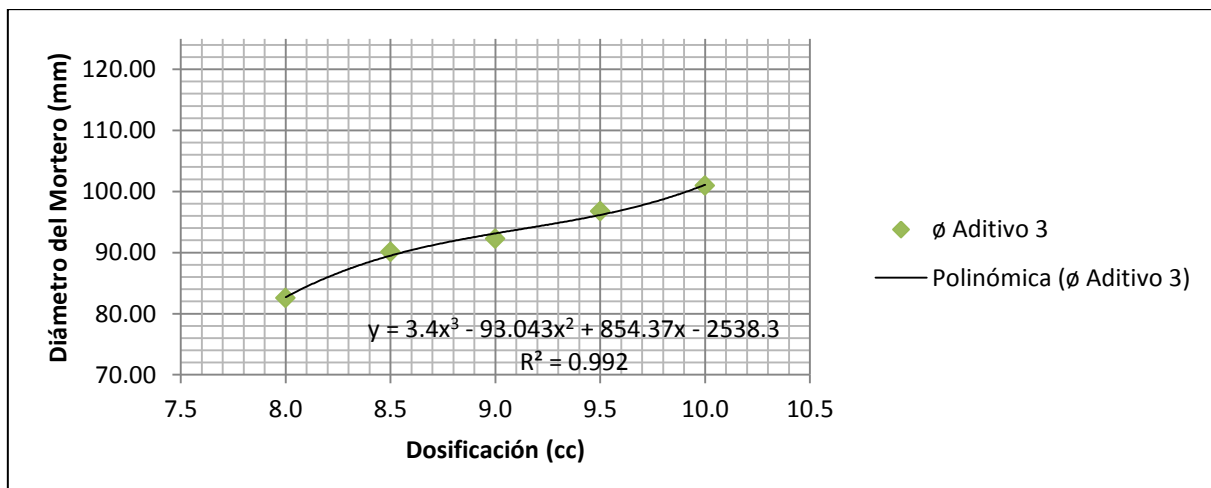


Tablas 34-35: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
8,0 cc	82,55 mm
8,5 cc	90,10 mm
9,0 cc	92,25 mm
9,5 cc	96,75 mm
10,0 cc	100,95 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	7,87 cc
90 mm	8,55 cc
100 mm	9,91 cc
110 mm	10,48 cc
120 mm	10,82 cc

Figura 19: Gráfica de las Tablas 34-35, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



**c) CON ARENA MALANCHE (ARENA CON ALTO CONTE-
NIDO DE ARCILLAS)**

Tabla 36: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.0cc

Tiempo (Vol. 7.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	89,15	89,60	89,70
30 min	79,23	85,95	78,15
60 min	67,10	74,70	62,15
90 min	52,20	71,15	52,30
120 min	46,35	61,10	44,50

Figura 20: Gráfica de la Tabla 36, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

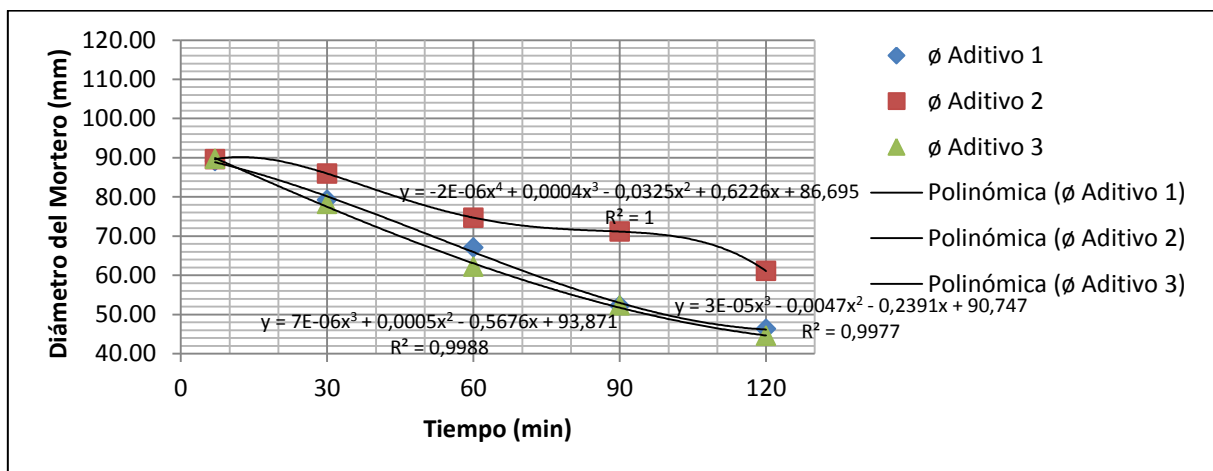


Tabla 37: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.5cc

Tiempo (Vol. 7.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	96,35	94,70	98,90
30 min	87,05	86,85	85,45
60 min	71,25	81,85	71,00
90 min	55,85	71,65	61,85
120 min	50,28	63,35	49,10

Figura 21: Gráfica de la Tabla 37, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

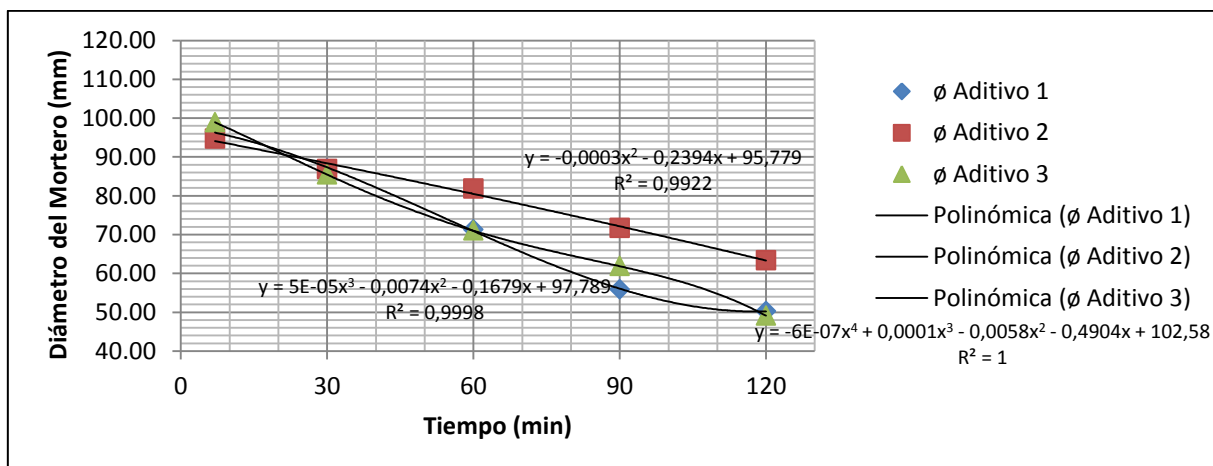


Tabla 38: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	104,80	98,85	105,05
30 min	91,00	87,95	93,55
60 min	79,50	83,65	75,10
90 min	63,10	73,45	64,40
120 min	53,35	66,95	54,60

Figura 22: Gráfica de la Tabla 38, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

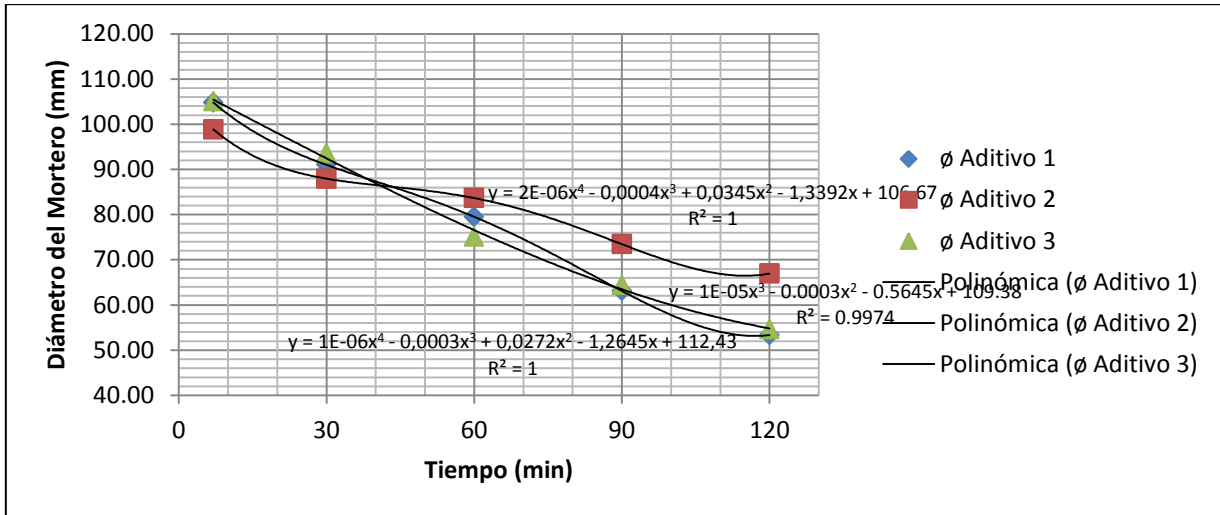


Tabla 39: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.5cc

Tiempo (Vol. 8.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	106,40	99,15	108,20
30 min	98,65	92,33	99,00
60 min	86,40	84,50	80,95
90 min	70,95	77,85	71,60
120 min	59,40	67,90	63,00

Figura 23: Gráfica de la Tabla 39, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

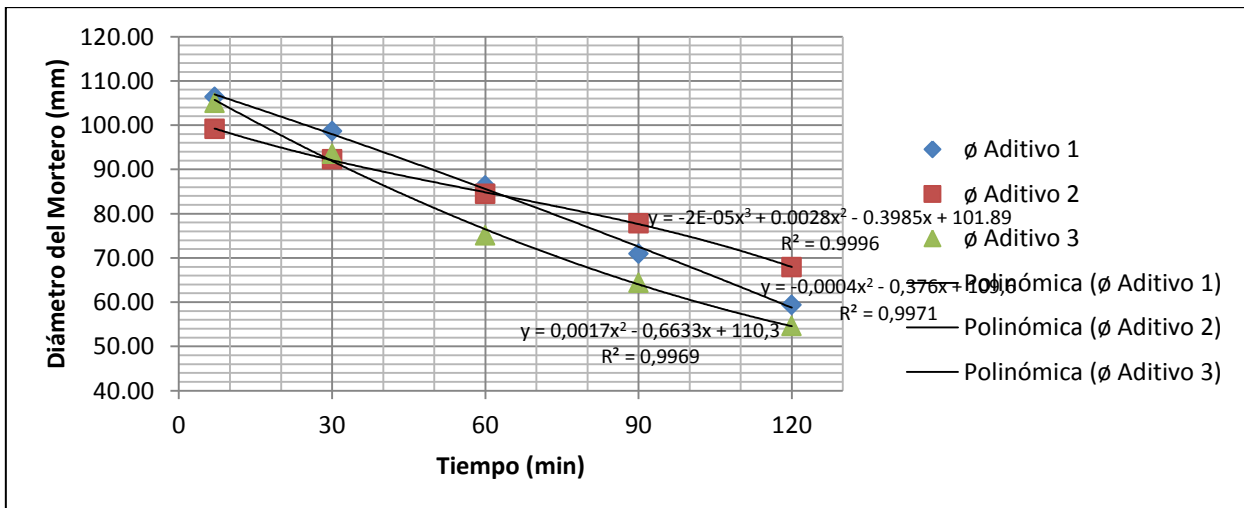
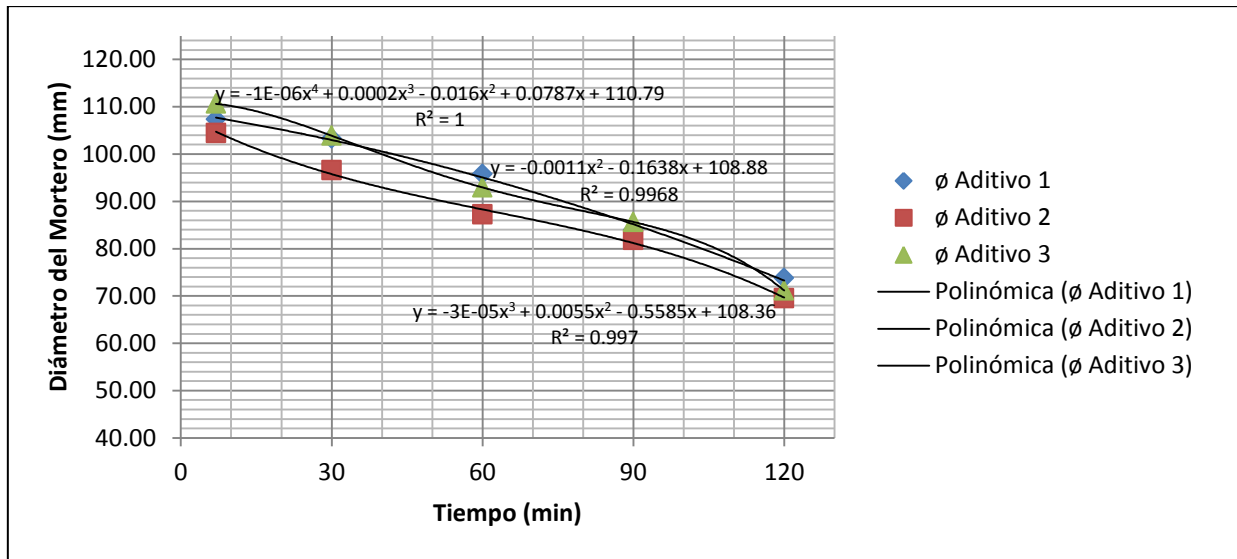


Tabla 40: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo V, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 9.0cc

Tiempo (Vol. 9.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	107,35	104,45	110,63
30 min	103,30	96,55	103,90
60 min	95,80	87,28	92,95
90 min	83,95	81,85	85,65
120 min	73,75	69,50	71,15

Figura 24: Gráfica de la Tabla 40, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

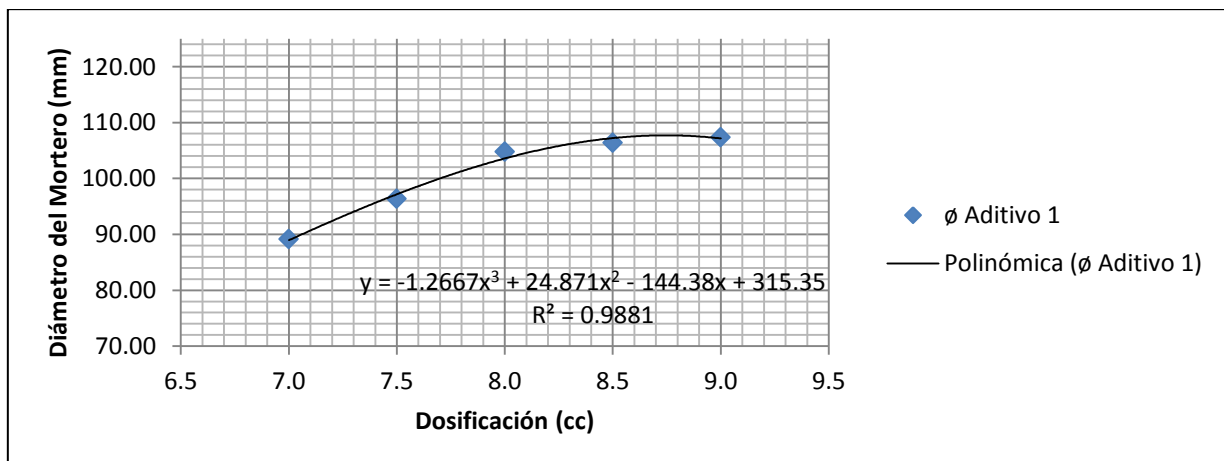


Tablas 41-42: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
7,0 cc	89,15 mm
7,5 cc	96,35 mm
8,0 cc	104,80 mm
8,5 cc	106,40 mm
9,0 cc	107,35 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	6,51 cc
90 mm	7,06 cc
100 mm	7,70 cc
110 mm	9,09 cc
120 mm	10,07 cc

Figura 25: Gráfica de las Tablas 41-42, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

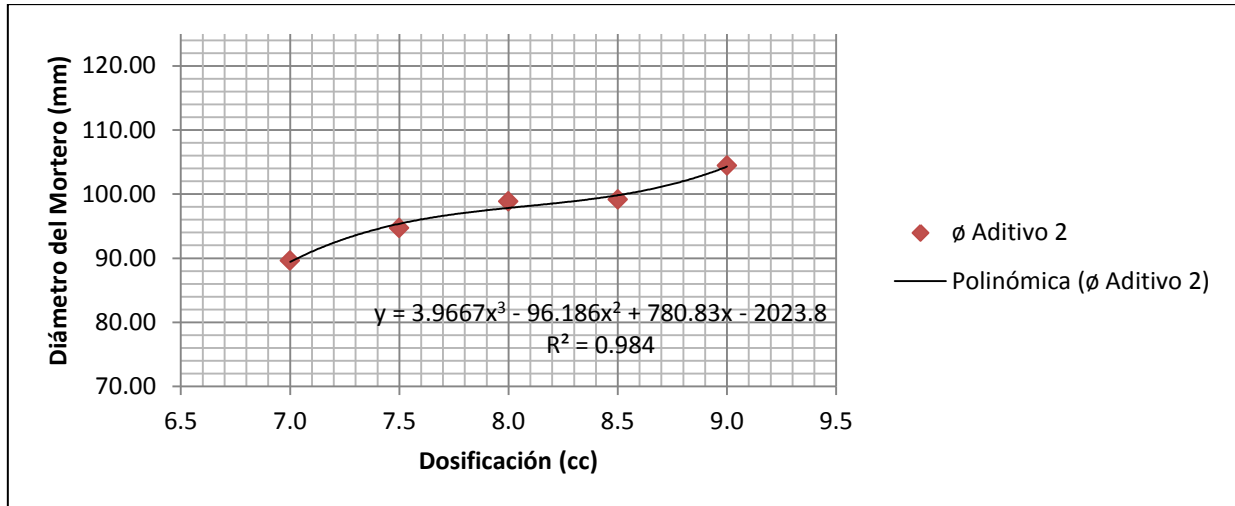


Tablas 43-44: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
7,0 cc	89,60 mm
7,5 cc	94,70 mm
8,0 cc	98,85 mm
8,5 cc	99,15 mm
9,0 cc	104,45 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	6,59 cc
90 mm	7,03 cc
100 mm	8,52 cc
110 mm	9,33 cc
120 mm	9,69 cc

Figura 26: Gráfica de las Tablas 43-44, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

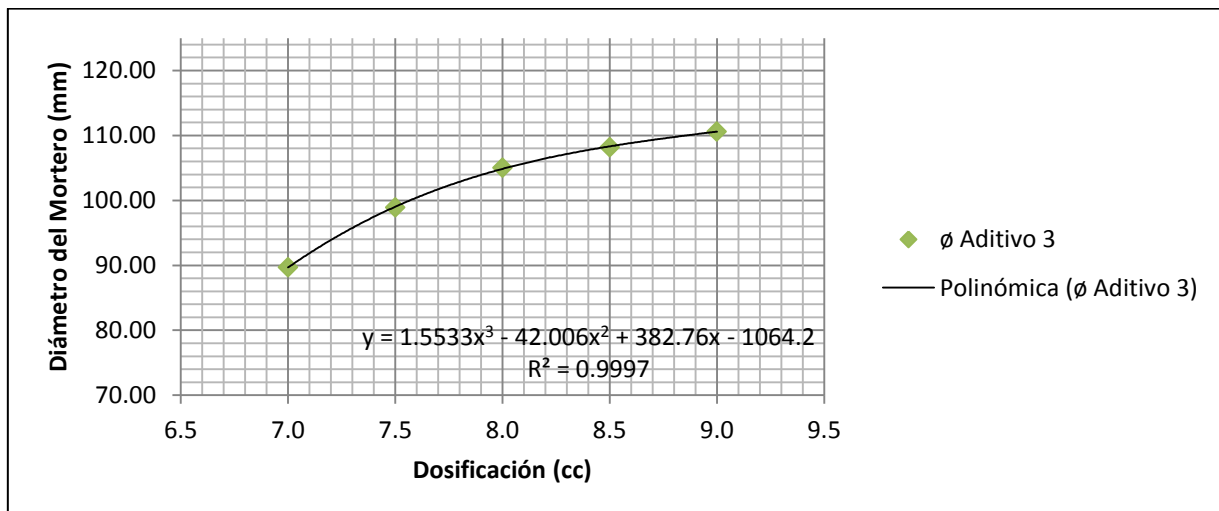


Tablas 45-46: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
7,0 cc	89,70 min
7,5 cc	98,90 min
8,0 cc	105,05 min
8,5cc	108,20min
9,0 cc	110,63 min

Diámetro buscado	Dosificación
80mm	6,64cc
90mm	7,02cc
100mm	7,57cc
110mm	8,88cc
120mm	10,37cc

Figura 27: Gráfica de las Tablas 45-46, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



5.2.2.2. MORTEROS DISEÑADOS CON CEMENTO TIPO I (CEMENTO CON INTERMEDIO CONTENIDO DE ÁLCALIS)

a) CON ARENA HUANCAYO (ARENA CON BAJO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 47: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.0cc

Tiempo (Vol. 5.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	112,35	111,00	115,65
30 min	101,95	106,40	107,60
60 min	88,70	100,90	91,35
90 min	78,05	93,15	80,15
120 min	62,25	89,30	72,15

Figura 28: Gráfica de la Tabla 47, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

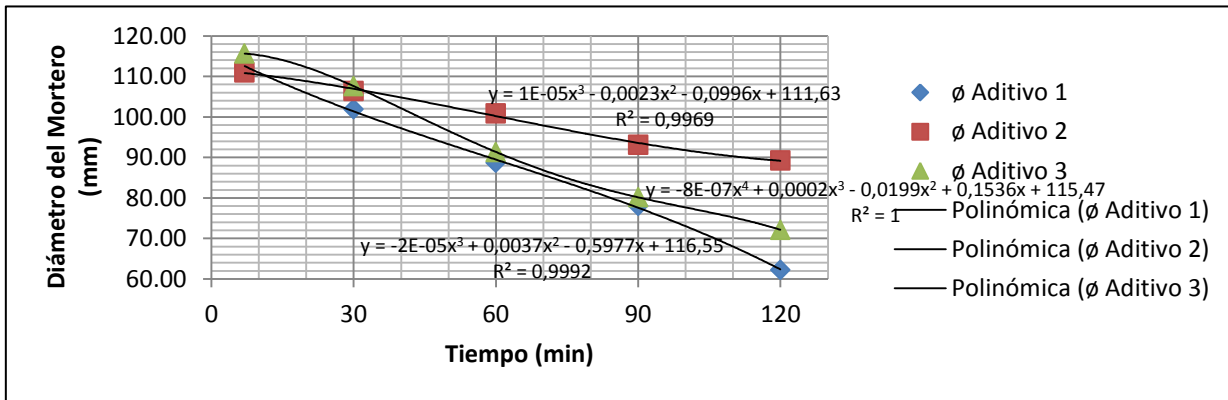


Tabla 48: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 5.5cc

Tiempo (Vol. 5.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	114,50	113,65	116,30
30 min	104,50	108,05	109,55
60 min	91,70	102,40	96,85
90 min	78,90	95,30	84,65
120 min	65,05	90,05	74,40

Figura 29: Gráfica de la Tabla 48, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

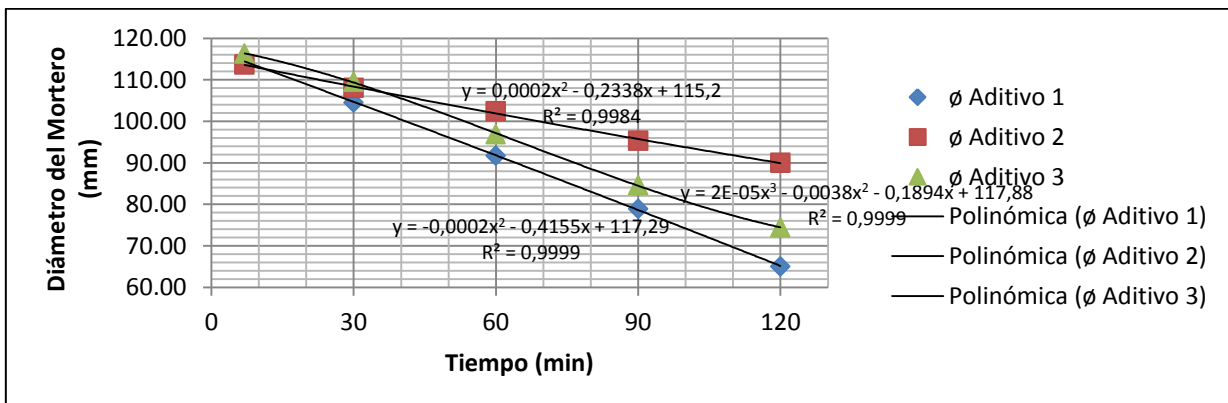


Tabla 49: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 6.0cc

Tiempo (Vol. 6.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	117,48	115,00	117,55
30 min	106,60	110,65	111,85
60 min	94,38	104,70	102,10
90 min	83,83	99,75	90,68
120 min	68,90	94,75	78,85

Figura 30: Gráfica de la Tabla 49, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

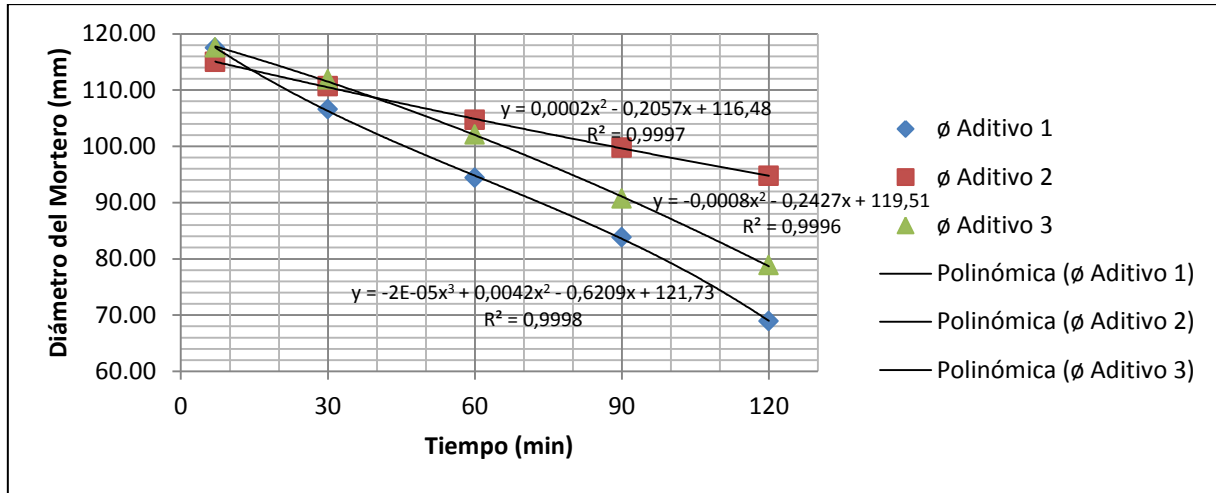


Tabla 50: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 7.0cc

Tiempo (Vol. 7.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	118,70	118,40	SEGREGADO
30 min	110,00	114,15	116,25
60 min	103,55	109,85	111,20
90 min	88,85	105,73	100,10
120 min	74,65	102,55	84,00

Figura 31: Gráfica de la Tabla 50, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

