

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL EFECTO DE ADITIVOS REDUCTORES,
MANEJADORES Y SU MEZCLA EN MORTEROS

ANA MARIA MORENO PACHON

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL EFECTO DE ADITIVOS REDUCTORES,
MANEJADORES Y SU MEZCLA EN MORTEROS

ANA MARIA MORENO PACHON

Proyecto integral de grado para optar al título
INGENIERO QUÍMICO

Director

ÁNGELA XIMENA MORENO ERAZO
PhD en química

Orientador

SANDRA LILIANA MESA ESPITIA
Ingeniera Química

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2018

Nota de aceptación:

Ing. David Triviño Rodríguez

Ing. Sandra Liliana Mesa

Bogotá D.C, Julio de 2018

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. JAIME POSADA DÍAZ

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCÍA PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano General de la Facultad de Ingeniería

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. LEONARDO DE JESÚS HERRERA GUTIÉRREZ

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

A mi mamá Francy, por inculcarme la responsabilidad, disciplina y otros valores que permitieron la realización y culminación de este trabajo de grado. Por su constante apoyo, motivación, amor, tiempo y paciencia. Espero devolverte en algún momento todo lo que me has dado y haz hecho por mí.

A mi hermano Juan Pablo, por estar conmigo, escucharme y apoyarme.

A mis abuelitas, María Eduvina e Isabel por su amor incondicional.

A mi familia, tíos y primos. Por demostrarme que la familia es el pilar de la vida, y darme en todo momento su cariño y apoyo.

A ottis, por acompañarme siempre.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a la empresa patrocinadora por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de grado junto a los mejores profesionales quienes no solo cuentan con la experiencia y el conocimiento sino con una gran calidad humana. Especialmente a Ángela Moreno Erazo por su constante apoyo y dirección durante todas las etapas de este trabajo de grado.

De igual forma a la Fundación Universidad de América por permitirme formar como profesional, principalmente a los profesores que hicieron parte de mi proceso académico. A la ingeniera Sandra Liliana Mesa por ayudarme y guiarme con su conocimiento en el planteamiento y ejecución del presente documento.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	23
1. MARCO TEORICO	24
1.1 EL CEMENTO	24
1.1.1 Tipos de cemento (NTC 321 y NTC 30)	25
1.1.2 Variación en la composición y tamaño de partícula del cemento causada en la fabricación	26
1.1.3 Fases y características	28
1.1.4 Hidratación	29
1.1.5 Relación agua cemento (Ra/c)	31
1.2 MORTERO	32
1.2.1 Agregados	32
1.2.2 Usos	33
1.2.3 Propiedades demandadas	33
1.2.3.1 Resistencia a la compresión	34
1.2.3.2 Fluidez	34
1.2.3.3 Tiempo de fraguado	35
1.3 ADITIVOS	37
1.3.1 Tipos	37
1.3.1.2 Reductores y manejadores.	39
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	41
2.1 MATERIALES EMPLEADOS	41
2.1.1 Cementos	41
2.1.2 Agregados	41
2.1.3 Aditivos	41
2.1.4 Reactivos	42
2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS	42
2.2.1 Propiedades de los cementos	42
2.2.1.1 Densidad	43
2.2.1.2 Fluidez	43
2.2.2 Composición química de los cementos	44
2.2.2.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX)	45
2.2.2.2 Difracción de Rayos X (DRX)	45
2.2.3 Caracterización de los agregados	46
2.2.3.1 Granulometría	46
2.2.3.2 Densidad y absorción	47
2.2.4 Propiedades de los aditivos y sus mezclas	48
2.2.4.1 Porcentaje de sólidos	49

2.2.4.2 Viscosidad	49
2.2.4.3 Densidad	50
2.2.4.4 Color	51
2.3 RELACIÓN AGUA CEMENTO	51
2.4 PRUEBA DE LA CULEBRILLA	51
2.5 PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DEL MORTERO	51
2.5.1 Manejabilidad	52
2.5.2 Resistencia a la compresión	52
2.5.3 Calorimetría	54
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	56
3.1 CEMENTOS	56
3.1.1 Densidad	56
3.1.2 Fluidez	57
3.1.3 Composición química	58
3.1.3.1 Fluorescencia de Rayos X	58
3.1.3.2 Difracción de Rayos X	61
3.2 AGREGADOS	63
3.2.1 Análisis granulométrico	63
3.2.2 Densidad y absorción del agregado	65
3.3 ADITIVOS Y SUS MEZCLAS	66
3.3.1 Porcentaje de sólidos	66
3.3.2 Viscosidad	67
3.3.3 Densidad	68
3.3.4 Color	68
3.4 RELACIÓN AGUA/CEMENTO DEFINIDA	70
3.5 DOSIS DE ADITIVO	71
3.6 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE DESEMPEÑO EN EL MORTERO	73
3.6.1 Fluidez de los morteros ante aditivos reductores, manejadores y sus mezclas	74
3.6.1.1 Aditivos reductores	74
3.6.1.2 Aditivos manejadores	76
3.6.1.3 Mezcla de aditivos	78
3.6.2 Resistencia a la compresión	83
3.6.2.1 Blancos analíticos	83
3.6.2.2 Morteros con aditivos reductores	84
3.6.2.3 Morteros con aditivos manejadores	86
3.6.2.4 Morteros con las mezclas de aditivos	88
3.6.3 Calorimetría	92
3.6.3.1 Blancos analíticos	93
3.6.3.2 Curva calorimétrica de aditivos reductores	95
3.6.3.3 Curva calorimétrica de aditivos manejadores	97
3.6.3.4 Curva calorimétrica de mezclas de aditivos	101
3.6.4 Usos recomendados para las mezclas de aditivos formuladas	105

4. EVALUACIÓN DE COSTOS	108
5. CONCLUSIONES	114
6. RECOMENDACIONES	115
BIBLIOGRAFÍA	116
ANEXOS	118

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Composición aproximada del cemento Portland	24
Tabla 2. Requisitos químicos del cemento Portland	25
Tabla 3. Clasificación de cementos Portland	26
Tabla 4. Materias primas y fases del cemento	28
Tabla 5. Reacciones de hidratación de las fases del cemento	30
Tabla 6. Clasificación de los morteros NTC 3365.	34
Tabla 7. Clases de aditivos.	38
Tabla 8. Aditivos y sus mezclas.	42
Tabla 9. Mezclas de aditivos.	52
Tabla 10. Fluidez de los cementos a diferentes relaciones agua/cemento.	58
Tabla 11. Reporte FRX cemento P y K ALPHA1 S. A.	58
Tabla 12. Componentes minoritarios del cemento.	61
Tabla 13. Reporte DRX cemento P y K ALPHA1 S. A.	62
Tabla 14. Análisis granulométrico	64
Tabla 15. Resultados de densidad y absorción del agregado	66
Tabla 16. Porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad de aditivos y mezclas	68
Tabla 17. Cantidades agua cemento	70
Tabla 18. Cantidades de materias primas en el mortero	72
Tabla 19. Consistencia del mortero respecto a su fluidez	74
Tabla 20. Resumen propiedades de desempeño obtenidas	106
Tabla 21. Densidad de la mezcla de mortero sin aditivos	108
Tabla 22. Densidad del mortero con mezclas de aditivos	109
Tabla 23. Masa de materia prima requerida para 1m ³ de mortero	109
Tabla 24. Costo del m ³ de mortero con las mezclas de aditivos en cemento P y K	110

LISTA DE IMÁGENES

	pág.
Imagen 1. Proceso de fabricación del cemento Portland	27
Imagen 2. Simulación de la hidratación del cemento respecto al tiempo	31
Imagen 3. Matriz del material a diferentes Ra/c	32
Imagen 4. Fluides de los morteros en diferentes aplicaciones	35
Imagen 5. Mecanismo de repulsión electroestática y de repulsión estérica	40
Imagen 6. LE CHARTERIER con muestra de cemento P y K	43
Imagen 7. Molde en mesa de flujo para cemento	44
Imagen 8. Equipo FRX Axios max	46
Imagen 9. Tamizadora con mallas empleadas	47
Imagen 10. Picnómetro con agregados finos y medios	48
Imagen 11. Equipo determinador de humedad marca KERN referencia MLS-D.	49
Imagen 12. Viscosímetro BROOKFIELD'S DV-II+ Pro	50
Imagen 13. Densímetro portátil DMA 35 Ex	50
Imagen 14. Escala de Gardner	51
Imagen 15. Proceso montaje de probetas cúbicas	53
Imagen 16. Prensa hidráulica Controls 50-050	54
Imagen 17. Proceso de compresión en prensa hidráulica	54
Imagen 18. Procedimiento de calorimetría en mortero	55

LISTA DE ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Cálculo densidad del cemento hidráulico NTC 221	43
Ecuación 2. Fluidéz NTC 111	44
Ecuación 3. Densidad del cemento P	56
Ecuación 4. Densidad del cemento K	56
Ecuación 5. Fluidéz del cemento P	57
Ecuación 6. Fluidéz del cemento K	57
Ecuación 7. Reacciones desarrolladas en la clinkerización	59
Ecuación 8. Porcentaje retenido	64
Ecuación 9. Porcentaje retenido acumulado	64
Ecuación 10. Porcentaje pasante	64
Ecuación 11. Densidad aparente	65
Ecuación 12. Densidad aparente base saturada	65
Ecuación 13. Densidad nominal	65
Ecuación 14. Absorción	65
Ecuación 15. Cantidad de aditivo	72
Ecuación 16. Agua real	72
Ecuación 17. Kilogramos de materia prima por m ³	108

LISTA DE GRÁFICOS

	pág.
Gráfica 1. Curva calorimétrica en pasta de cemento	37
Gráfica 2. Curva granulométrica	65
Gráfica 3. Flujo inicial de los cementos a las Ra/c	71
Gráfica 4. Flujo de mortero a diferentes dosis de aditivo AR7	73
Gráfica 5. Flujo en mortero de aditivos reductores con cemento P	75
Gráfica 6. Flujo en mortero de aditivos reductores con cemento K	75
Gráfica 7. Flujo en mortero de aditivos manejadores con cemento P	77
Gráfica 8. Flujo en mortero de aditivos manejadores con cemento K	77
Gráfica 9. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 y AM67 en cemento P	79
Gráfica 10. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 y AM67 en cemento K	79
Gráfica 11. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 (25%)-AM67- AM65H en cemento P	80
Gráfica 12. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 (25%)-AM67- AM65H en cemento K	81
Gráfica 13. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40(50%)-AM67- AM65H en cemento P	82
Gráfica 14. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40(50%)-AM67- AM65H en cemento K	82
Gráfica 15. Resistencia a la compresión de morteros con cementos P y K	84
Gráfica 16. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos reductores con cemento P	85
Gráfica 17. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos reductores con cemento K	86
Gráfica 18. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos manejadores con cemento P	87
Gráfica 19. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos manejadores con cemento K	87
Gráfica 20. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR25M con cemento P y K	88
Gráfica 21. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR50M con cemento P y K	89
Gráfica 22. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR37M1 con cemento P y K	90
Gráfica 23. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR12M3 con cemento P y K	90
Gráfica 24. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR57M1 con cemento P y K	91
Gráfica 25. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR75M con cemento P y K	92
Gráfica 26. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR18M5	

con cemento P y K	92
Gráfica 27. Curva calorimétrica blancos analíticos	94
Gráfica 28. Curva calorimétrica aditivos reductores en morteros con cemento P	96
Gráfica 29. Curva calorimétrica aditivos reductores en morteros con cemento K	97
Gráfica 30. Curva calorimétrica aditivos manejadores en morteros con cemento K	99
Gráfica 31. Curva calorimétrica aditivos manejadores en morteros con cemento P	100
Gráfica 32. Curva calorimétrica mezclas de aditivos en cemento K	103
Gráfica 33. Curva calorimétrica mezclas de aditivos en cemento P	104
Gráfica 34. Propiedades de desempeño del mortero con cemento P respecto a su costo	111
Gráfica 35. Propiedades de desempeño del mortero con cemento K respecto a su costo	111
Gráfica 36. Comparación de costos para una misma fluidez entre mortero sin aditivo y el mortero con las mezclas de aditivos en cemento P	112
Gráfica 37. Comparación de costos para una misma fluidez entre mortero sin aditivo y el mortero con las mezclas de aditivos en cemento K	112

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Resultados escala de Gardner	69
Cuadro 2. Color mezclas de aditivos	70

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Cantidades de materia prima en el mortero para resistencia a la compresión	118
Anexo B. Costo del m ³ de mortero con mezclas de aditivos	119
Anexo C. Costo del m ³ de mortero al igualar la fluidez al blanco analítico	125

GLOSARIO

ADITIVO: compuesto de carácter químico agregado durante el proceso de mezclado del mortero o el concreto que tiene la capacidad de modificar propiedades físicas y químicas antes o después del endurecimiento.

ADITIVO MANEJADOR: son sustancias que permiten incrementar considerablemente la manejabilidad del mortero y del concreto reduciendo la Ra/c. Se caracterizan por ser moléculas de alto peso molecular (polímeros) con unidades repetitivas de compuestos sulfonados, acrílicos o carboxilados (monómeros).

ADITIVO REDUCTOR: aditivo que permite obtener una manejabilidad especificada, en función del asentamiento o el factor de compactación empleando una relación agua cemento menor a la del mortero o concreto formulado sin aditivo, sin afectar la configuración del material.

CALORIMETRÍA SEMI-ADIABÁTICA: método experimental que determina el calor desprendido y los cambios de temperatura a lo largo del tiempo como producto de la hidratación del cemento en un entorno aislado y con un software determinado.

CEMENTO HIDRÁULICO: compuesto pulverizado con capacidad aglomerante que al reaccionar con el agua endurece y genera un material sólido

CLINKER: producto de la calcinación de la caliza y la arcilla que es empleado como el componente principal en el cemento Portland.

FRAGUADO: proceso del endurecimiento del mortero a causa del proceso de hidratación del cemento y la liberación de calor de las fases reaccionantes.

MESA DE FLUJO: dispositivo mecánico empleado para determinar la consistencia de morteros o concretos de diferentes materiales aglomerantes, consta de un reductor de velocidad que permite una velocidad de 1 revolución por segundo. Sus dimensiones se encuentran especificadas por la Norma Técnica Colombiana 111.

MORTERO: mezcla de pasta y agregados finos. Utilizado en construcción para la unión de elementos estructurales.

PASTA: mezcla de cemento, agregados y agua.

PERICLASA: componente minoritario del Clinker (MgO), el cual por reacción con agua incrementa considerablemente su volumen causando expansiones perjudiciales en el material.

VINAZA: subproducto de la destilación de la caña de azúcar, empleada como materia prima en aditivos por su capacidad de fluidificar o plastificar el mortero.

RESUMEN

La variación en la composición química del cemento no permite emplear un único aditivo de forma estándar, por consiguiente el propósito de este trabajo de grado fue evaluar el desempeño de aditivos reductores (AR3, AR7 y AR40), manejadores (AM6, AM67, AM65, AM65H y AM80) y compararlo con mezclas formuladas en diferentes concentraciones de los aditivos (AR40, AM67 y AM65H) para un total de 30 pruebas puesto que se incluyeron dos cementos de fabricantes nacionales denominados como P y K. Inicialmente se realizó la caracterización de los componentes del mortero, en el cemento se efectuaron pruebas experimentales para determinar su densidad y fluidez, y técnicas como la Difracción de Rayos X y la Fluorescencia de Rayos X para conocer su composición química. Los agregados fueron caracterizados a partir de su densidad, absorción y granulometría y por último se obtuvieron propiedades de los aditivos como el porcentaje de sólidos, viscosidad, densidad y color. Después de la caracterización se definió la relación agua cemento para cada tipo de aditivo (0.29 en reductores, 0.33 con manejadores y mezclas) y la dosis a emplear de aditivo (0.17%) en todos los morteros a partir del estudio de la prueba de culebrilla con el aditivo referencia AR7.

Las pruebas de desempeño realizadas en el mortero fueron fluidez a un tiempo máximo de 90 minutos, resistencia a la compresión medida a los 1, 7, 14 y 28 días y por último se analizó tiempo de fraguado a partir de las curvas de calorimetría semiadiabática. Para tener un punto de comparación se realizaron blancos analíticos en cada prueba los cuales consistieron en la mezcla de agua, cemento y agregados en las proporciones antes descritas.

Los resultados mostraron que el cemento K presenta mayor fluidez en la mayoría de aditivos a excepción del aditivo AR7, mostrando un incremento del 16-32% al emplear las mezclas y siendo superior la mezcla denominada AR25M. La resistencia a la compresión final fue sobresaliente al utilizar el aditivo reductor AR7 con el cemento P alcanzando un aumento del 31%. La ampliación del tiempo de fraguado tuvo una tendencia sobresaliente en el cemento K en donde las mezclas presentaron un rango entre los 10 y 77 minutos, en el cemento P el aditivo manejador denominado AM80 mostró una diferencia de 91 minutos convirtiéndose en el resultado más destacable.

Las mezclas de aditivos redujeron el costo del metro cúbico de mortero entre \$5700 y \$25900 con el cemento P y \$100 y \$22250 con el cemento K.

La conclusión principal es que en las propiedades de desempeño las mezclas formuladas tuvieron su mayor aporte en cuanto a la fluidez inicial y por consiguiente un aumento en el tiempo del fraguado final del mortero siendo más destacable en el cemento K.

La experimentación tuvo una duración aproximada de 4 meses y se llevó a cabo en los laboratorios de I+D con el fin de encaminar nuevas investigaciones y desarrollo de productos al efecto de mezclar los aditivos manejadores y reductores.

PALABRAS CLAVE:

Aditivo manejador

Aditivo reductor

Blanco analítico

Cemento

Fluidez

Mortero

Resistencia a la compresión

Tiempo de fraguado.

INTRODUCCIÓN

La construcción en cualquier país es un indicador de su desarrollo y dinamismo económico¹, puesto que la producción y demanda de materiales crece al igual que la generación de empleo y la venta de espacios dedicados para vivienda, industria, oficinas, bodegas, entre otros.

En cuanto a aditivos para el mortero, el cliente generalmente especifica la manejabilidad, resistencia mecánica y temperatura de exposición del material. Por lo cual se formulan aditivos que cumplan estos requerimientos; sin embargo es una tarea de alta complejidad debido a las múltiples variables como el tipo de polímero utilizado, los monómeros con que se encuentra constituido, el ordenamiento de estos monómeros, su peso molecular promedio y el tipo de polimerización. Pero la formulación del aditivo no es el único punto de dificultad, el tipo de cemento que se utilizará en el mortero y posterior concreto también lo es puesto que depende de su composición química y tamaño de partícula de la empresa fabricante. Estas características en el cemento definen aspectos del mecanismo de hidratación como el tiempo, nivel de hidratación de cada fase y por consiguiente los productos de reacción obtenidos los cuales son determinantes en propiedades como la resistencia mecánica del mortero y su fluidez final.

Debido a las variaciones en la fabricación del cemento y por consiguiente a sus diferentes composiciones, el aditivo no funciona de la misma manera por lo cual se vuelve determinante estudiar el efecto de los aditivos existentes y buscar nuevos comportamientos al ser mezclados, esto con el fin de generar soluciones para la industria de la construcción e infraestructura en el país.

Para analizar de forma correcta el efecto de mezclar dos tipos de aditivos se debe definir la dosis empleada al igual que la relación agua/cemento que origina la fluidez especificada por el cliente, la cual define su resistencia mecánica y calor de hidratación originado de la reacción entre el agua, el cemento y el aditivo empleado.

Por esto el presente proyecto realizó una comparación con base en el comportamiento de fluidez, resistencia a la compresión y tiempo de fraguado de aditivos reductores, manejadores y sus mezclas en morteros de dos cementos con diferente composición. Con el fin de determinar cómo afecta la química del cemento, de los aditivos y de su mezcla a las especificaciones planteadas por el cliente, así como generar la oportunidad de incluir alguna de las mezclas realizadas y estudiadas en un nuevo producto de comercialización por parte de la compañía.

El proyecto fue dividido en 4 objetivos específicos a partir de los cuales se redactaron los capítulos, la primera parte muestra el sustento teórico que argumenta

¹ CAMACOL. Tendencias De la construcción. Economía y Coyuntura Sectorial. 12 ed. Abril 2018, 37 p.

la experimentación llevada a cabo, así como la importancia del uso de aditivos y el fenómeno físico por medio del cual cumplen su función. El segundo capítulo explica y muestra la forma de llevar a cabo los procedimientos experimentales necesarios para cumplir el objetivo de caracterización de materias primas y estimar las propiedades de desempeño en estado fresco y endurecido de los morteros al emplear los aditivos reductores, manejadores y su mezcla.

Los resultados y el análisis de los mismos se muestran en el tercer capítulo, en donde en forma comparativa se evaluaron los aditivos y las mezclas formuladas generando las primeras conclusiones del proyecto.

Por último, se estimaron los costos de las mezclas empleadas para evidenciar la disminución económica que beneficia al constructor al ser incorporadas a los morteros, por esto se determinó el agua necesaria que iguala la fluidez inicial de los blancos analíticos con la de los morteros que contienen mezclas de aditivos.

Con lo descrito anteriormente se elaboraron las conclusiones y recomendaciones del proyecto para encaminar futuras investigaciones.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar el efecto de los aditivos reductores, manejadores y sus mezclas en el mortero en cuanto a su fluidez, resistencia a la compresión y tiempo de fraguado.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las propiedades de los polímeros y cementos utilizados en los morteros.
- Establecer la relación agua/ cemento y la dosis de los aditivos reductores, manejadores y sus mezclas.
- Comparar las propiedades de desempeño de dos tipos de cemento ante aditivos reductores, manejadores y sus mezclas.
- Comparar el costo del m³ de mortero sin aditivos con el de las mezclas de aditivos formuladas.

1. MARCO TEÓRICO

A partir de la información necesaria para entender las bases teóricas relacionadas con el proyecto se construye el presente capítulo. En donde se busca integrar la teoría con su posterior análisis, iniciando por los componentes del mortero, haciendo énfasis en el cemento con el fin de establecer su relación tanto con el aditivo utilizado como con los agregados en cuanto a las propiedades de desempeño obtenidas.

1.1 EL CEMENTO

Se denominan cementos a las sustancias formadas en su mayoría por compuestos de cal (CaO) que brindan la capacidad de adherir partículas sólidas con el fin de crear un compuesto compacto². De forma general se clasifican en cementos hidráulicos y cementos no hidráulicos basándose en la necesidad de reaccionar con el agua para obtener endurecimiento. Así como de ser estables ante este compuesto, por ende son el tipo de cemento más utilizado.

Debido a su capacidad de generar altas resistencias y su relativo bajo precio es el material más utilizado en la industria de la construcción del país, siendo un indicador del crecimiento del mismo en cuanto a infraestructura³. Específicamente el cemento denominado Portland cuya composición se basa en la presencia de caliza (calcio), arcillas o arenas (sílice), bauxita (alúmina), mineral de hierro y pequeñas trazas de óxido de magnesio, dióxido de sodio, dióxido de potasio, dióxido de titanio y pentóxido de fósforo⁴. A causa del proceso de fabricación y de la composición inicial de los minerales utilizados se genera variabilidad en la cantidad de fases y compuestos del cemento (tabla 1) al igual que en el tamaño de partícula resultante. Obteniendo diferentes comportamientos entre los lotes de producto y empresas fabricantes ante los aditivos.

Tabla 1. Composición aproximada del cemento Portland

Óxido	Composición (wt %)
<i>CaO</i>	60-67
<i>SiO₂</i>	17-25
<i>Al₂O₃</i>	3-8
<i>Fe₂O₃</i>	0.5-6.0
<i>MgO</i>	0.1-5.5
<i>Na₂O + K₂O</i>	0.5-1.3
<i>TiO₂</i>	0.1-0.4

² American Concrete Institute. ACI Concrete Terminology, 2010. 12 p.

³ FLORES, Noé; OLIVEIRA, José y ARACAYO, Luis. El desarrollo de infraestructura como indicador de crecimiento de un país. Puerto Iguazu: 2013, 2 p.

⁴ SOROKA, Itzhak. Portland cement paste and concrete. Londres. The Macmillan Press LTD. 1979, 2 p.

Tabla 1. (Continuación)

Óxido	Composición (wt %)
P_2O_5	0.1-0.2
SO_3	1-3

Fuente SOROKA, Itzhak. Portland cement paste and concrete.

1.1.1 Tipos de cementos (NTC 321 y NTC 30). Establecido por la norma técnica colombiana (NTC 321) se clasifican los cementos Portland a partir de sus especificaciones químicas, obteniendo cementos tipo 1, 1M, 2, 3, 4^a y 5^a. Las composiciones de cada tipo de cemento Portland se muestran a continuación en la tabla 2:

Tabla 2. Requisitos químicos del cemento Portland

Aspecto	Tipo 1	Tipo 1M	Tipo 2	Tipo 3	Tipo 4 ^a)	Tipo 5 ^a)
%mínimo de SO_2	-	-	21.0	-	-	-
%máximo de Al_2O_3	-	-	6.0	-	-	-
%máximo de Fe_2O_3	-	-	6.0	-	6.5	-
%máximo de MgO	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
%máximo de SO_3	3.5	3.5	-	4.5	-	-
%máximo de pérdida al fuego	-	5.0	4.0	4.0	3.5	4.0
% máximo de residuo insoluble	-	4.0	3.0	3.0	3.0	3.0
%máximo de $3CaO.SO_2$	-	-	-	-	35.0	-
%mínimo de $3CaO.SO_2$	-	-	-	-	40.0	-
%máximo de $3CaO.Al_2O_3$	-	-	8.0	15.0	7.0	5.0
%máximo de $(3CaO.SiO_2) + (3CaO.Al_2O_3)$	-	-	58.0	-	-	-
% máximo de $(4CaO.AlO_3FeO_3) + 2(3CaO.Al_2O_3)$ o $(4C_2O.Al_2O_3Fe_2O_3) + (2CaO.Fe_2O_3)$	-	-	-	-	-	20.0

Fuente NTC 321. Ingeniería civil y arquitectura. Cemento Portland. Especificaciones químicas.

Es importante destacar que la norma técnica colombiana (NTC 30) realiza la nomenclatura de los anteriores cementos a partir de sus cualidades y usos, como se muestra en la tabla 3. En ella se nombran los elementos incorporadores de aire, los cuales son aditivos que proveen a la mezcla de cemento mayor durabilidad a lo largo del tiempo cuando se encuentran expuestos a ciclos de hielo y deshielo; sin embargo, disminuyen su resistencia mecánica. Estos pueden ser resinas, sales sulfonadas, aceites grasos y detergentes sintéticos entre otros⁵.

⁵ ESCUELA INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN. Grupo de Hormigón. Los aditivos. 2010, 12 p.

Tabla 3. Clasificación de cementos Portland

Clasificación	Definición-uso
TIPO 1	No se le exigen propiedades especiales – Obras en hormigón.
TIPO 1M	Resistencia superior al TIPO 1 - Obras en hormigón.
TIPO 2	Moderado calor de hidratación - Obras en hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos.
TIPO 3	Desarrolla altas resistencias iniciales.
TIPO 4	Desarrolla bajo calor de hidratación.
TIPO 5	Alta resistencia a la acción de sulfatos.
BLANCO	Obtenido con materiales que brindan coloración blanca.
TIPO 1-A	Se le adiciona un material incorporador de aire.
TIPO 1-M-A	Tipo 1M con adición de un material incorporador de aire.
TIPO 2-A	Moderado calor de hidratación con elemento incorporador de aire.
TIPO 3-A	Alta resistencia inicial con elemento incorporador de aire.

Fuente NTC 30. Cemento Portland. Clasificación y nomenclatura.

1.1.2 Variación en la composición y tamaño de partícula del cemento causada en la fabricación. Las etapas para obtener el clinker y posterior cemento se muestran en la imagen 1.

El primer proceso consiste en la extracción de la materia prima, punto en donde empieza a cambiar la composición del cemento dado que al ser material de carácter mineral este valor no es fijo. Al continuar a la trituración se busca disminuir el tamaño de partícula hasta 13mm sin embargo no todas las partículas presentan el mismo tamaño final, de donde se empiezan a generar diferencias en la fabricación. Al utilizar el proceso de vía seca (más económico) se introduce el material al molino con un bajo contenido de humedad consecuencia de un secado previo⁶. Si se emplea el proceso de vía húmeda se agrega agua al material obteniendo una pasta con humedad mayor al 65% que es alimentada al molino, este proceso es conveniente para materias primas con alto contenido de humedad, sin embargo requiere mayor consumo tanto de agua como de energía por lo cual es un proceso más costoso y menos empleado⁷.

Posteriormente el polvo o pasta obtenidos de la molienda son homogenizados, esto con el fin de integrar adecuadamente las diferentes partículas presentes y optimizar el proceso en el alto horno al disminuir la temperatura requerida⁸. Al emplear el

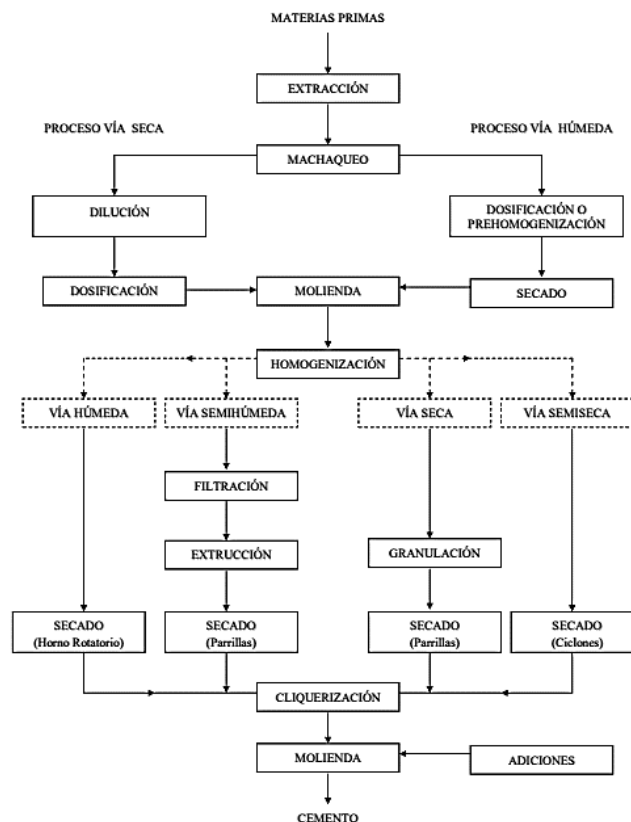
⁶ COLCIENCIAS COLOMBIA. Ahorro de energía en la industria del cemento. Universidad Autónoma de Occidente, 2010. 3 p.

⁷ *Ibíd.*, 4p.

⁸ *Ibíd.*, 5p.

método de vía húmeda se ingresa la pasta a un horno rotatorio con el objetivo de reducir la humedad previa a la clinkerización, sin embargo el contenido de humedad es mayor a los otros métodos (30-40%). Un proceso alternativo a la vía húmeda se conoce como vía semihúmeda en donde la pasta es filtrada, extruida y secada en parrillas hasta una humedad del 20% para ser alimentada al horno⁹. Si el ingreso de material al horno tiene una humedad entre el 10% y el 15% es debido a que el material fue tratado por vía semiseca, en la cual es transformado en pellets requiriendo un tratamiento adicional. En el proceso de vía seca el material en forma de polvo es alimentado al horno, al no requerir tratamientos adicionales solo de intercambio de calor y reducción de tamaño de partícula es el proceso más utilizado y económico, sin embargo, pueden presentarse problemas en el horno por el aumento de movimiento y volumen de polvos¹⁰.

Imagen 1. Proceso de fabricación del cemento Portland.



Fuente: COLCIENCIAS COLOMBIA. Ahorro de energía en la industria del cemento

⁹ *Ibíd.*, 6p.

¹⁰ *Ibíd.*, 17p

es que dependiendo del fabricante y su fórmula se añaden otros compuestos al material que ingresa al horno, esto con el fin de reducir la carga térmica en el mismo para alcanzar la temperatura que genera los óxidos requeridos. Por esta razón los aditivos requieren un estudio específico para el cemento que se emplee en el mortero debido a que su funcionalidad depende del proceso de hidratación que se lleve a cabo y por consiguiente de la cantidad de las fases presentes.

1.1.3 Fases y características. Las fases del cemento surgen por la combinación de los óxidos presentes en las materias primas en diferentes proporciones, a causa del proceso de clinkerización y molienda. Para entender mejor las fases presentes y sus características se muestra en forma de resumen la tabla 4.

Tabla 4. Materias primas y fases del cemento.

Materias Primas			Fases		
Formula Química	Abreviatura	+	Abreviatura	Nombre	
Óxido de aluminio	AL ₂ O ₃	A	3 C	C ₃ A	Aluminato tricalcico
Óxido de silicio	SiO ₂	S	3 C	C ₃ S	Alita
			2 C	C ₂ S	Belita
Cal libre	CaO	C	-	-	-
Óxido de hierro	Fe ₂ O ₃	F	4 C + A	C ₄ AF	Ferrito aluminato tetracálcico
Óxido de azufre	SO ₃	s	Sulfato de calcio	CsH ₂	Dihidrato o yeso
				CsH _{0,5}	Hemihidrato
				Anhidro	Cs
Óxido de potasio	K ₂ O	K		Álcalis	
Óxido de sodio	Na ₂ O	N			

. Fuente Elaboración propia con base en MONTEAGUDO VIERA, Silvia. Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones

Las fases mayoritarias en el cemento son la alita (C₃S), belita (C₂S), el Ferrito aluminato tetracálcico (C₄AF) y el Aluminato tricálcico (C₃A). Los sulfatos de calcio y álcalis se encuentran en menor proporción. La alita (C₃S) es el componente principal del cemento (45-60%), lo que permite explicar la mayoría de comportamientos obtenidos en el mortero o concreto endurecido. Al tener la mayor velocidad en la reacción de hidratación libera rápidamente y en mayor cantidad calor de forma exotérmica, endureciendo a alta rapidez obteniendo así alta resistencia mecánica inicial gracias a su red cristalina.

En un 15 a 25% se encuentra la belita (C₂S) la cual al reaccionar lentamente genera bajo calor de hidratación, a causa de esto su aporte es apreciable en la resistencia final del material (>28 días). Se forma por instauración de óxido de calcio en el clinker y presenta modificaciones polimórficas (α, α', β y γ) según su cristalización¹¹, en el cemento Portland predomina la forma β. El ferrito aluminato tetracálcico

¹¹ SANJUÁN BARBUDO, Miguel y CHINCHÓN YEPES, Servando. Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland. Alicante. Publicaciones de la Universidad de Alicante. 2015, 22 p.

(C₄AF), no influye en gran medida a la resistencia dado que la reactividad depende del contenido de óxido de hierro.

En forma cúbica y ortorrómbica se encuentra finalmente el aluminato tricálcico (C₃A), su hidratación es la que genera mayor calor (207 cal/g) a causa de su rápida velocidad de reacción. Por consiguiente, se puede producir un falso fraguado, en el cual por apariencia la masa de mortero se encuentra endurecida pero la hidratación de las fases no se ha iniciado o completado, produciendo valores erróneos de resistencias mecánicas. Para regular la velocidad de esta reacción se incorpora el yeso (sulfato de calcio dihidrato) el cual modifica el producto a sulfoaluminato de calcio hidratado (etringita) (SACH), el cual se genera paulatinamente¹².

1.1.4 Hidratación. Como se mencionó con anterioridad la hidratación de las fases y óxidos del cemento definen las propiedades de desempeño resultantes en el mortero, por lo cual es fundamental conocer este proceso para comprender sus implicaciones en el material. La hidratación del cemento se concibe como la suma de los procesos de hidratación individuales de las fases presentes, teniendo en cuenta que estas difieren en cantidades, volúmenes, tamaño de partícula y productos. A continuación, se muestran las reacciones de hidratación de las fases, la nomenclatura mostrada se describe en la tabla 4 del ítem anterior. Las reacciones de la hidratación de las fases que se llevan a cabo de forma simultánea y sucesivamente se muestran en la tabla 5.

En la tabla 5 se muestran los productos de hidratación de las fases, estas reacciones son llevadas a cabo a diferentes velocidades por ende los calores liberados difieren entre sí, a mayor calor de hidratación más rapidez en el endurecimiento de los productos de las fases. El mecanismo de reacción predominante es el de la alita (C₃S), seguido por la belita (C₂S), esto recordando que son los componentes mayoritarios en el cemento por consiguiente sus productos se encuentran en mayor concentración en la pasta sin embargo, la fase del aluminato tricálcico tiene gran importancia debido a que las partículas de etringita y sulfoaluminato de calcio hidratado generan mayor volumen al incrementar el tiempo de reacción respecto a los otros productos.

Inicialmente se hidrata el aluminato tricálcico (C₃A) liberando 320 cal/g, generando la primera acumulación de etringita (AFt) sobre sus partículas. Al incrementarse la capa de etringita (AFt) la presión aumenta llegando a valores que inician la cristalización de este producto. Simultáneo a la formación de la capa de etringita (AFt) se genera en menor cantidad la portlandita (CH), la que al depositarse constantemente promueve la rápida formación de la tobermorita (CSH) caracterizada por ser un gel rígido alrededor de los productos anteriores obtenidos en las partículas de cemento. Al ampliarse la cantidad de CSH en el grano se crean partículas sólidas alargadas con forma de aguja que por diferencia de cargas atraen

¹² MONTEAGUDO. Op.cit., p.15.

a las partículas restantes en la matriz del sistema agua cemento formando una sola estructura endurecida con pequeños vacíos, las redes se encuentran unidas por la influencia de los iones Ca^{2+} y OH^- . Para evidenciar este proceso a nivel micro estructural y de forma más sencilla se muestra la imagen 2.

Tabla 5. Reacciones de hidratación de las fases del cemento.

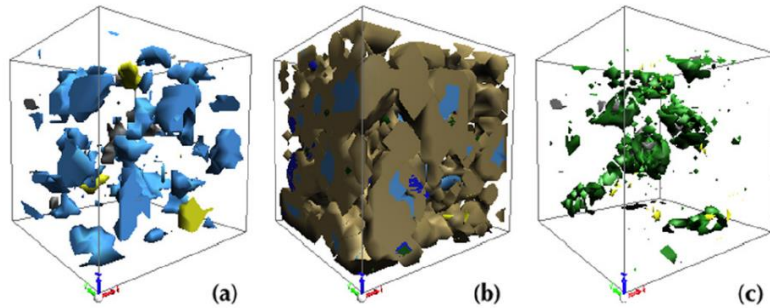
Fase	Hidratación	Productos	
Alita (C_3S)	$2 \text{C}_3\text{S} + 7\text{H} \leftrightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + 3\text{CH}$	CSH	Silicato de Tobermorita calcio hidratado
Belita (C_2S)	$2 \text{C}_2\text{S} + 4\text{H} \leftrightarrow \text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3 + \text{CH}$	CH	Hidróxido de calico Portlandita
Aluminato tricálcico (C_3A)	$\text{C}_3\text{A} + 6\text{H} \leftrightarrow \text{C}_3\text{AH}_6$	C_3AH_6	Tricálcio aluminato hidrato
	$\text{C}_3\text{A} + 3\text{CsH}_2 + 26\text{H} \leftrightarrow \text{C}_3\text{A} \text{C}_3\text{S}_3\text{H}_{32}$	C_3A $\text{C}_3\text{S}_3\text{H}_{32}$	Etringita o AFt
	$2 \text{C}_3\text{A} + \text{C}_3\text{A} \text{C}_3\text{S}_3\text{H}_{32} + 4\text{H} \leftrightarrow 3 \text{C}_4\text{AsH}_{12}$	$\text{C}_4\text{AsH}_{12}$	Sulfoaluminato de calcio hidratado
Ferrito aluminato tetracálcico (C_4AF)	$\text{C}_4\text{AF} + 17\text{H} \leftrightarrow \text{C}_3\text{AH}_6 + \text{CFH}_{11}$	CFH ₁₁	
	$\text{C}_4\text{AF} + 3 \text{CsH}_2 + 30\text{H} \leftrightarrow \text{C}_3\text{A} \text{C}_3\text{S}_3\text{H}_{32} + \text{CH} + \text{FH}_3$		
	$2 \text{C}_4\text{AF} + \text{C}_3\text{A} \text{C}_3\text{S}_3\text{H}_{32} + 12\text{H} \leftrightarrow 3 \text{C}_4\text{AsH}_{12} + 2\text{CH} + 2\text{FH}_3$	FH ₃	Gel hidróxido de hierro

Fuente Elaboración propia con base en MONTEAGUDO VIERA, Silvia. Estudio microestructural y de los procesos de hidratación de cementos con adiciones

En la parte (a) de la imagen 2, se muestra los productos iniciales por la disolución temprana y rápida reacción de los aluminatos. En el caso (b) se observa la propiedad del aluminato tricálcico de crecer en volumen después del tiempo generando la configuración propia del material, la división (c) permite ubicar espacialmente los productos principalmente la etringita y la tobermorita¹³

¹³ *Ibid*, p.11.

Imagen 2. Simulación de la hidratación del cemento respecto al tiempo.



Fuente BULLARD, Jeffrey, *et al.* A parallel reaction transport model applied to cement hydration and microstructure development. Gaithersburg. (a) Suspensión inicial de la microestructura, (b) microestructura después de 3 horas de hidratación y (c) microestructura después de 3 horas sin mostrar las fases de silicato para evidenciar las de sulfato de calcio y aluminato de calcio claramente. Colores: Azul claro = C3S, café claro= CSH, azul oscuro = portlandita, gris= C3A, amarillo = yeso, verde= etringita¹⁴.

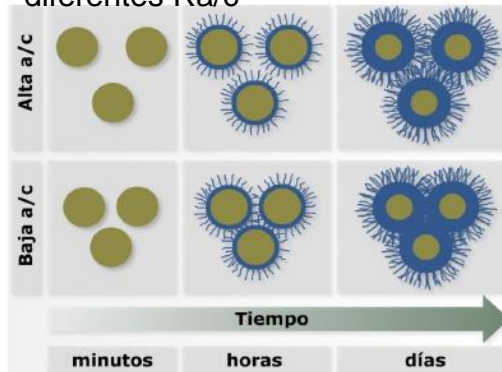
1.1.5 Relación agua cemento (Ra/c). La relación agua cemento hace referencia a la cantidad de agua de mezclado empleada en la pasta, mortero o concreto respecto a los gramos de cemento utilizados. Esta fracción tiene gran influencia en las propiedades en estado fresco y endurecido del mortero, en estado fresco básicamente define la manejabilidad del material por ende la facilidad en su compactación¹⁶. En este caso la relación es directamente proporcional por lo que se pensaría que si se busca alta manejabilidad la solución es emplear mayor cantidad de agua, eso es erróneo debido a que al emplear cantidad excesiva, el cemento se satura lo que con lleva a la segregación de la mezcla.

En estado endurecido la Ra/c establece la resistencia a la compresión del material, esto a causa de la porosidad que se genera por la interacción con el cemento. A mayor cantidad de agua en una masa de cemento definida la matriz del material es más amplia, por ende después de la hidratación de las fases el agua libre en el sistema representa espacios vacíos los cuales al unirse incrementan la porosidad (Imagen 3).

¹⁴ BULLARD, Jeffrey, *et al.* A parallel reaction transport model applied to cement hydration and microstructure development. Gaithersburg. IOP Publishing. 2010. 10 p.

¹⁶ GUEVARA FALLA, Génesis. *et al.* Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. Costa Rica. Escuela de Ingeniería de los Materiales. 2011, p 81-85.

Imagen 3. Matriz del material a diferentes Ra/c



Fuente INSTITUTO DE CEMENTO PORTLAND ARGENTINO. Materiales componentes y Control de Calidad.

La porosidad resultante representa disminución en la resistencia mecánica del material y en su durabilidad, al aplicar una fuerza considerable al material este se va a fracturar por los espacios huecos generando un detrimento en la funcionalidad final del mortero. Por lo que al disminuir la Ra/c el material tendrá mayor resistencia mecánica y se disminuirán costos, sin embargo si se emplea la menor cantidad de agua la plasticidad será nula. Evidenciando así la importancia de definir la Ra/c en cada tipo de cemento basando el estudio en la fluidez y resistencia a la compresión del material.

1.2 MORTERO

Al incorporar a la pasta (cemento con agua) agregados finos o medios se obtiene el mortero¹⁷. Este material es empleado ampliamente en la construcción y en los acabados de las edificaciones, al tener demanda en este tipo de industria se requiere que el material garantice su desempeño mediante la funcionalidad del mismo por medio de sus propiedades. Los agregados crean un medio estructural para el material, incrementando la adherencia entre las partículas del cemento y por consiguiente la resistencia mecánica del material.