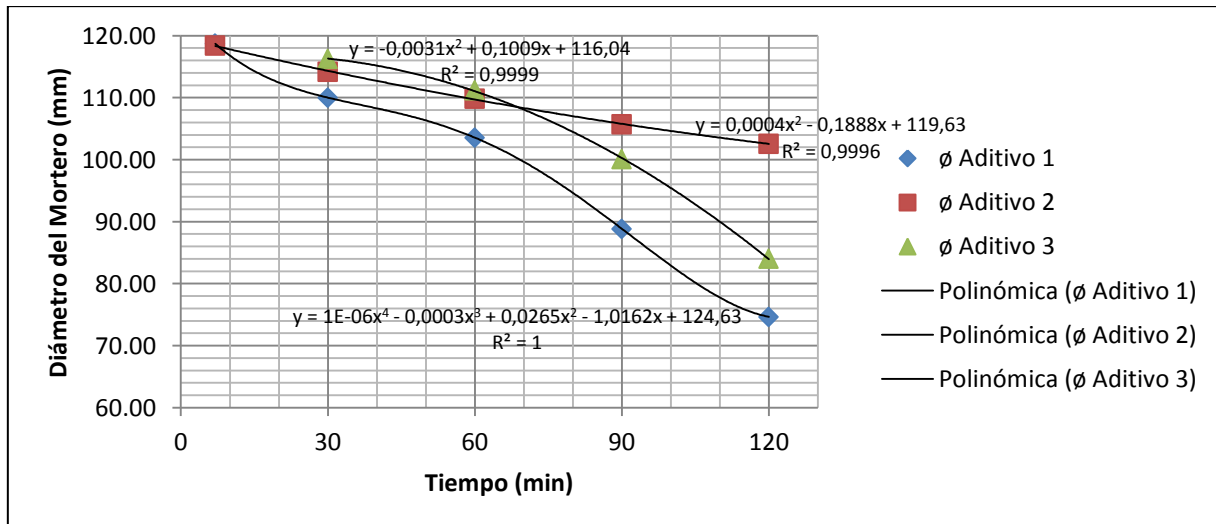
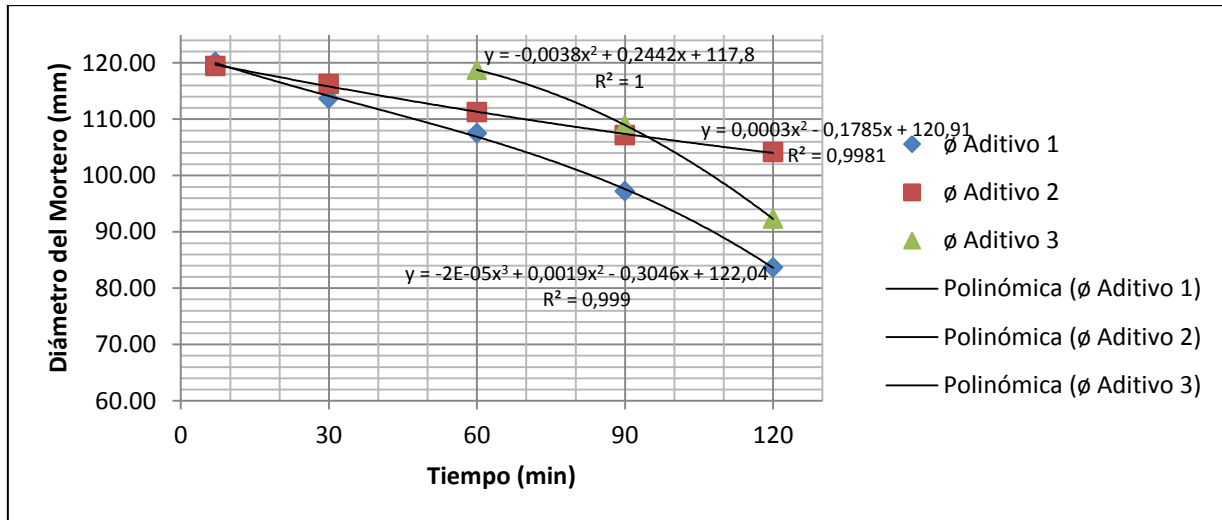


Tabla 51: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo de 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1	∅ aditivo 2	∅ aditivo 3
7	120,15	119,45	SEGREGADO
30	113,65	116,25	SEGREGADO
60	107,50	111,25	118,75
90	97,20	107,15	108,95
120	83,70	104,15	92,30

Figura 32: Gráfica de la Tabla 51, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

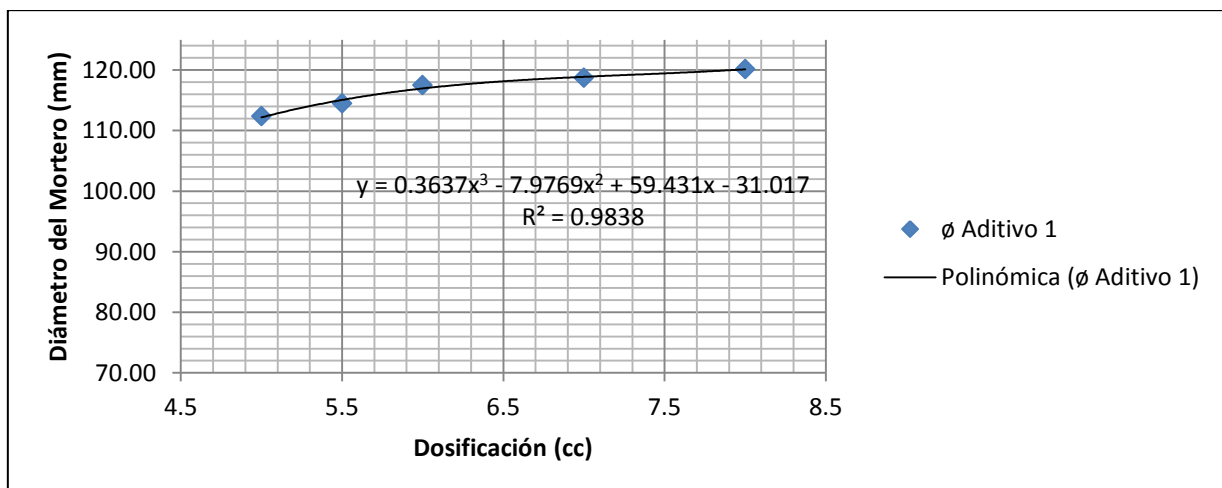


Tablas 52-53: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
5,0 cc	112,35 mm
5,5 cc	114,50 mm
6,0 cc	117,48 mm
7,0 cc	118,70 mm
8,0 cc	120,15 mm

Diámetro buscado	Dosificación
100 mm	3,83 cc
105 mm	4,21 cc
110 mm	4,72 cc
115 mm	5,49 cc
120 mm	7,92 cc

Figura 33: Gráfica de las Tablas 52-53, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

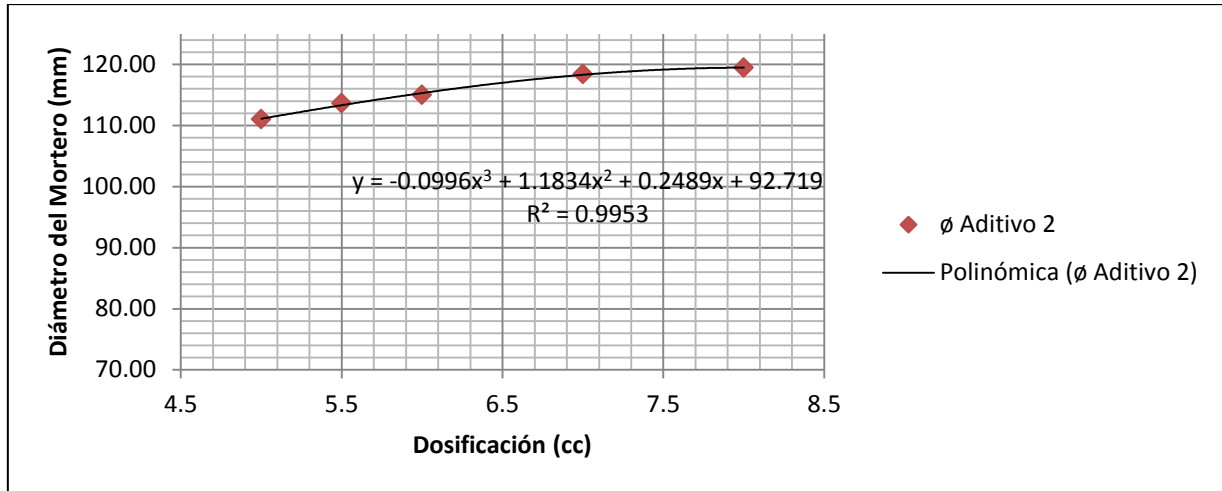


Tablas 54-55: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
5,0 cc	111,00 mm
5,5 cc	113,65 mm
6,0 cc	115,00 mm
7,0 cc	118,40 mm
8,0 cc	119,45 mm

Diámetro buscado	Dosificación
100 mm	2,69 cc
105 mm	3,74 cc
110 mm	4,77 cc
115 mm	5,92 cc
120 mm	8,09 cc

Figura 34: Gráfica de las Tablas 54-55, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



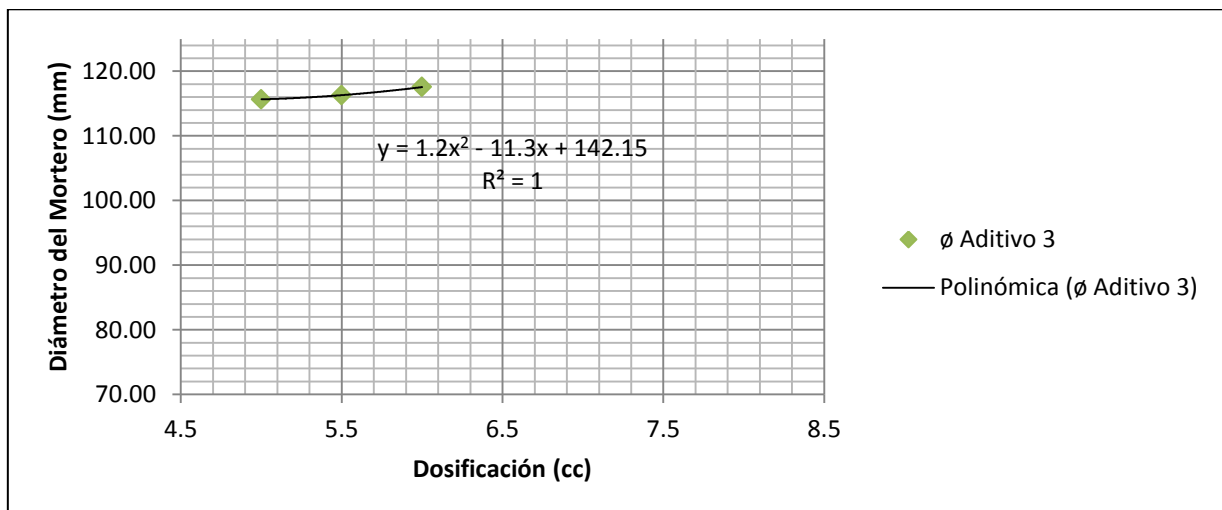
Tablas 56-57: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
5,0 cc	115,65 mm
5,5 cc	116,30 mm
6,0 cc	117,55 mm
7,0 cc	SEGREGADO
8,0 cc	SEGREGADO

Diámetro buscado	Dosificación
100 mm	2,55 cc
105 mm	3,08 cc
110 mm	3,77 cc
115 mm	4,71 cc
120 mm	6,63 cc*

*Muy probablemente, segregará la muestra.

Figura 35: Gráfica de las Tablas 56-57, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



b) CON ARENA JICAMARCA (ARENA CON INTERMEDIO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 58: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	88,85	89,25	78,80
30 min	70,45	80,45	71,50
60 min	55,15	77,75	51,40
90 min	45,90	76,20	42,55
120 min	41,80	73,30	40,50

Figura 36: Gráfica de la Tabla 58, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

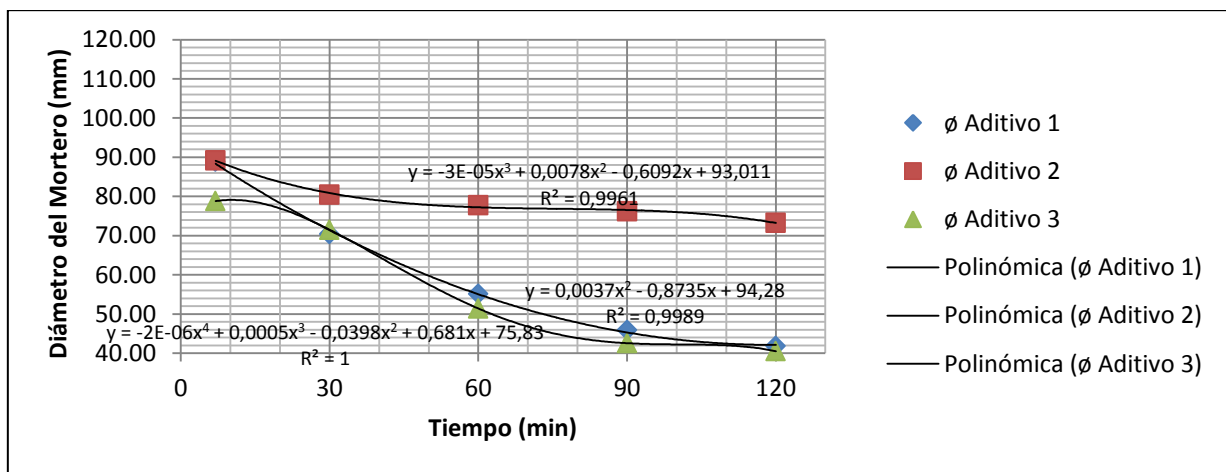


Tabla 59: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 8.5cc

Tiempo (Vol. 8.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	96,74	94,01	84,85
30 min	80,71	87,94	73,31
60 min	60,65	84,90	53,04
90 min	46,60	81,39	42,86
120 min	41,53	78,73	41,05

Figura 37: Gráfica de la Tabla 59, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

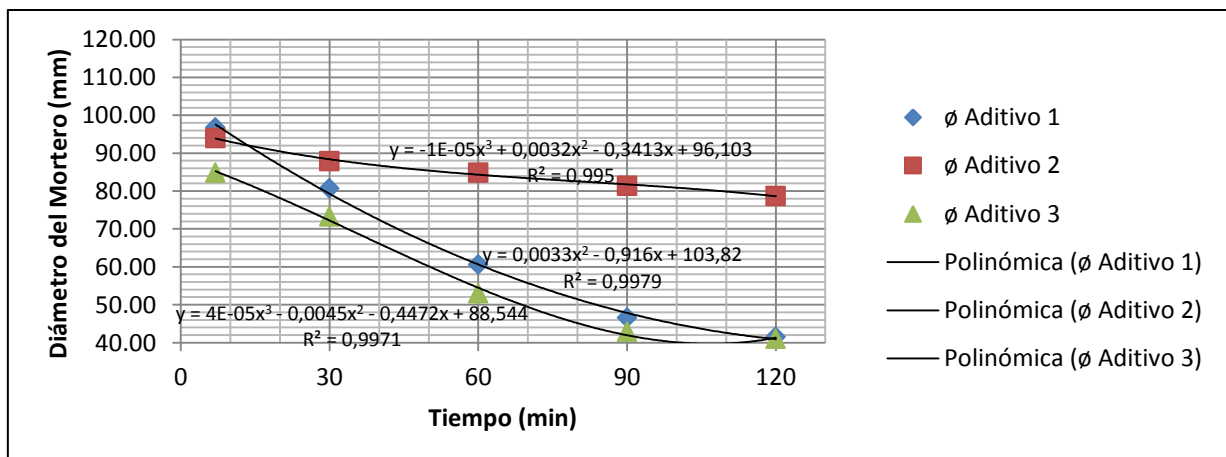


Tabla 60: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.0cc

Tiempo (Vol. 9.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	99,50	96,20	87,20
30 min	83,00	89,70	75,75
60 min	65,45	86,63	56,55
90 min	47,90	82,55	43,30
120 min	41,50	79,20	41,30

Figura 38: Gráfica de la Tabla 60, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

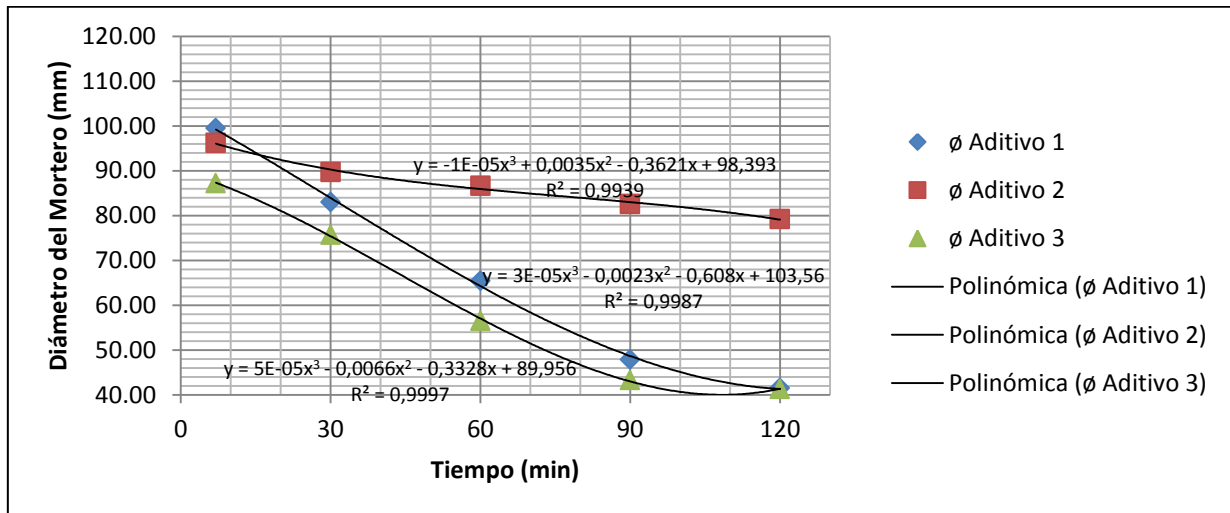


Tabla 61: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 9.5cc

Tiempo (Vol. 9.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	111,15	97,90	92,25
30 min	96,85	93,25	79,40
60 min	68,25	90,40	62,35
90 min	49,55	87,35	47,00
120 min	44,50	84,70	41,60

Figura 39: Gráfica de la Tabla 61, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

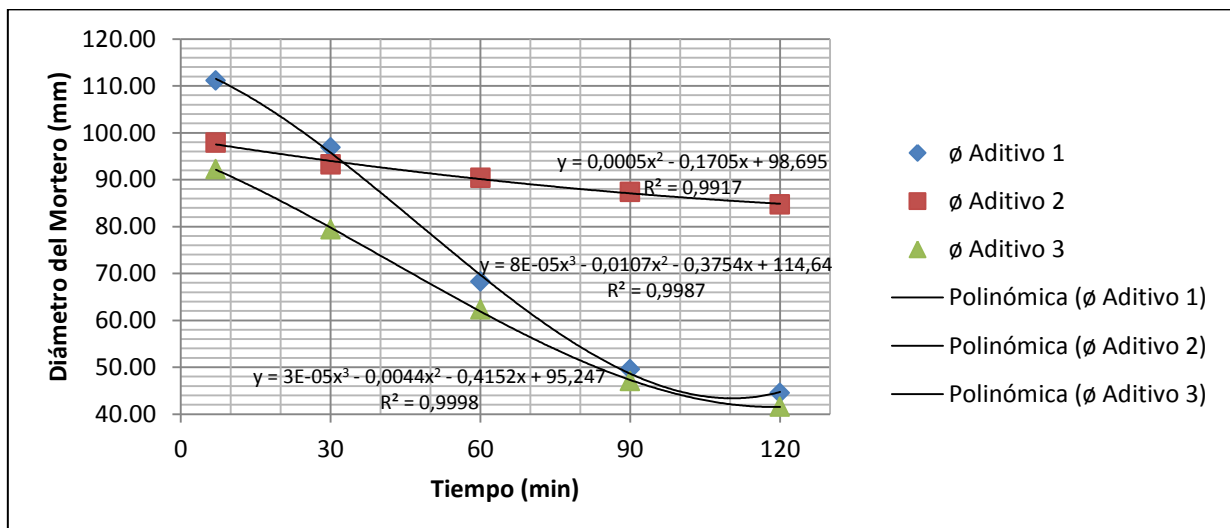
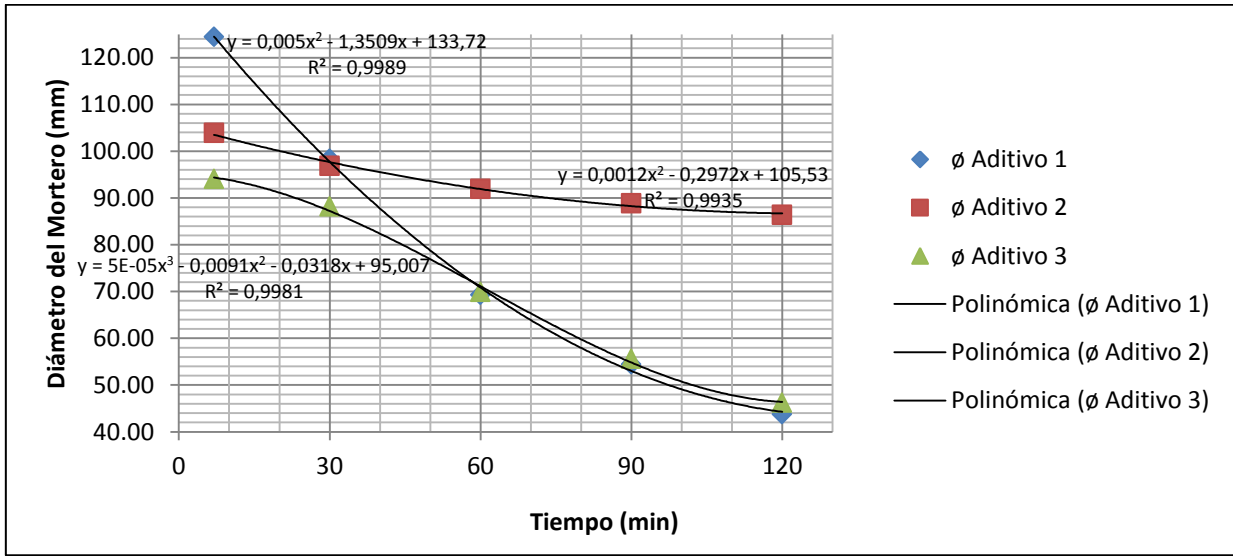


Tabla 62: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo de 10.0cc

Tiempo (Vol. 10.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	124,45	103,95	94,05
30 min	98,35	96,88	88,15
60 min	69,30	91,95	69,90
90 min	54,45	88,85	55,60
120 min	43,80	86,40	46,20

Figura 40: Gráfica de la Tabla 61, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

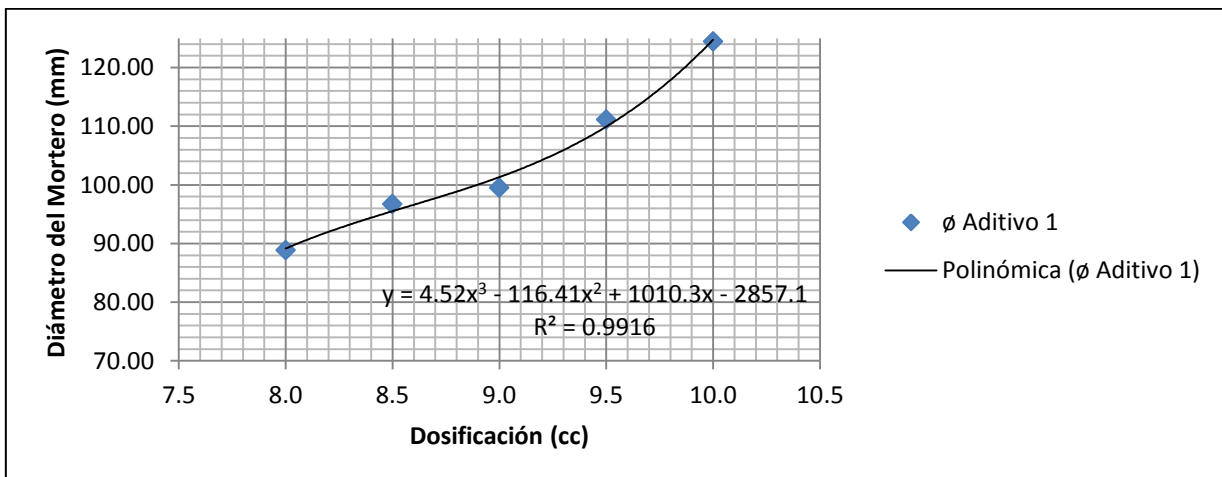


Tablas 63-64: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
8,0 cc	88,85 mm
8,5 cc	96,74 mm
9,0 cc	99,50 mm
9,5 cc	111,15 mm
10,0 cc	124,45 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	7,54 cc
90 mm	8,05 cc
100 mm	8,88 cc
110 mm	9,50 cc
120 mm	9,86 cc

Figura 41: Gráfica de las Tablas 63-64, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

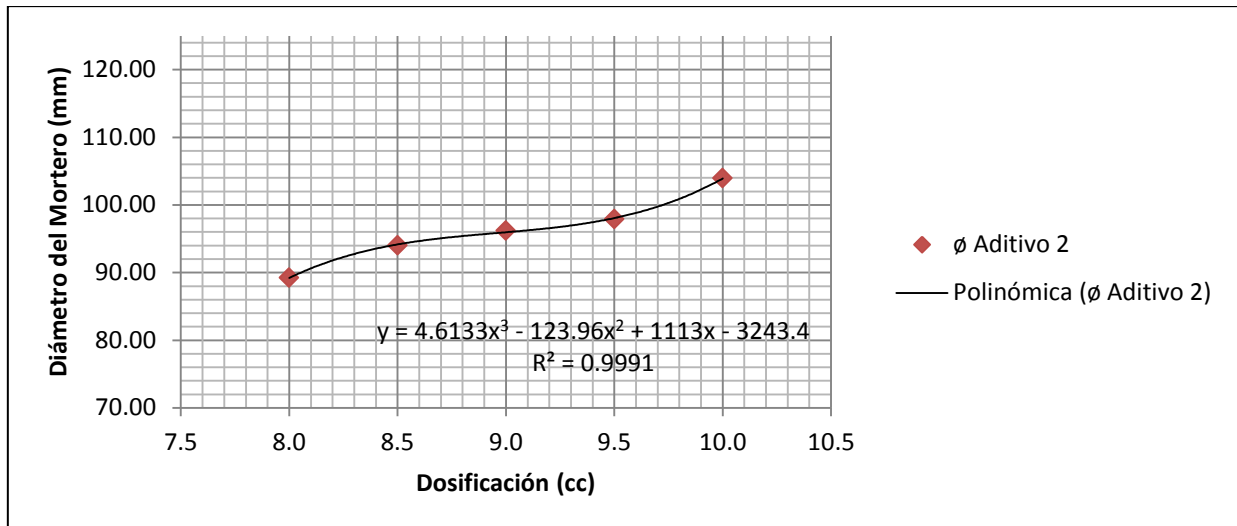


Tablas 65-66: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
8,0 cc	89,25 mm
8,5 cc	94,01 mm
9,0 cc	96,20 mm
9,5 cc	97,90 mm
10,0 cc	103,95 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	7,58 cc
90 mm	8,06 cc
100 mm	9,72 cc
110 mm	10,28 cc
120 mm	10,58 cc

Figura 42: Gráfica de las Tablas 63-64, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