Al integrar aditivos al mortero teniendo en cuenta la correcta dosificación y mezcla se puede tanto modificar sus propiedades como agregar características al material. Los aditivos más utilizados en el mortero son los aireantes, plastificantes, retardantes, hidrofugantes, retenedores de agua y resinas que proporcionan adherencia química.

1.2.1 Agregados. Material granular de origen natural o artificial de carácter inerte, que al ser dosificado o mezclado con otros tipos de agregados genera en el mortero

¹⁷RIVERA, Gerardo. Aditivos para mortero y concreto. Concreto Simple.2011, 236 p.

resistencia, dureza, durabilidad, forma, textura y homogeneidad¹⁸. La NTC 174 plantea la clasificación de los agregados basada en el análisis granulométrico de la muestra, los agregados finos son las arenas naturales, trituradas o la combinación de estas que traspasan la malla 200 (0.075 mm), sin embargo la empresa en lo correspondiente al mortero incluye los agregados finos como los pasantes de la malla 50; El agregado grueso se encuentra compuesto por roca triturada, grava, grava triturada, escoria del alto horno o concreto triturado que por su tamaño de partícula se retiene en la malla 4 (4.75 mm)¹⁹, por último debido a la gran diferencia de tamaños en la clasificación la empresa denomina como agregados medios los pasantes de la malla 4 que son retenidos en la malla 30 .

Otra clasificación es definida de acuerdo a la textura del agregado, esta puede ser vítrea, lisa, áspera, granular, cristalina o aplanada. De acuerdo a su forma y esfericidad se presentan agregados redondeados, irregulares, angulares, aplanados y elongados²⁰. Debido a que generalmente los agregados empleados son una combinación de diferentes texturas y formas para suplir las diferentes necesidades de uso estos tipos de clasificación no pueden ser generalizados.

1.2.2 Usos. En este caso el mortero es de cemento Portland, el uso de este material tiene un carácter tanto estructural como de acabado en la construcción. Es empleado para la unión de ladrillos, albañilería, mampostería, el revestimiento en fachadas, adhesivo en pavimentos y revestimientos cerámicos, impermeabilizante, material de reparación y materia prima en la prefabricación de tejas y baldosas. Debido a la gran cantidad de usos de este material las propiedades requeridas tanto en estado fresco como endurecido difieren entre aplicaciones. A continuación, se hablara sobre las propiedades demandadas en el mortero.

1.2.3 Propiedades demandadas. El constructor requiere propiedades de desempeño o durabilidad dependiendo del uso que se le dé al material. Un mortero que sea empleado para la unión de elementos estructurales debe tener buena resistencia mecánica pero no es fundamental una alta fluidez, como es el caso de la adhesión de pisos donde se debe garantizar la nivelación. Hay gran cantidad de propiedades como la densidad, resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, fluidez, resistencia a la flexión, durabilidad, permeabilidad, resistencia al ambiente, al fuego, capacidad de aislamiento térmico y características acústicas²¹. Debido a que el proyecto se limita a las propiedades demandadas generalmente, se hará énfasis en la resistencia a la compresión, fluidez y tiempo de fraguado.

¹⁸ ASOCRETO. Características cemento [Diapositivas]. Bogotá D.C. 2014. 80 diapositivas.

¹⁹ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000. P 5-8.

²⁰ LEÓN, Maria y RAMÍREZ, Fernando. Caracterización morfológica de agregados para concreto mediante el análisis de imágenes. Revista Ingeniería de Construcción Vol. 25 N°2, 2010. p 215-220.

²¹ MEDINA PIZA, Diana y YAÑEZ LOPEZ, Shirley. Análisis de viabilidad para el uso del mortero celular en Colombia a partir de la revisión del estado del arte. Trabajo de grado. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana, 2014. 22 p.

1.2.3.1 Resistencia a la compresión. Consiste en la habilidad que tiene el material de resistir a la fractura por acción de una fuerza externa de diferente tipo, en este caso de compresión²². Esto a causa de las reacciones de hidratación desarrolladas a través del tiempo y del acoplamiento de sus productos con las partículas de agregado, su utilidad radica en la estimación de la resistencia máxima del material antes de que este falle y se derrumbe. En el mortero se busca que este valor sea lo máximo posible, pero menor a la de los elementos estructurales que se van a unir.

➤ **Normatividad.** La norma técnica colombiana 3356 define los diferentes tipos de mortero según sus características mecánicas y físicas, así como sus principales ensayos. Respecto al tipo de fabricación están los morteros premezclados húmedos, secos, convencionales y de larga duración. A partir de su resistencia a la compresión y retención mínima de agua se presentan los tipos M, S y N, los valores son mostrados en la tabla 6.

Tabla 6. Clasificación de los morteros NTC 3356.

Tipo de mortero	Resistencia a la compresión (MPa)	Retención mínima de agua %
M	17.5	75
S	12.5	75
N	7.5	75

Fuente NTC 3356. Concretos. Mortero premezclado para mampostería.

En cuanto al ensayo de resistencia a la compresión el procedimiento se describe en la NTC 3546, en donde las probetas son cubos de 50 mm de lado que son almacenados hasta el fraguado final y desmoldados después de 20 horas. La resistencia a la compresión es medida en una prensa hidráulica a un máximo de 28 días, se deben realizar mínimo 3 probetas por día de ensayo y el valor resultante de resistencia a la compresión es el promedio aritmético de la replicas, rechazando los que presentan una variación mayor al 10%²³.

1.2.3.2 Fluidez. Es una propiedad que permite cuantificar la manejabilidad, plasticidad y consistencia del mortero en estado fresco, es fundamental para facilitar la aplicación y disminuir el trabajo mecánico requerido para la compactación en obra. Su valor óptimo depende del uso que se le valla a dar al mortero, en el caso de la unión de elementos se manejan valores bajos pero para las aplicaciones en las que se lanza el material o se cubren superficies la alta fluidez facilita su movimiento (imagen 4).

²² AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI Concrete Terminology. 2010. 71 p.

²³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. Concretos. Mortero premezclado para mampostería. NTC 3356. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000. P 7-8.

Imagen 4. Fluidez de los morteros en diferentes aplicaciones.



Fuente TECHNICAL-FLOOR.
Morteros Cementosos
Autonivelantes.

Para la determinación de la fluidez inicial del mortero se emplea la NTC 111, la cual se describe en el capítulo de desarrollo experimental numeral 2.2.1.2. Las mediciones a lo largo del tiempo se especifican en el numeral 2.5.1.

1.2.3.3 Tiempo de fraguado. Como se ha mencionado anteriormente el mortero presenta dos estados físicos, inicialmente se encuentra en estado fresco en donde se muestra como una mezcla manejable con determinada capacidad de fluidez²⁴. Y finalmente posterior de las reacciones de hidratación se convierte en un material sólido con resistencia difícil de manejar pero que representa apoyo estructural en la construcción. El tiempo de fraguado mide la duración en la transición de estado fresco a estado endurecido, es fundamental para saber el tiempo que puede estar en reposo o ser aplicado el material en determinada superficie antes de fraguar o endurecerse, estado en donde el material no puede ser manipulado de ninguna forma. En obra permite realizar un estimado del tiempo óptimo entre la preparación y la aplicación del mortero. Para medirlo se aplican varias técnicas, como el aparato Vicat, las agujas Gillmore y la estimación de la consistencia. Sin embargo, la mejor forma de relacionar el proceso de hidratación, teniendo en cuenta las velocidades de reacción mediante la temperatura inicial y final del fraguado, por consiguiente estimando de forma más precisa el tiempo de fraguado es la calorimetría, esta puede realizarse de forma adiabática o semiadiabática.

²⁴ BOTTO LUGO, Isabel y SANTACRUZ PACHÓN, Paola. Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido de un concreto para uso en pavimento rígido, adicionado con nanocompuestos de carbono. Trabajo de grado. Bogotá D.C. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería, 2017. 10 p.

➤ **Calorimetría semiadiabática.** Al emplear este tipo de calorimetría se caracteriza el comportamiento del mortero con alta precisión, esto debido a que se tiene en cuenta el cambio de temperatura de la mezcla sin tener contacto con el ambiente gracias al aislamiento del equipo. Esto permite cuantificar el calor generado en la muestra por acción de las reacciones de hidratación de las fases. Para esta técnica se emplean equipos de alta tecnología, los cuales a partir de las mediciones constantes de la temperatura y con un software propio generan las curvas características en las cuales se puede evidenciar tanto las temperaturas y tiempos del fraguado inicial y final²⁵.

▪ **Interpretación de la curva.** La gráfica 1 muestra la curva característica obtenida en el mortero, la amplitud, inicio o longitud varían dependiendo de la Ra/c, el uso de aditivos y la composición del cemento. Sin embargo, el comportamiento se presenta tanto en las pastas de cemento como en morteros, por lo cual las zonas características de los fenómenos químicos que se presentan se encuentran definidas y estudiadas ampliamente.

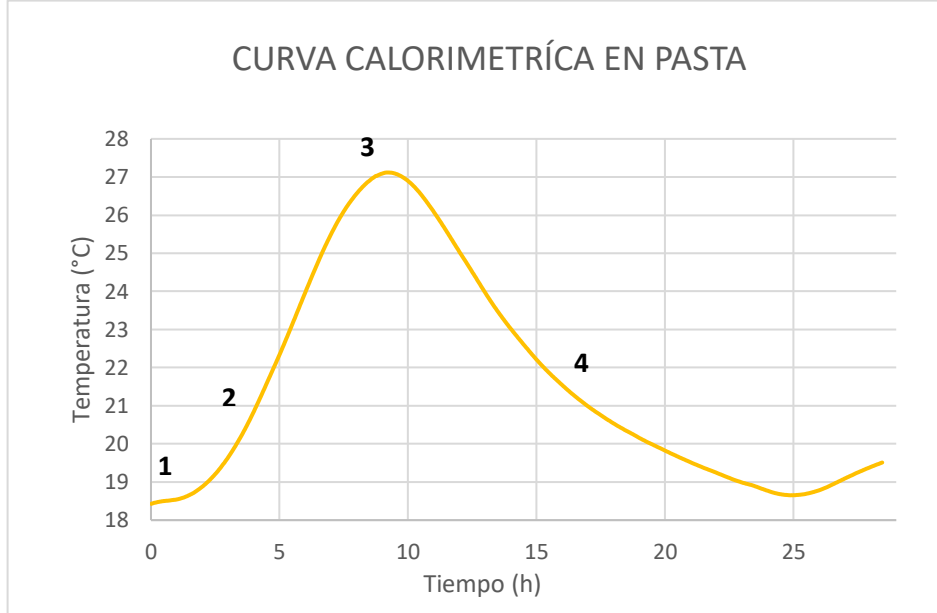
En la fase 1 inicia la hidratación superficial de los granos de cemento, sin embargo no es fácil de apreciar teniendo en cuenta que durante el mezclado del mortero y su traslado al equipo de calorimetría ha transcurrido tiempo considerable. En este punto inicia la disolución de los aluminatos generando etringita en pocas cantidades, es un periodo muy corto en donde la velocidad de reacción permanece prácticamente constante a causa del inicio de la acumulación de etringita sobre las partículas de C₃A. Posteriormente se evidencia en la curva un leve incremento en la temperatura (fase 2), esto es causado por el aumento de concentración de los productos y generación de los primeros hidratos. Durante la etapa 2 el mortero tiene su máxima manejabilidad, por lo que al culminar esta fase se inicia el fraguado.

Entre la etapa 2 y la número 3 se observa un aumento rápido en la temperatura de la muestra a causa de la velocidad de reacción en la hidratación e inicio del endurecimiento por el agotamiento del agua y acumulación de productos en el sistema. La etapa 3 muestra la máxima temperatura alcanzada en el proceso de fraguado a causa del calor liberado en la formación de sulfatos y aluminatos, este punto define el fin del fraguado, tiempo después del cual la mezcla disminuirá su manejabilidad. Por último, se presenta una fase en la que la velocidad de reacción decrece proporcionalmente, esto a causa de la concentración de productos alcanzada y acumulada en las partículas de cemento que generan un impedimento para continuar la hidratación. Este punto define las resistencias mecánicas obtenidas, debido a que se inicia la hidratación de los últimos silicatos²⁶.

²⁵ CRUZ RODRIGUEZ, Laura. Aplicación de la calorimetría para determinación de la madurez y las resistencias del cemento. Trabajo de grado. Bogotá D.C. Universidad de América. Facultad de Ingeniería Química, 2002. 61 p.

²⁶ ZULUAGA MADRID, Catalina. Caracterización de adiciones CAO para desarrollar hormigones de retracción compensada. Tesis de Máster Ingeniería Estructural y de la Construcción. Cataluña. Universidad Politécnica de Cataluña. 2014. P 6-8.

Gráfica 1. Curva calorimétrica en pasta de cemento.



Fuente: Elaboración propia.

1.3 ADITIVOS

Debido a que siempre se busca optimizar la funcionalidad del mortero bien sea por el tipo de uso que se le dará al material o por las condiciones de carácter ambiental y de esfuerzos mecánicos a las que se verá expuesto, desde la antigüedad se emplearon sustancias que modificaban las propiedades de estos materiales denominadas posteriormente aditivos. Tanto los polímeros como sus respectivos monómeros pueden ser utilizados en forma de látex, resinas líquidas o en solución con agua en el mortero con el fin de disminuir o eliminar el aglutinamiento entre el agua y el cemento e incrementar su manejabilidad, esto debido a que al final del proceso de hidratación las partículas del polímero rodean a las del cemento y se genera una fase en la que junto con los agregados se forma una especie de gel con buenas características de fluidez²⁷.

1.3.1 Tipos. De forma general la clasificación de los aditivos se basa en la modificación de las diferentes propiedades de los morteros o de las características adicionales que le puedan brindar al material, entre las que se encuentran:

- Mayor trabajabilidad.
- Reducción de agua.
- Controlar el sangrado y la segregación.
- Disminuir la cantidad de materias primas necesarias para el concreto.

²⁷ OHAMA, Yoshihiko. Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Noyes Publications. New Jersey. 1995. 15 p.

- Bajar la permeabilidad, inhibiendo la corrosión del armazón de acero.
- Controlar la expansión causada por la reacción de álcalis de agregados.
- Mejorar acabado²⁸.

A continuación se muestra una de las clasificaciones de los aditivos, su función y las sustancias comúnmente utilizadas (Tabla 7). Sin embargo dependiendo del autor (Dodson, 1990) pueden encontrarse otro tipo de clasificaciones como lo son por mecanismo de acción, dispersión del cemento en la fase acuosa del concreto, alteración de la velocidad normal de hidratación del cemento en particular en la fase del silicato tricálcico, reacción con subproductos de la hidratación del cemento y sin reacción con el cemento o sus subproductos²⁹.

Tabla 7. Clases de aditivos

Clasificación	Función	Compuestos
Acelerantes	Acelerar el endurecimiento y el desarrollo temprano de la resistencia.	Cloruro de calcio, trietaloamina, tiocianato de sodio, nitrito de calcio.
Reductores de aire	Disminuir el contenido de aire	Fosfato de tributilo, ftalato de dibutilo, siliconas.
Incorporadores de aire	Aumentar la durabilidad en procesos de congelación/descongelación, a ambientes alcalinos e incrementar la manejabilidad.	Resina vinsol, detergentes sintéticos, sales de hidrocarburos sulfonados.
Inhibidores de reactividad de álcali-agregado	Disminuir la expansión por reacción de álcalis.	Sales de bario, nitrato de litio, carbonato de litio e hidróxido de litio.
Antiadherentes	Ambientes submarinos	Polímeros acrílicos.
Aditivos adhesivos	Aumentar la fuerza de adhesión	Cloruro de polivinilo, acetato de polivinilo, acrílicos, butadieno.
Aditivos colorantes	Pigmentar el concreto	Oxido de titanio, óxido de hierro, óxido de cromo.
Inhibidores de corrosión	Reducen la corrosión del acero en ambientes con presencia de cloruros	Nitrito de calcio, nitrito de sodio, benzoato de sodio, fosfatos.
Impermeabilizantes	Retardan la penetración de humedad en concreto seco	Jabones de estearato de calcio o amonio
Agentes de espumado	Producen espuma en concretos con baja densidad	Surfactantes catiónicos y aniónicos, proteínas hidrolizadas.
Fungicidas	Inhiben el crecimiento de hongos	Compuestos de cobre, fenoles poli halogenados
Formadores de gas	Causa expansión antes del ajuste	Polvo de aluminio

²⁸ RIXOM, Roger y MAILVAGANAM, Noel. Chemical admixtures for concrete. E&FN SPON. Londres. 1999,293 p.

²⁹ AITCIN, Pierre y FLATT, Robert. Science and technology of concrete admixtures. Elsevier. Cambridge, 2016.18 p.

Tabla 7. (Continuación)

Clasificación	Función	Compuestos
Aditivos para el control de la hidratación	Suspenden y reactivan la hidratación del cemento con un estabilizante y activador.	Ácidos carboxílicos, sales orgánicas.
Reductores de permeabilidad	Incrementan la permeabilidad	Látex, estearato de calcio.
Ayudantes de bombeo	Mejora el bombeo	Polímeros orgánicos y sintéticos, floculantes orgánicos.
Retardantes	Retardan el tiempo de sellado	Bórax, azúcares, ácido tartárico.
Superplastificantes – Manejadores	Incrementan el flujo del concreto y reducen la relación agua/cemento	Policarboxilatos
Reductores de agua	Reducen el contenido de agua en menos del 5%	Lignosulfonatos, carboxilatos, ácidos carboxílicos hidroxilados
Reductores de agua rango medio	Reducen el contenido de agua entre el 6%-12% sin retardantes.	Lignosulfonatos, policarboxilatos.

Fuente: P AITCIN. R FLATT. Science and technology of concrete admixtures.

1.3.1.2 Reductores y manejadores. Debido a la delimitación del proyecto se enfatizará en los aditivos reductores y manejadores. Los aditivos reductores permiten la disminución del agua de mezclado sin sacrificar la manejabilidad del mortero, son denominados plastificantes a causa de su efecto en la disminución de la viscosidad del mortero y por ende en el aumento del estado plástico de la mezcla a una menor Ra/c. Su composición química se basa en el naftaleno, la melanina o los policarboxilados³⁰. Para lograr el aumento en la fluidez del mortero estos aditivos rompen las altas fuerzas de adhesión entre el agua y el cemento al iniciar la hidratación (flóculos), esto puede llevarse a cabo mediante la repulsión electrostática o la repulsión estérica (Imagen 5).

La repulsión electrostática basa su principio físico en el que dos cuerpos cargados eléctricamente con cargas del mismo signo se repelen³¹, enfocando esta propiedad al estudio del mortero el aditivo reductor o plastificante crea una superficie en contacto con el cemento de la misma carga iónica que la del agua presente en el medio, limitando el rápido contacto del agua con el cemento y permitiendo que una mayor proporción del agua de mezclado aporte la fluidez demandada para la aplicación requerida.

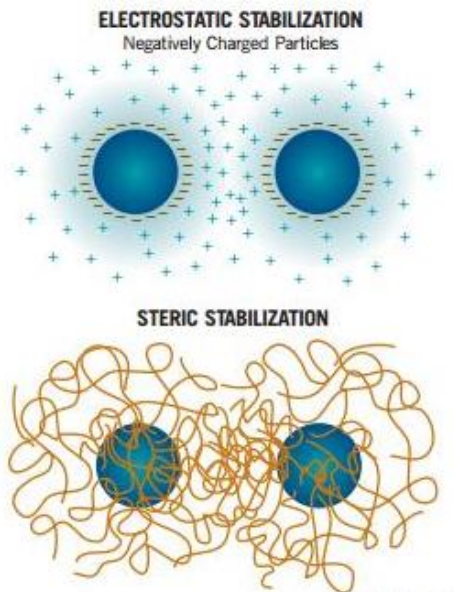
La repulsión estérica (Imagen 5) es característica de los aditivos manejadores o superplastificantes, en su composición química existe una parte hidrofílica y otra hidrófoba. La parte hidrofílica es representada por el extremo de la cadena que

³⁰ FERRAZ FABIANE, Danila. Aditivos reductores de agua para concreto premezclado. Construcción y tecnología en concreto. 2016, p 22-23.

³¹ HEWITT, Paul. Física Conceptual. PEARSON. México. 2004, 413 p.

presenta afinidad con el agua y la hidrófoba por el otro extremo que la repele y por ello se adhiere a la partícula de cemento, al presentarse gran cantidad de moléculas con esta capacidad se crea una superficie en la partícula de cemento con la misma carga pero gran parte de la cadena se encuentra presente en el medio captando o teniendo relación con el agua. Estos aditivos superan a la manejabilidad obtenida por los plastificantes debido a que aparte de generar la separación en las partículas por la repulsión inhiben la hidratación del cemento en la superficie y modifican la morfología de los productos de hidratación³².

Imagen 5. Mecanismo de repulsión electrostática y de repulsión estérica.



Fuente: PARTICLE SCIENCES.
Physical Stability of Disperse
Systems

³² PUERTAS, F y VÁZQUEZ, T. Hidratación inicial del cemento. Efecto de aditivos superplastificantes. Materiales de construcción, Vol. 51, n° 262. 2001, 53 p.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los métodos experimentales utilizados durante el desarrollo del proyecto, junto con los reactivos y materias primas empleadas, con el fin de cumplir los objetivos planteados. Por lo cual se contemplan: caracterización de materias primas, determinación de la relación agua cemento, determinación de la dosis de aditivo y de las propiedades de desempeño del mortero empleando las respectivas normas técnicas colombianas. Adicionalmente se presenta una descripción de los ensayos realizados con los diferentes aditivos y cementos.

2.1 MATERIALES EMPLEADOS

En esta parte del capítulo se nombran los materiales empleados durante el desarrollo del proyecto, así como la razón que llevo a su definición respecto a otras probables materias primas a utilizar.

2.1.1 Cementos. Los cementos que hacen parte del estudio se caracterizan por ser de resistencia alta inicial (Tipo III), fueron seleccionados debido a que son clientes de la empresa dedicada a la construcción y requieren de forma constante nuevos aditivos que cumplan con propiedades específicas, en lugares con condiciones ambientales variables. Estos cementos se nombraron como P y K, por lo que en el desarrollo del documento se hace referencia a ellos bajo esta nomenclatura, se muestran sus propiedades principales y su composición.

2.1.2 Agregados. Los agregados corresponden a partículas sólidas estandarizadas por parte de la empresa para sus investigaciones. Están compuestos por arena y piedras angulares planas. La arena es definida debido a su tamaño de partícula como agregado fino y las piedras como agregado medio.

2.1.3 Aditivos. La compañía produce y comercializa 20.000 toneladas al año de aditivos para el concreto entre los que se encuentran los de carácter retardantes, estabilizadores, superplastificantes, acelerantes, incorporadores de aire, reductores de retracción, inhibidores de corrosión, impermeabilizantes y activadores. El proyecto se enfoca en analizar el comportamiento de aditivos superplastificantes de carácter reductor y manejador y la mezcla entre ellos en diferentes composiciones de cemento. Los aditivos seleccionados son estudiados periódicamente por parte de la compañía dada la constante variación en la composición del cemento empleado por el cliente, sin embargo, el efecto de mezclarlos nunca ha sido investigado, razón por la cual, la compañía justifica el uso de dichas mezclas.

Para este trabajo de grado y según los intereses del departamento de investigación y desarrollo de la empresa se definieron un total de 15 aditivos, de los cuales 7 son mezclas con formulación definida con base en la experiencia de I+D , 5 son aditivos de carácter manejador y 3 de carácter reductor. El número de aditivos empleados fue definido teniendo en cuenta su composición química y los nuevos

comportamientos en su estructura química al ser mezclados. En la tabla 8 se muestra la nomenclatura de los aditivos y mezclas utilizadas, así como su principal característica.

Tabla 8. Aditivos y mezclas.

Tipo de aditivo		Referencia	Formulación (%)	
REDUCTOR	Permite obtener manejabilidad especificada en función del asentamiento empleando una relación agua cemento menor a la del mortero formulado sin aditivo, sin afectar la configuración del material.	AR7	100	
		AR40	100	
		AR3	100	
MANEJADOR	Incrementa el flujo del mortero y reduce la relación agua cemento requerida para esto.	AM6	100	
		AM67	100	
		AM65H	100	
		AM80	100	
		AM65	100	
MEZCLAS	Formulación (%)			Nomenclatura
	AR40	AM67	AM65H	
	25	75	-	AR75M
	50	50	-	AR50M
	75	25	-	AR25M
	25	18	57	AR18M5
	25	57	18	AR57M1
	50	12,5	37,5	AR12M3
50	37,5	12,5	AR37M1	

Fuente Sika Colombia S.A.S.

2.1.4 Reactivos. Además de los cementos y aditivos expuestos con anterioridad, se emplearon dos reactivos. El primero fue el agua, se obtuvo de la línea de acueducto de la empresa, por lo cual es de carácter potable sin concentración apreciable de sales o compuestos orgánicos. El segundo fue el querosene, el cual es de carácter comercial y fue empleado para la determinación de la densidad del cemento.

2.2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

La caracterización de los componentes que hacen parte del mortero se realizó determinando las propiedades físicas y químicas de interés en los mismos.

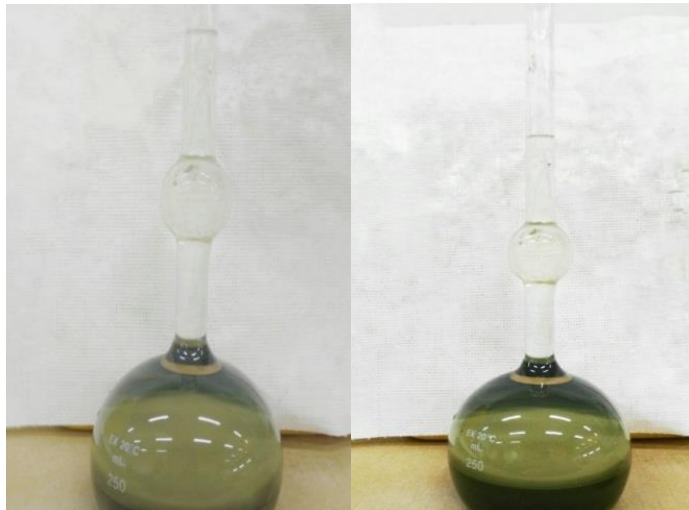
2.2.1 Propiedades de los cementos. La densidad y la fluidez de los cementos P y K se establecieron a partir de la NTC 221 y la NTC 111 respectivamente. Tomando la fluidez del cemento como patrón de la fluidez del mortero ante los aditivos y la mezcla de los mismos empleados.

2.2.1.1 Densidad. Para la densidad se inició agregando queroseno hasta un nivel entre las marcas de graduación (0-1 ml) del frasco LE CHATERIER, este fue depositado en un recipiente con agua a una temperatura de 23.1 °C por un periodo de 15 min. Posterior a los 15 min se tomó la primera lectura ($V_{inicial}$) del nivel de queroseno en el frasco LE CHATERIER, teniendo especial cuidado en su dosificación con el fin de que no se adhiriera a las paredes ni se tapone el cuello se incorporaron 64.01 g del respectivo cemento al frasco LE CHATERIER. Tapando el frasco se empezó a retirar el aire atrapado por medio de movimientos circulares de la base en torno a una superficie hasta observar que las burbujas dejaron de ascender. De nuevo se deposita el frasco en baño de agua a 23.1°C durante 15 min, tiempo después del cual se determina el punto al cual subió el queroseno con el cemento del frasco LE CHATERIER el cual se denomina V_{final} (Imagen 6). El cálculo de la densidad es realizado en el capítulo de resultados por medio de la ecuación 1 de la NTC 221 mostrada a continuación.

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa del cemento (g)}}{\text{Volumen desplazado (cm}^3\text{)}} = \frac{\text{masa del cemento (g)}}{V_{final} - V_{inicial} (cm^3)}$$

Ecuación 1. Cálculo de densidad del cemento hidráulico NTC 221.

Imagen 6. LE CHATERIER con muestra de cemento P y K.



Fuente: elaboración propia.

2.2.1.2 Fluidéz. La fluidez del cemento fue determinada empleando el procedimiento y la ecuación 2, descrita en la NTC 111. Para ello, inicialmente se prepararon los morteros mezclando a una relación agua cemento de 0.29 – 0.33 y 0.37, con 400 gramos de cemento (P o K), este rango es empleado dado que se busca tener en cuenta la diferente demanda de agua en los cementos para posteriormente ser relacionado con su finura, y agregados finos en una maquina Hobart durante 5 minutos. La mezcla homogenizada se agrega en dos partes a un

molde metálico troncocónico el cual es ubicado en el centro de las marcaciones de la mesa de flujo a primera capa se añade hasta aproximadamente la mitad del molde y por medio de 25 golpes en forma circular se compacta el material para después agregar la cantidad necesaria para llenar el molde en su totalidad y ser compactado de nuevo. Al observar la parte superior del molde sin espacios vacíos este es retirado en un solo movimiento, para después generar 25 golpes en la mesa de flujo. Al terminar los ciclos se mide el diámetro resultante 4 veces por medio de un calibrador pie de rey empleando las marcaciones, obteniendo así el diámetro promedio requerido para calcular el porcentaje de fluidez mediante la ecuación 2. El procedimiento es repetido para todas las dosis de agua nombradas anteriormente y los dos cementos en estudio.

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{\text{Diámetro promedio} - A}{A} * 100$$

Ecuación 2. Fluidez NTC 111.

Imagen 7. Molde en mesa de flujo para cemento.



Fuente: elaboración propia.

Posterior al paso mostrado en la imagen 7 se retira el molde metálico y acciona la mesa como se describió anteriormente.

2.2.2 Composición química de los cementos. Una leve variación en la composición química del cemento puede generar cambios considerables en su comportamiento al reaccionar con compuestos como el agua o los aditivos policarboxilados. De forma análoga la cantidad de cada fase representativa del cemento genera diferentes reacciones de hidratación y variaciones en la resistencia

del mortero. Por lo cual es fundamental determinar los elementos químicos y su cantidad presente en los cementos en estudio así como las fases y sus porcentajes, para esto se utilizaron las técnicas de Fluorescencia de Rayos X (FRX) y Difracción de Rayos X (DRX). La empresa no cuenta con el equipo necesario para realizar estos ensayos, por lo cual fueron realizados por ALPHA1 S.A. laboratorio externo.

2.2.2.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX). Técnica de espectroscopia que puede ser empleada en sólidos, polvos o líquidos viscosos y en la cual al incidir rayos X se genera emisión de energía a causa del salto de electrones de los átomos pasando de estado basal a inestable, estos cambios energéticos son únicos de cada átomo por lo que a partir de esta energía es posible determinar la composición de la muestra en estudio³³. El resultado expresa el porcentaje de los compuestos y sus elementos presentes en el cemento analizado a partir del espectro resultante de la muestra.

Respecto al tratamiento se busca que la superficie sea homogénea. Inicialmente la muestra de cemento se somete a un calentamiento durante 12 horas a 110°C, esto para alcanzar el estado de base seca. Después en un crisol por medio del fundente en este caso tetraborato de litio ($\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$) ingresa a calcinación por 1 hora a 1200 °C con el fin de eliminar la materia orgánica presente y obtener la perla³⁴. Esta perla es soportada por moldes metálicos que permiten incidir el láser que emite los rayos x por un orificio circular. La selección debe garantizar una muestra representativa del material debido a que el espectrómetro analiza la capa superficial de la muestra³⁵. El equipo empleado es el Axios max del fabricante Panalytical (Imagen 8).

2.2.2.2 Difracción de Rayos X (DRX). Técnica experimental utilizada para sustancias con disposición atómica regular que permite conocer el estado amorfo o cristalino de una sustancia, a partir de la emisión de rayos X ($\lambda = 0.1 \text{ nm}$) con constante variación del ángulo de incidencia y el ángulo de difracción a la muestra y posterior reflexión por difracción de los mismos a un detector obteniendo un difractograma de rayos X, en el que se relaciona la intensidad de rayos X difractados en función de un ángulo de incidencia, más el de difracción (2θ)³⁶. El procedimiento requerido para el tratamiento de la muestra es el mismo descrito para la Fluorescencia de Rayos X

³³ MELÉNDEZ PIZARRO, Carmen y CAMACHO DÁVILA, Alejandro. Espectrometría de Fluorescencia de Rayos X. Revista Aventuras del Pensamiento. Enero-Marzo 2009, 2 p.

³⁴ ROMERO BLANCO, Fernando. Caracterización elemental y estructural de cementos tipo I. Trabajo de grado. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de ciencias. 2015, p 29-32.

³⁵ BROUWER, Peter. Theory of XRF. Getting acquainted with the principles. Holanda. PANalytical B.V. 2010, 39 p.

³⁶ TRIVIÑO, F. Difracción de Rayos X. Aplicaciones a la calidad en construcción. Revista Materiales de Construcción. Vol.24, p 63-65.

Imagen 8. Equipo FRX Axios max.



Fuente ROMERO BLANCO, Fernando. Caracterización elemental y estructural de cementos tipo I.

2.2.3 Caracterización de los agregados. Los agregados utilizados en el proyecto corresponden a una mezcla de agregados finos y medios utilizados por la compañía en todos sus estudios. Por lo cual fue necesario realizar granulometría, densidad y absorción de los mismos. A continuación, se menciona cada uno de los procedimientos utilizados para cada ensayo.

2.2.3.1 Granulometría. La granulometría se realizó tamizando 1814.5 g de agregados finos y medios en proporción 1:1 durante 20 min por medio de las mallas 4-8-16-30-50-70-100 y 200 que se muestran en la imagen 9. Seguido a este tiempo se pesó la masa retenida en cada tamiz, con el fin de calcular los diámetros medios de superficie-volumen, masa, volumen y aritmético de las partículas. Definiendo como agregados medios los pasantes de las mallas 4-8-16-30 y finos los pasantes de las mallas restantes.

Imagen 9.
Tamizadora con
las mallas
empleadas



Fuente: elaboración propia.

2.2.3.2 Densidad y absorción. Empleando el procedimiento basado en la NTC 237 se hallaron la densidad aparente, densidad de base saturada superficialmente seca y densidad nominal. Las cuales fueron determinadas para los agregados medios y los agregados finos.

Para ello se inició tamizando 1600 g de agregados en las mallas 8-16-30-50-70-100 y 200 durante 20 min con el fin de obtener 800 g de cada tipo. Después de ello se agregó agua al material hasta cubrirlo en su totalidad en un recipiente metálico, el cual es almacenado en cuarto humedo durante 24 h. Luego de este tiempo se procede a retirar el agua que no fue absorbida por el material y se inicia calentamiento hasta obtener el material en estado superficialmente seco. Para verificar que el material se encuentre en esta condición se emplea un molde metálico troncocónico de 40 mm de diámetro interno superior el cual es llenado con el material y posteriormente apisonado con un pistón metálico de superficie circular plana desde una altura aproximada de 5mm respecto a la altura del molde por 25 veces. Si al retirar el molde la parte exterior del cono formado por el material se derrumba pero se conserva su forma la condición de superficialmente seco fue alcanzada, se busca esta condición debido a que en ella todos los poros del agregado se encuentran llenos de agua pero su superficie no tiene humedad.

Por medio de un picnómetro de 500 ml se determinan las densidades y el porcentaje de absorción, inicialmente se pesa el picnómetro vacío para luego ser llenado en

una tercera parte por agua a 23.1°C. Se agregan 500 g de material superficialmente seco (S) al picnómetro teniendo cuidado en la dosificación del mismo para evitar que el material se quede adherido al cuello. Se incorpora el agua restante para llenar el un 90% la capacidad del frasco y se retira el aire presente por medio de movimientos circulares, cuando no se observe el ascenso de burbujas de aire se completan los 500 ml con agua a 23.1°C, esto se muestra en la imagen 10 y se pesa el picnómetro (C). El picnómetro es vaciado y su contenido ingresa por mínimo 24 h al horno a una temperatura de 110°C hasta obtener peso constante (A). Por último se pesa el picnómetro lleno con agua a 23.1°C hasta la graduación (B).

Imagen 10. Picnómetro con agregados finos y medios



Fuente: elaboración propia.

2.2.4 Propiedades de los aditivos y sus mezclas. Respecto a la caracterización de los aditivos y sus mezclas se utilizaron procedimientos establecidos por la empresa, los cuales fueron usados para determinar el porcentaje de sólidos, viscosidad, densidad y color. Estas propiedades permiten la identificación de los aditivos, la estandarización para control de calidad y aún más importante, explicar la forma en que los aditivos actúan en el mortero. Esto último, debido a que permiten tener indicios sobre la naturaleza química del aditivo, en el caso de altas

viscosidades se presenta un polímero de alto peso molecular, el cual al tener alto contenido de sólidos genera información sobre la distribución de sus cadenas³⁷.

2.2.4.1 Porcentaje de sólidos. Utilizando el equipo determinador de humedad (Imagen 11) se determinó el porcentaje de sólidos de los aditivos y sus mezclas a 150°C. Para ello se agregaron 40 g de la muestra en estudio a una base metálica, esparciendo la muestra de forma circular. La base metálica se ingresa al determinador de humedad y se baja su tapa para que el equipo inicie su funcionamiento, después de aproximadamente 10 minutos el equipo muestra el porcentaje de sólidos (%D) de la muestra en estudio.

El funcionamiento del determinador de humedad radica en un principio de pérdida de masa al evaporar el agua presente en la muestra a la temperatura programada y registrar constantemente está perdida.

Imagen 11. Equipo determinador de humedad marca KERN referencia MLS-D



Fuente: elaboración propia.

2.2.4.2 Viscosidad. La viscosidad se obtiene por medio del viscosímetro BROOKFIELD'S DV-II+ Pro, el cual se muestra en la imagen 12, teniendo en cuenta tanto el número de aguja como la velocidad de giro que genera un torque cercano al 50%. Para ello se añaden 250 g del aditivo en un recipiente de vidrio con tamaño de boquilla que permita ingresar la aguja, se programa la velocidad de torque y el número de aguja empleada

³⁷ PALACIOS, M; SIERRA, C y PUERTAS F. Métodos y técnicas de caracterización de aditivos para hormigón. Madrid. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. 2012, p 90-91.

Imagen 12. Viscosímetro
BROOKFIELD'S DV-II+Pro



Fuente LabX. Brookfield
viscometer viscosity meter dv ii
pro w warranty.

2.2.4.3 Densidad. Por medio de un densímetro portátil DMA 35 Ex de la marca ANTON-PAR (Imagen 13) se especificaron las densidades de los aditivos y sus mezclas. El procedimiento consiste en realizar 5 purgas absorbiendo agua destilada con el fin de limpiar la sonda que hace parte del instrumento, posterior a ello se realizan 3 purgas con el aditivo. Para absorber una última vez el aditivo y al dejar estabilizar la medición obtener su densidad.

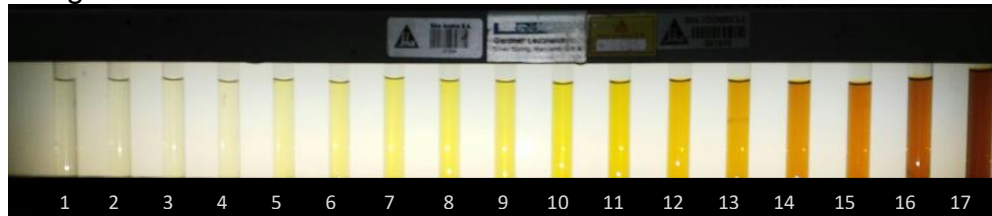
Imagen 13. Densímetro
portátil DMA 35 Ex



Fuente Scientific sales. Density &
Specific Gravity. ANTON PAAR USA
INC. HOUSING RUBBER FOR DMA 35
DENSITY METER.

2.2.4.4 Color. Empleando la escala de Gardner mostrada en la imagen 14 se definió el rango de color de los aditivos y sus mezclas. Para ello se agregó 25 ml del aditivo en un tubo de ensayo y visualmente se ubicó al color más cercano en la escala para posteriormente encender la luz y evidenciar el resultado.

Imagen 14. Escala de Gardner.



Fuente: elaboración propia.

2.3 RELACIÓN AGUA CEMENTO

Estimando el flujo del mortero a los 5 min se definió la relación agua/cemento común para los dos cementos en estudio. Por lo cual se inició mezclando 400 g del respectivo cemento, 900 g de agregados y la cantidad de agua correspondiente a la relación agua/ cemento a definir. Las Ra/c fueron 0.25 (100 g de agua), 0.29 (116 g de agua), 0.33 (132 g de agua) y 0.37 (148 g de agua), estas con el fin de contemplar los diferentes requerimientos de agua por parte del cemento, todo lo anterior con base en la experiencia de la empresa con diferentes tipos de cementos. El flujo fue establecido empleando la mesa de flujo y el procedimiento establecido por la NTC 111 descrito en el numeral 2.1.1 del presente documento. Es fundamental recordar que en el capítulo de marco teórico numeral 1.1.5 se describe la importancia de la relación agua cemento en el mortero.

2.4 PRUEBA DE LA CULEBRILLA

La prueba de la culebrilla permite definir la dosis de aditivo para el mortero. Consistió en que a partir de la Ra/c definida anteriormente para cada tipo de aditivo se mide el flujo inicial del mortero empleando dosis de 0.11 – 0.13- 0.15-0.17- 0.19- 0.21 y 0.25 de un aditivo referencia (AR7) empleado por la compañía con el fin de generar la curva característica de la prueba de la culebrilla. El flujo fue medido empleando la NTC 111 procedimiento que se encuentra especificado en el numeral 2.1.1 del presente documento.

2.5 PROPIEDADES DE DESEMPEÑO DEL MORTERO

Teniendo en consideración la demanda de resistencia a la compresión, manejabilidad y tiempo de fraguado en el material por parte del cliente se realizaron los métodos y procedimientos experimentales necesarios para ejecutar la estimación de la resistencia a la compresión, fluidez y tiempo de fraguado. Esto fue realizado tanto para los aditivos como para sus blancos analíticos.

2.5.1 Manejabilidad. Para especificar la capacidad del mortero para ser aplicado y la facilidad en su transporte al lugar requerido se estimó su fluidez hasta un tiempo de 90 min en el blanco analítico, aditivos reductores, aditivos manejadores y sus mezclas según la tabla 9.

Es importante aclarar que las mezclas realizadas se formularon con base en especificación de flujo intermedio por parte del cliente, por lo cual se requiere una manejabilidad inicial entre 11 cm y 13 cm, con esto se definieron los aditivos AR40 - AM67 – AM65H como los componentes que hacen parte de las mezclas (Tabla 9). Se establecieron en relaciones 1:3, 1:1 y 3:1 en el caso de las mezclas con dos aditivos. Para las mezclas con tres componentes, inicialmente se buscó analizar el comportamiento de una mayor concentración de los aditivos manejadores en el reductor definido AR40, para después estudiar el efecto de mayor concentración del aditivo reductor sobre los manejadores.

El procedimiento empleado fue el descrito en el numeral 2.2.1.2 respecto al flujo inicial, posterior a ello el mortero se dejó en reposo durante 10 min cubriéndolo con un paño húmedo, tiempo después del cual se homogenizó en la maquina mezcladora durante 30 segundos y se volvió a medir su flujo. Este procedimiento se repitió a los 5-15-30-60- 90 minutos para evidenciar tanto en plazos cortos como en un tiempo prolongado el comportamiento de la hidratación de las diferentes fases del cemento y su relación con el aditivo empleado.

Tabla 9. Mezclas de aditivos.

Tipo de aditivo	Referencia	Formulación (%)		
REDUCTOR	AR7	100		
	AR40	100		
	AR3	100		
MANEJADOR	AM6	100		
	AM67	100		
	AM65H	100		
	AM80	100		
	AM65	100		
MEZCLAS	Formulación (%)		Nomenclatura	
	AR40	AM67	AM65H	
	25	75	-	AR75M
	50	50	-	AR50M
	75	25	-	AR25M
	25	18	57	AR18M5
	25	57	18	AR57M1
	50	12,5	37,5	AR12M3
50	37,5	12,5	AR37M1	

Fuente Sika Colombia S.A.S.