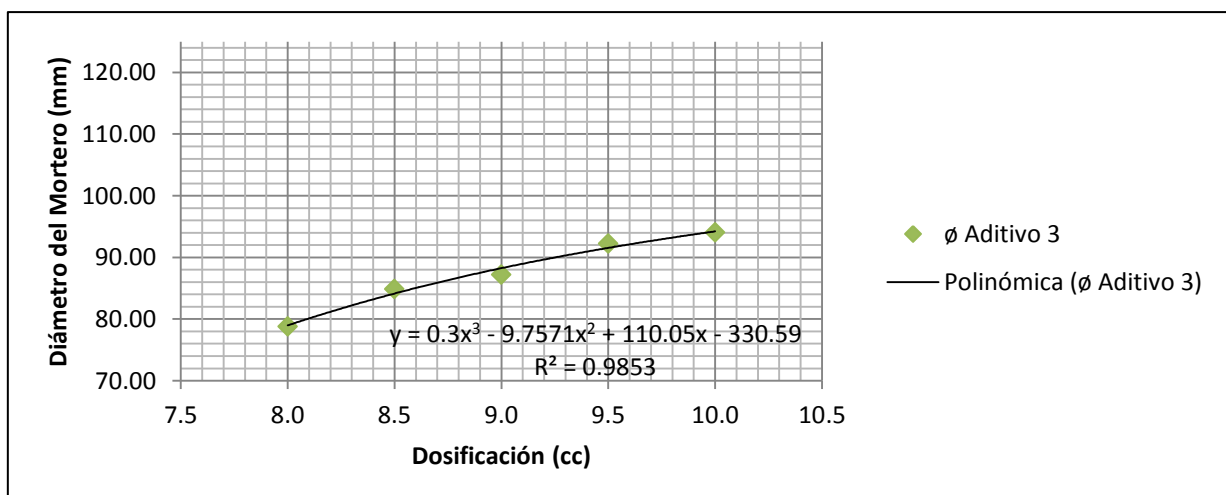


Tablas 67-68: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
8,0 cc	78,80 min
8,5 cc	84,85 min
9,0 cc	87,20 min
9,5 cc	92,25 min
10,0 cc	94,05 min

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	8,09 cc
90 mm	9,26 cc
100 mm	11,31 cc
110 mm	12,98 cc
120 mm	13,93 cc

Figura 43: Gráfica de las Tablas 63-64, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



c) CON ARENA MALANCHE (ARENA CON ALTO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 69: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 6.5cc

Tiempo (Vol. 6.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	93,60	97,80	102,00
30 min	74,50	82,95	74,20
60 min	58,25	75,95	60,05
90 min	46,05	72,60	51,20
120 min	42,20	66,05	44,80

Figura 44: Gráfica de la Tabla 69, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

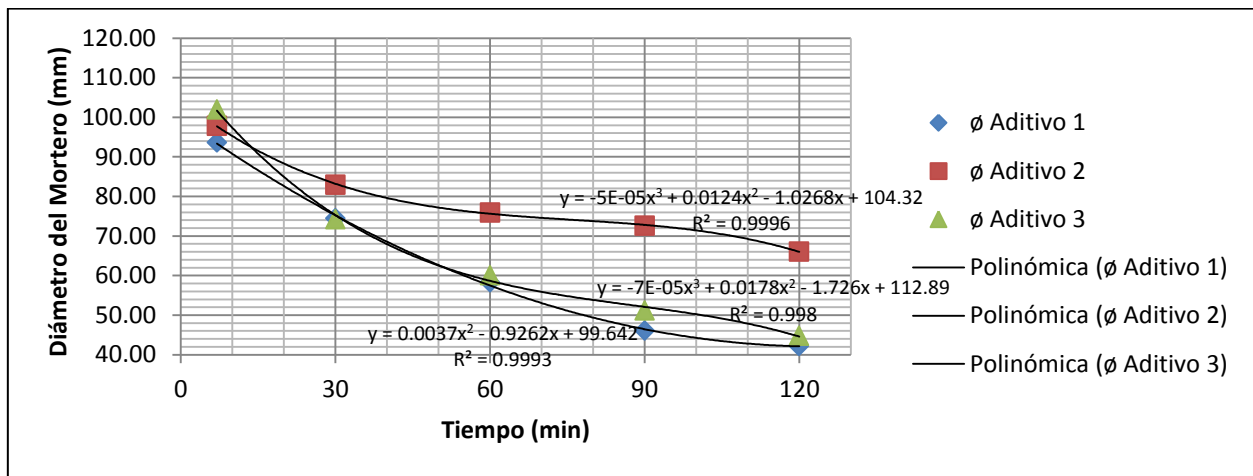


Tabla 70: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.0cc

Tiempo (Vol. 7.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	101,45	103,90	107,50
30 min	86,80	97,50	83,90
60 min	70,05	87,85	75,10
90 min	57,40	80,80	64,75
120 min	49,40	77,00	56,10

Figura 45: Gráfica de la Tabla 70, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

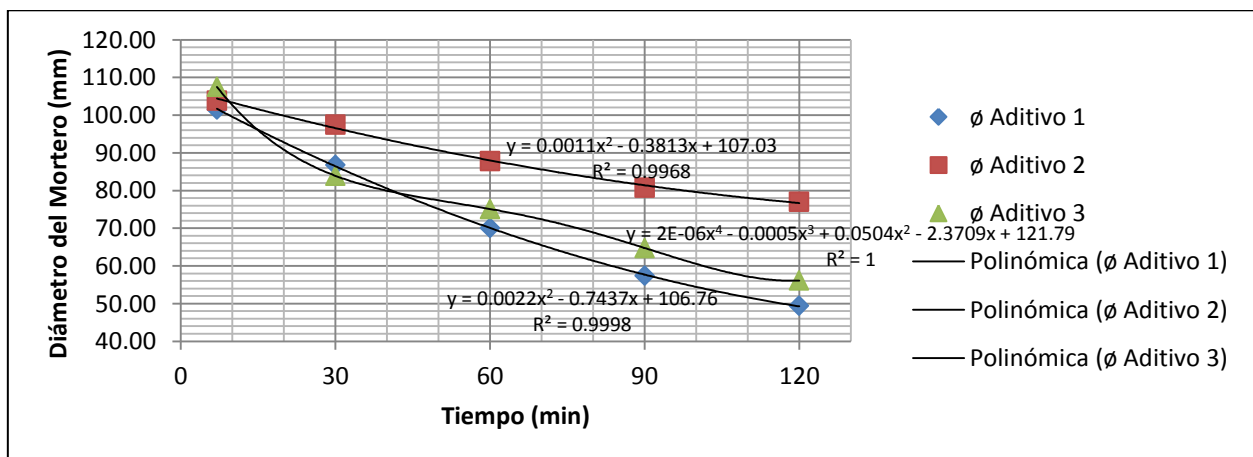


Tabla 71: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 7.5cc

Tiempo (Vol. 7.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	109,70	107,30	110,15
30 min	94,05	98,15	98,05
60 min	82,70	94,65	83,85
90 min	69,60	90,40	74,30
120 min	53,25	81,10	59,20

Figura 46: Gráfica de la Tabla 71, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

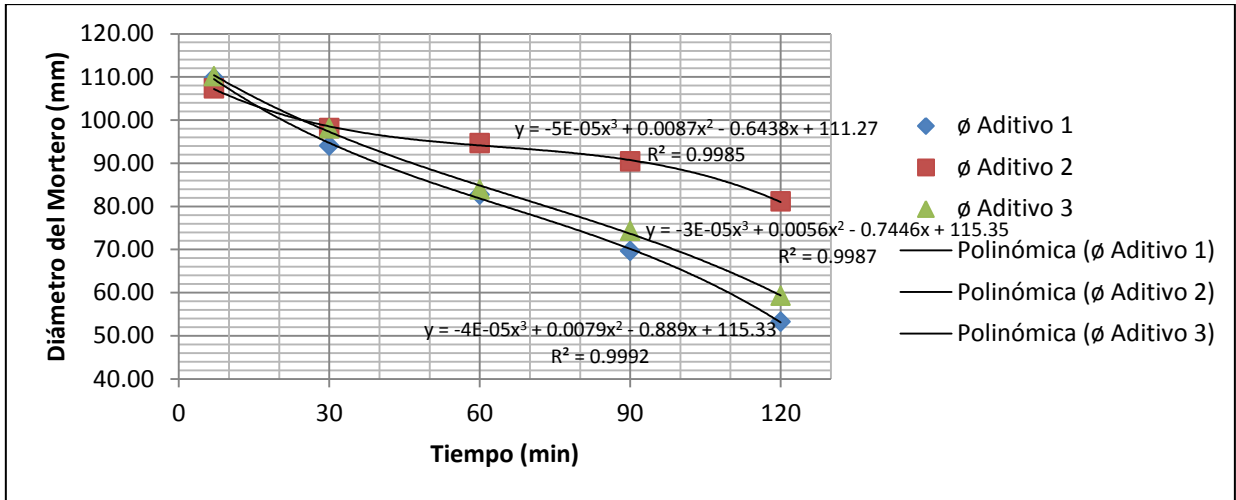


Tabla 72: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	113,53	112,60	114,30
30 min	102,95	105,80	107,80
60 min	88,00	97,15	91,80
90 min	69,70	91,80	81,60
120 min	57,85	79,80	75,50

Figura 47: Gráfica de la Tabla 72, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

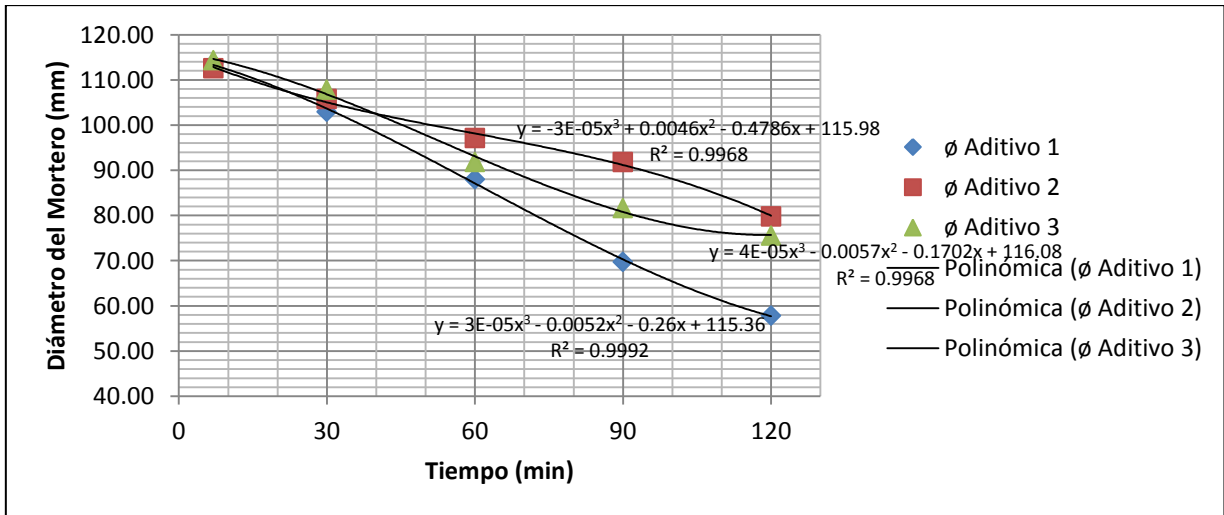
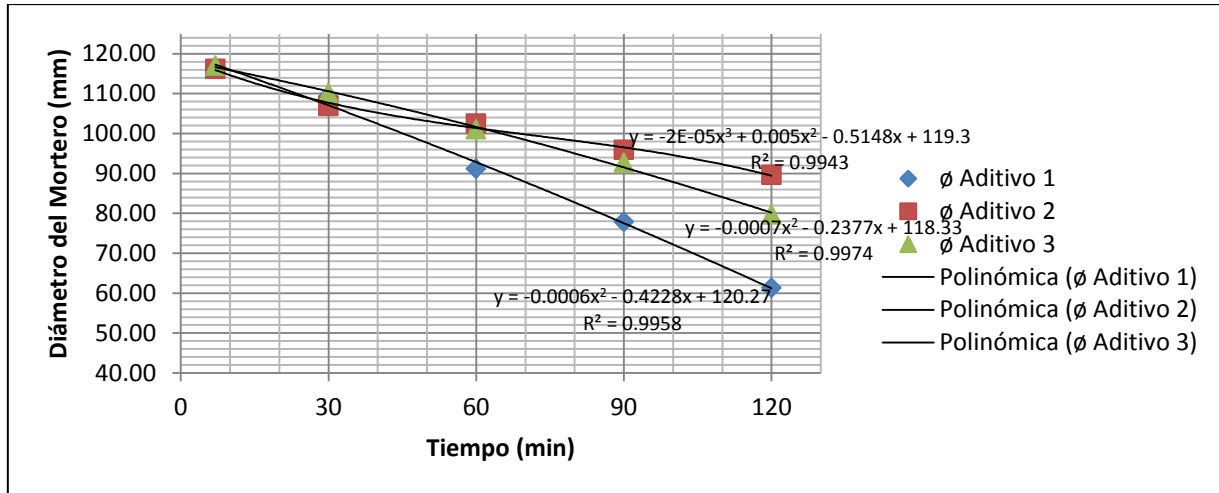


Tabla 73: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo I, Arena Malanche y Volumen de Aditivo de 8.5cc

Tiempo (Vol. 8.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	116,35	116,20	117,00
30 min	109,25	106,90	110,15
60 min	91,15	102,45	101,05
90 min	77,85	95,85	92,65
120 min	61,30	89,60	79,70

Figura 48: Gráfica de la Tabla 73, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

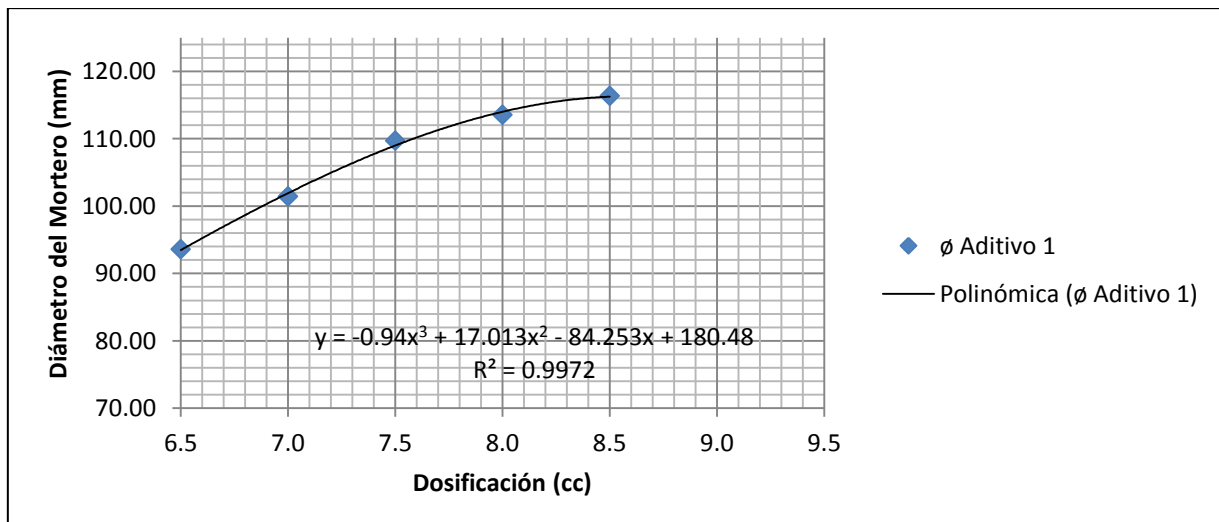


Tablas 74-75: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
6,5 cc	93,60 min
7,0 cc	101,45 min
7,5 cc	109,70 min
8,0 cc	113,53 min
8,5 cc	116,35 min

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	5,76 cc
90 mm	6,31 cc
100 mm	6,88 cc
110 mm	7,58 cc
120 mm	8,64 cc

Figura 49: Gráfica de las Tablas 74-75, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

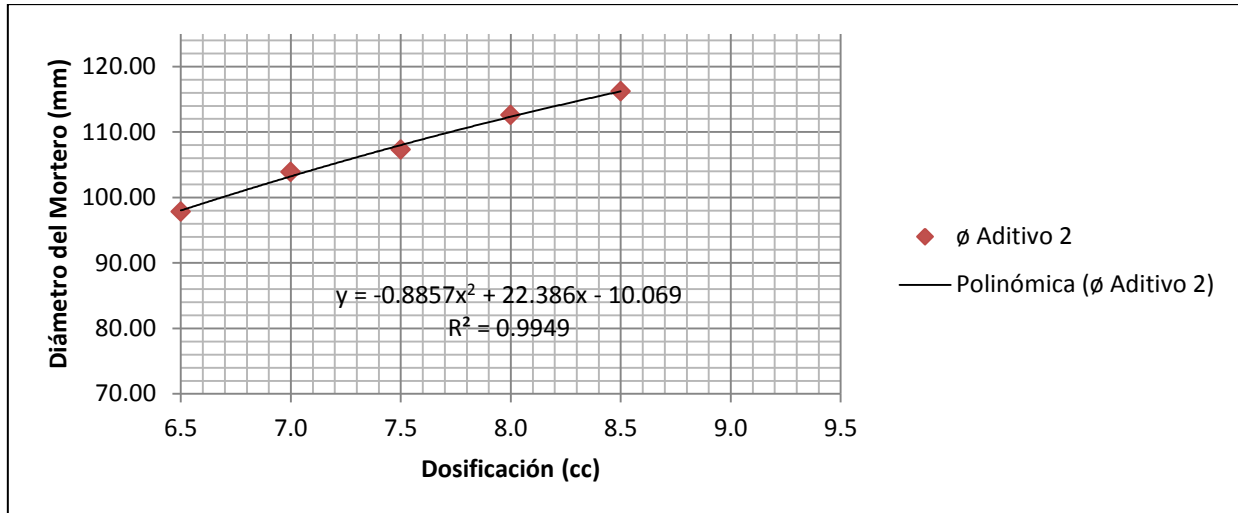


Tablas 76-77: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
6,5 cc	97,80 mm
7,0 cc	103,90 mm
7,5 cc	107,30 mm
8,0 cc	112,60 mm
8,5 cc	116,20 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	5,02 cc
90 mm	5,80 cc
100 mm	6,69 cc
110 mm	7,72 cc
120 mm	9,05 cc

Figura 50: Gráfica de las Tablas 76-77, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

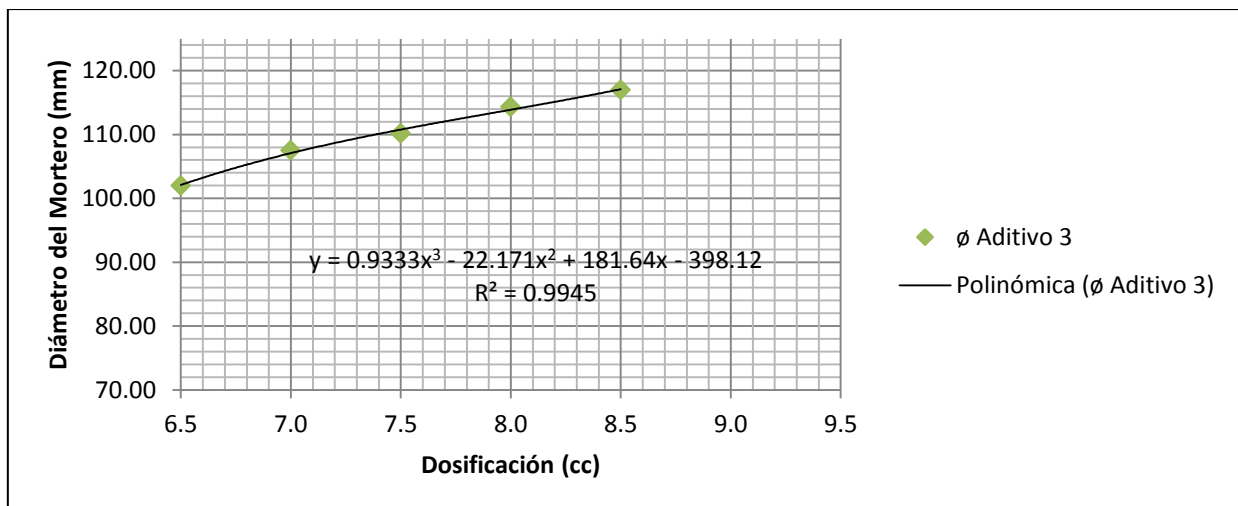


Tablas 78-79: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
6,5 cc	102,00 mm
7,0 cc	107,50 mm
7,5 cc	110,15 mm
8,0 cc	114,30 mm
8,5 cc	117,00 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	5,27 cc
90 mm	5,71 cc
100 mm	6,33 cc
110 mm	7,38 cc
120 mm	8,87 cc

Figura 51: Gráfica de las Tablas 78-79, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



5.2.2.3. MORTEROS DISEÑADOS CON CEMENTO TIPO HE (CEMENTO CON ALTO CONTENIDO DE ÁLCALIS)

a) CON ARENA HUANCAYO (ARENA CON BAJO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 80: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo: 5.0cc

Tiempo (Vol. 5.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	94,80	96,50	98,80
30 min	88,60	88,10	94,90
60 min	78,60	80,70	80,80
90 min	68,40	73,80	71,00
120 min	59,20	66,90	55,20

Figura 52: Gráfica de la Tabla 80, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

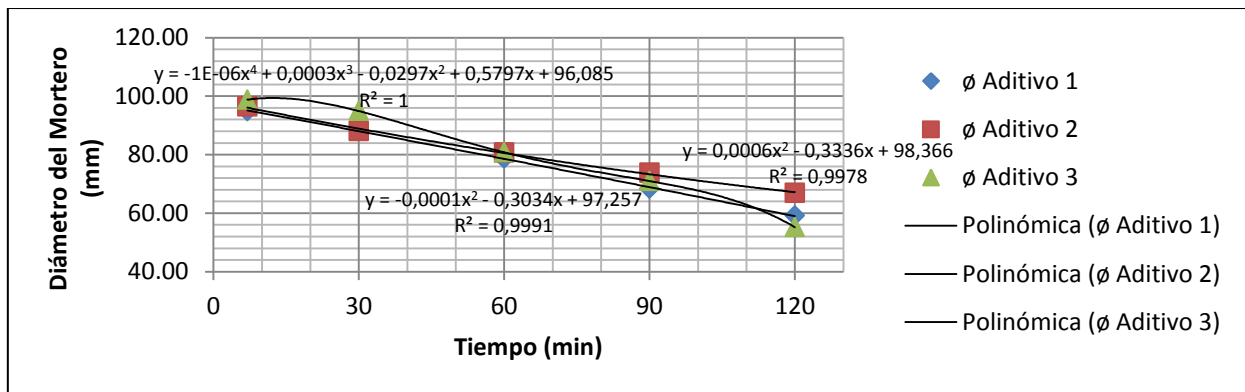


Tabla 81: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo: 5.5cc

Tiempo (Vol. 5.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	97,80	99,00	101,20
30 min	90,00	90,30	96,00
60 min	80,50	83,40	86,30
90 min	70,70	75,90	74,90
120 min	63,90	71,50	59,70

Figura 53: Gráfica de la Tabla 81, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

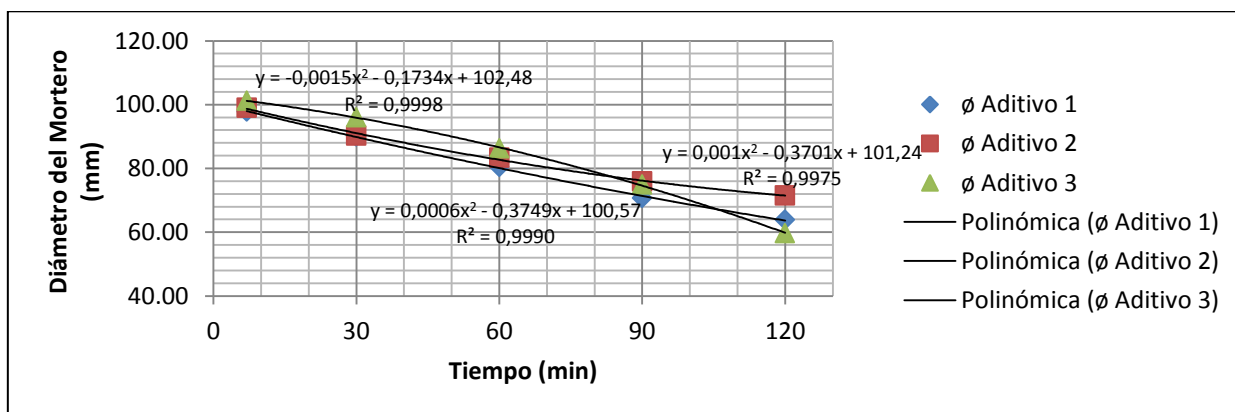


Tabla 82: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo: 6.0cc

Tiempo (Vol. 6.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	104,40	101,60	105,90
30 min	92,10	93,00	98,90
60 min	83,20	88,00	89,50
90 min	72,70	77,00	77,80
120 min	66,30	72,50	61,00

Figura 54: Gráfica de la Tabla 82, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

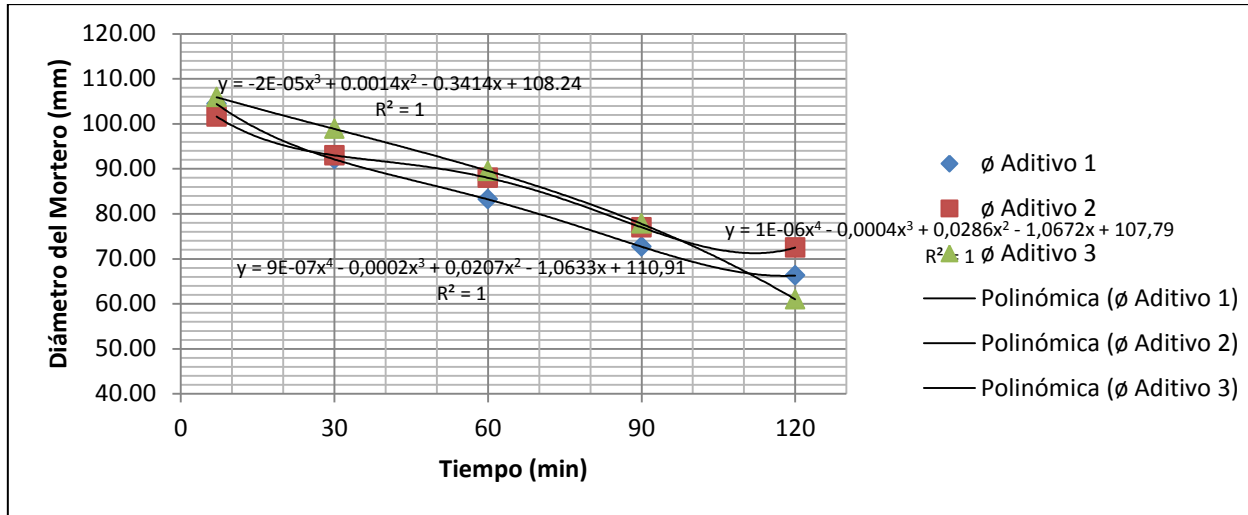


Tabla 83: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo: 7.0cc

Tiempo (Vol. 7.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	112,40	112,20	115,50
30 min	97,30	97,70	101,60
60 min	86,40	90,30	93,50
90 min	74,00	82,80	80,20
120 min	68,20	78,00	63,30

Figura 55: Gráfica de la Tabla 83, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