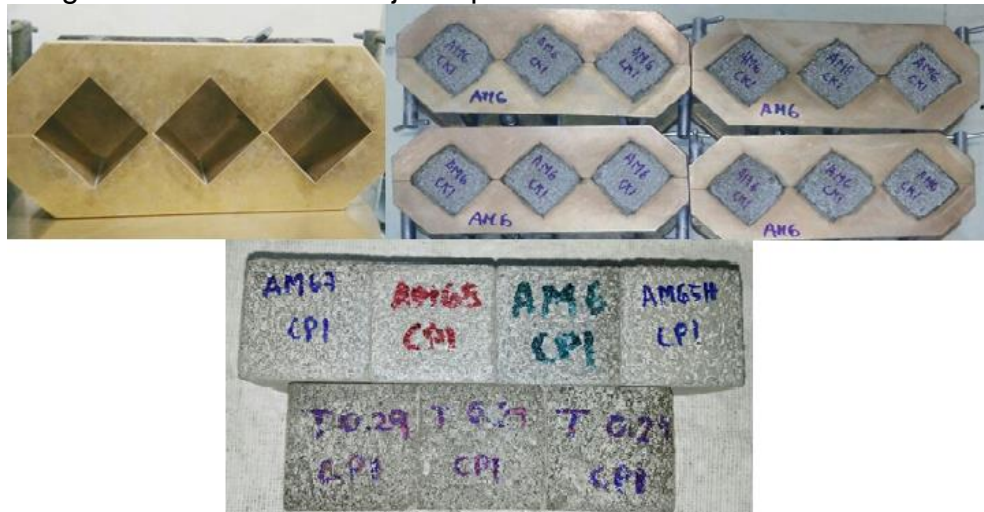
2.5.2 Resistencia a la compresión. Inicialmente se pesó la dosis aditivo definida por la prueba de la culebrilla, la cual se homogeniza con la cantidad de agua (relación agua cemento). Después se adicionaron 800 g de cemento (P o K) y 1800

g de agregados a la maquina mezcladora para ser incorporados durante 30 segundos.

Después de los 30 segundos se añadió la mezcla de agua-aditivo en pocas cantidades a la maquina Hobart la cual contenía previamente la mezcla de cemento y agregados, después de incorporar la totalidad del agua y aditivo se homogenizo el mortero durante 5 minutos. El mortero se incorpora en moldes metálicos que permiten obtener 3 probetas cubicas de 50mm x 50mm, primero se agrega la mitad del material necesario para llenar el cubo y se apisona 16 veces en dos sentidos después se agrega la cantidad faltante y se compacta de igual forma. Al completar los tres cubos del molde se retira el aire del mortero, para ello se realizan 3 golpes en cada esquina desde 5mm respecto a una superficie plana. El procedimiento se muestra de forma resumida en la Imagen 15.

Los moldes se dejan a temperatura ambiente por 24 horas para su proceso de fraguado, tiempo después del cual se retiran las probetas cubicas y se dejan en reposo durante 1 hora para después ser sometidas a una resistencia a la compresión en la prensa hidráulica Controls 50-050 (Imagen 16).

Imagen 15. Proceso montaje de probetas cúbicas.



Fuente: elaboración propia.

Imagen 16. Prensa hidráulica Controls 50-050.



Fuente: elaboración propia.

Para ello se configuran las medidas de la probeta, así como el tipo (cubica-cilíndrica) y el ensayo a realizar (compresión – tensión). Configurado previamente los ajustes del ensayo se ubica la probeta en el molde cúbico y se acciona la prensa (Imagen 17), cuando la probeta es destruida en su totalidad el equipo registra la presión ejercida, los valores se dan en MPa.

Imagen 17. Proceso de compresión en prensa hidráulica.



Fuente: elaboración propia.

2.5.3 Calorimetría. Implementando los resultados del análisis de calorimetría se analizaron los tiempos de fraguado producto de la reacción de hidratación de los cementos con el agua y su interacción con los aditivos en estudio. Por medio de un software propio de la compañía denominado SEMAMENT se obtuvieron las curvas de calorimetría a partir de la medición en el cambio de temperatura de una muestra

de 400g del mortero respecto al tiempo. El calorímetro empleado es de tipo semi adiabático el cual tiene en cuenta el calor acumulado en el equipo y la pérdida de calor a la atmósfera.

Inicialmente se preparó la muestra, para ello se mezclaron 800 g de agregados con el agua requerida dependiendo del tipo de aditivo, la dosis de aditivo y por ultimo 400 g del cemento P o K. En el recipiente cilíndrico de calorimetría se agregaron 400 g del mortero previamente mezclado, por medio de golpes en superficie plana se retiró el aire del recipiente y se compactó la muestra, esto con el objetivo de que la termocupla del equipo registre adecuadamente los cambios térmicos en la mezcla. Se ingresó el recipiente en el calorímetro y se inició el software configurando el tipo de mezcla ingresada, las unidades de medición y el tiempo, las muestras fueron analizadas por un mínimo de 20 horas o hasta no observar incrementos en la temperatura en la curva. El procedimiento se muestra en la Imagen 18.

Imagen 18. Procedimiento de calorimetría en mortero.



Fuente: elaboración propia.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas y métodos experimentales, a partir de los cuales se realiza principalmente el análisis de desempeño del mortero ante la composición química de los cementos utilizados y las mezclas de aditivos. Sin dejar de lado aspectos como la Ra/c definida dependiendo del tipo de aditivo, la dosis de los mismos y sus propiedades físicas, el tamaño de partícula de los agregados, su densidad y capacidad de absorción.

3.1 CEMENTOS

Como se mencionó con anterioridad, los morteros fueron formulados con dos cementos de diferentes fabricantes en el país, son tipo III por lo cual la NTC 30 los clasifica como cementos de resistencia alta inicial. De forma análoga la NTC 321 determina los porcentajes máximos permitidos en su composición de elementos como el MgO, SO₃, CaO y el Al₂O₃ los cuales son mostrados en la tabla 2 del capítulo 1.

3.1.1 Densidad. Empleando la ecuación 1 del capítulo 2, se calculó la densidad del cemento P y K a partir de las mediciones obtenidas empleando el procedimiento del numeral 2.1.1.1 del presente documento.

$$\rho_P = 3.08 \frac{g}{cm^3}$$

Ecuación 3. Densidad del cemento P.

$$\rho_K = 3.04 \frac{g}{cm^3}$$

Ecuación 4. Densidad del cemento K.

Las densidades obtenidas para el cemento P y K fueron 3.08 g/cm³ y 3.04 g/cm³ respectivamente, estas presentan una variación considerable respecto a la densidad normalizada de 3.11 g/cm³, estas diferencias son importantes porque representan un indicador de calidad para el constructor en cuanto al comportamiento a largo plazo del material, en el caso del cemento K la reducción en su densidad permite evidenciar la presencia de adiciones. Las adiciones son utilizadas para facilitar la tecnología en la producción del cemento en procesos de molienda, cumplir especificaciones de resistencias a bajo costo y para cementos cuyas propiedades dificultan su aplicaciones en obras marítimas y presas³⁸. Sin embargo los cementos adicionados muchas veces son obtenidos por razones económicas, puesto que tanto en su composición como en el proceso de fabricación se agregan materias primas que son subproductos con el fin de generar mayor masa

³⁸ CALLEJA, José. Adiciones y cementos con adiciones. Madrid. Materiales de construcción. 1983, p 25-27.

y energía potencial que reduce el calor requerido en la clinkerización. Generando reducción de costos para el fabricante pero un decremento en las propiedades obtenidas por el cliente.

Por otro lado la baja densidad es un indicador de la relación entre la masa y el volumen del cemento, por lo cual al ser menor indica que el volumen del cemento K es mayor a una masa determinada. Al incrementar su volumen propiedades como la fluidez y la resistencia pueden ser mejores lo que podría indicar que estas propiedades tendrán mejores comportamientos en el cemento K.

3.1.2 Fluidez. Empleando la mesa de flujo y el molde metálico de 100 mm de diámetro real (A) se obtuvo el diámetro promedio a partir del cual se calculó la fluidez de los cementos con la ecuación 2 del capítulo 2. Esto a una Ra/c de 0.37 , ya que a otras relaciones el flujo inicial fue muy similar entre los morteros.

$$\% \text{Fluidez}_P = 58 \%$$

Ecuación 5. Fluidez cemento P.

$$\% \text{Fluidez}_K = 64 \%$$

Ecuación 6. Fluidez cemento K.

Los resultados muestran que el cemento K tiene un 6% más de fluidez respecto al cemento P. Por lo cual es un cemento que permitirá mayor manejo y tiempo de transporte por parte del cliente, sin embargo la cantidad de agua requerida para que el material tenga este comportamiento es elevada y representaría disminución en la resistencia a la compresión. Otro aspecto a considerar es que cuando se emplean relaciones agua cemento menores a 0.37 los cementos tienen prácticamente el mismo comportamiento en cuanto a su fluidez inicial (Tabla 10), por lo que escoger alguno de estos cementos no puede obedecer solo a la búsqueda de alta manejabilidad, dependerá de otras propiedades como su resistencia mecánica o tiempo de fraguado. Recordando que los morteros en los que se hace énfasis no contienen aditivos en su composición y que al ser incorporados sus comportamientos variarían considerablemente.

En la tabla 10 se muestran los resultados de fluidez, en donde las relaciones agua cemento tanto en el cemento P como K inferiores a 0.29 generan un mortero seco con alta dificultad de manejo y al aumentar la cantidad de agua para una relación agua cemento de 0.42 conduce a la saturación (Sat) del mortero, convirtiéndolo en un material inservible.

Tabla 10. Fluidez de los cementos a diferentes Ra/c

R a/c	Cemento P					Cemento K				
	0,25	0,29	0,33	0,37	0,42	0,25	0,29	0,33	0,37	0,42
Flujo inicial (cm)	7.5	10	12.2	15.8	19.4	7	10	12,2	16,4	19,4
Flujo a los 15 min (cm)	Seco	9.9	11.7	15.7	Sat	Seco	9.8	12.2	16.2	Sat
Flujo a los 30 min (cm)	Seco	9.3	11.5	15	Sat	Seco	9.7	11.9	15.4	Sat
Flujo a los 60 min (cm)	Seco	Seco	11	14.1	Sat	Seco	9.5	11.3	15.3	Sat
Flujo a los 90 min (cm)	Seco	Seco	10.5	14	Sat	Seco	9.4	10.9	15.1	Sat
% Fluidez	-	-	22	58	94	-	-	22	64	94

Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Composición química. Como se definió anteriormente las técnicas para determinar los elementos, compuestos y fases del cemento , así como la cantidad de las mismas fueron la Fluorescencia de Rayos X y Difracción de Rayos X. A continuación se presentan los resultados obtenidos con cada una.

3.1.3.1 Fluorescencia de Rayos X (FRX). La cantidad de los elementos y su respectivo compuesto presentes en los cementos se muestran a continuación en la Tabla 11.

Tabla 11. Reporte FRX cemento P y K ALPHA1 S.A.

Elemento	Compuesto	Composición Cemento	
		P (%)	Cemento K (%)
Sílice	SiO ₂	34,78	34,5
Titanio	TiO ₂	0,2	0,25
Aluminio	Al ₂ O ₃	3,7	4,75
Hierro	Fe ₂ O ₃	2,6	2,61
Manganeso	Mn ₃ O ₄	0,16	0,11
Magnesio	MgO	0,44	0,42
Calcio	CaO	51,68	49,72
Potasio	K ₂ O	0,56	0,71
Fosforo	P ₂ O ₅	0,22	0,22
Azufre	SO ₃	1,76	2,17
Vanadio	V ₂ O ₅	0,01	0,01
Cromo	Cr ₂ O ₃	0,01	-
Estroncio	SrO	0,08	0,07
Zirconio	ZrO ₂	0,01	0,01
Bario	BaO	0,02	0,07
Cobre	CuO	-	0,01
Zinc	ZnO	0,01	0,02
Perdida	LOL	4,14	4,72

Fuente: elaboración propia.

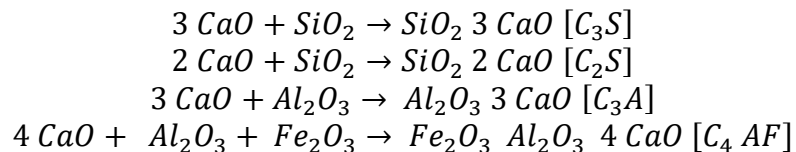
En la tabla anterior se muestran los resultados del análisis cuantitativo de los cementos, en ella se pueden analizar tanto los componentes mayoritarios como minoritarios. Los componentes mayoritarios que constituyen las fases del cemento después de hidratación son Al_2O_3 , Fe_2O_3 y el CaO . Su comportamiento en los cementos se analiza a continuación:

Trióxido de dialuminio o alúmina (Al_2O_3) - A: Su relación es directa en la formación del aluminato tricálcico (C_3A) dado que al mezclarse con el yeso se forma este compuesto, el cual tiene alta influencia en el comportamiento del mortero en cuanto al tiempo de fraguado, el calor de hidratación y durabilidad del material³⁹. Por lo cual el cemento K al tener mayor cantidad de Al_2O_3 evidenciará por medio de la calorimetría mayor temperatura en un menor tiempo de fraguado, sin embargo la cantidad no difiere en gran medida al cemento P por lo cual la diferencia no será significativa.

Óxido de hierro (Fe_2O_3) – F: Este compuesto proviene del mineral de hierro presente en la arcilla empleada previa a la molienda. Los cementos en estudio presentan cantidades de este compuesto muy cercanas, la influencia del óxido de hierro en las propiedades de desempeño es causada por la presencia de altos contenidos de ferroaluminato tetracálcico, debido a que retrasa el fraguado sin embargo no presenta aporte a la resistencia mecánica del material.

Óxido de calcio (CaO) – C: Es el compuesto presente en los cementos en mayor cantidad, este es directamente incorporado al cemento a causa de la caliza que es molida con las arcillas o escorias del alto horno. Es fundamental para la generación de los productos presentes en el clinker :

Ecuación 7. reacciones desarrolladas en la clinkerización



En el sistema de reacción mostrado anteriormente se evidencia que el reactivo común es el óxido de calcio, a mayor cantidad de este compuesto se incrementa la composición de CaO en el C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF del cemento. La fluorescencia muestra que el cemento P contiene mayor cantidad de CaO sin embargo no es posible determinar el porcentaje de este compuesto en cada producto de clinkerización lo cual confiere propiedades específicas al material por la cantidad de óxidos y aluminatos generados.

Respecto a los componentes minoritarios :

³⁹ CALLEJA CARRETE, Jose y FERNANDEZ PARIS, Manuel. Observaciones acerca de la determinación de alúmina en cementos. Materiales de construcción. 1983, p 25-28.

Dióxido de titanio (TiO_2): En los dos cementos se muestra una cantidad de este compuesto menor al 0.3% y muy cercano entre ambos. A valores más elevados del 0.5% se disminuye la resistencia mecánica del material⁴⁰, por lo cual al estar a un menor valor no se presentara disminución en la resistencia a la compresión por acción del TiO_2 .

Óxido de manganeso (Mn_3O_4): La Presencia de este óxido a un valor mayor al 3% genera disminución en las resistencias a largo plazo (28 días)⁴¹, sin embargo la fracción de este compuesto en los cementos es muy baja y cercana entre sí. Lo que permite inferir que esta resistencia no se verá afectada por este compuesto.

Óxido de magnesio (MgO): Si se excede este compuesto al 1% es posible que se genere una reducción en la resistencia del material o degradación del mismo, en este caso los cementos tienen valores cercanos al 0.5%, esto argumentado en que al hidratarse el cemento se lleva a cabo una reacción de baja velocidad indeseable que genera $\text{Mg}(\text{OH})_2$ el cual aumenta el volumen junto a las partículas de periclusa⁴².

Álcalis: Los cementos no tienen dióxido de sodio (Na_2O), pero si un porcentaje entre el 0.5-1% de K_2O . Es fundamental controlar el contenido de álcalis en las estructuras tanto de mortero como de concreto, esto debido a que generan deterioro del material por reacción con la sílice de los agregados, esto fundamentado en la formación de geles expansivos que causa agrietamientos en el mortero⁴³. De igual forma un contenido de álcalis superior al 1% en el cemento puede generar corrosión en las estructuras de hormigón, esto causado por un incremento en el pH⁴⁴.

Pentóxido de fosforo (P_2O_5): Los cementos tienen una composición igual entre sí de 0.22% de P_2O_5 , por lo que este compuesto no puede ser punto de comparación entre los mismos en cuanto a propiedades o comportamientos de los morteros. Sin embargo si este porcentaje fuera superior al 2% el tiempo de fraguado sería mayor dado que el óxido interviene en la descomposición del C_3S a C_2S ⁴⁵.

⁴⁰ ROMERO BLANCO, Fernando. Caracterización elemental y estructural de cementos tipo I. Trabajo de grado. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias. 2015, 4 p.

⁴¹ *Ibid*, p 5.

⁴² UNIVERSIDAD DE OVIEDO. Cementos/Materias primas. Oviedo. 2012.

⁴³ MELO JIMENEZ, Johanna. Reactividad álcali-agregado (RAA): Experiencias en presas colombianas, análisis comparativo de principales variables que intervienen en el fenómeno. Tesis de Maestría. Bogotá D.C: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Artes. 2014, 24 p.

⁴⁴ ANDRADE, C y MACIAS, A. Influencia del contenido en alcalis de los cementos sobre la corrosión de armaduras galvanizadas. Madrid. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y el Cemento. 1981, p 83-85.

⁴⁵ SOROKA, Itzhak. Portland cement paste and concrete. Londres. The Macmillan Press LTD. 1979, 25 p.

Trióxido de azufre (SO₃): El cemento K contiene mayor porcentaje de SO₃, este bajo porcentaje se puede deber a la adición necesaria de yeso como regulador de fraguado al clinker durante la molienda⁴⁶. Otra razón para presentarse este compuesto es la oxidación que sucede en el horno del SO₂ por el tipo de combustible empleado para su funcionamiento⁴⁷.

Los otros compuestos detectados en la Fluorescencia de Rayos X como el vanadio, cromo, estroncio, zirconio y bario son trazas con composiciones muy bajas, por lo cual su efecto no tiene relevancia en el material. El ítem de pérdida (LOL) se refiere al porcentaje reducido a causa de la ignición en el ensayo.

En general los porcentajes de elementos minoritarios en los cementos no difieren considerablemente entre sí, de igual forma se encuentran dentro de los rangos aceptados para un cemento teórico (Tabla 12). Se puede sugerir con ello que, el comportamiento en fluidez, resistencia a la compresión y tiempo de fraguado de los morteros no tendrá variación a causa de los componentes minoritarios.

Tabla 12. Componentes minoritarios del cemento.

Elemento	Compuesto	Proporción (%)
Titanio	TiO ₂	0 – 0.5%
Manganeso	Mn ₃ O ₄	0 – 3%
Magnesio	MgO	0.1 – 4%
Sodio	Na ₂ O	0 – 1%
Potasio	K ₂ O	0 – 1%
Fosforo	P ₂ O ₅	0 – 1.5%
Azufre	SO ₃	0.1 – 2.5%

Fuente: DUDA, W.H. Manual tecnológico del cemento.

3.1.3.2 Difracción de Rayos X (DRX). Los resultados de la técnica para el cemento P y K se muestran en la tabla 13. De forma general se observa que aproximadamente la mitad en composición del cemento es alita (C₃S), seguido por un 20% de belita. Es importante destacar la presencia de óxido de calcio libre en los cementos, este es un indicador de que en el proceso de fabricación la clinkerización fue incompleta por lo cual se afecta la cantidad de este compuesto en la alita quien confiere propiedades importantes en cuanto a resistencia a la compresión temprana en el cemento⁴⁸.

⁴⁶ DE LA CRUZ, Ignacio. VAZQUEZ, Tomas. Sulfatos en el cemento Portland y su incidencia sobre el falso fraguado: Estado actual del conocimiento. Materiales de Construcción. 1983, 45 p.

⁴⁷ SANTAMARIA, Francisco. Influencia de los componentes minoritarios de los carbones en la fabricación de cementos. Materiales de Construcción. 1982, 72 p.

⁴⁸ ROMERO BLANCO, Fernando. Caracterización elemental y estructural de cementos tipo I. Trabajo de grado. Tunja: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Ciencias. 2015, 14 p.

Tabla 13. Reporte DRX cemento P y K ALPHA1 S.A.

Fase	Formula	Composición Cemento P (%)	Composición Cemento K (%)
Alita	C ₃ S	48,13	56,58
Belita	C ₂ S	20,55	15,31
Cal	CaO	0,25	0,02
Brownmillerita	Ca ₂ (AlFe)O ₅	9,35	10,07
Aluminato cúbico	C ₃ A	1,33	2,45
Ortho Aluminato	C ₃ A	1,16	2,34
Periclasa - Óxido de Magnesio	MgO	0	0,16
Arcanita - Sulfato de potasio	K ₂ SO ₄	0,61	0,9
Bassanita - Sulfato de calcio hemihidrato	CaSO ₄ /2H ₂ O	2,23	0,66
Yeso - Sulfato de calcio dihidrato	CaSO ₄ /2H ₂ O	1,74	1,6
Anhidrita - Sulfato de calcio	CaSO ₄	1,65	2,04
Portlandita - Hidróxido de calcio	Ca(OH) ₂	0,15	0,64
Calcita	CaCO ₃	8,42	5
Cuarzo	SiO ₂	4,44	2,23

Fuente: elaboración propia

Las fases y su cantidad presente en los cementos se analizan de forma general a continuación:

Alita (C₃S): El cemento K contiene un 8.5% más de alita o silicato tricálcico con respecto al cemento P, esta fase influye principalmente en la resistencia inicial del material, por lo que se espera para este cemento, que la resistencia a la compresión a las 24 horas sea mayor respecto a los morteros de cemento P. De forma análoga el desarrollo de la resistencia es más rápido, por lo que la pendiente en la curva respecto al tiempo tendrá mayor inclinación hasta los 14 días en el cemento K; Sin embargo a mayor cantidad de alita en el cemento el material presenta menos durabilidad⁴⁹, por lo cual la resistencia final del mortero con cemento P posiblemente será mayor. En cuanto al calor de hidratación la curva calorimétrica del cemento K debe mostrar mayor temperatura de hidratación, así como tiempo de fraguado menor.

Belita (C₂S): El silicato dicálcico no tiene influencia en la resistencia inicial mecánica del material. Por lo cual al tener el cemento P 5% más no debería contribuir a una diferencia en los resultados de resistencias tempranas a la compresión, sin embargo

⁴⁹ GIRALDO, Manuel. TOBÓN, Jorge. Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 2006, 80 p.

esta fase genera incrementos en las resistencias finales ⁵⁰. Respecto al proceso de hidratación al incrementar el porcentaje de belita en la composición del cemento directamente aumenta el tiempo requerido en este proceso, como consecuencia se esperaría mayor tiempo de fraguado en el cemento P esto fundamentado tanto en el bajo porcentaje de alita como en el alto porcentaje de belita en este cemento.

Brownmillerita (C_4AF): Esta fase está presente en los cementos en porcentajes bastantes cercanos, por lo cual no representa un punto diferencial por si solo entre ellos. Sin embargo analizando la influencia de la brownmillerita , la belita y la alita la resistencia inicial de los morteros con cemento K podría ser mayor, otro aspecto a considerar es el desarrollo de resistencia a una baja velocidad. El cemento P contiene menor cantidad de C_4AF lo que permite inferir que se presentara en menor proporción los fenómenos de expansión, retracción y fisuración en el material lo que con lleva mayor durabilidad en los morteros de este cemento.

Aluminato (ortho – cúbico) (C_3A) : Es la fase que genera mayor calor de hidratación⁵¹, el cemento K presenta el doble en cantidad de aluminato. Lo cual aportaría mayor temperatura en la curva de calorimetría, la resistencia inicial mayor fundamentado tanto en el aluminato como en las fases anteriores. De igual forma esta fase establece la fluidez que va a presentarse en el mortero, esto se fundamenta en que los aditivos plastificantes y superplastificantes se absorben en la superficie hidratada de los productos de reacción del C_3A ⁵², por lo que al contener mayor cantidad de esta fase la fluidez sera mayor, por lo anterior se espera que el cemento K al tener un 4.79 % sea superior al cemento P en fluidez . Finalmente, la resistencia a la compresión podría aumentar de forma gradual, generando mínimas variaciones en el desarrollo de la misma. El análisis detallado de las fases se realiza en el ítem de propiedades de desempeño.

3.2 AGREGADOS

Previo al cálculo de las propiedades de partícula de los agregados, se realizó el ensayo granulométrico, esto con el fin de obtener la distribución de tamaños. Para posteriormente a partir de su clasificación emplear el procedimiento correspondiente a la norma técnica colombiana 174.

3.2.1 Análisis granulométrico. Las masas retenidas en lo tamices descritos en el numeral 2.1.2.1 del capítulo dos y los cálculos necesarios para obtener la curva

⁵⁰ TORRES, Paola. X-SEED: Cristales para el endurecimiento rápido del concreto. BASF. Perú.2016, 2 p.

⁵¹ SÁNCHEZ, M. FRÍAS, M y RIVERA, J. Estudios sobre el calor de hidratación desarrollado en morteros con materiales puzolánicos: naturales y subproductos industriales. Materiales de construcción. España. 2000, 40 p.

⁵² GHORAB, H. KENAWI. I y ABDEL, Z. Interacción entre cementos de diferente composición y aditivos superplastificantes. Materiales de construcción. Cairo. 2012, 371 p.

característica de la granulometría se muestran en la tabla 14. En donde el porcentaje retenido se calcula como:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Masa retenida} * 100}{\sum \text{Masa retenida}}$$

Ecuación 8. Porcentaje retenido.

El porcentaje retenido acumulado se calcula como:

$$\% \text{ Retenido acumulado} = \sum_n^{n+1} \% \text{ Retenido}$$

Ecuación 9. Porcentaje retenido acumulado.

El porcentaje de pasante se calcula como:

$$\% \text{ Pasante} = 100 - \% \text{ Retenido acumulado}$$

Ecuación 10. Porcentaje pasante.

Tabla 14. Análisis granulométrico

Malla	Tamiz (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasante
4	4,75	0			
8	2,36	963,17	53,22	53,22	46,78
16	1,18	182,63	10,09	63,31	36,69
30	0,6	321,33	17,75	81,06	18,94
50	0,3	324,28	17,92	98,98	1,02
70	0,212	12,98	0,72	99,69	0,31
100	0,15	1,4	0,08	99,77	0,23
200	0,075	1,49	0,08	99,85	0,15
BASE		2,65	0,15	100,00	0,00
SUMATORIA		1809,93	100,00		

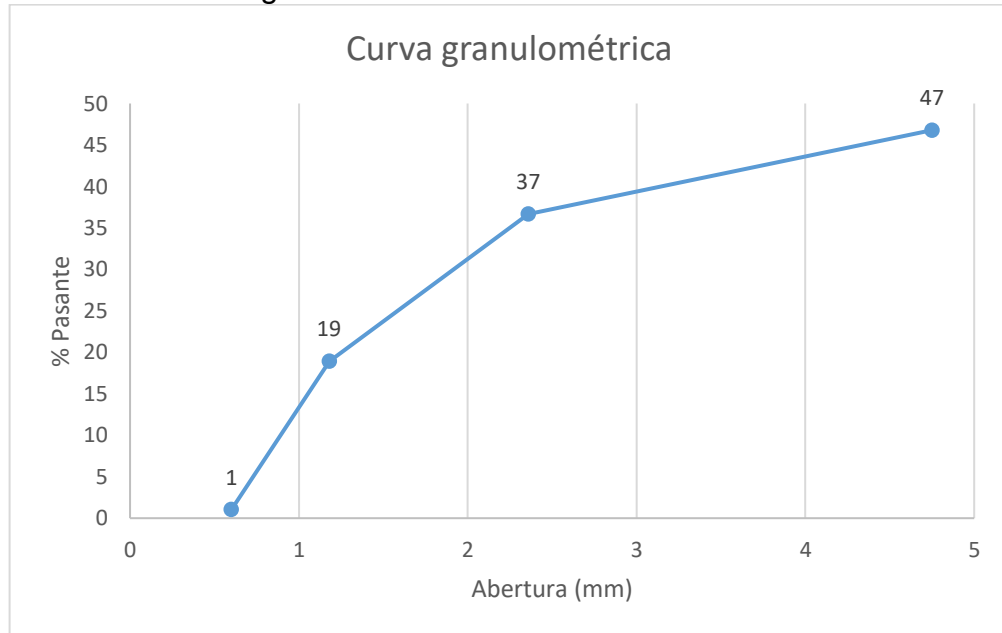
Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 14. Se construye la curva granulométrica graficando el número de malla en el eje de las abscisas y en el de las ordenadas el porcentaje (%) retenido acumulado (gráfica 2). La granulometría permite identificar diferentes aspectos:

- Todas las partículas pasan la malla 4 por lo cual tienen un tamaño de partícula inferior a los 4,75 mm y la cantidad de masa pasante malla 200 es 2.65 g por lo que el agregado se clasifica como fino según la NTC 174⁵³.
- Más del 50% de las partículas tienen un tamaño entre los 2,36 – 4,75 mm, lo que permite inferir que la resistencia mecánica del material está influenciada por los sólidos con diámetro promedio desde los 2,36 mm hasta los 4,75 mm por lo que al ser categorizado como agregado fino, es adecuado para el mortero.

⁵³ GERARDO RIVERA, A. Agregados para mortero o concreto. Concreto Simple.2002, p 41-19.

Gráfica 2. Curva granulométrica



Fuente: elaboración propia.

3.2.2 Densidad y absorción del agregado. Dado que el agregado representa la estructura del material se requiere determinar su densidad con el fin de estimar la relación masa volumen presente. Empleando el procedimiento del numeral 2.1.2.2 y dividiendo los agregados en finos y medios se obtuvo:
La densidad aparente se calculó empleando la ecuación 11:

$$D_{S \text{ aparente}} = \frac{0.9975 * A}{B + S - C}$$

Ecuación 11. Densidad aparente

La densidad aparente base saturada se calculó empleando la ecuación 12:

$$D_{S \text{ aparente SSS}} = \frac{0.9975 * S}{B + S - C}$$

Ecuación 12. Densidad aparente base saturada

Por último la densidad nominal se calculó como :

$$D_{S \text{ nominal}} = \frac{0.9975 * A}{B + A - C}$$

Ecuación 13. Densidad nominal

La absorción se determina a partir del mismo ensayo y su porcentaje se calcula como:

$$\% Abs = \left(\frac{S - A}{A} \right) * 100$$

Ecuación 14. Absorción

Tabla 15. Resultados densidad y absorción del agregado.

Tipo	Peso de (g)	Constante	Peso (g)	Densidad aparente (g/cm ³)	Densidad aparente base saturada (g/cm ³)	Densidad nominal (g/cm ³)	Absorción (%)
MEDIO	Material seco	A	482,7				
	Picnómetro con 500 ml de agua	B	674,8				
	Picnómetro + agua + material	C	991,3	2,6	2,7	2,9	3,9
	Material superficialmente seco	S	501,4				
FINO	Material seco	A	491,9				
	Picnómetro con 500 ml de agua	B	674,8				
	Picnómetro + agua + material	C	1010,3	2,9	3,0	3,1	1,8
	Material superficialmente seco	S	501				

Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 15. A partir de los cuales se puede concluir que el agregado medio, al tener menor densidad absorbe mayor cantidad de agua, por lo que emplear únicamente este tipo de agregado en el mortero implicaría mayor gasto de agua para obtener manejabilidad adecuada incrementando costos, esto en el caso de no emplear aditivos en la mezcla. De forma análoga si se utilizara solo agregado fino se evidenciaría disminución en la resistencia mecánica del material a causa de la menor relación de masa volumen presente, pero mayor fluidez debido a la facilidad de acoplamiento al tener mayor tamaño de partícula, por lo que la mejor opción es mezclar de manera proporcional los dos tamaños de agregados.

3.3 ADITIVOS Y SUS MEZCLAS

Las propiedades obtenidas de los aditivos y sus mezclas fueron especificadas debido a aspectos físicos que afectan la dosificación requerida en la mezcla del mortero, así como requerimientos técnicos en el proceso de fabricación relacionados principalmente con la dinámica de fluidos dado que los aditivos en estudio se encuentran en estado líquido. La composición química de los aditivos no se contempla en el proyecto actual.

3.3.1 Porcentaje de sólidos. El porcentaje de sólidos relaciona la cantidad de aditivo en la mezcla con los gramos de cemento empleados, por lo que permite

calcular el agua real requerida en la mezcla de mortero. Debido a que por definición el porcentaje de sólidos relaciona la cantidad de sólidos secos presentes en la fase líquida (aditivo). Los resultados se muestran en la tabla 16.

Se evidencia que los aditivos reductores presentan menor porcentaje de sólidos y por ende mayor humedad, el aditivo con menor porcentaje de sólidos es el AR7 por lo cual se empleará menos agua en la mezcla para evitar segregación del mortero a una misma relación agua cemento en todas las muestras. De forma análoga los aditivos de carácter manejador tienen mayor porcentaje de sólidos, requiriendo mayor cantidad de agua debido a su comportamiento e incrementando la fluidez del mortero al ser empleados. Recordando la tabla 2 en la que se muestra las cantidades de cada aditivo (AR40, AM67, AM65H) en la mezcla AR75M, en la que a pesar de predominar el AM67 en su composición, el porcentaje de sólidos es menor al del aditivo base a causa de la incorporación de un 25% de AR40 obteniendo fluidez cercana al AM67 pero con menor cantidad de agua.

3.3.2 Viscosidad. La viscosidad de los aditivos a parte de ser un indicador de calidad en los mismos es una medida indirecta de la cohesión que se puede generar en la mezcla del mortero⁵⁴; sin embargo, aditivos con alto valor de viscosidad representan mayor demanda en energía en el proceso de fabricación, al causar resistencia al flujo en tuberías y tanques. Los resultados de viscosidad de los aditivos y sus respectivas mezclas se muestran en la tabla 16. De forma general se observa que los aditivos manejadores presentan mayor viscosidad que los reductores a excepción del AM65.

Donde el aditivo AM67 presenta mayor viscosidad lo que dificultaría su proceso de fabricación pero generaría buenas características de cohesión con los agregados y el cemento, el cual al endurecerse generara una matriz compacta entre los elementos, obteniendo mayor resistencia en el mortero. Al mezclar este aditivo en igual proporción con AR40 (AR50M) se disminuye considerablemente la viscosidad.

Los valores de viscosidad en todas las mezclas superan a los obtenidos en los aditivos reductores por lo que idealmente la resistencia de las mezclas sería mayor, obteniendo mejor comportamiento a la compresión con menor requerimiento de agua en la mezcla.

⁵⁴ HUERTA, Raúl. Mejorando el concreto. Grupo HyM. Italia. 2016, 2p.

Tabla 16. Porcentaje de sólidos, viscosidad y densidad de aditivos y mezclas

	Aditivo	%Sólidos (150°C)	Viscosidad cP	Densidad (g/ cm ³)
ADITIVOS	AR3	49,9	214	1,1
	AR7	45,7	298,7	1,1
	AR40	46,9	292	1,1
	AM65	51,7	238,4	1,1
	AM65H	48,9	436	1,1
	AM67	52,8	578	1,1
	AM80	53,5	330,7	1,1
	AM6	51,2	474	1,1
	AR75M	51,6	511	1,0
	AR50M	48,7	439	1,1
MEZCLAS DE ADITIVOS	AR25M	47,4	360	1,1
	AR18M5	48,9	422	1,1
	AR57M1	50,4	498	1,1
	AR12M3	47,8	376,8	1,1
	AR37M1	48,5	414	1,1

Fuente: elaboración propia

3.3.3 Densidad. La densidad representa la relación de la masa en un volumen dado, en el caso de los aditivos plastificantes esta propiedad oscila entre valores de 1 g/cm³ y 2 g/cm³ los cuales cumplen con los estándares de calidad de la compañía⁵⁵. Lo cual concuerda con los resultados obtenidos, en general los valores no difieren mucho entre si y son muy variables por lo que no se emite punto de comparación ni es posible extrapolar a propiedades del mortero.

3.3.4 Color. Empleando la escala de Gardner (Imagen 9) se caracterizaron los aditivos y sus mezclas por color. En el caso de los aditivos el color es un indicio de la presencia de compuestos como la vinaza, sin embargo se comercializan aditivos en diferentes colores con el fin de generar una característica especial que permita recordar fácilmente e identificar las materias primas que hacen parte del producto.


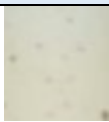

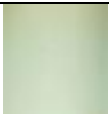



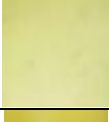

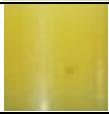










La vinaza incorpora al aditivo un complejo polimérico de alto peso molecular, el cual permite fluidificar o plastificar en mayor proporción el mortero⁵⁶. Esto se fundamenta en la capacidad que tiene la molécula de actuar por si sola como un medio de repulsión estérica, por lo que al incorporar este producto orgánico en los aditivos se incrementa la funcionalidad del mortero en cuanto a su fluidez. La vinaza también permite aumentar la resistencia mecánica del material, debido a que se genera una reducción en el agua de mezclado requerida para el flujo que se desea alcanzar, sin

⁵⁵ RIVERA, Gerardo. Aditivos para mortero y concreto. Concreto Simple.2011, 236 p.

⁵⁶ IRISARRI, Daniel. Usos industriales y agrícolas de la vinaza de caña de azúcar. Tecnicaña. Cali. 2006. 24 p.

embargo la concentración de este compuesto en la mezcla debe ser controlada debido a que en su composición presenta altos niveles de azúcares que pueden ser empleados como medio de cultivo de los microorganismos. Los resultados se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados escala de Gardner.

Escala de Gardner		Aditivo	
1		AM6	
		AR40	
2		AR25M	
3		AM65	
		AM65H	
4		AR3	
10		AR75M	
11		AR7	
12		AM80	
16		AR12M3	
18		AM67	

Fuente: elaboración propia.

Dado que varios aditivos presentan colores diferentes a los de la escala de Gardner, estos se muestran a continuación en el cuadro 2.

Cuadro 2. Color mezclas de aditivos

Fuera de la escala	Aditivo	
Verde amarillo	AR50M	
Verde claro	AR18M5	
Azul translucido	AR57M1	
Azul cian	AR37M1	

Fuente: elaboración propia.

3.4 RELACIÓN AGUA/ CEMENTO (RA/C) DEFINIDA

Empleando el procedimiento explicado en el numeral 2.3 se estableció la relación agua cemento común a los dos cementos en estudio, por medio del análisis del flujo inicial de la pasta. Las cantidades de agua y cemento empleadas se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Cantidades agua /cemento

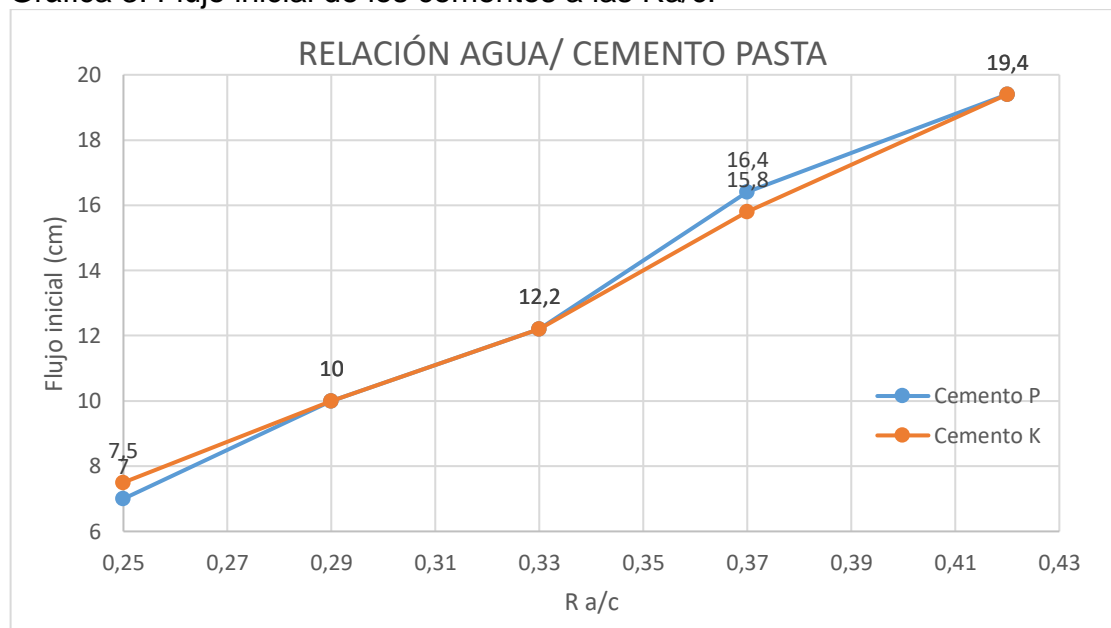
Cemento P o K (g)	Agua (ml)	R a/c
	100	0,25
	116	0,29
400	132	0,33
	148	0,37
	168	0,42

Fuente: elaboración propia

Los flujos iniciales de los dos cementos a las diferentes a las relaciones agua cemento de 0.29 y 0.33 se muestran en la gráfica 3, el flujo inicial en el cemento P fue menor a la Ra/c de 0.29, por lo que este cemento requerirá mayor cantidad de agua para una manejabilidad determinada respecto al cemento K. Por heurísticas de la empresa para los aditivos reductores la relación agua cemento debe asegurar un flujo inicial entre 8 -10 cm y para los manejadores entre 11 – 13 cm, esto debido al diferente comportamiento entre estos tipos de aditivos y al máximo esfuerzo que pueden alcanzar.

Por lo cual la Ra/c de 0.29 es adecuada para los aditivos reductores, si la Ra/c es menor a este valor la pasta se encuentra demasiado seca y difícil de manejar de manera que la cantidad de agua no puede reducirse. El flujo es de 12.2 cm cuando la Ra/c 0.33, a mayor cantidad de agua el comportamiento en los cementos difiere entre si hasta llegar a la segregación a la Ra/c de 0.42 por consiguiente esta relación no puede tenerse en cuenta debido a que la mezcla no es un material adecuado para aplicación, por lo que la relación de 0.33 es óptima para los aditivos manejadores y las mezclas. Se pensaría que cuando la Ra/c es de 0.42 también es un punto a considerar, no obstante la cantidad de agua empleada es excesiva incrementando costos⁵⁷ y como se nombro anteriormente la mezcla se encuentra saturada.

Gráfica 3. Flujo inicial de los cementos a las Ra/c.



Fuente: elaboración propia.

A partir de los resultados mostrados y teniendo en cuenta que, para los aditivos reductores la relación agua cemento debe asegurar un flujo inicial entre 8 -10 cm y para los manejadores entre 11 – 13 cm, las relaciones agua cemento establecidas fueron de 0.29 para aditivos reductores y de 0.33 para aditivos manejadores y mezclas, la gráfica 3 permitió tomar esta decisión.

3.5 DOSIS DE ADITIVO

Como se mencionó con anterioridad, la prueba de la culebrilla permitió establecer la dosis de aditivo AR7 que debe ser empleada en los morteros tanto con aditivos

⁵⁷ RODRÍGUEZ, Oscar. Morteros para fábricas. Asociación Nacional de fabricantes de mortero. Madrid. 2004, 14 p.

reductores, manejadores como con las mezclas de aditivos, esto por medio del análisis de flujo a diferentes cantidades de un aditivo referencia, que como se señaló en el capítulo 2, es el AR7. Este aditivo fue seleccionado debido a que es el de mayor producción, demanda y estudio en diferentes cementos por parte de la empresa de construcción por lo que su comportamiento se encuentra estandarizado y genera punto de comparación para las mezclas formuladas, de igual forma permite reducir las variables en el estudio. Al emplear un aditivo de carácter reductor la Ra/c usada fue de 0.29.

Para calcular la cantidad de agua (ecuación 17) que debe ser incorporada a la mezcla es necesario relacionar porcentaje de sólidos del aditivo AR7, la relación agua cemento y el rango de dosificación del AR7. Para determinar los gramos de aditivo AR7 que representan el rango de dosis a estudiar se emplea la ecuación 15.

$$Aditivo (g) = \frac{Dosis * Cantidad\ de\ cemento (g)}{\% Sólidos}$$

Ecuación 15. Cantidad de aditivo

$$Agua\ real (g) = Agua\ teórica (g) - aditivo (g) * \frac{1 - \% sólidos}{100}$$

Ecuación 16. Agua real

En donde el agua teórica se obtiene multiplicando los gramos de cemento con la Ra/c. Las cantidades empleadas de cada materia prima en el mortero se muestran en la tabla 18; sin olvidar que se emplearon agregados finos y medios en igual proporción para un total de 800 g.

Tabla 18. Cantidades de materias primas en el mortero.