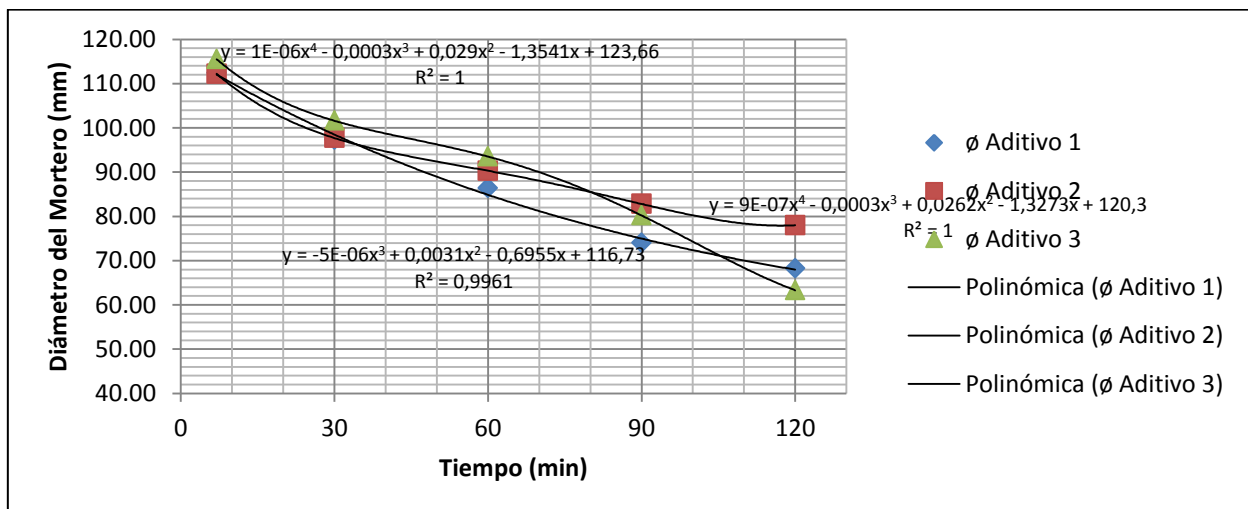
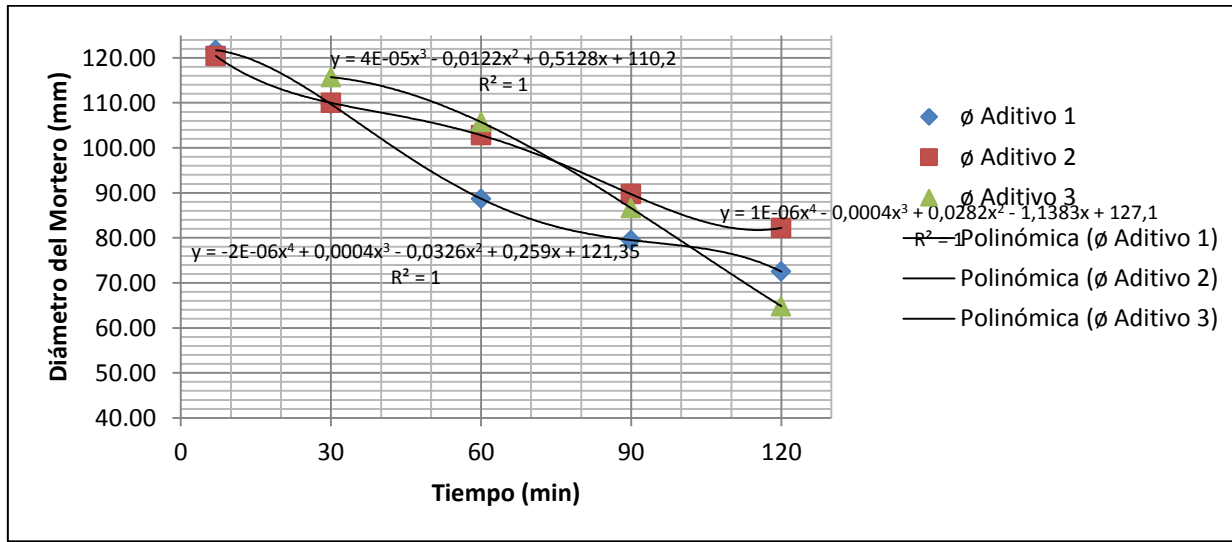


Tabla 84: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Huancayo y Volumen de Aditivo: 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (min)	∅ aditivo 3 (min)
7 min	121,70	120,40	SEGREGADO
30 min	109,70	110,00	115,70
60 min	88,70	102,80	105,70
90 min	79,50	89,70	86,60
120 min	72,50	82,20	64,80

Figura 56: Gráfica de la Tabla 84, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

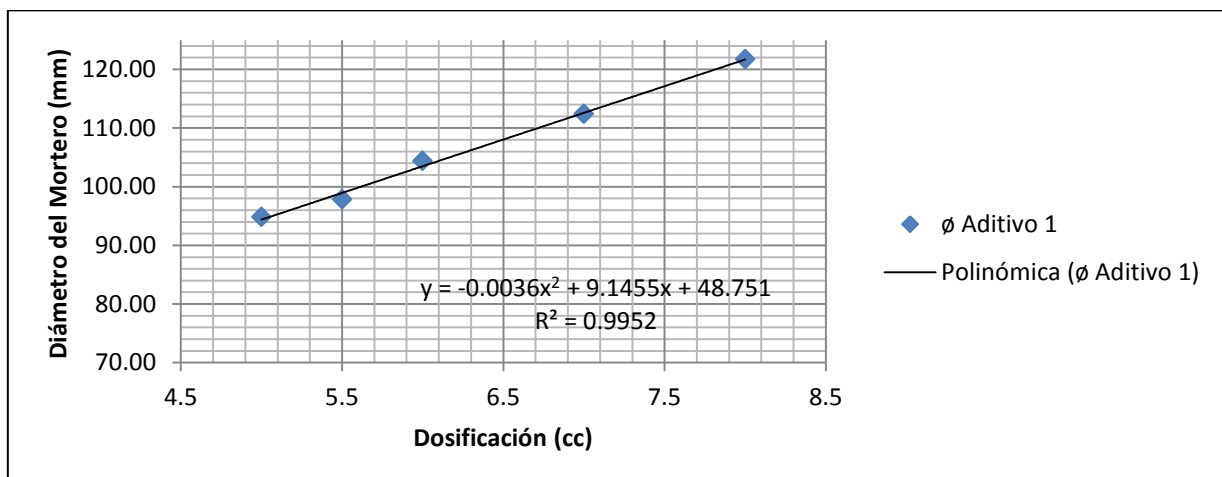


Tablas 85-86: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
5,0 cc	94,80 mm
5,5 cc	97,80 mm
6,0 cc	104,40 mm
7,0 cc	112,40 mm
8,0 cc	121,70 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	3,42 cc
90 mm	4,52 cc
100 mm	5,62 cc
110 mm	6,71 cc
120 mm	7,81 cc

Figura 57: Gráfica de las Tablas 85-86, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

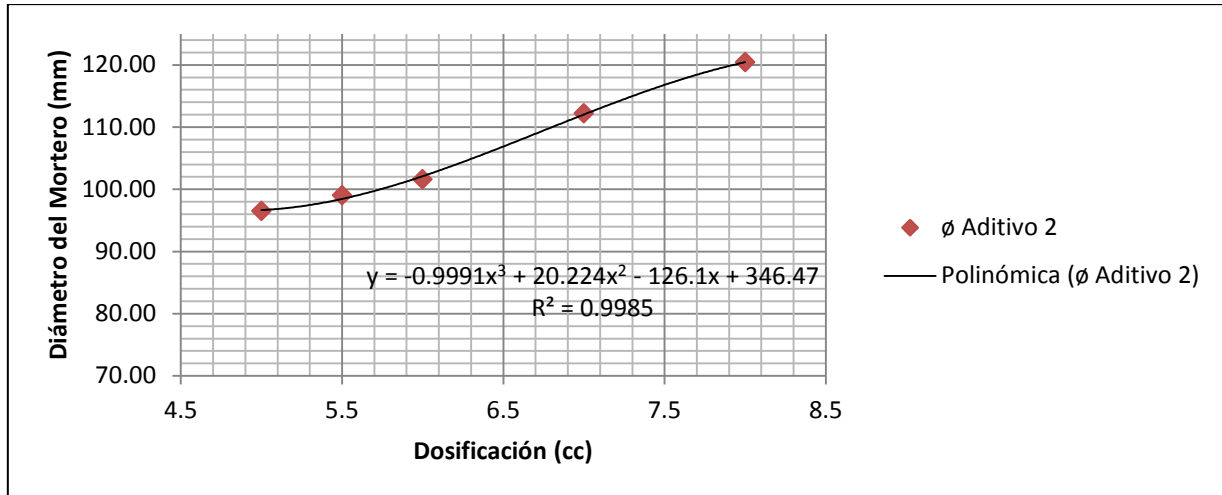


Tablas 87-88: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
5,0 cc	96,50 min
5,5 cc	99,00 min
6,0 cc	101,60 min
7,0 cc	112,20 min
8,0 cc	120,40 min

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	3,17 cc
90 mm	4,38 cc
100 mm	5,73 cc
110 mm	6,80 cc
120 mm	7,92 cc

Figura 58: Gráfica de las Tablas 87-88, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



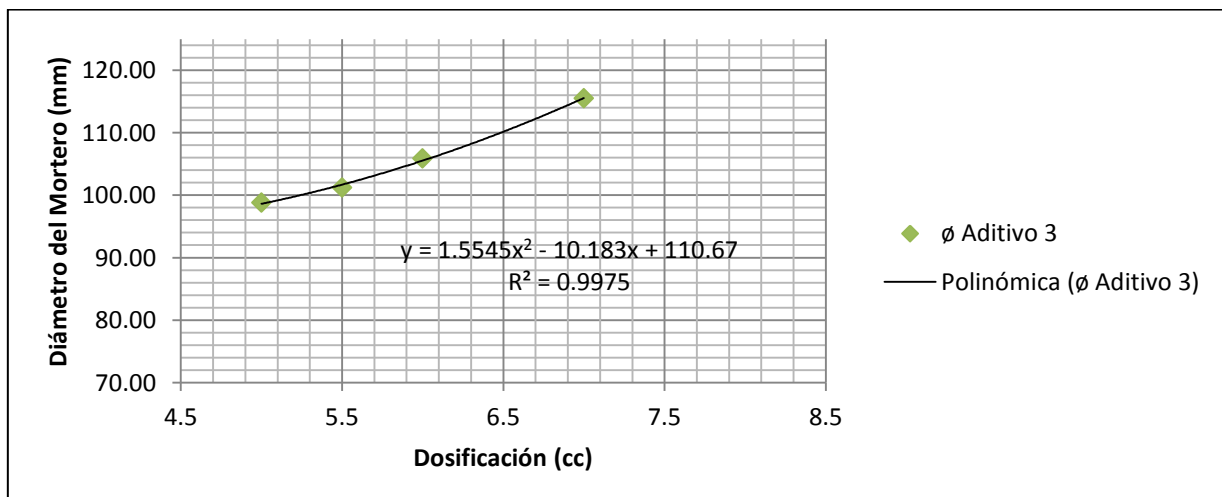
Tablas 89-90: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
5,0 cc	98,80 mm
5,5 cc	101,20 mm
6,0 cc	105,90 mm
7,0 cc	115,50 mm
8,0	SEGREGADO

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	2,92cc
90 mm	4,09cc
100 mm	5,24cc
110 mm	6,48cc
120 mm	7,37cc*

* Muy probablemente, segregará la muestra

Figura 59: Gráfica de las Tablas 89-90, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



b) CON ARENA JICAMARCA (ARENA CON INTERMEDIO CONTENIDO DE ARCILLAS)

Tabla 91: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo: 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	81,85	85,70	73,85
30 min	71,40	78,80	64,70
60 min	55,20	72,40	50,25
90 min	43,35	67,90	42,10
120 min	41,10	61,10	40,80

Figura 60: Gráfica de la Tabla 91, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

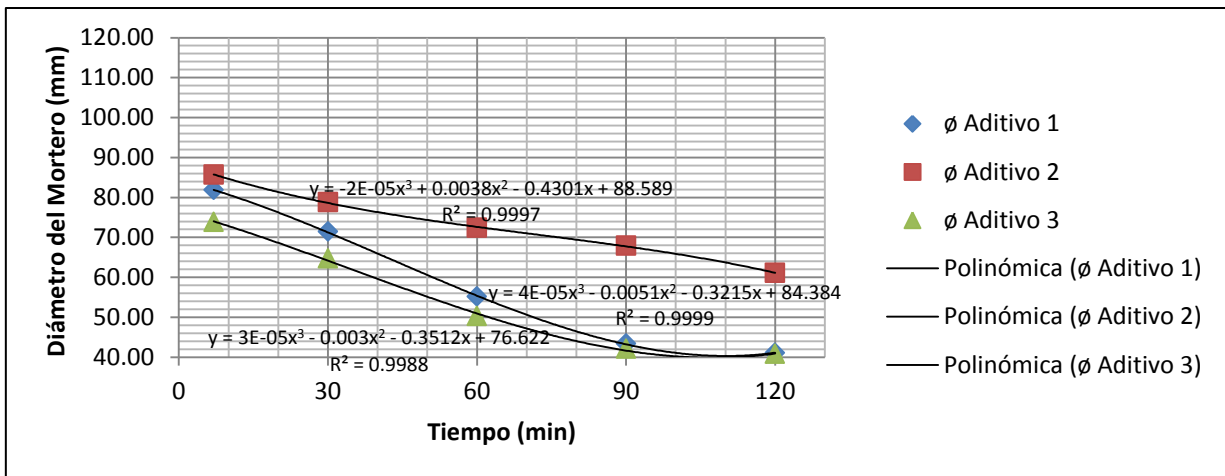


Tabla 92: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo: 8.5cc

Tiempo (Vol. 8.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	85,48	88,10	80,90
30 min	76,20	81,55	71,70
60 min	63,95	75,20	57,25
90 min	46,90	70,70	45,60
120 min	42,10	66,10	41,83

Figura 61: Gráfica de la Tabla 92, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

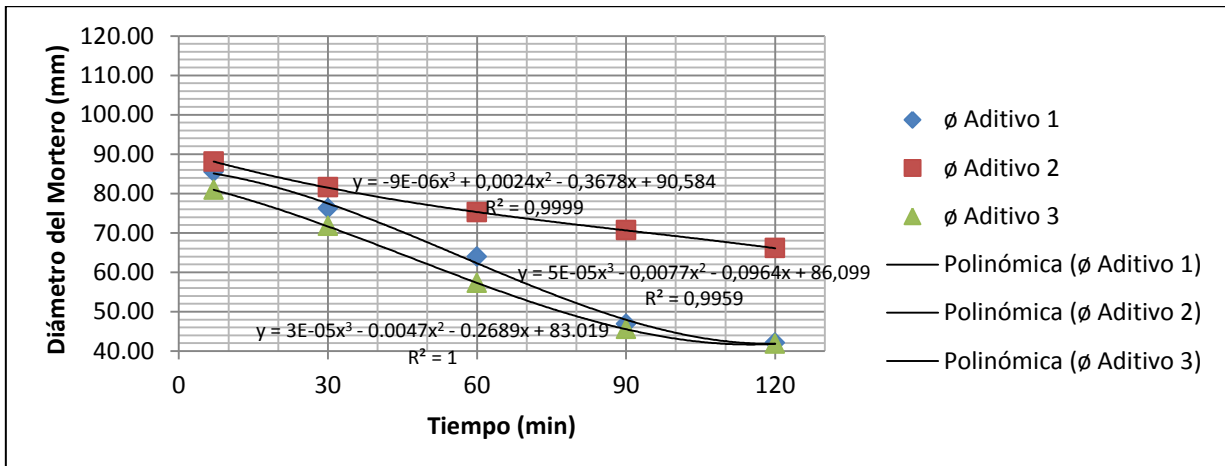


Tabla 93: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo: 9.0cc

Tiempo (Vol. 9.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	88,48	89,25	82,40
30 min	78,10	83,10	73,75
60 min	66,20	77,40	61,35
90 min	49,70	72,45	46,60
120 min	43,10	67,10	42,85

Figura 62: Gráfica de la Tabla 93, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

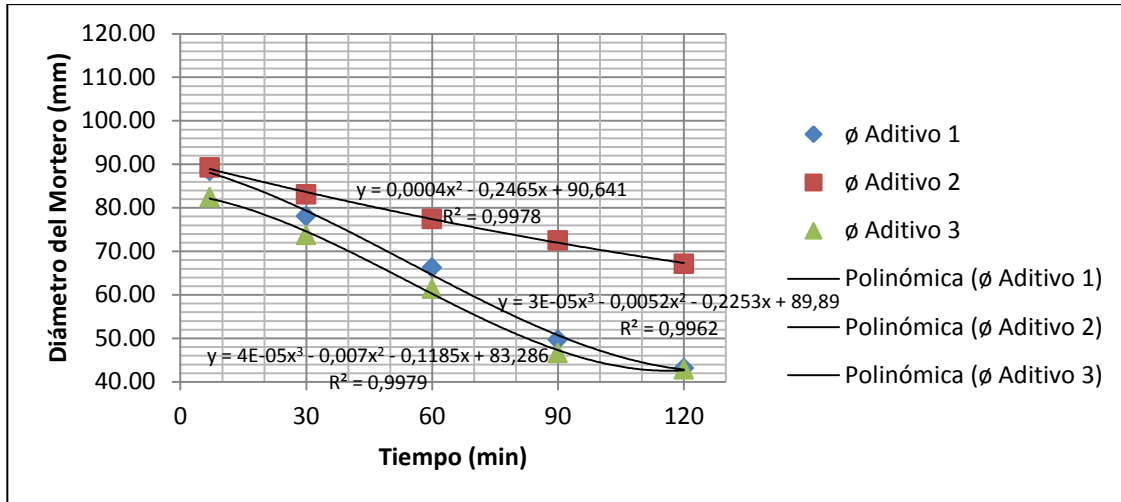


Tabla 94: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo: 9.5cc

Tiempo (Vol. 9.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	91,05	91,50	84,35
30 min	83,65	84,95	75,10
60 min	67,85	78,55	62,85
90 min	50,60	75,35	47,70
120 min	44,00	68,85	44,03

Figura 63: Gráfica de la Tabla 94, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

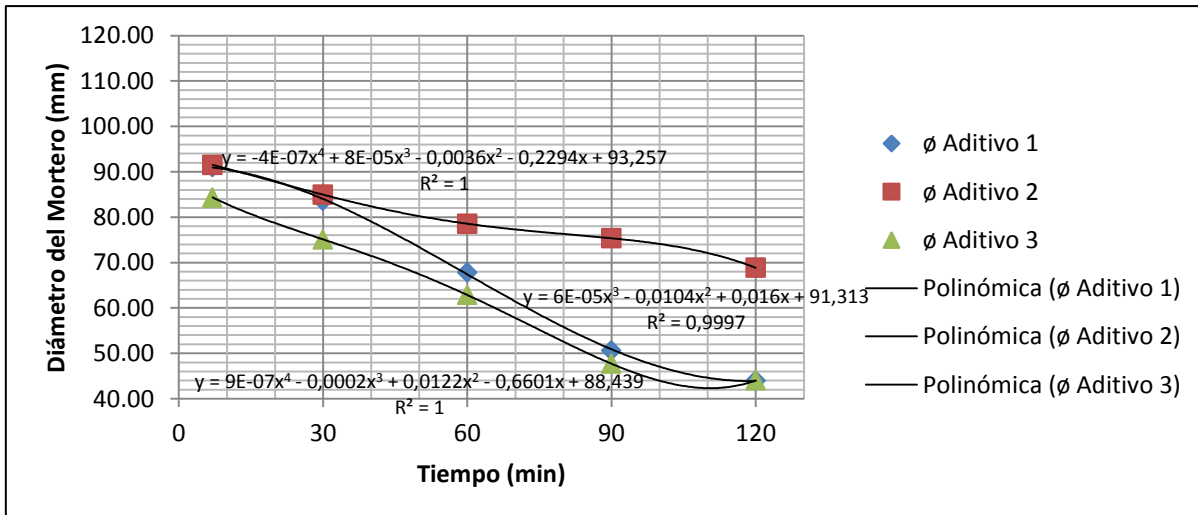
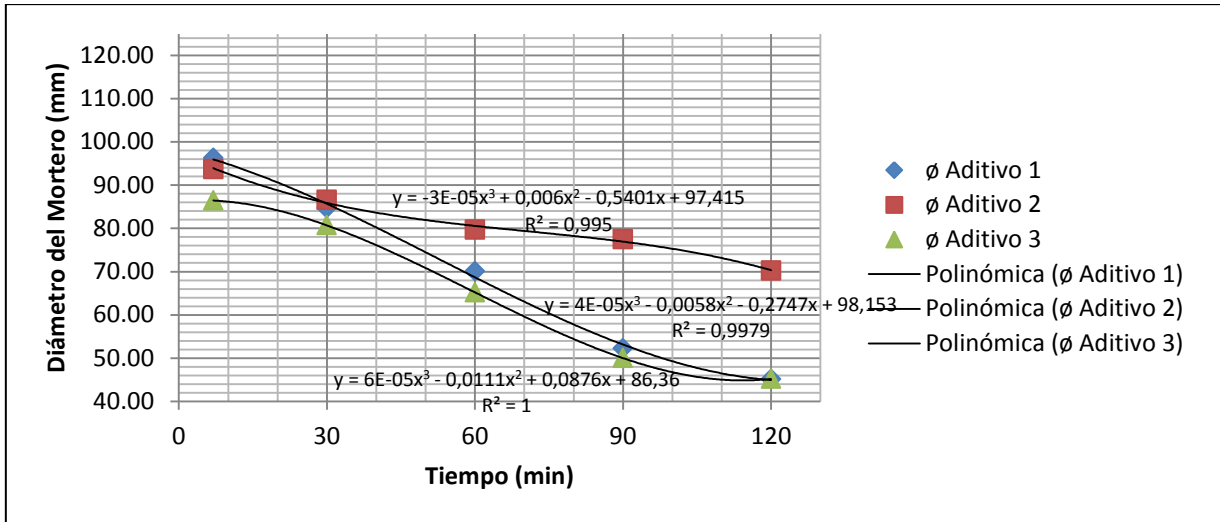


Tabla 95: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Jicamarca y Volumen de Aditivo 10.0cc

Tiempo (Vol. 10.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	96,30	93,70	86,45
30 min	84,63	86,55	80,70
60 min	70,05	79,70	65,20
90 min	52,25	77,50	50,00
120 min	45,15	70,20	45,20

Figura 64: Gráfica de la Tabla 95, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

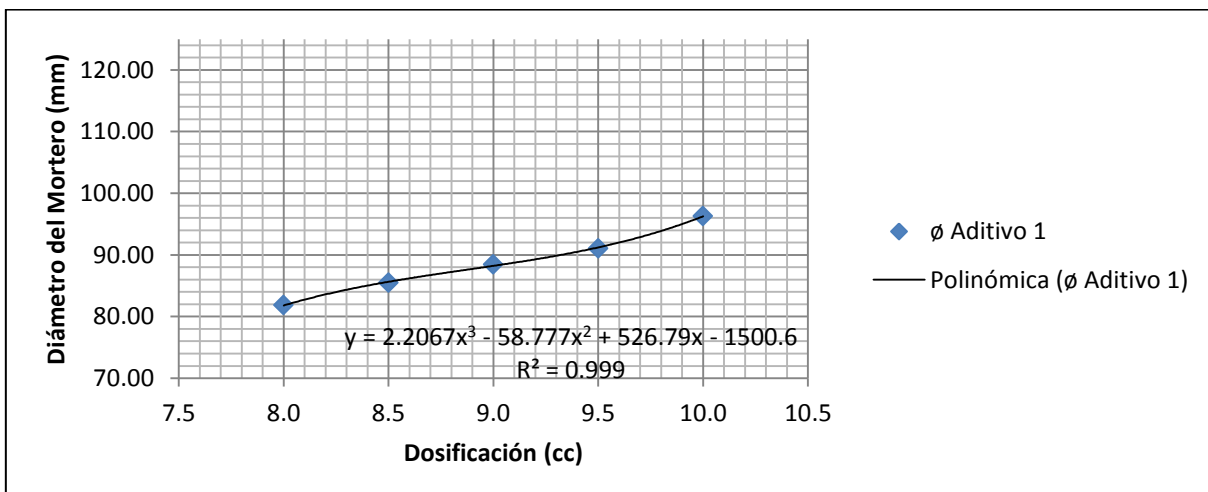


Tablas 96-97: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
8,0 cc	81,85 min
8,5 cc	85,48 min
9,0 cc	88,48 min
9,5 cc	91,05 min
10,0 cc	96,30 min

Diámetro buscado	Dosificación
70 mm	7,25 cc
80 mm	7,84 cc
90 mm	9,32 cc
100 mm	10,24 cc
110 mm	10,70 cc

Figura 65: Gráfica de las Tablas 96-97, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

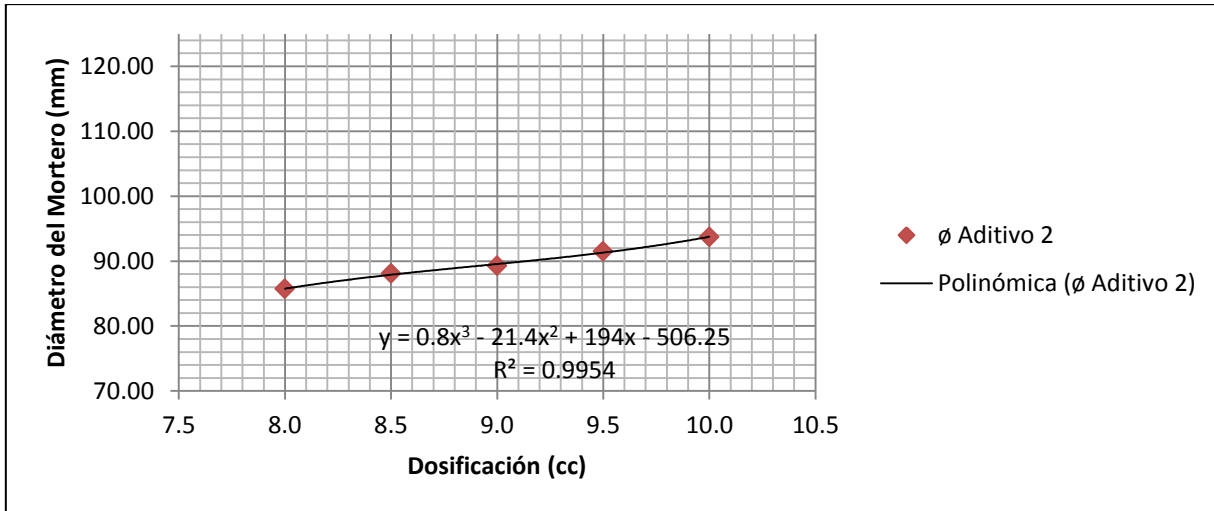


Tablas 98-99: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba para dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2
8,0 cc	85,70 min
8,5cc	88,10 min
9,0 cc	89,25 min
9,5 cc	91,50 min
10,0 cc	93,70 min

Diámetro buscado	Dosificación
70 mm	6,48 cc
80 mm	7,22 cc
90 mm	9,14 cc
100 mm	10,75 cc
110 mm	11,43 cc

Figura 66: Gráfica de las Tablas 98-99, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

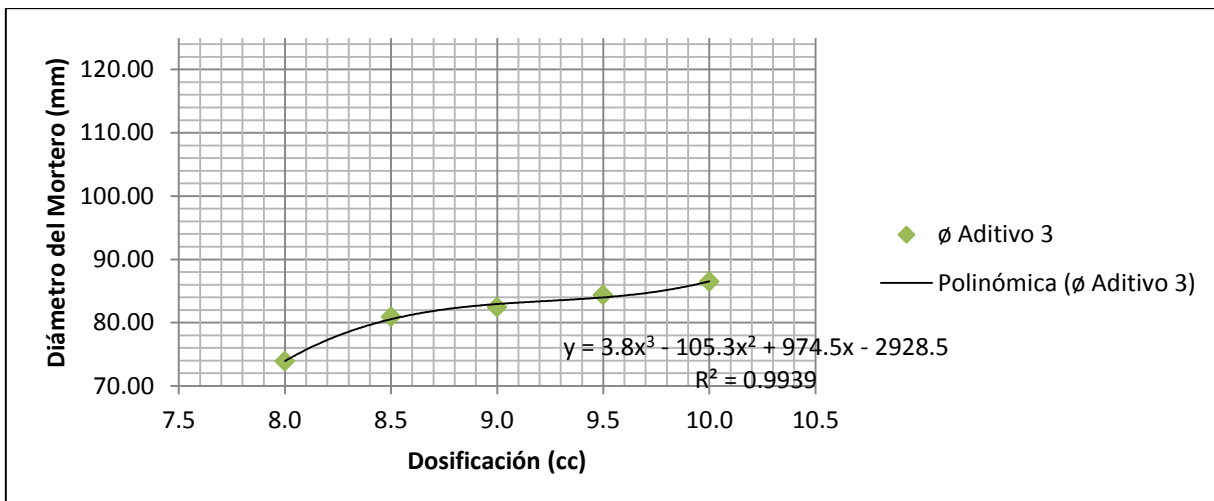


Tablas 100-101: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba a dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
8,0 cc	73,85 min
8,5 cc	80,90 min
9,0 cc	82,40 min
9,5 cc	84,35 min
10,0 cc	86,45 min