Cemento P (g)	% Dosis de aditivo		Ra/c	Agua teórica (ml)	Agua real (ml)
	AR7	% Sólidos			
400	0,11		0,29	116	115,48
	0,13				115,38
	0,15	45,69			115,29
	0,17				115,19
	0,19				115,1
	0,21				115

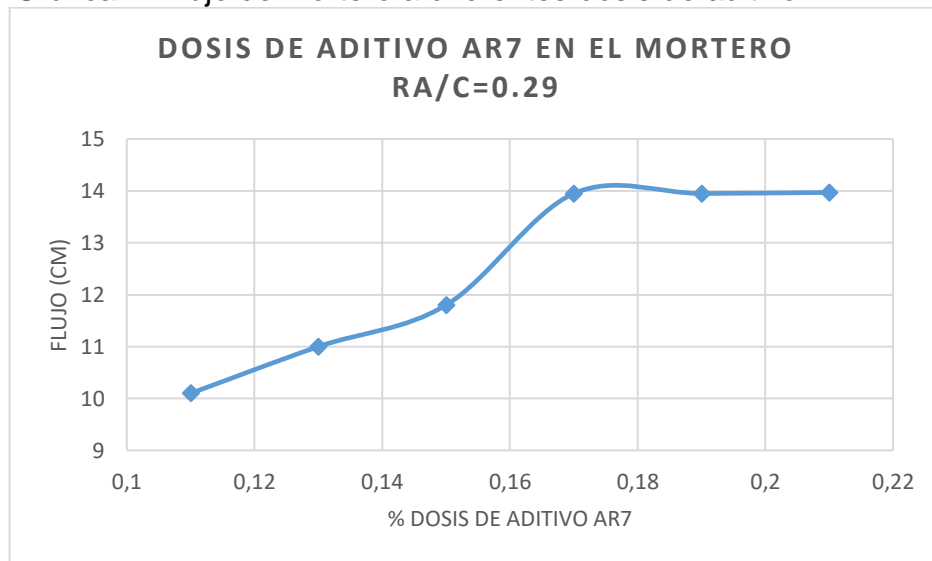
Fuente: elaboración propia

La gráfica 4. Muestra los resultados de flujo inicial empleando las dosis de aditivo AR7 que se quieren estudiar, para después definir la dosis común a los aditivos restantes (reductores, manejadores y mezclas), la manejabilidad del mortero crece de forma constante hasta una dosis de 0.15% pero el flujo obtenido igual a 11.8 cm no representa una manejabilidad diferencial que justifique su incorporación al mortero por lo cual no permite el máximo desempeño del aditivo.

Por el contrario al incrementar la dosificación de AR7 a porcentajes mayores al 0.15% el flujo del material crece de forma que la pendiente en la gráfica 2 presenta

mayor inclinación, lo que muestra que el flujo máximo que se obtendrá para una Ra/c de 0.29 se encuentra en una dosificación del 0.17% mostrando el máximo desempeño del aditivo AR7, dado que posteriormente la curva decrece hasta obtener el mismo flujo a mayores cantidades de aditivo AR7 lo que representaría el uso innecesario y un costo sin justificación. Por lo tanto, la dosis definida fue de 0.17%, esta dosis determina el punto en el que el polímero satura la superficie de las partículas de cemento y por consiguiente se detiene su absorción⁵⁸ de igual forma es escalada a todos los aditivos sean de carácter manejador o reductor o las mezclas, en morteros del cemento P y del cemento K.

Gráfica 4. Flujo de mortero a diferentes dosis de aditivo AR7.



Fuente: elaboración propia.

3.6 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE DESEMPEÑO EN EL MORTERO.

Al realizar los procedimientos requeridos para estimar las propiedades de desempeño, empleando las normas técnicas colombianas, se obtuvieron los resultados en cuanto a fluidez, resistencia a la compresión y tiempo de fraguado de los morteros de cemento P o K ante 0.17% de aditivo reductor o manejador para ser comparadas con las propiedades demandadas por el cliente al emplear las mezclas definidas, cuya formulación se muestra en la tabla 8. Esto permite caracterizar los aditivos sin tener en cuenta su composición química, esta sección muestra los resultados obtenidos para los dos cementos ante los aditivos anteriormente definidos.

Es importante aclarar que debido a que el objetivo general del proyecto era evaluar la cantidad de aditivos especificados por la compañía y estudiar el efecto de mezclar dos tipos de aditivos comercializados no se implementó un diseño experimental que

⁵⁸ GHORAB, H. KENAWI. I y ABDEL, Z. Op. Cit.,p. 374.

permitiera optimizar los aditivos y posteriores mezclas, de igual forma no se conto con la composición química de los aditivos por lo cual el analisis se encamina en las propiedades de desempeño obtenidas con base en la composición química de los cementos P y K.

3.6.1 Fluidéz de los aditivos reductores, manejadores y sus mezclas en el mortero. El análisis de resultados será dividido en el tipo de aditivo inicialmente en los dos cementos, después se estudiará de forma comparativa el flujo entre los diferentes tipos de aditivos empleados y la mezcla de los mismos definidas. El criterio de diferenciación entre los morteros empleados en cuanto a fluidez se muestran en la tabla 19. En este ensayo no se realizaron replicas, debido a que se busca analizar el comportamiento en fluidez más no cumplir con un procedimiento normativo específico o alcanzar una medición estandarizada. De forma análoga los blancos analíticos se toman como los morteros y las mediciones de flujo de los mismos mostradas en la tabla 10 debido a que el procedimiento es el mismo.

Tabla 19. Consistencia del mortero respecto a su fluidez.

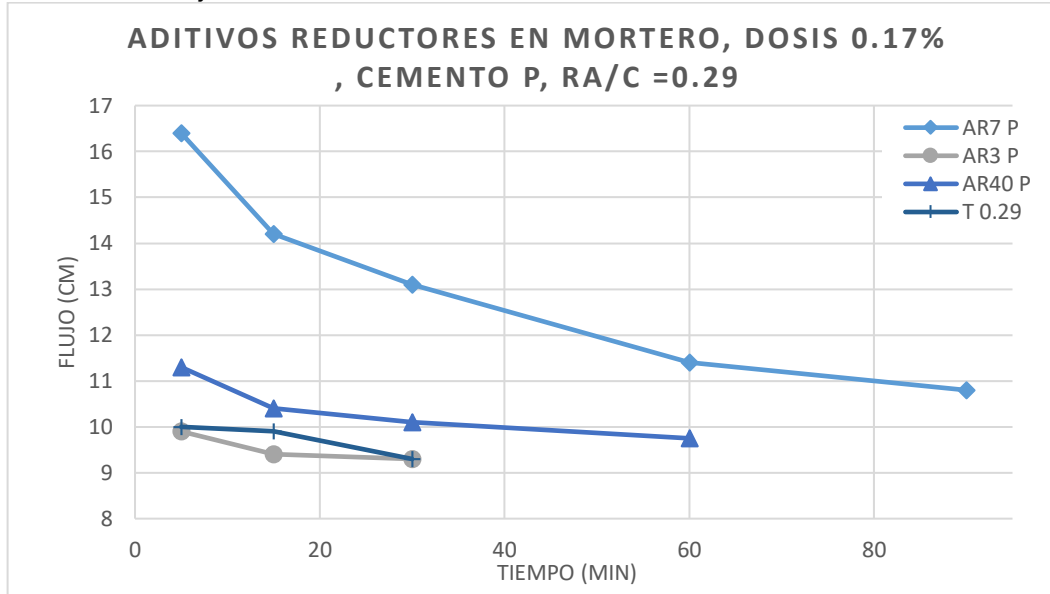
Consistencia	Flujo	Tolerancia
Seca	9-10 cm	1 cm
Fluida	10-15 cm	2 cm
Líquida	>15 cm	0 cm

Fuente GUEVARA FALLA, Génesis. *et al.* Efecto de la variación agua/cemento en el concreto.

A una relación agua/cemento (R a/c) de 0.29 y una dosis de aditivo de 0.17% los flujos de los morteros con cemento P y cemento K en un tiempo máximo de 90 minutos se muestran en las gráficas 5 y 6. Los aditivos reductores presentan flujo inicial alto el cual disminuye con el tiempo y en el caso de los aditivos manejadores el flujo inicial es bajo incrementa o mantiene su valor en fluidez respecto al tiempo.

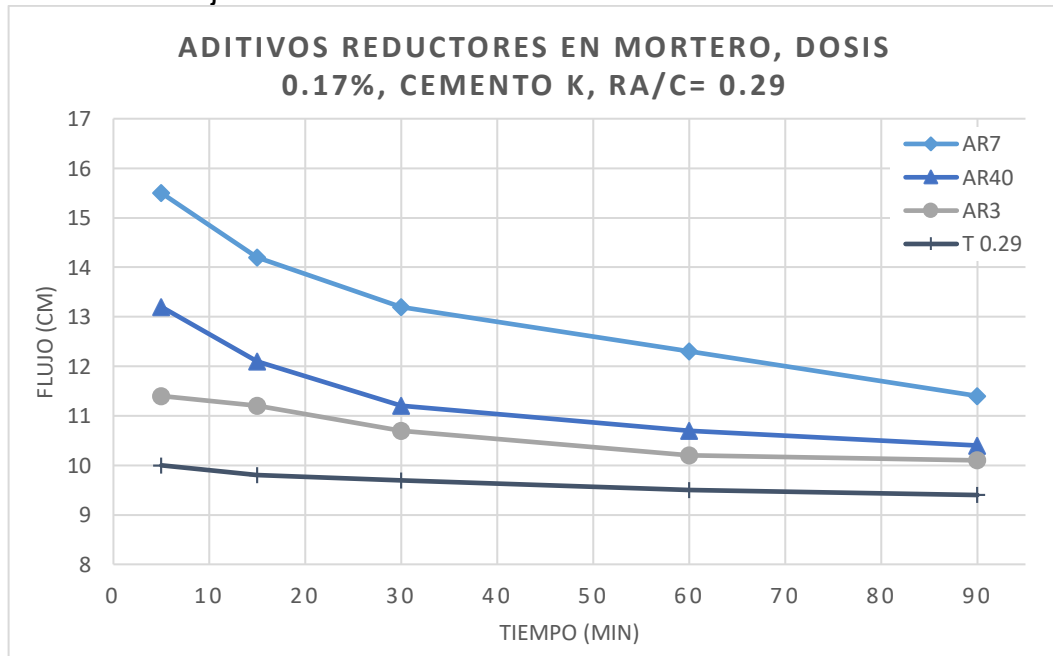
3.6.1.1 Aditivos reductores. El aditivo AR3 en el mortero de cemento P (gráfica 5) es el que presenta menor fluidez, a tiempos mayores a los 30 minutos el mortero presenta poca o nula manejabilidad, lo que indicaría que la interacción entre el cemento P y el aditivo AR3 no es adecuada, a causa de esto en flujos menores a los 10 cm el material no debe ser utilizado evidenciándose en la gráfica la reducción de los puntos de medición en los aditivos AR3 y AR40 del mortero con cemento P. Por el contrario cuando este aditivo (AR3) se encuentra presente en mortero con cemento K (gráfica 6) la fluidez inicial cambia en un 13.16% y a un tiempo total de 90 minutos la mezcla reduce su fluidez llegando a 10.1 cm, mostrando gran diferencia entre los cementos ante el mismo aditivo. Recordando que la Ra/c, cantidad de cemento, los gramos de agua y las proporciones y cantidad de agregados son constantes para los dos morteros se demuestra que la diferencia en fluidez radica en las diferentes composiciones y características de los cementos.

Gráfica 5. Flujo en mortero de aditivos reductores con cemento P .



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 6. Flujo en mortero de aditivos reductores con cemento K .



Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 5 se observa que el mortero con cemento P el aditivo AR40 presenta una fluidez inicial de 11.3 cm, pero a los 60 minutos la manejabilidad decae en un 14%. Tiempo después la mezcla tiene poca humedad superficial por lo que requiere un esfuerzo mecánico alto para su compactación. Al emplear el mismo aditivo en el mortero con cemento K (gráfica 6) se evidencia un mejor comportamiento el flujo

inicial es superior en un 15% y posterior a los 90 minutos la manejabilidad es de 10.4 cm, la velocidad de decrecimiento presenta un comportamiento gradual respecto al tiempo.

El flujo inicial más alto es el del mortero con cemento P y aditivo AR7, no obstante la manejabilidad decrece a una alta velocidad obteniendo a los 90 minutos una reducción del 35% respecto a su flujo a los 5 minutos. En comparación al cemento K la manejabilidad presenta una menor velocidad de reducción, obteniendo flujo cercano en ambos morteros.

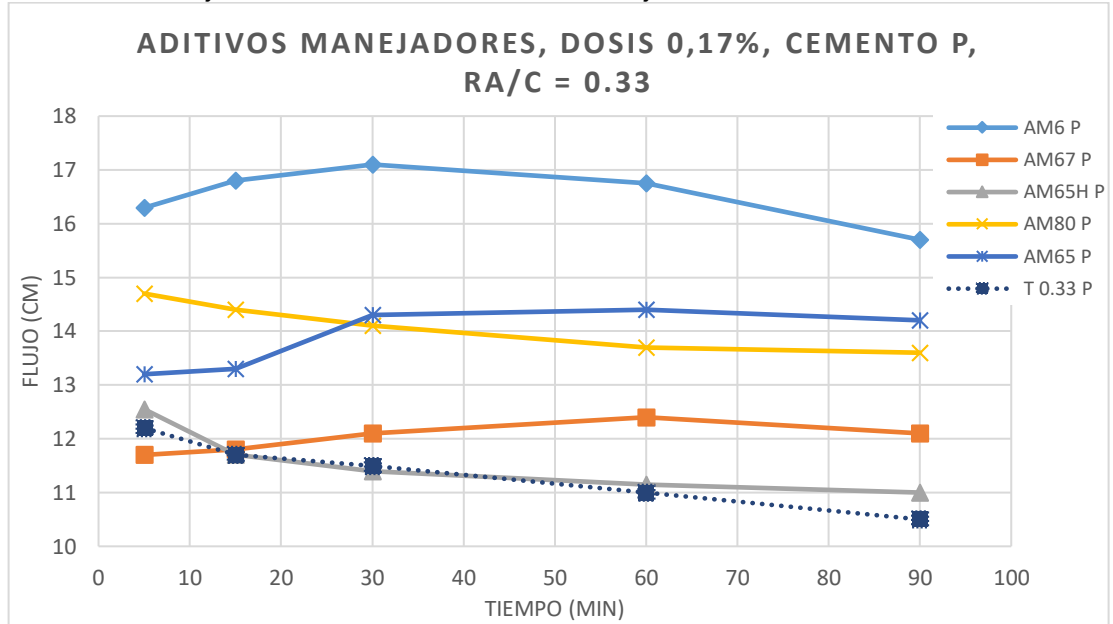
En general los aditivos reductores presentaron un comportamiento superior en los morteros formulados con el cemento K el mejor aditivo reductor fue el AR7 seguido por el AR40 y del AR3 (gráfica 6). En el caso del AR40 y AR7 el cliente tiene mayor tiempo para aplicar la mezcla en la superficie deseada. Si se empleara únicamente cemento P (gráfica 5) y se demandara buena manejabilidad, el aditivo sugerido es el AR7 puesto que genera mejores resultados en aplicaciones menores a los 30 minutos, si no se requiere fluidez el aditivo AR40 es el adecuado; sin embargo, no se recomienda el uso del aditivo AR3 con este cemento debido a que su comportamiento en fluidez respecto al tiempo es similar al blanco analítico por lo que este aditivo, no genera un valor diferencial en cuanto a la trabajabilidad de la mezcla.

3.6.1.2 Aditivos manejadores. Empleando el procedimiento descrito en el numeral 2.2.1.2 del presente documento se determinó el flujo de los morteros con cemento P o K en un tiempo total de 90 minutos, a una Ra/c de 0.33 y dosis de aditivo de 0.17%. Los resultados se muestran en la gráfica 7 y 8.

Las gráficas 7 y 8 exponen que los aditivos manejadores permiten obtener flujos mayores de 11 cm y menores de 17 cm a los 90 minutos, gracias a su composición química, lo cual muestra el amplio rango de aditivos que comercializa la empresa para diferentes requerimientos de manejabilidad. También se evidencia que pese a ser un mismo tipo de aditivo estos cumplen su función de diferente forma: en el caso de los aditivos AM6, AM67 y AM65 la manejabilidad crece hasta un punto máximo a lo largo del tiempo, los otros aditivos (AM80 y AM65H) tienen una manejabilidad inicial alta la cual decrece a diferente velocidad respecto al tiempo.

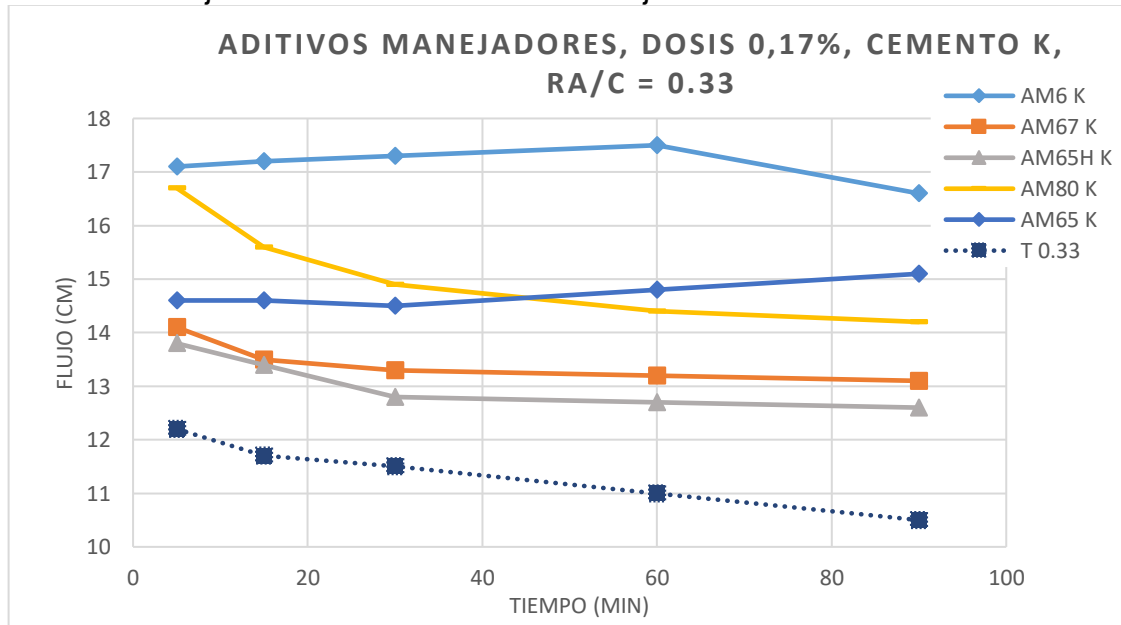
La fluidez más alta se presenta en el mortero con cemento K (gráfica 8) en este caso con el aditivo AM6. El flujo inicial (5 minutos) y final (90 minutos) solo presentan una diferencia de 0.5 cm, teniendo su mayor trabajabilidad a los 60 minutos. Al dosificar el mismo aditivo en mortero con cemento P (gráfica 7) el mayor flujo se presenta a los 30 minutos, sin embargo su manejabilidad es adecuada.

Gráfica 7. Flujo en mortero de aditivos manejadores con cemento P.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 8. Flujo en mortero de aditivos manejadores con cemento K.



Fuente: elaboración propia.

Seguido del AM6, el AM80 tiene un flujo inicial de 16.7 cm el cual decrece rápidamente a los 15 minutos para posteriormente disminuir su manejabilidad de forma constante hasta obtener un flujo 15% menor al inicial. El mortero con cemento P (gráfica 7) muestra un flujo inicial menor , pero su disminución de manejabilidad presenta un comportamiento constante a lo largo del tiempo.

Para analizar el efecto del aditivo AM65 en los morteros P y K los flujos iniciales de los morteros P y K difieren únicamente en 1.4 cm; no obstante, su manera de obtener su máxima manejabilidad es desigual. En el mortero K se presenta una disminución en el flujo hasta los 30 minutos, sin embargo después de este tiempo el flujo incrementa de forma constante a velocidad elevada generando su máximo desempeño a los 90 minutos de 15.1 cm. Cuando el mortero tiene en su composición cemento P en un lapso de 15 minutos aumenta su fluidez en un centímetro, para posteriormente llegar a un valor de 14.4 cm y finalmente a 14.2 cm.

En consecuencia es posible afirmar que el proceso de hidratación del cemento P y su relación con el aditivo AM65 genera una fluidez máxima en un menor tiempo y por ende un proceso de endurecimiento más corto, lo cual sería excelente en procesos de aplicación directa.

En el caso del aditivo AM65H la tendencia de decrecimiento del flujo presenta mayor velocidad inicialmente, posterior a los 30 minutos esta velocidad se reduce presentando un comportamiento similar al aditivo reductor. Los dos cementos presentan una tendencia cercana pero con aproximadamente 2.5 cm de diferencia en los tiempos establecidos, siendo mayor el mortero con cemento K.

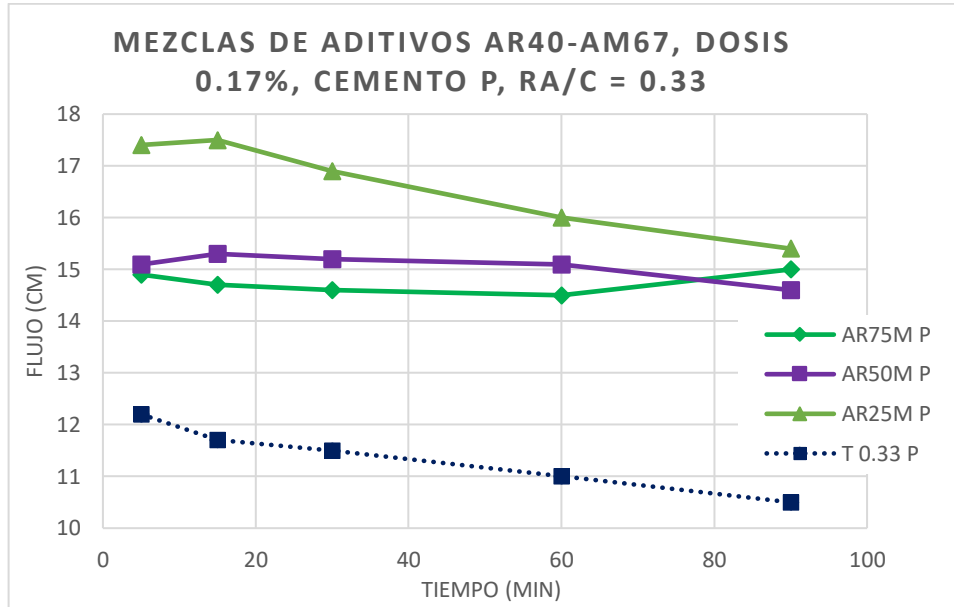
3.6.1.3 Mezclas de aditivos. Como se especificó anteriormente las mezclas fueron formuladas con los aditivos que generaron flujo inicial intermedio en el cemento P (11.3 cm en el caso del AR40, 11.7 cm en AM67 y 12.55 cm con AM65H) y que su efecto en los cementos P y K es de interés por parte del área de investigación y desarrollo. Se recuerda que la formulación se encuentra en la tabla 8 del capítulo 2. Inicialmente se analizarán las mezclas que contienen los aditivos AR40 y AM67, con el fin de diferenciar las mezclas que contienen dos aditivos en su composición de las que contienen tres, su fluidez se muestra en la gráfica 9 y 10.