Diámetro buscado	Dosificación
70 mm	7,82 cc
80 mm	8,44 cc
90 mm	10,30 cc
100 mm	10,77 cc
110 mm	11,06 cc

Figura 67: Gráfica de las Tablas 100-101, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



**c) CON ARENA MALANCHE (ARENA CON ALTO CONTE-
NIDO DE ARCILLAS)**

Tabla 102: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo 7.0cc

Tiempo (Vol. 7.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	94,60	96,55	97,60
30 min	87,85	85,85	88,55
60 min	76,50	78,73	72,75
90 min	63,85	74,95	60,50
120 min	50,95	66,30	51,00

Figura 68: Gráfica de la Tabla 102, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

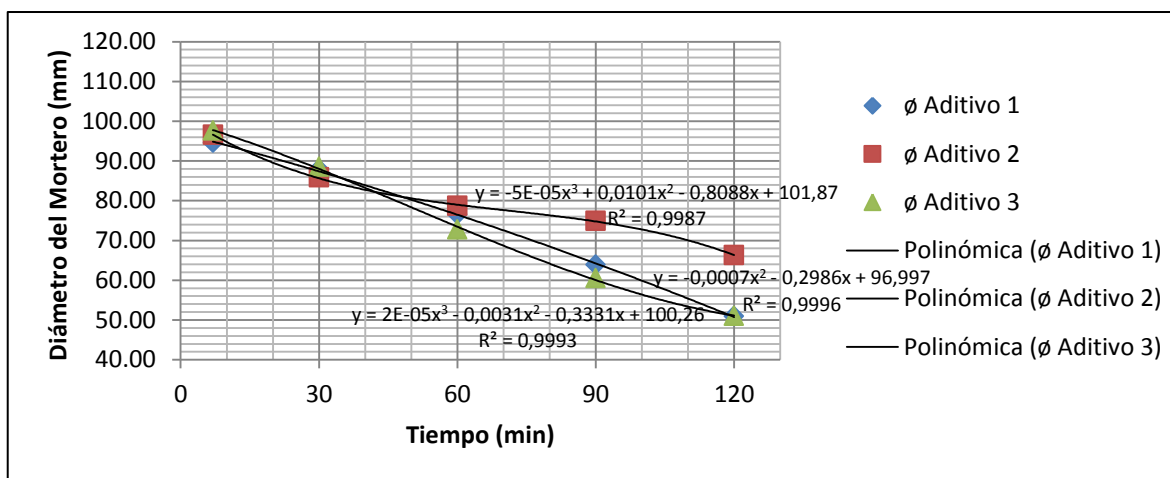


Tabla 103: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo 7.5cc

Tiempo (Vol. 7.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	107,00	103,15	106,15
30 min	93,75	89,35	96,85
60 min	80,90	80,35	78,80
90 min	70,15	76,95	65,00
120 min	54,25	69,65	56,58

Figura 69: Gráfica de la Tabla 103, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

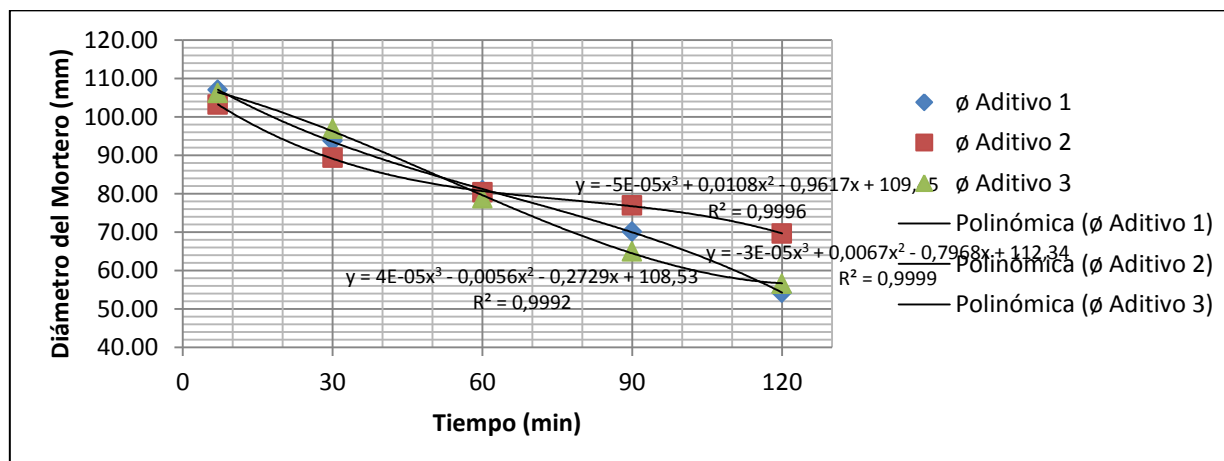


Tabla 104: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo 8.0cc

Tiempo (Vol. 8.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	109,05	104,80	112,85
30 min	98,00	95,65	98,60
60 min	89,15	86,30	87,30
90 min	76,60	80,80	72,90
120 min	58,95	71,45	57,65

Figura 70: Gráfica de la Tabla 104, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

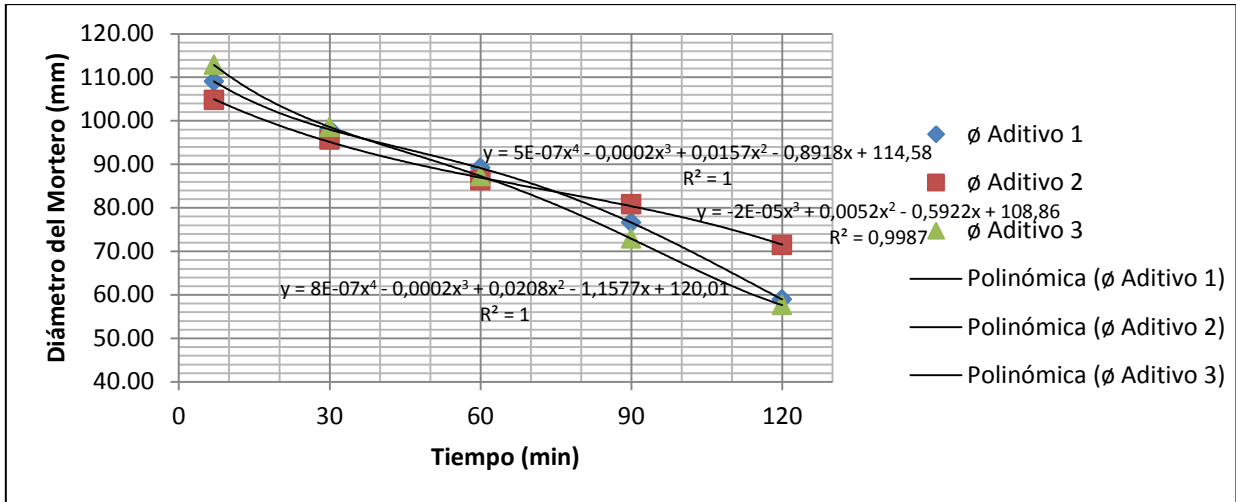


Tabla 105: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo 8.5cc

Tiempo (Vol. 8.5 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	111,85	110,15	116,95
30 min	102,75	97,58	103,10
60 min	91,40	93,38	90,15
90 min	79,65	91,65	74,00
120 min	60,33	79,80	60,70

Figura 71: Gráfica de la Tabla 105, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

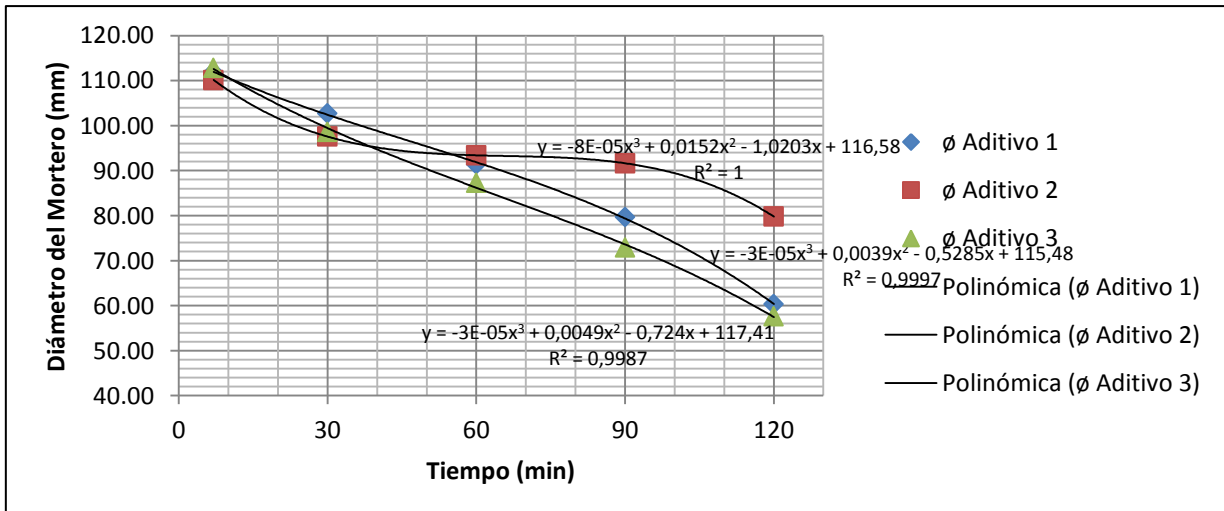
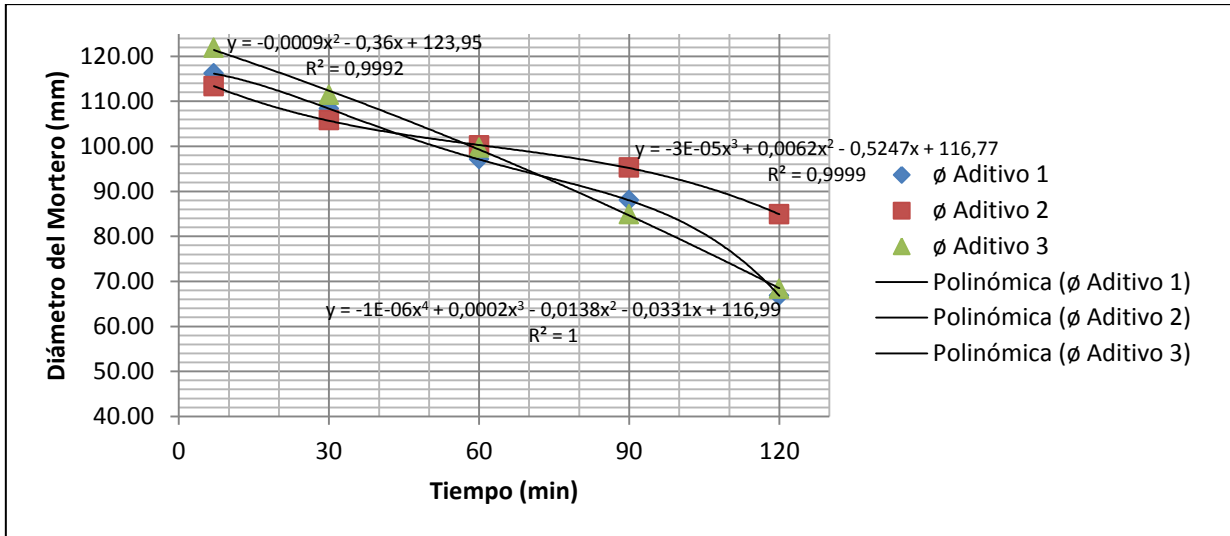


Tabla 106: Diámetro de los morteros, con Cemento Tipo HE, Arena Malanche y Volumen de Aditivo 9.0cc

Tiempo (Vol. 9.0 cc)	∅ aditivo 1 (mm)	∅ aditivo 2 (mm)	∅ aditivo 3 (mm)
7 min	116,15	113,35	121,85
30 min	108,35	105,80	111,45
60 min	97,10	100,15	99,70
90 min	88,00	95,28	84,90
120 min	66,80	84,88	68,30

Figura 72: Gráfica de la Tabla 106, Diámetro del Mortero (mm) vs Tiempo (min)

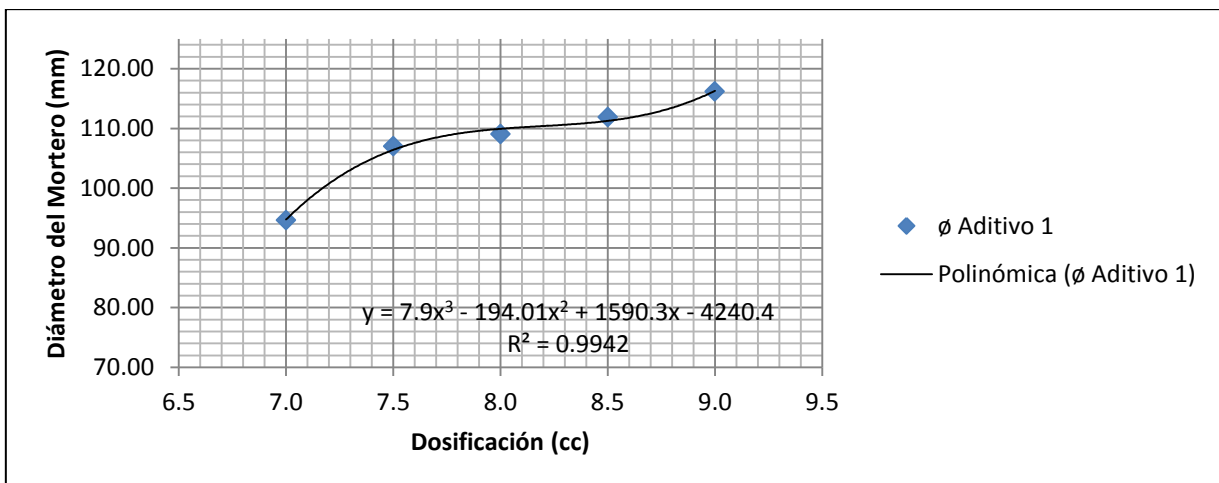


Tablas 107-108: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba a dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 1
7,0 cc	94,60 min
7,5 cc	107,00 min
8,0 cc	109,05 min
8,5 cc	111,85 min
9,0 cc	116,15 min

Diámetro buscado	Dosificación
80 mm	6,67 cc
90 mm	6,88 cc
100 mm	7,16 cc
110 mm	8,07 cc
120 mm	9,16 cc

Figura 73: Gráfica de las Tablas 107-108, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

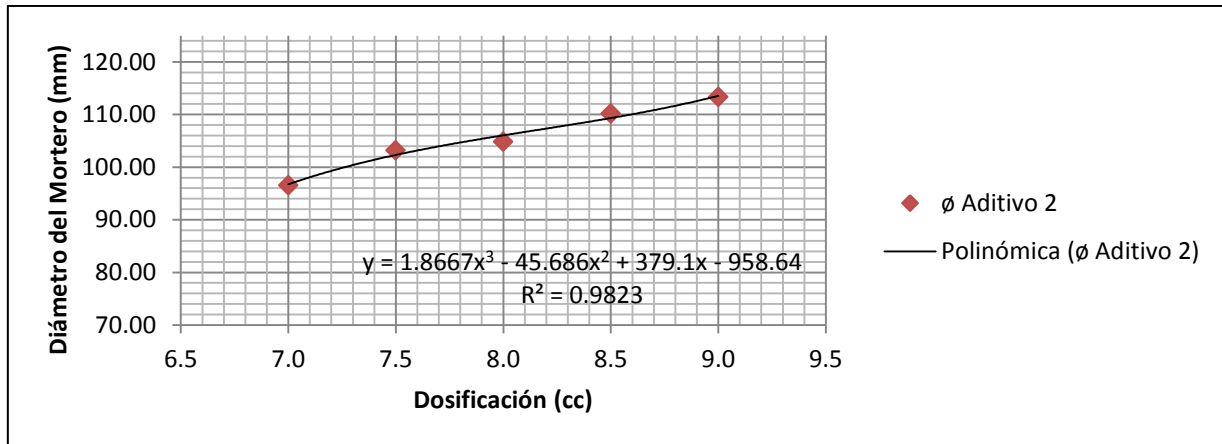


Tablas 109-110: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba a dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 2 (mm)
7,0	96,55
7,5	103,15
8,0	104,80
8,5	110,15
9,0	113,35

Diámetro buscado	Dosificación
80mm	6,18cc
90mm	6,60cc
100mm	7,27cc
110mm	8,48cc
120mm	9,49cc

Figura 74: Gráfica de las Tablas 109-110, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)

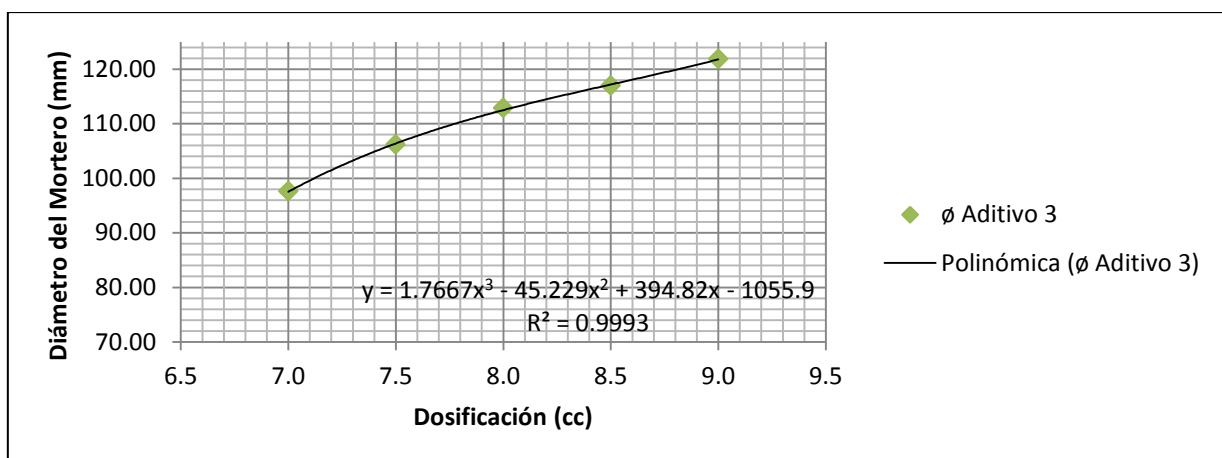


Tablas 111-112: Diámetro de los morteros a diferentes dosificaciones y volúmenes de prueba a dosificar

Volumen (Tiempo 7')	∅ aditivo 3
7,0	97,60 mm
7,5	106,15 mm
8,0	112,85 mm
8,5	116,95 mm
9,0	121,85 mm

Diámetro buscado	Dosificación
80mm	6,36cc
90mm	6,68cc
100mm	7,12cc
110mm	7,77cc
120mm	8,81cc

Figura 75: Gráfica de las Tablas 111-112, Diámetro de Mortero (mm) vs Dosificación empleada (cc)



Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad, de la empresa BASF Chemical Construction S.A. en el Área de Desempeño de Materiales.

5.2.3. DISEÑO DE CUBOS DE MORTERO Y PRUEBA DE RESISTENCIA

5.2.3.1. Con Aditivo de Tecnología Naftalenosulfonato (Aditivo 1)

Tabla 113: Mortero con Dosificación Mínima - Luego de 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	252,54	243,09	237,33
Arena Jicamarca	247,76	240,39	233,43
Arena Malanche	241,21	237,27	225,86

Tabla 114: Mortero con Dosificación Máxima - Luego de 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	261,67	254,99	247,16
Arena Jicamarca	253,85	243,27	237,52
Arena Malanche	249,78	239,35	228,82

Tabla 115: Mortero con Dosificación Mínima - Luego de 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	320,46	327,79	345,09
Arena Jicamarca	313,54	323,19	332,54
Arena Malanche	296,96	312,46	325,69

Tabla 116: Mortero con Dosificación Máxima - Luego de 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 1

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	326,24	339,13	347,83
Arena Jicamarca	322,49	330,80	338,87
Arena Malanche	306,36	319,59	329,06

5.2.3.2. Con Aditivo de Tecnología Policarboxilato (Aditivo 2)

Tabla 117: Mortero con Dosificación Mínima - Luego de 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	241,56	229,45	224,32
Arena Jicamarca	232,78	226,23	219,29
Arena Malanche	227,98	218,72	207,87

Tabla 118: Mortero con Dosificación Máxima - Luego de 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	243,48	237,39	228,37
Arena Jicamarca	237,21	231,56	225,74
Arena Malanche	230,34	223,71	214,45

Tabla 119: Mortero con Dosificación Mínima - Luego de 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	339,04	347,27	360,77
Arena Jicamarca	333,47	343,41	353,94
Arena Malanche	322,66	338,96	344,59

Tabla 120: Mortero con Dosificación Máxima - Luego de 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 2

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	353,09	364,27	373,81
Arena Jicamarca	339,31	347,53	362,64
Arena Malanche	326,89	341,93	356,83

5.2.3.3. Con Aditivo de Tecnología Lignosulfonato (Aditivo 3)

Tabla 121: Mortero con Dosificación Mínima - Luego de 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 3

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	233,73	229,59	221,28
Arena Jicamarca	227,91	222,84	214,29
Arena Malanche	219,63	215,93	210,64

Tabla 122: Mortero con Dosificación Máxima - Luego de 7 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 3

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	236,17	232,05	225,33
Arena Jicamarca	231,39	226,14	220,58
Arena Malanche	223,48	218,73	215,06

Tabla 123: Mortero con Dosificación Mínima - Luego de 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 3

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	316,11	327,99	333,90
Arena Jicamarca	306,13	318,34	325,59
Arena Malanche	300,91	308,47	313,76

Tabla 124: Mortero con Dosificación Máxima - Luego de 28 días de curado del Cubo de mortero – Aditivo 3

Tipo de Arena	Cemento Tipo HE (KN)	Cemento Tipo I (KN)	Cemento Tipo V (KN)
Arena Huancayo	321,90	331,50	337,39
Arena Jicamarca	315,11	323,06	330,56
Arena Malanche	307,23	312,47	319,26

Estas mediciones se realizaron en el Laboratorio de Instrumentación, de la empresa BASF Chemical Construction S.A. en el Área de Desempeño de Materiales.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. ENSAYOS PREVIOS

6.1.1. ENSAYO PARA CALCULAR EL CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL

Aquí, se analiza la clasificación de las arenas, según la humedad natural encontrada. Recordar que los resultados mostrados en la tabla N°9, referidos a los contenidos de humedad, están como referencia, ya que éstos dependerán de las condiciones ambientales en que se tomó la arena; sin embargo, debido a que todas las muestras fueron tomadas, para hacer el ensayo de humedad natural, el mismo día del ensayo; el resultado es fiable, respecto a la cantidad de humedad presente en cada arena; y este resultado se podría tomar como dato extra referencial, para obtener mayor información y un mejor análisis, en los otros ensayos realizados. Sin embargo, como con fines del estudio realizado, se desea eliminar la variable humedad natural, se buscó llevar todas las arenas a una humedad natural de 9 +/- 1%; por lo que para mejorar el control del proceso de diseño de los morteros, se llevó a todas las arenas a una humedad entre 8% y 10%; esto en pro de intentar homogenizar al máximo estas 5 arenas, previamente a su mezclado.

6.1.2. ENSAYO PARA CALCULAR EL MÓDULO DE FINURA (M.F.)

Los resultados mostrados en la tabla N°10, nos muestran que las Arenas Orcopampa y Pallancata, son las más gruesas, ya que presentan un M.F. de 3.86 y 3.85 respectivamente; este es un valor muy superior al recomendado por la norma (3.10), e incluso es mayor al límite máximo permitido, para ser usado como arena para construcción (3.45). Respecto a la arenas Huancayo y Jicamarca, éstas presentan un valor de 3.50 y 3.19 respectivamente, que podría ser considerado dentro del rango del límite máximo permitido, pero son arenas gruesas comparadas con las que se utilizan en la construcción. Finalmente, la arena Malanche, con M.F. de 3.05, podría ser considerada como la única entre las 5 arenas, que no es gruesa, sino intermedia (M.F. entre 2.40 y 3.10), por lo que a priori. Se podría pensar que es una arena ideal para construcción; pero esto habría que comprobarlo con otras pruebas físicas, e incluso químicas, que podrían mostrar un panorama más detallado y revelador.

6.1.3. ENSAYO PARA CALCULAR EL % DE FINOS QUE PASA LA MALLA N°200

Los resultados mostrados en la tabla N°11, muestran que las Arenas Orcopampa y Huancayo, son las que presentan menor cantidad de finos, ya que presentan un %Pasa la Malla N°200, de 2.48% y 3.41% respectivamente; este es un valor muy inferior al recomendado por la norma (6.00%), e incluso es menor al límite máximo permitido, para ser usado como arena para construcción (4.50%). Respecto a la arenas Pallancata y Jicamarca, éstas presentan un valor de 4.41% y 5.33% respectivamente, que podría ser considerado dentro del rango del límite recomendado por la norma, pero ya parecen tener una cantidad de finos muy alta, comparadas con las que se utilizan en la construcción. Finalmente, la arena Malanche, con un %Pasa la Malla N°200 de 6.89%, podría ser considerada como la única entre las 5 arenas, que presenta una confirmada excesiva cantidad de finos; pero nuevamente, esto habría que comprobarlo con las demás pruebas físicas y químicas, e incluso, con posteriores pruebas mecánicas en los cubos de morteros, que mostrarán un panorama más certero.

6.1.4. ANÁLISIS DE LOS CEMENTOS PERUANOS ELEGIDOS

Analizando las propiedades de todos los cementos descritos anteriormente, y comparando sus características físico - químicas, se eligió a priori los siguientes 3 cementos, para diseñar los morteros; por tener los rasgos más diferenciados (están en los extremos de las características de distintas propiedades, como por ejemplo, respecto al contenido de álcalis, contenido de puzolana, resistencia a los sulfatos, etc.); pero principalmente, el parámetro en el cual se basó la elección de los cementos que son materia de este estudio, fue el contenido de álcalis, por ser un factor cuyo contenido tiene una gran influencia, en el comportamiento del futuro mortero que se diseñe con este cemento. Por ejemplo, cementos con altos contenidos de álcalis, resultarán en morteros con mayor sensibilidad plastificante, y cementos con bajos contenidos de álcalis, resultarán en morteros con mayor resistencia a la fluidificación, aunque esto será mejor explicado cuando se discutan los resultados presentados en la sección del desarrollo experimental; y es por todo ello, que se eligieron estos 3 tipos de cementos, el cemento Tipo HE (con un contenido relativo de álcalis igual a 1.44), el cemento Tipo V (con un contenido relativo de álcalis igual a 0.48), y finalmente el cemento Tipo I (con un contenido relativo de álcalis igual a 0.80), necesario porque al ser un cemento intermedio en contenido de álcalis, podrá servir para hacer un análisis comparativo, entre los 3 cementos.

Recordar que las partículas de cemento, son granos finos de formas irregulares; con cargas positivas y negativas, que son localizadas dentro de las capas de cristal que se van formando; así que cuando se mezcla el cemento con agua, las partículas cementicias floculan debido a la atracción electrostática, entre sus partículas con cargas positivas y negativas; valiendo la pena hacer recordar, que dentro de las partículas floculadas de cemento hidratado, existen vacíos que atrapan parte del agua de mezclado.

En este punto es importante hacer una pertinente aclaración acerca del contenido de “Álcalis” en el cemento, análisis químicos usualmente reportan el contenido de álcalis, como la suma Na_2O y K_2O ; sin embargo, como se analizó anteriormente, muchos álcalis vienen en la forma de Na_2SO_4 y K_2SO_4 ; y son con ésta estructura, que los álcalis pueden ser cuantificados en su mayoría, ya que este análisis nos da una buena referencia, para saber cuánta eficiencia en la unión cemento – aditivo existirá; ya que como se mencionó anteriormente, los cementos con baja cantidad de álcalis (también llamados cementos con baja cantidad de sulfatos), tendrán un alto consumo de superplastificante, pero que se perderá innecesariamente en la zona de coprecipitación. Es por esta razón, que a igual dosis de aditivo, los cementos con alto contenido de álcalis, brindarán mejores resultados de fluidez y trabajabilidad, esto debido a que menos aditivo, se perderá dentro de la zona de coprecipitación (sin embargo, como se explicará más adelante, un alto contenido de álcalis, también provocará que los morteros diseñados con estos cementos, aceleren su ganancia de resistencia, tal es así que a los 7 días, las mezclas diseñadas con alto álcalis tienen la mayor resistencia, y a los 28 días tienen la menor).

Los álcalis, también están muy relacionados con la reactividad del cemento. Un cemento con alto contenido de álcalis, tiene menor reactividad química y viceversa (debido a que los álcalis internamente equilibran las zonas iónicas del cemento, y es además por ello, que todo cemento es de naturaleza básica). Así, mientras más reactivo sea el cemento, absorberá una mayor cantidad de aditivo de forma innecesaria, disminuyendo su poder fluidificante a largo plazo, evitando que más adelante, se continúe manteniendo la dispersión de la mezcla en el tiempo, llegando a la fragua más rápido.

Sin embargo, se hace notar, que estos efectos son mucho más notorios en los superplastificantes con naturaleza eléctrica (Naftaleno y Lignosulfonatos); y no en los de naturaleza estérica como son los Policarboxilatos, donde prácticamente no hubo diferencia al mezclar el aditivo con todos los tipos de cementos (de bajos y altos contenidos de álcalis); esto tal vez por su propia naturaleza, que no implica mucho las fuerzas iónicas electrostáticas, que son la principal fuente de acción de los álcalis; por lo mismo y consiguiente es de suponer, que tampoco habría gran

cambio al añadir este tipo de aditivo, de manera directa o retrasada a la mezcla (a diferencia de los otros tipos de superplastificantes, donde se supone, si habrá una relativa gran afectación).

Los distintos tipos de cemento Portland que fueron utilizados, fueron analizados según las composiciones químicas teóricas brindadas por las norma; sin embargo, debido a que la técnica de identificación de componentes por Difractometría de Rayos X (DRX), ha sido utilizada en múltiples investigaciones similares, se tomaron en cuenta estos datos, para continuar con el análisis. Ahí se hallaron entre otros componentes: Silicato Dicálcico (C_2S), Silicato Tricálcico (C_3S), Aluminato Tricálcico (C_3A) y Ferroaluminato Tetracálcico (C_4AF); donde las composiciones mineralógicas reales, encontradas en estos componentes, fueron: $Ca_{85}MgAl_2Fe(Na_{0.5}K_{0.5})(Al_3Si_{42})O_{180}$, $Ca_{105}Mg_2Al(AlSi_{35})O_{180}$, $Ca_3Al_2O_6$ y $Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$, respectivamente; cuyos componentes minerales fueron identificados al difractor [42].

Además, en este punto se muestra nuevamente, el análisis efectuado por Kazuo Yamada y Shunsuke Hanchara [29]; quienes explican la relación entre el slump del concreto y la fluidez de la pasta, además de la relación entre el slump del concreto y la fluidez del mortero; trabajando con medidas, que fueron tomadas inmediatamente después de culminar de procesar la mezcla; y con las mismas dosificaciones parciales y totales, según sea el caso.

Ellos notaron, que la fluidez de la pasta, muestra una buena correlación con el slump del concreto; por lo que en este caso, el slump del concreto puede ser considerado para determinar la fluidez de la pasta. En este punto vale la pena aclarar, que obtener una buena performance en una pasta, con una determinada dosificación, no implica que se obtendrá la misma buena performance en un mortero, o en el mismo concreto, diseñado con las mismas características (esto porque las propiedades químicas y físicas de los agregados, pueden afectar el comportamiento reológico del mortero y del concreto); sin embargo, lo opuesto si se cumple, es decir, si se obtiene una pasta mal diseñada, con una dosificación equivocada, el mortero que se diseñe con esa dosificación, y el posterior concreto que también pueda diseñarse, también tendrá un mal comportamiento reológico.

A continuación, se muestra el rol que cumple cada componente del cemento; en el comportamiento reológico de los distintos tipos de pastas, morteros y concretos.

Rol del C_3A :

El contenido del C_3A , o más específicamente la relación C_3A / SO_3 , tiene un profundo efecto en el comportamiento temprano, de la pasta o mortero; con bajas cantidades de C_3A (lo que implica alta resistencia a los sulfatos), la Etringita permanece activa después de la hidratación inicial. Cuando la relación entre C_3A y SO_3 es muy alta (o cuando el SO_3 , no es fácil de obtener en la solución), la fragua rápida ocurre debido a una rápida hidratación de C_3A ; en cambio, en el caso de bajas relaciones de C_3A / SO_3 , existe una alta posibilidad de que ocurra una falsa fragua (llamado así, a la conversión de las distintas formas de sulfato de calcio, en yeso).

Cuando el contenido de C_3A en el cemento es alta, y la disponibilidad del sulfato es baja, los morteros con o sin aditivos, experimentan altos ratios de pérdidas de fluidez; es por ello, que los cementos que contienen de moderado a alto C_3A (mayor a 9%), muestran incrementos en las pérdidas de fluidez, respecto a un mortero de control referencial; sin embargo, para mostrar uno de los beneficios del C_3A , podemos afirmar que cuando existe menos C_3A disponible en la mezcla, los superplastificantes tienden a adsorber altos montos de C_3S y C_2S , lo que resulta en una reducción, en el desarrollo de la resistencia futura del mortero; a pesar de esto, en la actualidad se usan muchos cementos Portland especiales, que contienen menos del 10% de aluminatos, en su fase intersticial (en promedio, 3.6% de C_3A y 6.9% de C_4AF); no sólo por los beneficios ya antes explicados, sino por el ahorro económico que esto representa; ya que de esta forma, se puede utilizar una menor cantidad de dosis de aditivo, obteniendo la misma fluidez y trabajabilidad, pero con una mejor performance a largo plazo; respecto a los morteros diseñados con cementos, que presenten mayor cantidad de C_3A .

Rol del Sulfato de calcio:

Como ya se explicó anteriormente, existe una gran interacción del catión calcio Ca^{+2} con los aditivos, pero sobre todo en la estructura interna del Naftalenosulfonato (SNFC), sin llegar a tener gran influencia en las tecnologías de los otros 2 tipos de aditivos; sin embargo se ha reportado, que añadiendo pequeñas cantidades de sulfato de sodio (Na_2SO_4) diluido (0.2%) al aditivo, este aditivo pasaba a ser mucho más eficaz, interactuando con todo tipo de cemento, incluso con cementos de bajo contenido de álcalis; logrando una fluidez incluso mayor, que la lograda mezclando cemento con alto contenido de álcalis, con un aditivo sin sulfato de sodio [43].

Se comprobó que la presencia de este tipo de aditamentos puede hacer decrecer el consumo del aditivo (disminuye la absorción del aditivo por parte del cemento), logrando una mejora de la trabajabilidad, por haber mayor aditivo libre en la interface líquida, activa para seguir actuando, manteniendo fluido a la pasta o mortero.

Otros investigadores encontraron resultados similares [44], descubriendo que los Lignosulfonatos (LS), forman sales complejas con Ca^{+2} , más fácilmente que con los Naftalenosulfonatos (SNF); observando además, que la concentración de Ca^{+2} en la fase líquida, retrasa su propia saturación, lo que influye directamente en la morfología del hidrato producido; es por ello, que los cristales más grandes de $[Ca_3(AlFe)(OH)_6]X_3 \cdot xH_2O$, se producen en mayor cantidad con los LS, que con los SNF, retrasando en mayor o menor medida, el tiempo de fraguado del mortero.

Rol de los Álcalis:

Los álcalis en los cementos, son esenciales para lograr acelerar la hidratación del C_3S ; sin embargo, un exceso de álcalis también podría acarrear efectos adversos, siendo uno de ellos, la existencia de reacciones secundarias que formarán agregados de álcalis; el uso de cementos con alto contenido de álcalis, causa problemas de trabajabilidad, sino se usa algún

superplastificante; pero a la vez, cementos con bajo contenido de álcalis, son conocidos por presentar una pobre reología, incluso usando aditivos basados en sulfonatos; este tema viene relacionado, por la interacción de los álcalis con los sulfatos de calcio, que fueron descritos en la sección anterior.

El problema con los cementos con bajos contenidos de álcalis, pueden ser compensados añadiendo un óptimo contenido de álcalis solubles; principalmente como metasilicato, o en alguna otra forma sulfatada; a partir de aquí y luego de muchas investigaciones, se encontró que con un contenido de 0.4 a 0.5% de álcali soluble, se puede obtener máxima fluidez, y a la vez reducir la pérdida de trabajabilidad a largo plazo del concreto, al optimizar su eficiencia [45].

Cementos con alto contenido de álcalis, promueven la solubilidad de los iones sulfato, y disminuyen la pérdida de la fluidez, especialmente cuando se mezclan con aditivos, a base de Naftalenosulfonato; sin embargo, también existen efectos negativos, con la presencia de altos contenidos de álcalis, sobre todo cuando usamos más sulfatos de álcalis que sulfatos de calcio (Yeso); ya que con esto se da una rápida cristalización de la Etringita, por lo que pastas, morteros o concretos, experimentarán una rigidez y endurecimiento rápido.

Como información adicional, se puede mencionar que los álcalis en la forma de K_2O , incrementan la reactividad del C_3A , mientras que el Na_2O , reduce la reactividad del C_3A ; también se observa problemas de eflorescencia, cuando los superplastificantes basados en Naftaleno y Melaminasulfonatos, son usados en mezclas diseñadas con cementos que contienen alto contenido de los óxidos de álcalis ($K_2O + Na_2O > 0.75\%$).

Rol de la finura del cemento:

Respecto a la finura del cemento, es bien sabido, que mientras más fino sea el cemento, más grande será el área de la superficie específica; y consecuentemente, la demanda de agua para obtener una cierta trabajabilidad será más alta; de la misma manera, cuando los aditivos son utilizados en una mezcla que contiene un cemento de alta finura, el monto de superplastificante requerido para obtener una cierta trabajabilidad o nivel de fluidez, será mayor; esto debido a que como manda la lógica, mientras más área superficial tenga el cemento, tendrá un mayor espacio disponible el superplastificante (en las partículas de cemento), para que pueda ser adsorbido.

Como es obvio, y como se analizará más adelante, la dosis y el tipo de aditivo, tiene los mayores efectos sobre el cemento, y por tanto, sobre el comportamiento reológico de la mezcla; además de que también es sabido, que casi todos los Superplastificantes aumentan la duración del período de inactividad y ralentizan el proceso de hidratación del cemento; este proceso sucede principalmente, debido a que los Superplastificantes de alto rango, ralentizan la disolución de Ca^{+2} , e inhiben la cristalización de la Etringita (que es lo que permite la fragua inicial).

Respecto al factor de la temperatura, se encontró que los cementos que contienen bajo contenido de C_3A (o baja relación C_3A/SO_3), eran más sensibles a la variación de temperatura, en lo referente a la retención de la fluidez; comparando con las características, que tienen los cementos que presentan alto contenido de C_3A (o alta relación C_3A/SO_3); y en el sentido opuesto, los cementos con altos contenidos de álcalis equivalentes, generaron mezclas, cuyas fluideces presentaron una mayor sensibilidad a las variaciones de temperatura, esto con respecto a las morteros, con bajos contenidos de álcalis.

También investigaciones similares, muestran que el contenido de SO_3 en el Clinker del cemento, se correlaciona grandemente con el contenido de los álcalis solubles; y también se puede deducir, que el contenido de SO_3 en el Clinker, se deriva principalmente de alcoholes sólidos y solubles; además parece notarse, que durante los primeros 30 minutos de mezclado, los álcalis solubles se disolvían casi por completo, para relaciones w/c de 0.50 aproximadamente; por lo que se puede suponer que hasta este momento, sólo alguna parte del cemento ha sido hidratada; con el fin de alcanzar una cantidad muy alta de disolución, los álcalis sulfato tienen que ser preferentemente lo más finos posibles, para que las reacciones químicas preferentemente ocurran en la superficie de las partículas de cemento (los resultados reológicos corroboran estas interacciones).

Además de que los sulfatos de calcio, son adicionados para ser usados como retardadores fijos, los álcalis solubles en agua, son suministros de iones sulfato muy importantes, especialmente a bajas relaciones w/c; esto es especialmente importante, para el entendimiento de las interacciones del cemento con los superplastificantes, ya que los iones sulfato y C_3A son principalmente los responsables, del comportamiento de adsorción de los superplastificantes.

Este análisis de las interacciones del cemento y del superplastificante, a temperaturas ambientales son la base de la reología; y ayudarán a entender las implicancias que tiene la composición química de cada fase, en los sistemas cementicios; temas que fueron analizados por Grieser, y cuyas conclusiones serán mostradas con más detalle, en la discusión de resultados [46]. Finalmente es necesario recordar, que la interacción cemento–superplastificante en el concreto, es una combinación compleja de mecanismos químicos y físicos, interdependientes entre sí; es por esta naturaleza complicada en la interacción, que lograr el desarrollo de soluciones simples, en lo referente a los problemas relacionados con el campo de aplicación de superplastificantes; es todavía una tarea muy difícil, y continuará siendo por mucho tiempo materia de investigación.

6.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

6.2.1. VALOR DE AZUL DE METILENO (MBV)

6.2.1.1. MÉTODO AASHTO

A continuación, se analiza detalladamente la equivalencia en la determinación de contenido de arcillas; con el Método del valor de azul de metileno (MBV), según AASHTO TP 57-2000 [21]:

Los resultados mostrados en la tabla N°12, muestran que las arenas Malanche y Jicamarca, son las que presentan un mayor contenido de arcillas, ya que presentan un MBV de 10.00mg/g y 8.50mg/g respectivamente; este es un valor muy superior al recomendado por la norma, para tener un excelente contenido bajo de arcillas (6.00mg/g), pero es menor al límite máximo permitido, para ser usado como arena para construcción (12.00mg/g). Respecto a las arenas Pallancata y Orcopampa, éstas presentan un MBV de 7.75mg/g y 7.50mg/g respectivamente, que también podrían ser consideradas dentro del rango del límite máximo permitido, pero incluso presentan menor cantidad de arcillas, comparadas con las anteriores, aunque sin llegar al valor del excelente contenido bajo. Finalmente, la arena Huancayo, con MBV de 5.75mg/g, podría ser considerada como la única entre las 5 arenas, que presenta un excelente contenido bajo de arcillas (menor a 6.00mg/g), por lo que a priori, se podría pensar que es una arena ideal para construcción; pero como todo resultado aproximado, esto habría que comprobarlo con las demás pruebas, que mostrarán un panorama más detallado, como son las pruebas físicas y mecánicas.

6.2.1.2. MÉTODO ASTM

A continuación, se analiza detalladamente la equivalencia en la determinación de contenido de arcillas; con el Método del valor de azul de metileno (MBV), según ASTM C03 – 2003 [22]:

Los resultados reportados en la tabla N°13, muestran que las arenas Malanche y Orcopampa, son las que presentan un mayor contenido de arcillas, ya que presentan un MBV de 1.344% y 1.088% respectivamente; este es un valor muy superior al recomendado por la norma, para tener un excelente contenido bajo de arcillas (0.6%); y en el caso de la arena Malanche, su valor es incluso superior al límite tolerable de contenido de arcillas (1.2%), por lo que se comprobaría su excesivo contenido de finos, presentes en su estructura. Pero en el caso de la arena Orcopampa, su MBV es menor al límite tolerable permitido, para ser usado como arena para construcción (1.2%); respecto a la arenas Jicamarca y Pallancata, éstas presentan un MBV de 0.833% y 0.768% respectivamente, por lo que también podrían ser consideradas

dentro del rango del límite tolerable permitido, pero presentan una menor cantidad de arcillas, comparadas con la arena Orcopampa, aunque sin que este valor pueda ser considerado como contenido bajo todavía.

Finalmente, la arena Huancayo, con MBV de 0.576%, podría volver a ser considerada como la única entre las 5 arenas, que presenta un excelente contenido bajo de arcillas (menor a 0.6%), por lo que a priori, se podría volver a pensar que es una arena ideal para construcción; pero al igual que en el caso anterior, al ser un resultado aproximado, esto habría que comprobarlo con las demás pruebas que mostrarán un panorama más detallado, como son las pruebas físicas y mecánicas, que reforzarán los resultados.

6.2.1.3. ANÁLISIS FINAL DE AMBOS MÉTODOS

Finalmente de ambos ensayos, comparando sus resultados, se ha elegido a priori las siguientes 3 arenas por tener las características más diferenciadas (están en los extremos de la tabla):

- Arena Malanche (Presenta en promedio, el mayor valor de azul de metileno (MBV), lo que significa que esta arena tiene la mayor cantidad de arcilla, comparada con las otras 4).
- Arena Jicamarca (Presenta en promedio, un valor intermedio de MBV, lo que significa que esta arena tiene una cantidad de arcilla intermedia, respecto a las otras 4).
- Arena Huancayo (Presenta en promedio, el menor valor de azul de metileno (MBV), lo que significa que esta arena tiene la menor cantidad de arcilla, comparada con las otras 4).

6.2.2. DISEÑO DE MORTEROS Y MINISLUMP

A continuación se mostrará un análisis, con todos las combinaciones de aditivo, cemento y arena posibles: 3 Tipos de aditivos * 5 Dosificaciones de aditivos * 3 Tipos de cemento * 3 Tipos de arena * 2 Muestras por cada combinación; hacen un total de 270 tipos de morteros con diseños distintos, que fueron analizados inmediatamente después de su elaboración, para medir su fluidez y ver su plasticidad inicial; posteriormente, se tomaron medidas luego de 30, 60, 90 y 120 minutos, para verificar cuánto pueden retardar su fragua, es decir, se observó por cuánto tiempo podían sostener su fluidez y manejabilidad.

Análisis previo:

Para empezar a aclarar y entender los resultados obtenidos, se plantean las siguientes conclusiones generales preliminares:

- Se puede observar una pérdida de fluidez (poder plastificante), según el contenido de aditivo; es decir, a mayor volumen de aditivo, tendrá mayor fluidez el mortero.
- También se puede observar una pérdida de fluidez (poder plastificante), según el tipo de aditivo; es decir, según la tecnología del aditivo (Lignosulfonato, Naftalenosulfonato o Policarboxilato); tendrá mayor o menor fluidez el mortero, tanto a corto, como a largo plazo.
- Se puede observar preliminarmente, de las tablas mostradas anteriormente (a simple inspección); que el aditivo aparentemente más poderoso, al menos inicialmente (a los 7min), es el aditivo con tecnología Naftalenosulfonato; por tener el mayor poder plastificante, a corto plazo.
- Además se puede observar preliminarmente, de las tablas mostradas anteriormente (a simple inspección); que el aditivo aparentemente más duradero, es el aditivo con tecnología Policarboxilato; por lograr mantener su poder plastificante, durante mayor tiempo.
- Y también se puede observar preliminarmente, de las tablas mostradas anteriormente (a simple inspección); que el aditivo aparentemente menos poderoso y menos duradero, es el aditivo con tecnología Lignosulfonato, al tener el menor poder plastificante; sin embargo también se observa, que el comportamiento de este aditivo es el que más varía, dependiendo del tipo de cemento y arena utilizado.

Análisis detallado:

Las gráficas que se obtuvieron, en las figuras anteriormente mostradas, comprueban que el consumo de superplastificante, y la resistencia a la fluidez, están en función de la cantidad de aditivo adherida a la mezcla; a la vez que permiten hallar el punto de saturación, que fue definido, como la dosis de superplastificante límite, ya que a partir de este punto, así se continúe añadiendo aditivo a la mezcla, el mortero no reducirá significativamente su resistencia a la fluidez, por el contrario, se correrá el riesgo de que el mortero empiece a segregarse; por ello hallar este punto es muy importante (ya que esto puede provocar un excesivo retraso en la hidratación del cemento, lo que generaría de no medir correctamente este punto, una segregación de la pasta o del mortero).

Se demostró que la cantidad de superplastificante adsorbido e incorporado, es dependiente del contenido de C_3A del cemento; por lo que se buscó que esta cantidad, fuese diferente en los 3 cementos, y así lograr distintas dosificaciones para los tres superplastificantes bajo estudio; así se observó, que para el superplastificante de Policarboxilato, este límite de saturación fue más bajo, comparándolo con el superplastificante de Naftalenosulfonato, donde se obtuvo un valor más alto; además, con la adición de Na_2SO_4 al agua de la mezcla, aumentó la proporción de álcalis que permanecía en esta agua, y ya no era necesario que una mayor cantidad de superplastificante, fuese adsorbida o incorporada a la mezcla.

Ahora bien, no es sencillo analizar los datos de adsorción en función del tiempo, ya que la concentración de superplastificantes en el agua intersticial, puede disminuir por su encapsulación en el cemento hidratado, o puede aumentar, a medida que el agua de los poros se consume mediante el proceso de hidratación; sin embargo, en esta investigación, la concentración de PC, LS y SNF en el agua intersticial, no cambió notablemente con el tiempo; esta observación concuerda con la realizada en anteriores investigaciones, que afirman, que el proceso de adsorción de todos los superplastificantes, especialmente en los de naturaleza de SNF y SMF, termina después de sólo 5 minutos, de iniciado el proceso de mezclado [47].

En general, se descubrió que las pérdidas de fluidez, dependen del tipo de cemento, de la finura de la arena, y del tipo y de la dosificación de los superplastificantes; se descubrió que la pérdida de flujo, generalmente ocurre con mayor fuerza en los morteros con SNF (Naftalenosulfonato); e incluso los morteros con LS (Lignosulfonato), generalmente desarrollaron una menor pérdida de flujo que los morteros con SNF (en algunas casos); y además se observó en ellos, ganancia en su fluidez, para varios de los morteros que se diseñaron con ellos.

Otra característica notable de los SNF, es que la pérdida de flujo, tiene un punto de inflexión, justo en la dosificación con la que se obtiene la saturación, y es a partir de ese momento, donde las tasas de pérdida de fluidez aumentan notablemente. Pero por otro lado, se descubrió que los morteros con SNF y SMF, aunque tengan grandes tasas de pérdidas de fluidez; esta tiende a disminuir, cuando se usan dosis de superplastificantes, cada vez más altas [48].

Especialmente, los morteros con LS, tienden a transformar la pérdida de flujo en ganancia de flujo, cuando las dosificaciones adicionales, alcanzan la sobresaturación (es por eso, que se usaron 5 dosis distintas de aditivos). La ganancia de fluidez, por la sobresaturación, puede indicar una velocidad de hidratación inhibida o reducida, debido a la formación de complejos con Ca^{+2} como se discutió anteriormente; es así, que las moléculas de LS excedentes en la fase acuosa, también podrían adsorberse sobre los productos de hidratación recién formados, permitiendo un mayor flujo, que podría ser llamado de “segundo tiempo”, por ser a posteriori.

Además, de los gráficos obtenidos, se encontró que la resistencia a la pérdida de fluidez, fue la tendencia general para la mayoría de las pastas con PC (Policarboxilatos). Estos resultados, concuerdan con Uchikawa, quien estudió el efecto de la fuerza repulsiva estérica de los PC [49].

Se ha detectado un punto de inflexión más bajo, para la pérdida de fluidez, en función de la dosificación de PC; lo que podría indicar, que las cadenas injertadas de las moléculas de PC, son lo suficientemente largas, para proporcionar la estabilización estérica; incluso si la cadena principal, ya ha sido adsorbida y cubierta por los productos de hidratación del cemento; los siguientes conceptos, apoyados por las teorías de Vikan, Justnes y Figi [50], analizan los datos de pérdida de fluidez de los morteros, gracias a la combinación de cada uno de los 3 cementos, con las 5 diferentes dosificaciones elegidas, por cada uno de los tres plastificantes.

Aquí, cementos con 3 diferentes niveles de álcalis fueron estudiados, usando directamente adiciones de los 3 tipos de aditivos, y se encontró que los cementos con bajo contenido de álcalis, afectan con más intensidad, a los aditivos basados en Naftalenosulfonatos (SNS), ya que por su naturaleza química, estos cementos tienden a absorber más este tipo de superplastificante, que los cementos con alto contenido de álcalis (lo que provoca que menos aditivo quede libre en la interface líquida para continuar con la dispersión y empiece a fraguar el mortero, es decir, quedará menos aditivo en reserva, para seguir actuando conforme vaya transcurriendo el tiempo); por lo que se pudo observar, que la trabajabilidad y la fluidez de los morteros preparados con bajo contenido de álcalis, fue más pobre y menor, que el de los morteros con alto contenido de álcalis.

Sin embargo, en el caso de los Lignosulfonatos y Policarboxilatos, este efecto de los álcalis no es tan notorio (como información adicional, se menciona que investigaciones similares a ésta, experimentaron no sólo con sulfato de sodio, sino también con cloruro de magnesio ($MgCl_2$), y obtuvieron resultados similares); por lo que se puede deducir, que por ser la naturaleza química de los Policarboxilatos, estérica y no electrostática, ellos no se alteraron por la presencia de iones cargados electrostáticamente; a diferencia de los aditivos con base de Naftalenosulfonato, que como se explicó en la parte teórica, tiene una naturaleza y comportamiento eléctrico, por lo que sí se ven afectados por estas adiciones [49].

En este punto, vale la pena volver a resaltar, la importancia de los tiempos de adición del superplastificante; ya que se comprobó, que cuando se añade el aditivo directamente al agua de mezclado, antes de su contacto con el cemento, hay un mayor efecto en la trabajabilidad, pero si éste contacto fuera retrasado (es decir, 1 ó 2 minutos después del contacto del agua con el cemento), este efecto parece atenuarse; y esto se debe a que las partículas del agua ya actuaron en las de cemento, y no hay muchos compuestos libres en la interface, donde los aditivos puedan actuar; así que es necesario tener especial cuidado en este punto, para lograr

maximizar la eficiencia del aditivo y poder mantener la trabajabilidad desde el primer minuto de mezclado, hasta que se termine el efecto natural del aditivo, durando de este modo, el máximo tiempo posible.

Para poder deducir el slump del concreto, la condición requerida, es que el comportamiento de este slump, sea gobernado por la fluidez de la pasta, o del mortero, diseñado con la misma dosificación de agua, cemento o arena; esta condición, usualmente se logra en concretos bien proporcionados; por supuesto, que las características de los agregados y una dosificación correcta, afectan la relación entre la fluidez de la pasta, y el slump del concreto. Lograr una adecuada proporción del concreto, es muy importante para mantener la durabilidad de las estructuras de concreto por mayor tiempo, eliminando algunos defectos del concreto, en su proceso de colocación. En esta investigación, se analizó la fluidez de los morteros, por ser un estado intermedio entre las pastas y el concreto (un mortero brinda mayores detalles que la pasta, pero sin requerir demasiado material, como en el caso del concreto); por lo que basados en este modelo, la performance de los Policarboxilatos con diferentes habilidades de adsorción, han sido estimadas en morteros, pero podrían extrapolarse a las pastas y a los concretos. Recientes investigaciones, afines a este tema, han demostrado que los aditivos basados en Naftalenosulfonatos (SNF), son los más propensos a sufrir una rápida pérdida de trabajabilidad, especialmente a bajas relaciones agua - cemento (w/c), el cual es uno de los principales problemas hasta hoy en el concreto; y comparando con los Lignosulfonatos (LS), en los SNF, su adsorción depende de manera más sensible del tipo de cemento, por lo que necesita ser adicionado en mayores cantidades, para cubrir algunas posibles eventualidades [30]; y a su vez, otras investigaciones han encontrado que las pérdidas de slump, son más bajas en morteros con LS, que con Naftaleno y Melaminosulfonatos (SMF); debido principalmente, a que los Lignosulfonatos no se adsorben en el mismo grado que los SNF o SMF, e implica que a largo plazo, permanecerá mayor LS en el interfaz de la mezcla, lo que explican en detalle Yousuf y colaborad.[51]

Para todos los superplastificantes, se observa de las gráficas presentadas, que el potencial de todos los componentes se incrementa con el tiempo transcurrido; especialmente se incrementa el potencial del C_3S , con el superplastificante de Lignosulfonato (MT); y el C_4AF , incrementa su potencial con el superplastificante de Naftalenosulfonato (C); ahora bien, es conocido que el valor de la fluidez de la pasta con Lignosulfonato decrece con el tiempo, lo que corresponde a la pérdida de slump del concreto; esto ahora puede ser explicado viendo la gráfica correspondiente, y se observa que la pérdida de la fluidez de la pasta, es debido al incremento en el potencial de las partículas de cemento [51]; de lo que sólo queda concluir, que este incremento en los potenciales de la partícula de C_3S , es una de las causas de la pérdida de slump de todo el mortero (ya que en promedio, en todos los tipos de cemento, el C_3S representa el 60% de la masa total cementicia); y debido a que los otros componentes minerales del cemento se mantienen constantes, se puede deducir que el C_3S , es el que

tendrá en este aspecto, mayor influencia, en el comportamiento reológico de la pasta, y/o del mortero o concreto [50].

Además, se puede concluir de este análisis, acerca de las interacciones de los superplastificantes; que las características en la adsorción, de los 3 tipos de aditivos utilizados, dependen de la composición mineralógica de los 3 cementos Portland estudiados; de lo que se observa a priori, que una gran cantidad de superplastificante, es adsorbido principalmente por el C_3A y el C_4AF , y un menor porcentaje, es adsorbido por el C_3S y el C_2S ; cumpliéndose esto, para todos los tipos de aditivos y cementos con los que se ha trabajado; sin embargo, la concentración de equilibrio de cada superplastificante tuvo el mismo valor, en el momento de la máxima adsorción; por lo que una meta en investigaciones futuras, será diseñar nuevos métodos, para hallar este punto de máxima adsorción [50].

También, al aumentar el contenido del superplastificante, el valor del rendimiento relativo disminuye (capacidad aglomerante del cemento), y aquí se volvió a notar, que el efecto de fluidificación del Policarboxilato fue el más pronunciado; el impacto de la adición de Na_2SO_4 al agua de mezclado del concreto (con superplastificante), dependió de la naturaleza de los sistemas investigados (por ejemplo, la temperatura del superplastificante). En general se puede asumir, que los valores de rendimiento relativo, tienen alguna relación con los valores del contenido de Na_2SO_4 asignados (relación que generalmente se grafica con una curva parabólica); sin embargo, aun probando con un contenido mayor o menor de Na_2SO_4 , la cantidad de superplastificante no llega a optimizarse, con respecto al valor de rendimiento relativo.

Respecto al contenido óptimo de Na_2SO_4 , este puede ser cambiado significativamente, dependiendo del superplastificante y del cemento utilizado, así como de la temperatura del mortero que se utiliza; por lo tanto, es posible deducir, que mediante el incremento de una mayor cantidad de Na_2SO_4 , se puede provocar, variaciones en la curva parabólica (varía el rendimiento relativo) [45].

Con respecto a la correlación de la cantidad de plastificante adsorbido, según las características del cemento, se puede afirmar los siguientes postulados; luego de analizar por qué en algunas mezclas con una determinada dosificación, se llega a la saturación del aditivo (y a una consecuente segregación del mortero), y en otros casos no (dependiendo del tipo de cemento, e incluso del tipo de arena).

Las cantidades consumidas de superplastificantes en el punto de saturación, muestran que las dosis de saturación de los superplastificantes, principalmente dependen del cemento, y en menor medida del tipo de superplastificante; sin embargo, esta característica es más notoria en el caso de los Naftalenosulfonatos y Lifgnosulfonatos, con respecto a los Policarboxilatos.

En cambio, la medida de la capacidad de adsorción en los cementos, parece depender de la dosificación de los superplastificantes; y parecería además de las gráficas mostradas anteriormente, que la adsorción de las moléculas de Naftalenosulfonato, es un poco más fuerte en el cemento, con respecto a las moléculas de Policarboxilato, pero esto se da, cuando la dosis de aditivo está por debajo del punto de saturación; mientras que la tendencia opuesta se observa, cuando la dosificación está cerca del punto de saturación; aunque en líneas generales se puede concluir, que tanto Naftalenosulfonatos como Policarboxilatos, serán adsorbidos aproximadamente en la misma medida, en todos los cementos.

Se intentó hallar correlaciones en las dosificaciones de saturación de Naftalenosulfonato y Lignosulfonato, con las características del cemento, según su contenido total de C_3A , y según su contenido de álcalis solubles equivalentes (Na_{equiv}); los mismos procedimientos se realizaron para diseñar morteros con Policarboxilatos. La dosificación de saturación de los Naftalenosulfonatos, depende firmemente de las características de cada cemento, principalmente del contenido de C_3A ; y adicionalmente, una fuerte correlación fue encontrada, entre los puntos de saturación con los productos de álcalis equivalentes; esto es lógico, ya que las superficies de los álcalis, y el contenido de aluminio en el cemento, producen una hidratación rápida, lo que a su vez conduce a una alta concentración de saturación del superplastificante.

La dosis de saturación de Lignosulfonato, parece tener una dependencia más fuerte en la cantidad de álcali soluble, que lo observado para los morteros con Naftalenosulfonato; este resultado puede ser causado, por el hecho de que la composición química de los Lignosulfonatos, es un tanto más compleja que la de los Naftalenosulfonatos, como se discutió en acápite anteriores; además, se obtuvieron buenas correlaciones, entre las dosis de saturación de cada aditivo, con las características de cada cemento, y éstas con el contenido de álcalis equivalentes, y éstas a su vez, con el contenido de C_3A [51].

En presencia de superplastificantes, se sabe que la influencia del contenido de sulfatos (álcalis solubles), depende del tipo de superplastificante; se ha encontrado que en presencia de superplastificantes de tipo SNF, la adición de álcalis sulfatados puede conducir a mejoras en las propiedades reológicas de los morteros a largo plazo, debido a que el ion SO_4^{2-} produce una disminución en la adsorción o intercalación de los Naftalenosulfonatos (El SO_4^{2-} compite con los superplastificantes); además, los primeros hidratos de C_3A que se forman, no interfieren en la reserva del aditivo disponible, logrando mantener la fluidificación de pasta; las tablas presentadas anteriormente, muestran sin embargo, que el aumento del contenido de álcali provocará a su vez, un aumento en el valor de saturación de los superplastificantes, indi-

cando que más moléculas del aditivo serán consumidas, por los productos de hidratación; y además, se vuelve a reafirmar la posibilidad de que la cantidad de álcalis equivalentes, gobierne los efectos de los hidratos de C_3A u otros [50].

Como punto adicional, se hace notar, que en el caso de los Policarboxilatos, con las gráficas se puede comprobar, que no se puede explicar la mejora en la fluidez de los morteros, solamente por fuerzas electrostáticas; es decir, como resultado de la repulsión eléctrica entre las 4 principales partículas de cemento (esto se puede notar claramente, porque en el caso de las gráficas de Policarboxilato, casi no se aprecian diferencias, comparando los resultados obtenidos entre los 3 distintos tipos de cementos); de lo que se puede deducir, que en el caso del aditivo Policarboxilato, las partículas de cemento se tienen que dispersar adicionalmente por otro tipo de razón, verificando así la existencia del otro tipo de efecto (el impedimento estérico).

Finalmente, respecto a los Policarboxilatos, se señala que para entender su mecanismo de trabajo, se tuvo que asumir algunas simplificaciones, con el fin de lograr entender el comportamiento de este aditivo en los morteros. Entre las simplificaciones asumidas, se tienen las siguientes: Primero, existe una relación de proporcionalidad, entre el efecto de impedimento estérico y la cantidad de aditivo adsorbida en el área superficial del cemento; segundo, la cantidad de aditivo adsorbida por las partículas de cemento, depende de 2 parámetros, la concentración inicial del aditivo, y la concentración inicial del anión sulfato; y tercero, la relación proporcional, entre la cantidad de aditivo adsorbida en el área superficial del cemento, y la fluidez de la pasta o mortero, no considera el efecto de la arcilla mineral [49].

Adicionalmente se notó, acorde con lo analizado por Penttala V.E; que los aditivos que denotaron un mayor potencial de adsorción (debido a las características del cemento con el que interactuaron), mostraron una mayor fluidez inicial, sin muchas fluctuaciones en sus slumps iniciales, aunque a la larga, estos morteros, mostraron una mayor pérdida en su fluidez y trabajabilidad; y lo opuesto también se cumplió, es decir, los aditivos que denotaron un menor potencial de adsorción, mostraron una menor fluidez inicial, con muchas fluctuaciones en sus slumps iniciales, pero con el tiempo, estos morteros demostraron una excelente retención en su trabajabilidad, siempre y cuando se añada el aditivo sin mayores retrasos, al interfaz de la mezcla [52].

Y por último se reitera, que en un futuro, se requerirán nuevas metodologías; primero, para

poder identificar a los sistemas propensos a efectos alternos indeseables, que se pueden dar debido a múltiples interacciones cemento – aditivo; y segundo, para comprender mejor la naturaleza fundamental del comportamiento de la mezcla en los sistemas basados en estas interacciones. Y por último, vale la pena resaltar, que la comprensión de estas interacciones; debe ser tanto a escala macro (por ejemplo, estudiando la fluidez y retención de la trabajabilidad en pastas y hormigones); como a escala micromolecular, donde se puede obtener una idea de las interacciones físico – químicas que internamente se dan, entre las partículas de cemento, con las moléculas reductoras de aditivo, e incluso, con las moléculas de agua.

Es por ello que en esta parte de la investigación, se ha intentado a partir de las gráficas, descubrir y entender, como los comportamientos adsorptivos (de los aditivos sobre las partículas de cemento), de cada una de las 3 naturalezas de superplastificantes, que se ha estudiado (Lignosulfonado, Naftalenosulfonado y Policarboxilado), varían según las distintas características químicas de los cementos y arenas, con los que se mezclan; y para complementar este análisis, a continuación en la siguiente sección, también se analizará cómo esta compleja interacción, afecta las propiedades reológicas de todas las mezclas de morteros; ya no en su estado fluido o plástico, sino ahora también en su estado final, una vez ya cristalizado y endurecido.

6.2.3. DISEÑO DE CUBOS DE MORTERO Y PRUEBA DE RESISTENCIA

Luego de diseñar los cubos, se procedió a romperlos por compresión a los 7 y 28 días, obteniéndose los resultados que fueron mostrados en las tablas de la sección 5.2.3.; y ahora se analizará cómo se comportó el aditivo dentro del mortero (según las características de cada Cemento y arena); pero ya no en su estado plástico, sino en su estado final (luego de la fragua y endurecimiento), por lo que se ha medido, la resistencia a la que llega cada cubo de mortero.

Respecto al contenido o dosificación de los Aditivos:

En este punto, como era de esperarse, la resistencia tanto a los 7 como a los 28 días, aumentó cuando se incrementó la dosis de aditivo (para todos los tipos de cementos y arenas), aunque sólo ligeramente; empero se pudo notar, que este pequeño aumento, se ve con mayor intensidad en los policarboxilatos, y a los 28 días (lo que puede ser explicado analizando la naturaleza de este aditivo, que tiene una tendencia tardía de acción; y es por ello, que justamente a los 28 días se verá su efecto, en lo referente a incrementar la resistencia, de manera más notoria).

Respecto al tipo de Aditivo:

De las tablas señaladas anteriormente, se puede observar que el aditivo con base Naftalenosulfonato, es el que presenta una mayor resistencia a los 7 días (para todos los tipos de arenas y cementos), seguido por el aditivo con base Policarboxilato, y finalmente por el aditivo con base Lignosulfonato; sin embargo, esta tendencia parece revertirse, cuando se hace el análisis a los 28 días, donde el Policarboxilato es el que obtiene las mayores resistencias, seguido por el Naftalenosulfonato, dejando siempre al último a los morteros con Lignosulfonato (La explicación podría ser similar a la brindada en el análisis anterior, es decir, debido al efecto tardío de los aditivos con base Policarboxilato, y al efecto más débil que tienen los aditivos de Lignosulfonato).

Respecto al tiempo del ensayo:

En este punto se observó sin excepción, que en todos los casos a los 28 días, hubo un aumento en la resistencia en todas las combinaciones cemento – arena – aditivo; sin embargo, acorde a lo explicado anteriormente, este incremento varía según cada combinación, llegando los morteros a obtener a los 7 días, resistencias de entre 60 y 80% respecto a las resistencias finales a 28 días; aunque en este caso, el aumento de resistencia depende en mayor medida, del tipo de cemento y/o de arena; ya que incluso en morteros sin aditivo, se observan similares porcentajes de resistencia temprana (que generalmente es de alrededor de 70%).

Respecto al tipo de Arena:

Observando las tablas ya señaladas, se puede afirmar que en la mayoría de los casos, los morteros diseñados con arenas más gruesas, obtuvieron mayores resistencias, tanto a los 7, como a los 28 días, sin importar el tipo de cemento y/o aditivo (esto es por el gran daño que hacen los finos de las arenas, especialmente las arcillas, en la futura cristalización y fragua del mortero).

Y es por ello que la arena Huancayo, es la que obtiene mayor resistencia a 7 y 28 días, seguido por la arena Jicamarca, y finalmente por la arena Malanche (la arena más fina); ya que aunque se utilice el mejor aditivo del mundo, con el mejor tipo de cemento; el factor de la cantidad de arcillas, hace igual que el cubo de mortero presente mayores imperfecciones, como son

la presencia de fisuras, la presencia de mayor cantidad de poros internos y externos (cubo más permeable), etc; lo que debilita al cubo, disminuyendo grandemente su resistencia.

Respecto al tipo de Cemento:

Finalmente, en lo referente al tipo de cemento, se puede afirmar observando las tablas especificadas inicialmente, que los cementos con menor cantidad de álcalis y de C_3A , generaron morteros con mayor resistencia, especialmente a los 28 días, pero siendo esta tendencia opuesta a los 7 días; esto debido a que un contenido mayor de álcalis, generará una absorción mayor del aditivo a edades tempranas (especialmente en el caso de los aditivos con tecnología Naftalenosulfonato, ya que esencialmente, los álcalis son compuestos químicos a base de sulfatos, y se genera una mayor interacción con ellos, respecto incluso a los Lignosulfonatos).

Adicionalmente, un mayor contenido de C_3A , genera una temprana hidratación del cemento, lo que genera, una rápida ganancia de resistencia, pero que luego se va equilibrando, hasta que a los 28 días, ya todo el C_3A se ha consumido; y más bien los cementos, con menor cantidad de este compuesto (pero con mayor cantidad de otros componentes), generarán morteros con mayores resistencias (llamado por algunas investigaciones “tardías”), tanto a 28 días como a fechas posteriores.

Y es por ello, que a 7 días, el cemento tipo HE, es el que presentó la mayor resistencia a compresión, seguido por el cemento tipo I, y seguido por el cemento tipo V, aunque como se explicó en líneas superiores, esta tendencia cambia a los 28 días; siempre dejando en la zona intermedia al cemento Tipo I (que es el de uso más común), y ahora obteniendo la mayor resistencia el cemento Tipo V, por lo que es comúnmente conocido como el cemento más “fuerte” en el mercado peruano; haciendo notar, que de forma opuesta al caso del cemento tipo HE, el aditivo que mejora en mayor medida el comportamiento del mortero es el aditivo en forma de Policarboxilato (al influir positivamente la escasez de álcalis de este tipo de cementos, en el comportamiento de este tipo de aditivo, que no cuenta con sulfatos en su estructura).

Todo este análisis final, fue apoyado por múltiples investigaciones relacionadas con este acápite, especialmente por Ramezananpor y colaboradores, quienes analizaron detalladamente el efecto que tienen los superplastificantes, sobre las futuras resistencias a compresión de las mezclas cementicias [53]. En el siguiente capítulo se brindarán conclusiones y recomendaciones de suma importancia, y se compartirán perspectivas sobre futuros temas que podrían investigarse.

VII. CONCLUSIONES

A partir de todos los resultados obtenidos, se plantea las siguientes conclusiones, que van desde algunas inmediatas, hasta otras que demandan mayor grado de análisis.

- Preliminarmente, se pudo observar una relación entre la intensidad de la fluidez (poder plastificante), con el contenido de aditivo; es decir, a mayor volumen de aditivo, tendrá mayor fluidez el mortero; y además, se pudo observar una caída en la fluidez, con el paso del tiempo, de lo que se puede concluir, que el efecto de todos los aditivos decae, conforme va disminuyendo su concentración, en la interfaz acuosa del mortero, hasta que finalmente la reserva de éste llegue a agotarse (la gradiente de caída dependerá del tipo de aditivo, es decir, según la tecnología de cada aditivo, los morteros tendrán mayor o menor pérdida de fluidez).
- También se puede concluir, observando las tablas y gráficas reportadas, que el aditivo más poderoso, al menos inicialmente (tomando medidas a los 7 minutos), es el aditivo 01 (LBLST - 01), y por tanto tendría el mayor poder plastificante; sin embargo, también se puede observar de las tablas y gráficas, que el aditivo más duradero es el aditivo 02 (LBLS T - 02), al mantener su poder plastificante por mayor tiempo; de lo que se puede concluir, que este aditivo, es el que mantiene mayores reservas, en las interfaces acuosas de los morteros.
- Siguiendo con el análisis de las tablas y gráficas, se puede concluir que en promedio, el aditivo menos poderoso y menos duradero, es el aditivo 3 (LBLST-03), y que por tanto tiene el menor poder plastificante; sin embargo también se llega a concluir, observando las grandes variaciones de las gráficas, que el comportamiento de este aditivo es el más variable, ya que es muy dependiente del tipo de cemento y arena (Incluso llega a ser el mejor plastificante, en los morteros diseñados con arena Malanche, especialmente en los mezclados con cementos tipo HE).
- También se puede concluir, continuando con la observación de las gráficas, que el contenido de arcillas en las arenas, influye mucho en el comportamiento del mortero; ya que mientras más finos tenía la arena, absorbía mayor cantidad de agua, y generaba morteros más secos (trabajando con la misma humedad); y además, analizando las tablas de resistencias, luego de 7 y 28 días, se concluyó que los morteros diseñados con estas arenas, obtenían las menores resistencias a compresión, en comparación con los otros tipos morteros (diseñados

con otros tipos de arenas).

- Desde el punto de vista químico, se puede concluir que cuando la arena es muy fina (ya casi tomando sus partículas el tamaño límite, cercano al de las arcillas), tiene mayor área superficial, pudiendo atraer más fácilmente, a las partículas al aditivo, generando una interacción arena - aditivo (que no mejora la plasticidad); evitando la interacción cemento-aditivo, lo que a posteriori disminuirá la plasticidad del mortero ya que es justamente esta interacción, la que genera el aumento de fluidez y de trabajabilidad.
- Respecto a la variación del tipo de cemento en los morteros, se puede concluir que mientras más álcali y aluminato tricálcico (C_3A) tenga el cemento; se obtendrán morteros algo más secos a largo plazo, ya que los álcalis y el C_3A , provocarán una mayor absorción del agua superficial y una fragua más rápida (a 2h); a excepción de las mezclas con la arena Malanche, donde pareciera que los morteros adquieren una fluidez adicional, debido a las características químicas de cada elemento constituyente; y además luego de 7 y 28 días, los morteros diseñados con estos cementos, obtendrán las menores resistencias a compresión, en comparación con los otros morteros (diseñados con otros tipos de cementos).
- Y a pesar que un mayor contenido de álcalis y C_3A , genera una mayor fluidez y trabajabilidad inicial, ésta sólo es aparente, debido a la aparición de una temprana floculación; ya que con el paso del tiempo, estos tipos de morteros, serán los primeros en perder su fluidez y slump; y esto se comprobó observando, que luego de las 2 primeras horas de análisis, éstos morteros fueron los primeros en fraguar y en perder su plasticidad; por lo que se concluye que en todos ellos, fue desapareciendo de a poco, la influencia que tienen los aditivos sobre estos morteros.
- Y desde el punto de vista social, concluimos que con el empleo de superplastificantes en las mezclas cementicias, se consiguen ventajas que permitirán un ahorro a largo plazo en el sistema constructivo (que compensa con creces el costo del aditivo); ya que al disminuir la cantidad de agua a emplearse (manteniendo la trabajabilidad constante, justamente gracias al aditivo); se puede bajar a su vez, la cantidad de cemento necesaria para el diseño, generándose un ahorro; y mejor, si no se disminuye el cemento, mejora la resistencia a compresión del mortero.
- Finalmente, respecto a las propiedades mecánicas, que ganarán los morteros luego de 7 y 28 días, podemos concluir que; aun observándose en las tablas correspondientes, que la incorporación de plastificantes o superplastificantes, no afectan en gran medida la resistencia mecánica del mortero (siempre que se mantenga la relación agua-cemento); según Ramezananpor

[53], el beneficio mecánico más importante radicará, en la mejora de la impermeabilidad, y en el consecuente aumento en durabilidad, del mortero o del concreto equivalente, a largo plazo.

VIII. RECOMENDACIONES

A partir de las conclusiones obtenidas y del trabajo realizado, se brindan las siguientes recomendaciones; con el fin de simplificar el contenido de esta Proyecto, y de que futuras investigaciones, afines a esta materia de estudio, eviten cometer errores haciendo análisis erróneos

- Ante todo se recomienda tener una noción clara, de que el comportamiento de una mezcla diseñada con cemento, es sumamente voluble; y por tanto estará sujeto a cambios, con una mínima variación cuantitativa o cualitativa, de cualquiera de sus factores constituyentes.

- Además se necesita prestar mucha atención a los cambios que puedan darse en las condiciones naturales del ambiente de trabajo, aunque sean mínimos; ya que investigaciones parecidas a ésta, muestran que cambios ligeros de la temperatura, o de la humedad ambiental, pueden generar variaciones, en el comportamiento de las mezclas cementicias.

- También se podría recomendar a futuras investigaciones, a que complementen lo mostrado en este proyecto, pero haciendo uso de una mayor cantidad de equipos de instrumentación analíticos; para obtener resultados más precisos, y que puedan compararse con los obtenidos en esta Tesis, con los métodos explicados anteriormente.

- Es importante también recomendar, que debido a la gran cantidad de datos que se obtienen de todos los experimentos, y al amplio tiempo que demanda cada uno de ellos; se trabaje ordenadamente en todos los casos, y pueda diseñarse una adecuada matriz de resultados.

- Además, se recomienda que se tenga especial cuidado, con el manejo y la dosificación de los aditivos; ya que debido a su hipersensibilidad, incluso pequeñas variaciones, podrían generar consecuencias en el comportamiento de las mezclas, y en potenciales tempranas segregaciones.

- Finalmente, se recomienda, trabajar siempre con sumo cuidado y limpieza; utilizando los equipos de protección adecuados, como gafas de seguridad, mascarilla para gases, y guantes seleccionados (Finos, de Nitrilo; y gruesos, de seguridad); para evitar, tanto la contaminación de material por agentes externos, como para evitar riesgos en nuestra propia salud.

IX. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. <https://nanotecnologia.fundaciontelefonica.com/nanocemento-y-aplicacion-de-nanoparticulas-de-silice-en-su-composicion>. Consultada el 09/05/2017.
- [2]. Manual de Tecnología de Aditivos para Hormigón. Monografía 16. 2º grupo de trabajo en estudio de los Aditivos Químicos para Hormigón Estructural. Editorial ACHE. Edición ANFAH (Conformada por, BASF Construction Chemicals y SIKA), ISBN: 978-84-89670-70-9.
- [3]. Cement's basic molecular structure finally decoded (MIT, 2009), Archived: 21 February 2013, At the Wayback Machine.
- [4]. P. Kumar Mehta y Paulo J. M. Monteiro. Concrete Microstructure, Properties, and Materials. Department of Civil and Environmental Engineering. University of California at Berkeley. 2006. Third edition. Mc Graw – Hill.
- [5]. Gomà, Fernando (1979), Química del Cemento Portland y otros aglomerantes, E.I., Universidad de Barcelona, España, Técnicos Asociados S.A., ISBN 84 – 7146 – 192 - 7.
- [6]. ASTM C150/C150M, 2017, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, ICS Number Code: 91.100.10 (Cement, Gypsum, Lime, Mortar), www.astm.org.
- [7]. ASTM C1157/C1157M, 2017, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, ICS Number Code: 91.100. 10 (Cement, Gypsum, Lime, Mortar). www.astm.org.
- [8]. Tabla: Composición química típica de los cementos Portland, Blog: Constructor Civil 33.
- [9]. ASTM C595/C595M, 2009, Standard Specification for Blended Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, ICS Number Code: 91.100.10 (Cement, Gypsum, Lime, Mortar), DOI: 10.1520/C0595_C0595M-09. www.astm.org.
- [10]. Cristina Márquez Ortiz. Caracterización de un árido granítico para fabricación de hormigón. Tesis para optar el Título de Ing. Minas. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía. 20 Septiembre del 2012.
- [11]. “Panorama Minero” (en línea). Versión 2010. Instituto geológico y minero. [http:// www.igme.es](http://www.igme.es).
- [12]. EHE-08 (2008) Instrucción de Hormigón Estructural. Ed. Ministerio de Fomento, España.
- [13]. VILLARINO OTERO, Alberto (2011): Ciencia y tecnología de los materiales. Tema 6: “El hormigón”. Escuela Politécnica Superior de Ávila. I.T.O. Públicas.
- [14]. UNE - EN 12620:2003. “Áridos para hormigón”.
- [15]. «Clay mineral», Enciclopedia Británica (en inglés), Pag. 1, Consultado el 17/04/2017.
- [16]. Wenk, Hans-Rudolf; Bulakh, Andrei (2004). Minerals: Their Constitution and Origin. pp. 453 - 457.
- [17]. <http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Filler>. Consultada: 23/10/2017.
- [18]. Standard Test Method for Rapid Determination of the Methylene Blue Value for Fine Aggregate or Mineral Filler Using a Colorimeter, Archived from the original, On 2014-02-28.
- [19]. Grundmeier G. Corrosion Protection by Organic Coatings. Corrosion Protection. Lisboa, Portugal. 2007.
- [20]. Effect of the Methylene Blue Value of Manufactured Sand, on Performances of Concrete, Li

Beixing, Zhou Mingkai, Wang Jiliang, Accepted 02 of March of 2011, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 9, N^o. 2. Pages 127 - 132, June 2011, Copyright 2011, Japan Concrete Ins.

[21]. AASHTO TP 57, 2007, Standard method of test for the qualitative detection of harmful clays of the smectite group in aggregates using methylene blue, AASHTO International, Washington DC, 2007, Item Code: T330-07-UL, www.transportation.org.

[22]. ASTM C03, 2003, Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, ICS Number Code: 91.100.15 (Mineral materials and products), www.astm.org.

[23]. <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/AzulMetileno.pdf>. Consultada el 15/06/2017.

[24]. UNE - EN 933-9, 2010, +A1, 2013, Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 9: "Evaluación de los finos. Ensayo de Azul de Metileno", UNE International, España, 2013, CTN 146 - ÁRIDOS, 91.100.15 / Productos y materiales minerales, 91.100.15-30 / Áridos, www.aenor.com.

[25]. Ramachandran, V.S. (1995), Concrete Admixtures, Handbook – Properties, Science, and Technology, 2nd Edition, William Andrew Publishing, ISBN 0-8155-1373-9.

[26]. EN 934: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Teil 2: Betonzusatzmittel – Definitionen, Anforderungen, Konformität, Kennzeichnung und Beschriftung.

[27]. ACI 116. Instituto Americano de Concreto. Comité 116. Terminología de Cemento y Concreto. Tipos de Aditivos para Concreto.

[28]. ASTM C125 Standard Test Method for Methylene Blue Index of Clay, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2003, ICS Number Code: 91.100.30 (Concrete and Concrete products), DOI: 10.1520/C0125-18, www.astm.org.

[29]. Kazuo Yamada y Shunshuke Hanehara. "Cadenas troncales de Policarboxilatos en PEG, y análisis de la interacciones químicas, en superplastificantes de alto rango". Cement and Concrete Research. Science Direct, July 2007, Volumen 25, Número 2, Pag. 353 - 364.

[30]. Hiroshi Uchikawa, Shunsuke Hanehara, Tokuhiko Shirasaka, Daisuke Sawaki. "Effect of admixture on hydration of cement, adsorptive behavior of admixture and fluidity and setting of fresh cement paste". C&C Research. Volume 22, November 1995, Pages 1115 - 1129.

[31]. Kosmatka, Steven H.; Kerhoff, Beatrix; Panarese, William C.; y Tanesi, Jussara: Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, E.E.U.U., 2004.

[32]. Enrique Pasquel Carbajal. Tópicos de Tecnología de Concreto en el Perú. Segunda edición. Colegio de Ingenieros del Perú. Lima, Noviembre 1998.

[33]. Procedimiento para preparar morteros, diseño UNICON. Humedad de Arena: 9.0 +/- 0.5%. Referenciado por BASF Master Builder Solutions. Laboratorio de Calidad. 2017.

[34]. ASTM C109/C109M-16a. Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in [50-mm] Cube Specimens).

[35]. NTP 334.051:2013. CEMENTOS. Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de morteros de cemento Portland, usando especímenes cúbicos de 50mm de lado. 3ª Edición.

[36]. ASTM C566-13. "Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying".

[37]. NTP 339.185:2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado, para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. 2ª Edición. 09/01/2013.

- [38]. ASTM C136/C136M-14. "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates".
- [39]. NTP 400.012:2013. AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global. 3ª Edición. 16/01/2013.
- [40]. ASTM C117-17. "Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing".
- [41]. NTP 400.018:2013. AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz. 3ª Edición. 26/12/2013.
- [42]. Yoshioka, K.; Tazawa, E.; Kawai, K. y Enohata, T. (2002). Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, N° 106, pp.1507 - 1513.
- [43]. Khalil, S.M. y Ward, M.A. (1980), Effect of sulphate content of cement upon heat evolution and slump loss of concretes containing high-range water-reducers (superplasticizers), *Magazine of Concrete Research*, Vol. 32, N°110, pp. 28 - 38.
- [44]. Uchikawa, H.; Sawaki, D. y Hanehara, S. (1995), Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, N° 2, pp. 353 – 364.
- [45]. Nawa, T.; Eguchi, H. y Fukaya, Y. (1989), Effect of alkali sulfate on the rheological behavior of cement paste containing a superplasticizer, *Conference on superplasticizers and other chemical admixtures in Concrete (Ottawa, Canada)*; V.M., ACI, Detroit, USA, pp. 405 - 424.
- [46]. Interacciones del Cemento y del Superplastificante, a temperaturas ambientales. Presentado por Andreas Griesser, Diplomático de Zurich (Suiza), el 28 de mayo de 2008.
- [47]. Fernon, V.; Vichot, A.; Le Goanvic, N.; Colombet, P. (1997), Interaction between Portland cement hydrates and polynaphthalene sulfonates, *Fifth Conference on Superplasticizer and other Chemical Admixtures in Concrete (Rome, Italy)*, V.M., ACI, Michigan, USA, pp. 225 - 248.
- [48]. Interacciones del Cemento y del Superplastificante, a temperaturas ambientales. Presentado por Andreas Griesser, Diplomático de Zurich (Suiza), el 28 de mayo de 2008.
- [49]. Uchikawa, H.; Hanehara, S. y Sawaki, D.(1997), The role of steric repulsive force in the dispersion of cement particles in fresh paste prepared with organic admixture, *Cement and Concrete Research*, Vol. 27, N° 1, pp. 37 – 50.
- [50]. Adsorción de Plastificantes, Influencia de Plastificantes según el Tipo de Cemento. Hedda Vikan, Harald Justnes y Renato Figi. Instituto del Concreto, Trondheim (Noruega) - Dubendorf (Suiza).
- [51]. Yousuf, M.; Mollah, A.; Palta, P.; Hess, T.R. (1995), Chemical and physical effects of sodium lignosulfonate superplasticizers on the hydration of Portland Cement and solidification/stabilization consequences, *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, N° 3, pp. 671 - 682.
- [52]. Penttala, V.E. (1993), Effects of delayed dosage of superplasticizer on high performance concrete, *Proc. of High-Strength Concrete 1993, Lillehammer, Norway*, Vol. 2, pp. 874 - 881.
- [53]. Ramezaniapour, A.A.; Sivasundaram, V. y Malhotra V.M. (1995), Superplasticizers: their effect on the strength properties of concrete, *Concrete International*, April 95, pp. 30 - 35.
- [54]. Tabla de Anexo 01: "Tabla con los tamaños de las aberturas de los Tamices". Según la Norma ASTM E – 11/95, referente al Tamaño de los Tamices,
- [55]. Tabla de Anexo 02: "Grading Requirements for Coarse Aggregates", basados en la Norma ASTM C33/C33M – 13, referente a los Tamaños Máximos de las Arenas.

X. ANEXOS

A continuación, se muestran las Normas AASHTO, ASTM y UNE (En este caso, un resumen, presentado por la Universidad de Sevilla, para simplificar su contenido), referidas a hallar el contenido del valor de azul de metileno; además de otras Tablas y Fotos, de gran ayuda final.

Norma AASHTO T – 57 – 07 [21]:

Standard Method of Test for

**The Qualitative Detection of
Harmful Clays of the Smectite
Group in Aggregates Using
Methylene Blue**

AASHTO Designation: T 330-07¹



American Association of State Highway and Transportation Officials
444 North Capitol Street N.W., Suite 249
Washington, D.C. 20001

Standard Method of Test for

**The Qualitative Detection of Harmful Clays
of the Smectite Group in Aggregates
Using Methylene Blue**



AASHTO Designation: T 330-07¹

1. SCOPE

- 1.1. The purpose of this standard is to identify the presence of harmful clays of the smectite group (poor minus 75- μm material) and to provide an indication of the surface activity of the aggregate.
- 1.2. *This standard may involve hazardous materials, operations, and equipment. This standard does not purport to address all of the safety concerns associated with its use. It is the responsibility of the user of this procedure to establish appropriate safety and health practices and to determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. REFERENCED DOCUMENTS

- 2.1. *AASHTO Standard*
■ M 231, Weighing Devices Used in the Testing of Materials

3. SUMMARY OF TEST METHOD

- 3.1. Methylene Blue solution is titrated in increments into distilled water containing sample material passing the 75- μm (No. 200) sieve in increments. A small amount of water containing the sample material and titrated Methylene Blue is removed via a glass rod and dropped onto filter paper. When the clay fraction of the sample aggregate can no longer absorb more Methylene Blue, a blue ring is formed on the filter paper.

4. SIGNIFICANCE AND USE

- 4.1. The Methylene Blue Value determined by this standard can be used to estimate the amount of harmful clays and organic matter present in an aggregate. A high value for Methylene Blue Value indicates a large amount of clay or organic material present in the sample.

Note 1—Research (Aschenbrenner, 1992) has developed the following relationship of methylene blue values and anticipated hot mix asphalt pavement performance as related to moisture susceptibility. (See Table 1.)

Limite azul
5mg/g (muestras)

Table 1—Expected Performance of Methylene Blue

Methylene Blue (mg/g)	Expected Performance
0-5	Excellent
7-11	Marginally acceptable
13-15	Problems possible failures
17-20	Failure

J50

g

azul

100g. muestras

5. APPARATUS

- 5.1. Amber-colored burette of at least 50-mL capacity with 0.1-mL graduations.
- 5.2. Magnetic mixer with stir bar.
- 5.3. Balance complying with M 231, Class G1.
- 5.4. Glass rod of approximately 250-mm (10-in.) length and approximately 8-mm (0.3-in.) diameter.
- 5.5. Timer or stopwatch.
- 5.6. Pan and 75-µm (No. 200) sieve.
- 5.7. Volumetric flask of 1000-mL capacity.
- 5.8. Whatman No. 2 filter paper.
- 5.9. Three 500-mL Griffin beakers.
- 5.10. Methylene Blue, reagent grade, dated and stored for no more than four months in a brown bottle wrapped with foil in a dark cabinet at lab temperature.
 Note 2—One gram of Methylene Blue is dissolved in enough distilled water to produce 200 mL of solution, with each 1 mL of solution containing 5 mg of Methylene Blue.
- 5.11. Distilled water at lab temperature.
- 5.12. Oven capable of maintaining 110 ± 5°C (230 ± 9°F).
 Note 3—For the purposes of this procedure, lab temperature is defined as 15–25°C (60–77°F).

6. SAMPLE PREPARATION

- 6.1. This test shall be performed on a sample of material passing the 75-µm (No. 200) sieve, taken from the washed portion of a representative sample of individual or combined material (as required). The material shall be washed through the 75-µm (No. 200) sieve and collected in a clean container. This container shall be large enough to hold several gallons of water and material passing the 75-µm (No. 200) sieve. Allow the material to settle and remove the excess water. The portion passing the 75-µm (No. 200) sieve is collected, transferred to a smaller container, and dried for testing. The collected material is mixed thoroughly prior to testing. The minimum oven-

dry mass of the collected material shall be at least 30 g to ensure enough material for a possible retest.

7. PROCEDURE

- 7.1. Place 10.0 g (± 0.05 g) of the minus 75- μm (No. 200) material that has been dried to constant mass in a 500-mL Griffin beaker.
- 7.2. Add 30 mL of distilled water and stir with the mixer to make a slurry.
- 7.3. With the slurry still mixing, fill the burette with the Methylene Blue solution, add 0.5 mL of the solution to the slurry, and stir for 1 minute.
- 7.4. Remove a drop of the slurry, using the glass stirring rod, and place on the filter paper.
- 7.5. Observe the appearance of the drop on the filter paper. The end point is indicated by the formation of a light blue halo around the drop. Continue adding the Methylene Blue solution to the slurry in 0.5-mL increments with 1-minute stirring after each addition, then testing, until the end point is reached.
- 7.6. After the end point is reached, continue stirring for 5 minutes and retest.

Note 4—With experience, the person performing the test can reach the end point more quickly by skipping early increments.

8. CALCULATION

8.1. *Example:*

$$M = CI/I'W \quad (1)$$

where

M = Methylene Blue Value in mg of solution per g of the minus 75- μm (No. 200) material;

C = mg of Methylene Blue/mL of solution;

I' = mL of Methylene Blue solution required for titration; and

W = grams of dry material.

8.2. The calculation may be simplified by inserting the mg of Methylene Blue per mL of solution and the grams of dry material.

$$M = (5 \times I')/10 \quad (2)$$

$$M = 0.5I' \quad (3)$$

9. REPORT

- 9.1. The report shall include the following:
- 9.1.1. Type and source of the material tested; and
- 9.1.2. Methylene Blue value to the nearest 0.1 mg/g.

10. PRECISION AND BIAS

10.1 *Precision*—No precision has been established for this test.

10.2 *Bias*—No bias can be established because no reference material is available for this test.

11. KEYWORDS

11.1 Clay and organic material; fine aggregate; methylene blue; moisture susceptibility.

12. REFERENCES

12.1 Aschenbrener, T. Comparison of Colorado Component Hot Mix Asphalt Materials with some European Specifications. In *Research Report CDOT-DTD-R-92-14*. Colorado Department of Transportation, Denver, CO, December 1992, p. 65.

12.2 Aschenbrener, T. and R. Zamora. Evaluation of Specialized Tests for Aggregates Used in Hot Mix Asphalt Pavements in Colorado. In *Transportation Research Record 1486*. Transportation Research Board Business Office, Washington, DC, January 1995, pp. 130-136.

12.3 Aschenbrener, T., R. Terrel, and R. Zamora. Comparison of the Hamburg Wheel Tracking Device and the Environmental Conditioning System to Pavements of Known Stripping Performance. In *Research Report CDOT-DTD-R-94-1*. Colorado Department of Transportation, Denver, CO, January 1994, p. 110.

¹ Formerly TP 57.



AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación

AZUL DE METILENO

UNE-EN 933-9:1999

1. OBJETIVO DEL ENSAYO

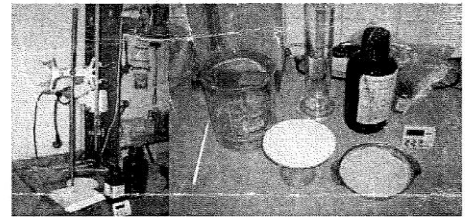
Este ensayo tiene por objeto determinar el valor de azul de metileno de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos o de la mezcla total de los áridos. En el Anexo A de la norma referenciada se especifica un método para su determinación sobre la fracción 0/0,125 mm.

Se fundamenta en la adición de pequeñas dosis de disolución de azul de metileno a una suspensión de la muestra de ensayo en agua, comprobando la absorción de colorante por parte de la muestra y realizando una prueba de coloración sobre papel de filtro.

2. INSTRUMENTAL Y EQUIPOS

El instrumental necesario para la realización de este ensayo es el siguiente:

- Azul de metileno
- Agua destilada o desmineralizada
- Bureta de 50 ml (mínimo)
- Papel de filtro de tamaño de poro medio y ϕ 125 mm
- Varilla de vidrio de ϕ 8 mm
- Agitador de paletas con velocidad regulable
- Balanza de 0,2 g de precisión mínima
- Cronómetro
- Tamiz ensayo (2 mm)
- Vaso de precipitados de 2 litros y de 250 ml
- Probeta graduada de 500 ml
- Estufa ventilada a (110 ± 5) °C
- Termómetro
- Bandejas y cepillos
- Desecador

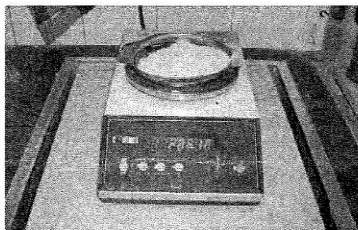


3. CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA

Este método se aplica a la fracción granulométrica de 0/2 mm de los áridos finos o de la mezcla total de los áridos.

4. EJECUCIÓN DEL ENSAYO

Las etapas a considerar a la hora de realizar este ensayo son las siguientes:



a

Preparación de la muestra de ensayo

Obtener una submuestra mediante reducción según la norma UNE-EN 932-2:1999. Una vez seca (en estufa hasta masa constante), pasarla por el tamiz de 2 mm, rechazando lo que quede por encima, obteniendo una masa superior a 200 g.

Pesar la submuestra y anotar su masa, redondeada al gramo más próximo (M_1), conservándola en el desecador.

b

Preparación de la solución colorante

Añadir $(10 \pm 0,1)$ gramos en un litro de agua destilada o desmineralizada. La solución, una vez preparada, deberá conservarse protegida de la luz y emplearse antes de los 28 días.

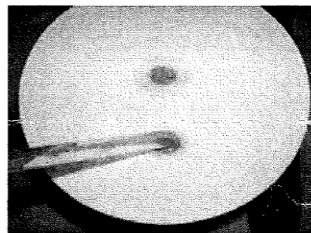
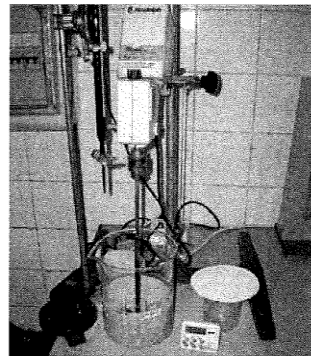
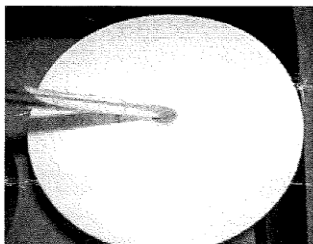
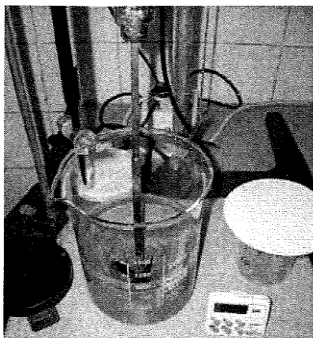




C

Determinación del azul de metileno

1. Colocar un filtro de papel sin cenizas de tamaño de poro de 8 μm sobre el vaso de precipitados posicionado boca arriba.
2. Introducir en el vaso de precipitados de 2 litros un volumen de (500 ± 5) ml de agua destilada o desmineralizada. Después, introducir la muestra ya pesada de árido (> 200 gramos), conservada en el desecador.
3. Agitar la solución colorante y llenar la bureta de 50 ml.
4. Posicionar la base de las paletas del agitador a 1 cm por encima del fondo del vaso. Se pone en marcha el agitador a una velocidad de agitación de (600 ± 60) rpm, y se mantiene durante 5 minutos.
5. Transcurrido dicho período de tiempo, se reduce la velocidad a (400 ± 40) rpm hasta la terminación del ensayo.
6. Se añaden 5 ml de solución colorante con la bureta, contando 1 min. de tiempo. Transcurrido el minuto se realiza la prueba de coloración, consistente en coger una gota del fondo del vaso de 2 l con la varilla de vidrio y depositarla en el filtro. La prueba de coloración puede dar como resultado una mancha azul oscuro sobre el papel de filtro, rodeada de una aureola incolora. Si ello ocurre, entonces se vuelven a añadir otros 5 ml de solución y se realiza otra prueba, contando otro minuto de tiempo desde dicha adición.
7. El apartado 6 se repite tantas veces como sea necesario hasta que aparezca sobre el papel de filtro una aureola alrededor de la mancha con un tonalidad azul más claro y un espesor de aproximadamente 1 milímetro. A partir de ese momento se hace referencia al tiempo de la última adición de solución colorante como tiempo cero. Por tanto, la aparición de la aureola color azul claro ha tenido lugar en el primer minuto.
8. El ensayo se da por finalizado si la aureola permanece durante 5 minutos, es decir, si en el segundo, tercero, cuarto y quinto minuto desde la última adición de solución colorante continúa apareciendo la aureola azul claro con un espesor de 1 mm aproximadamente. Para ello, en el minuto 2 se efectúa una segunda prueba de coloración, en el minuto 3 se efectúa una tercera prueba, etc.



9. Puede ocurrir que la aureola desaparezca al efectuar la segunda, tercera o cuarta prueba de coloración (minutos 2, 3 ó 4). En ese caso, es necesario volver a adicionar otros 5 ml, reiniciando la sistemática de ensayo desde el apartado 7.
10. Si la aureola aparece en la cuarta prueba pero desaparece en la quinta y última, entonces es necesario reiniciar la sistemática de ensayo desde el apartado 7, pero con la salvedad de que se añaden 2 ml en lugar de 5 ml, puesto que si la aureola ha permanecido durante 4 min. se debe a que el árido se encuentra casi en condiciones de saturación por absorción de solución colorante.
11. El ensayo se da por finalizado si la prueba de coloración muestra una aureola de color azul más claro de aproximadamente 1 mm de espesor durante los 5 minutos posteriores a la última adición de solución colorante, habiendo efectuado su comprobación en cada unidad de tiempo. Se anota el volumen de colorante añadido (V_1).

4.1. Muestras con bajo contenido en finos

Si la muestra de ensayo no contiene finos suficientes para formar la aureola, se debería añadir caolinita, para lo que es necesario conocer el volumen de solución colorante requerido para saturar a la misma, operando del siguiente modo:

- Añadir al vaso $(30 \pm 0,1)$ g de caolinita previamente secada, en lugar de la muestra de árido.
- Determinar el volumen de azul absorbido por la misma según el apartado c.
- Reiniciar el ensayo con la cantidad de caolinita empleada y el árido objeto de ensayo.
- Determinar el valor de azul de metileno empleando la segunda expresión indicada en el siguiente apartado.

5. CÁLCULO Y EXPRESIÓN DE RESULTADOS

El valor de azul de metileno, MB (Methylene Blue), se expresa en gramos de colorante por kilogramo de la fracción granulométrica 0/2 mm. Se calcula con la siguiente expresión:

$$MB = \frac{V_1}{M_1} \cdot 10 \quad (\text{g}_{\text{colorante}}/\text{kg}_{\text{fracción gran.}})$$

Siendo:

M_1 , la masa de la muestra de ensayo (g)
 V_1 , el volumen de solución colorante añadido (ml)

NOTA: Anotar el valor de azul de metileno (MB) redondeando a la décima de gramo.

Si durante el ensayo se añade caolinita, la expresión anterior se transforma en:

$$MB = \frac{V_1 - V_2}{M_1} \cdot 10 \quad (\text{g}_{\text{colorante}}/\text{kg}_{\text{fracción gran.}})$$

Siendo:

M_1 , la masa de la muestra de ensayo (g)
 V_1 , el volumen de solución colorante añadido (ml)
 V_2 , el volumen de solución colorante para saturar la caolinita de azul

Tabla N°01, con los tamaños de los Tamices (Necesarios para cuantificar la Finura de las arenas) [54]:

TABLA DE TAMICES

Descripción	Diametro	Nº	Luz
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	2"	50,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	11/2"	37,50 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	11/4"	31,50 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	1"	25,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	3/4"	19,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	0,53"	13,20 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	1/2"	12,50 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	3/8"	9,50 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	5/16"	8,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	1/4"	6,30 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	3,50	5,60 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	4	4,75 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	5	4,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	6	3,35 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	7	2,80 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	8	2,36 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	10	2,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	12	1,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	14	1,40 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	16	1,18 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	18	1,00 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	20	0,850 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	25	0,710 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	30	0,600 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	35	0,500 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	40	0,425 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	45	0,355 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	50	0,300 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	60	0,250 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	70	0,212 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	80	0,180 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	100	0,150 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	120	0,125 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	140	0,106 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	170	0,090 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	200	0,075 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	230	0,063 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	270	0,053 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	325	0,045 mm
Tamices Norma ASTM E - 11/95	8"	400	0,038 mm

Tabla N^o 2, con los Tamaños Máximos de las arenas (Necesario para calcular el módulo de finura) [55]:

T.M. : Tamaño Máximo (Tamaño Máximo de Agregado)
 D.M. : Diámetro Máximo (Tamaño Máximo Nominal)

C33/C33M - 13

TABLE 3 Grading Requirements for Coarse Aggregates

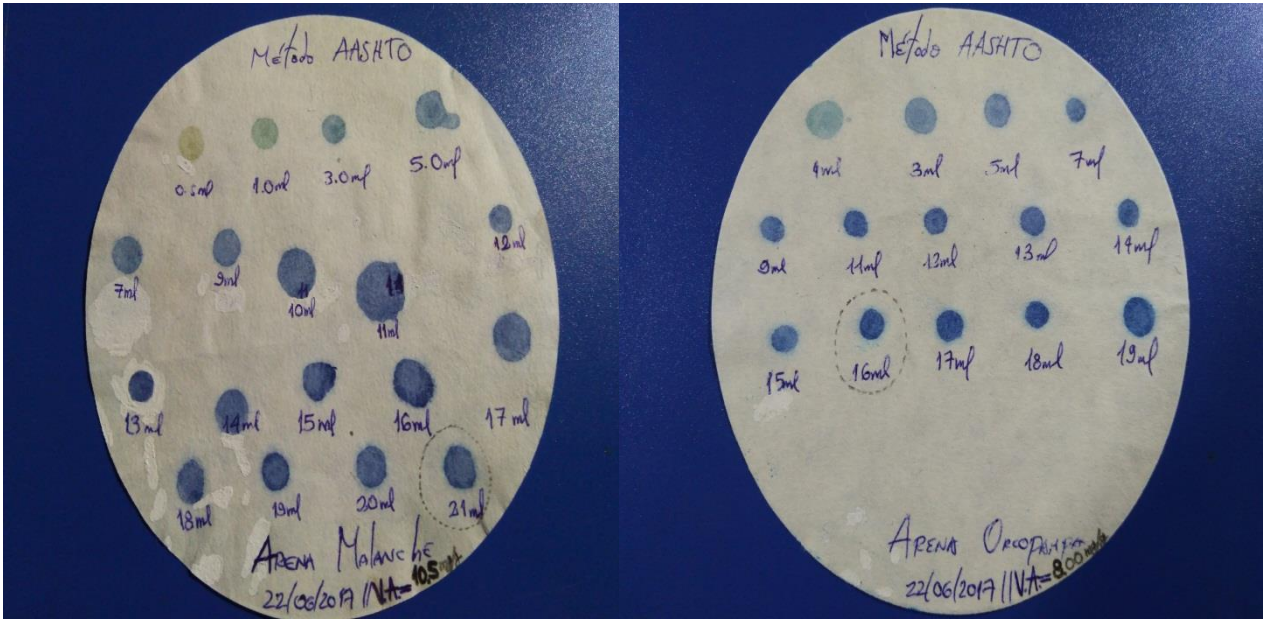
Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3 1/2 in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2 1/2 in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1 1/2 in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (3/4 in.)	12.5 mm (1/2 in.)	9.5 mm (3/8 in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 μm (No. 50)
1	90 to 37.5 mm (3 1/2 to 1 1/2 in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
2	63 to 37.5 mm (2 1/2 to 1 1/2 in.)	...	...	100	90 to 100	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	...	0 to 5	...	...	...	...	...	...
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	35 to 70	10 to 30	...	...	0 to 5	...	...	...	...
4	37.5 to 19.0 mm (1 1/2 to 3/4 in.)	...	...	...	...	100	20 to 55	0 to 15	...	...	0 to 5	...	...	...	...
467 (Para B. Vitreos)	37.5 to 4.75 mm (1 1/2 in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	35 to 70	...	...	0 to 5	...	...	...	...
5	25.0 to 12.5 mm (1 to 1/2 in.)	...	...	...	...	...	90 to 100	20 to 55	0 to 10	...	0 to 5	...	...	...	...
56	25.0 to 9.5 mm (1 to 3/8 in.)	...	...	...	...	...	100	40 to 85	10 to 40	...	0 to 5	...	...	...	...
6 (Agregado para 57 Concrete for grad)	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	...	...
6	19.0 to 9.5 mm (3/4 to 3/8 in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	...	0 to 15	0 to 5	...	...	...
7 (Concrete and 67 Mucha rejas (más plumbos))	19.0 to 4.75 mm (3/4 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	...	0 to 10	0 to 5	...	...	...
7	12.5 to 4.75 mm (1/2 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	100	90 to 100	...	0 to 15	0 to 5	...	...	...
8	9.5 to 2.36 mm (3/8 in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	100	100	90 to 100	40 to 70	0 to 10	0 to 5	...	...
89 (Castilla) 89 Coarse four to intermediate	9.5 to 1.18 mm (3/8 in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	100	100	85 to 100	0 to 10	0 to 5	...	...
94	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	0 to 5	...

A Size number 9 aggregate is defined in Terminology C125 as a fine aggregate. It is included as a coarse aggregate when it is combined with a size number 8 material to create a size number 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C125.

M.F. Entre 2.15 y 3.45 (Norma)
 3.30 y 3.10 (Recomendada)
 New (recomendado)

Imágenes con los Papeles Filtros Watman, dados para calcular el Valor de Azul de Metileno (AASHTO):





Imágenes con los Papeles Filtros Watman, usados para calcular el Valor de Azul de Metileno (ASTM):