La fluidez inicial y final de mayor valor se presentó en la mezcla denominada AR25M (1:3), la forma en que decrece su desempeño respecto al tiempo en el cemento K, es característica de los aditivos reductores al igual que en el mortero con cemento P, el comportamiento presentado tiene la tendencia de crecimiento inicial y decrecimiento gradual después de un punto máximo que se presenta a los 15 minutos. Al emplear una relación 1:1 de aditivo AR40 y AM67 la disminución en la manejabilidad del mortero muestra una tendencia similar a la descrita anteriormente.

Es decir pese a la poca cantidad de aditivo manejador en la mezcla, este tiene mayor eficiencia al reaccionar con el cemento P. Por el contrario el aditivo reductor interactuó de mejor forma con la composición y tamaño de partícula del cemento K, a excepción de la mezcla AR75M (3:1) que aunque contiene mayor composición de aditivo manejador AM67 la presencia del aditivo AR40 no permite obtener flujos altos como en el caso del AR25M. Por consiguiente la mezcla AR25M es adecuada en procesos de aplicación que demandan tiempo entre el mezclado y el uso, pero

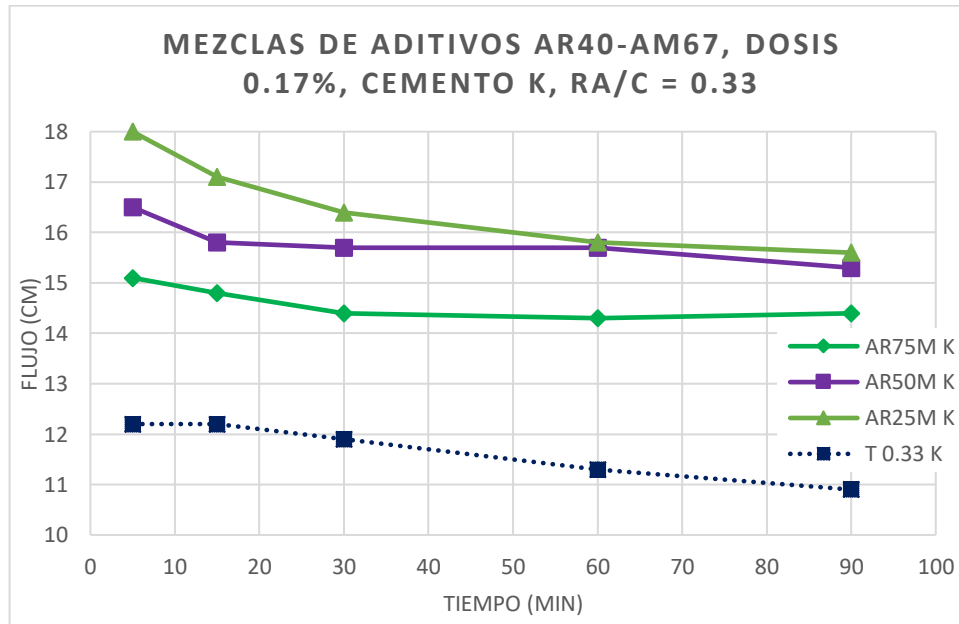
es mejor cuando el mezclado del material no se encuentra cerca a la obra y requiere ser transportado largas distancias.

Gráfica 9. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 y AM67 en cemento P.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 10. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 y AM67 en cemento K.

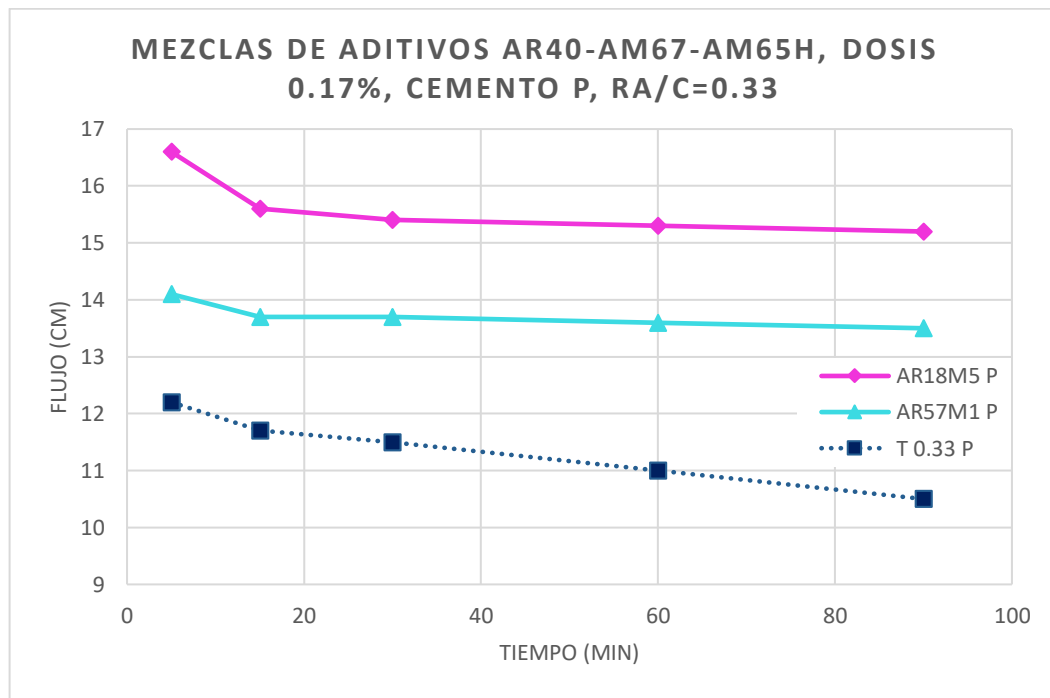


Fuente: elaboración propia.

Para evidenciar la influencia de los aditivos manejadores, en el AR40 se formularon las mezclas AR18M5 y AR57M1. En las que se mantuvo constante la composición del AR40 a un 25% y se varió la de AM67 y AM65H, los resultados obtenidos se muestran en las gráficas 11 y 12.

En el caso de estas mezclas, se presentó un comportamiento no visto con los anteriores aditivos, el mortero con cemento P genero la fluidez inicial y final más alta empleando la mezcla AR18M5. Esta mezcla contiene un 57% de aditivo AM65H, por el contrario la mezcla AR57M1 tiene un 18% de este aditivo. Esto permite afirmar que la composición química y la estructura del polímero resultante al mezclar AR40(25%) -AM67(18%) y AM65H(57%) permite que la interacción con el cemento P genere mayor fluidez. La mezcla AR18M5 en el mortero P posibilitó incrementar en un 32% el flujo inicial y en un 37% la manejabilidad transcurridos 60 minutos respecto al aditivo AR40, también incrementó a tiempos mayores de 90 minutos su fluidez. Por lo cual la mezcla AR18M5 es adecuada para clientes que busquen buena manejabilidad y empleen cemento P en sus morteros.

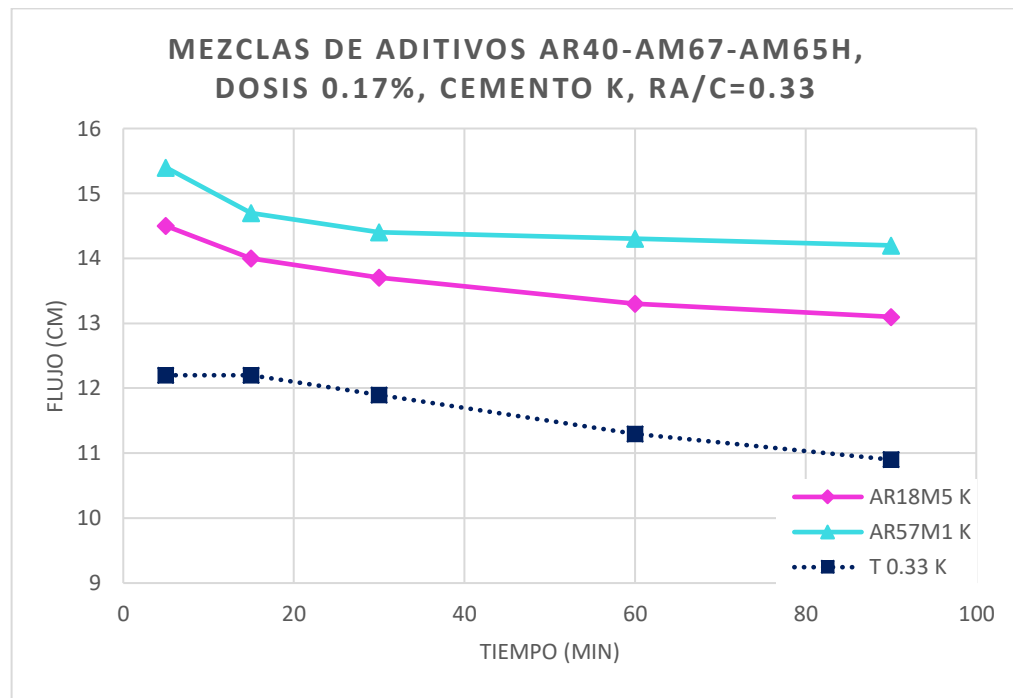
Gráfica 11. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 (25%)-AM67- AM65H en cemento P.



Fuente: elaboración propia.

Al disminuir la cantidad de aditivo AM65H en la mezcla el mortero con cemento K (gráfica 12) produce mayor manejabilidad, la cual decrece de forma gradual con el paso del tiempo.

Gráfica 12. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40 (25%)-AM67- AM65H en cemento K.



Fuente: elaboración propia.

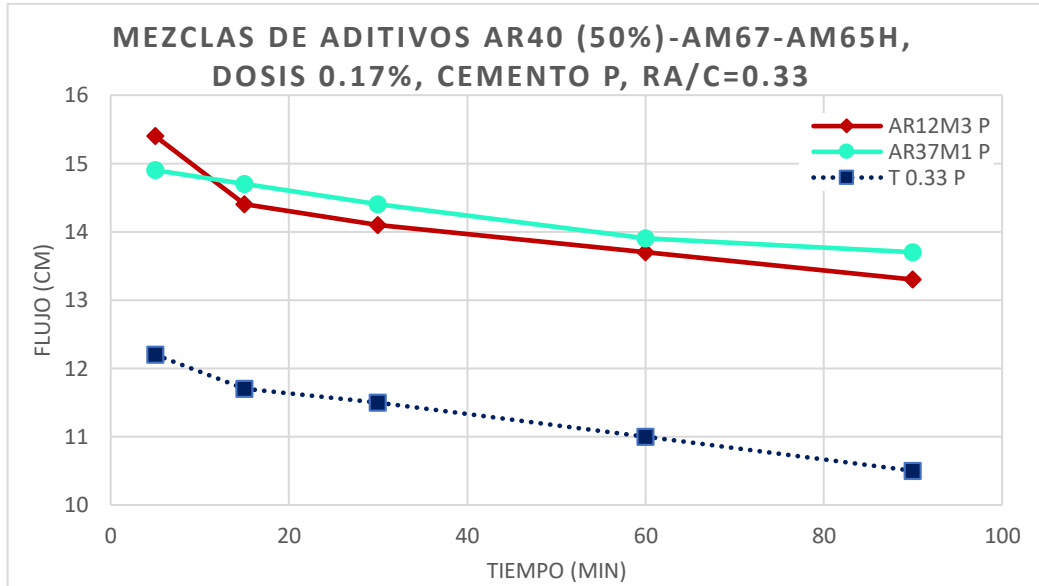
Las últimas mezclas formuladas fueron planteadas manteniendo constante la cantidad de aditivo AR40 (50%), variando la composición de aditivo manejador en un 12.5% y 37.5%. Los flujos medidos se encuentran en las gráficas 13 y 14. Las mezclas presentaron fluidez similar entre sus respectivos cementos. Se observa un comportamiento representativo del aditivo reductor dado que la mitad de su composición esta representada por este tipo de aditivo, al igual que gran parte de los aditivos la fluidez en el cemento K es mayor y en este caso la mezcla AR37M1 solo presenta una diferencia del 7.9% entre manejabilidad inicial y final por lo cual sería un aditivo preciso para clientes que busquen manejabilidad constante en el tiempo y empleen el cemento K como materia prima.

Recordando los resultados de la Difracción de Rayos X (Tabla 13), el cemento K presentó mayor cantidad (4.79 %) de aluminatos ortho-cúbico C_3A y por consiguiente mayor producción de etringita, se esperaba que la fluidez tuviera valores mayores respecto al cemento P (2.49%), esto se demostró en todos los ensayos. Otra fase destacable cuyos productos de hidratación tienen influencia en la fluidez del mortero es la C_4AF o Brownmillerita, argumentado en que la absorción máxima del polímero se realiza de forma veloz en la superficie de estos productos por la rapidez del mecanismo electrostático⁵⁹, por lo cual el cemento que presente

⁵⁹ *Ibid*, p. 373.

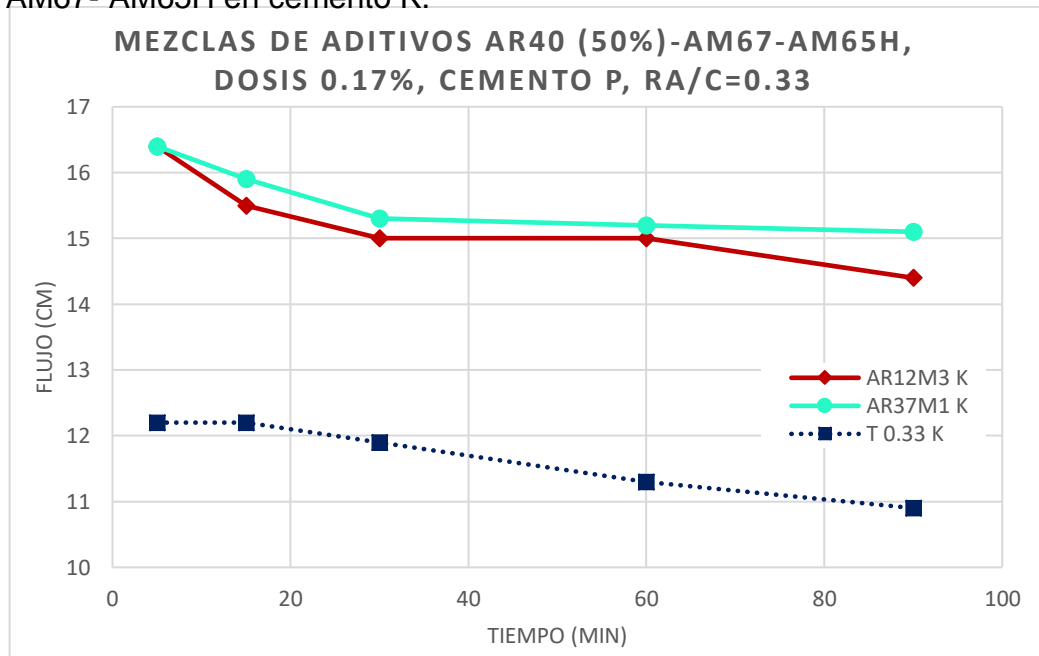
mayor cantidad de esta fase en su composición generaría mayor fluidez inicial en este caso el cemento K.

Gráfica 13. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40(50%)-AM67- AM65H en cemento P.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 14. Flujo en mortero de mezclas de aditivos con AR40(50%)-AM67- AM65H en cemento K.



Fuente: elaboración propia.

3.6.2 Resistencia a la compresión. Los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros con aditivos reductores, manejadores y mezclas se muestran a continuación. Debido a que la resistencia a la compresión se ve afectada por múltiples variables como los materiales empleados, su dosificación, tiempo y forma de mezclado, tiempo de curado, velocidad de aplicación de la fuerza en la prensa hidráulica y por último la forma y tamaño de las probetas en todos los ensayos; se mantuvieron constantes estas variables en cuanto a los aspectos definidos anteriormente como la Ra/c, dosis de aditivo, cantidad y tipo de agregado y cantidad de agua para cada uno de los ensayos (anexo A). Los resultados de las resistencias a la compresión mostradas son el promedio de los valores obtenidos de tres replicas de probetas con las mismas características.

De igual forma se presentan los resultados de los blancos analíticos, recordando que consisten en la mezcla de mortero en relaciones agua cemento de 0.29 y 0.33 sin dosificación de aditivo. Al igual que en el ítem anterior 3.6.1 se dividirá el análisis por tipo de aditivo y mezclas en los cementos P y K.

3.6.2.1 Blancos analíticos. La resistencia a la compresión del blanco analítico del mortero con cemento P a los días 1,7,14 y 28 y diferentes Ra/c se muestran en la gráfica 16 al igual que en el caso del cemento K. Al tener menor cantidad de agua, las resistencias iniciales son superiores, esto debido a que a pesar de que el agua aporta a la fluidez del material, a una menor cantidad será prioritariamente para la hidratación del cemento, por lo que el agua restante no será la suficiente para generar buena manejabilidad. Dado que la hidratación del cemento inicia rápidamente, al tener poca fluidez las partículas de cemento se encuentran más cercanas entre si y al hidratarse forman un sistema más estable obteniendo un mortero con menor cantidad de espacios vacíos y una matriz más homogénea, por lo que al aplicar una presión externa no se fracturará con tanta facilidad.

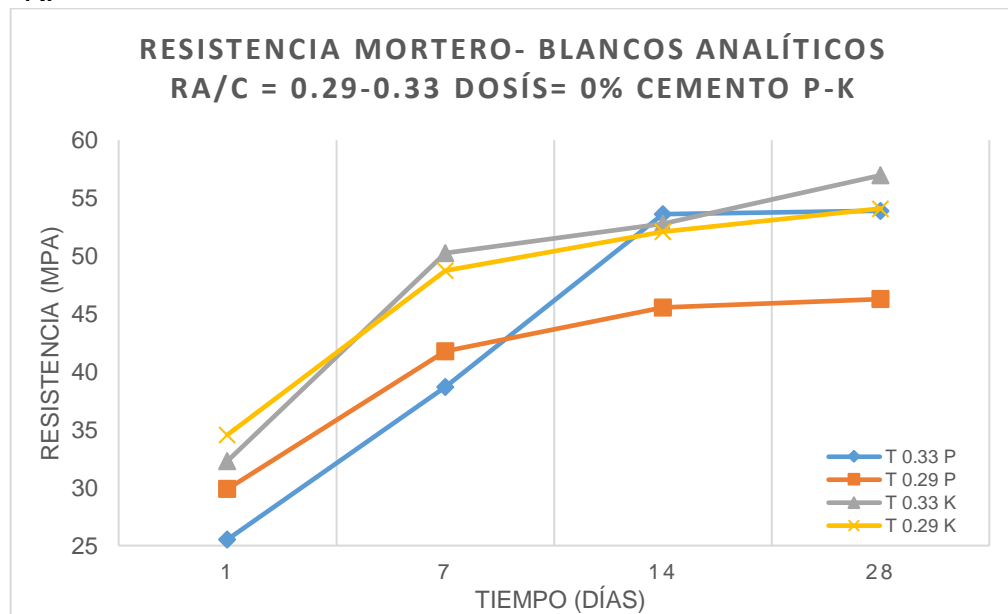
En el caso del mortero T 0.33 los resultados de resistencia a la compresión son mayores después de los 14 días, su fundamento se relaciona con lo descrito anteriormente en la hidratación del cemento. En seguida de que la velocidad de hidatación empieza a disminuir con el paso del tiempo, el agua presente en la matriz del material que no reaccionó empieza a evaporarse por acción de las condiciones ambientales generando espacios vacíos por lo que al emplear una Ra/c mayor la evaporación del agua después de tiempos prolongados no será tan significativa como en el caso del mortero T 0.29 generando mayor resistencia posterior a los 14 días.

En la gráfica 15 se muestra la resistencia de mortero con cemento K, a pesar de presentarse diferente relación agua cemento las resistencias resultantes son cercanas. La resistencia inicial es mayor en la menor relación agua cemento; sin embargo, la diferencia es solo de 2.26 MPa, a mayores tiempos esta desigualdad se mantiene entre 0.7-2.87 MPa. La razón de estos resultados puede

fundamentarse en que este cemento demande más agua debido a su composición o tamaño de partícula.

En la siguiente gráfica se evidencia que las resistencias iniciales más altas se generan en menores relaciones agua cemento, a causa del proceso de hidratación y el efecto que se genera en la matriz del material descrito anteriormente; sin embargo, la composición química del cemento, la cantidad de elementos y fases presentes son determinantes. Recordando el ítem 3.1.3 del capítulo, en el cemento K gracias a la cantidad de alita (C_3S) presente se estimó que tanto su resistencia inicial como la velocidad en el desarrollo de la misma sería mayor respecto al cemento P lo cual se cumple para las relaciones agua cemento establecidas. En el caso del blanco analítico T 0.33 P se presenta un incremento del 27% entre los días 7 y 14 esto se debe a que el cemento P contiene un 5% más de belita la cual no contribuye a resistencia inicial pero si a resistencias finales.

Gráfica 15. Resistencia a la compresión de morteros con cementos P y K.



Fuente: elaboración propia.

La desigualdad en la cantidad de C_3A entre los cementos P y K es la que no permite una variación considerable en los valores de resistencia mayores a los 14 días. Las resistencias finales de los cementos a excepción del cemento P con Ra/c de 0.29 tienen valores adecuados para las aplicaciones en las que se emplea el mortero, ya sea de forma estructural o de acabados en la construcción.

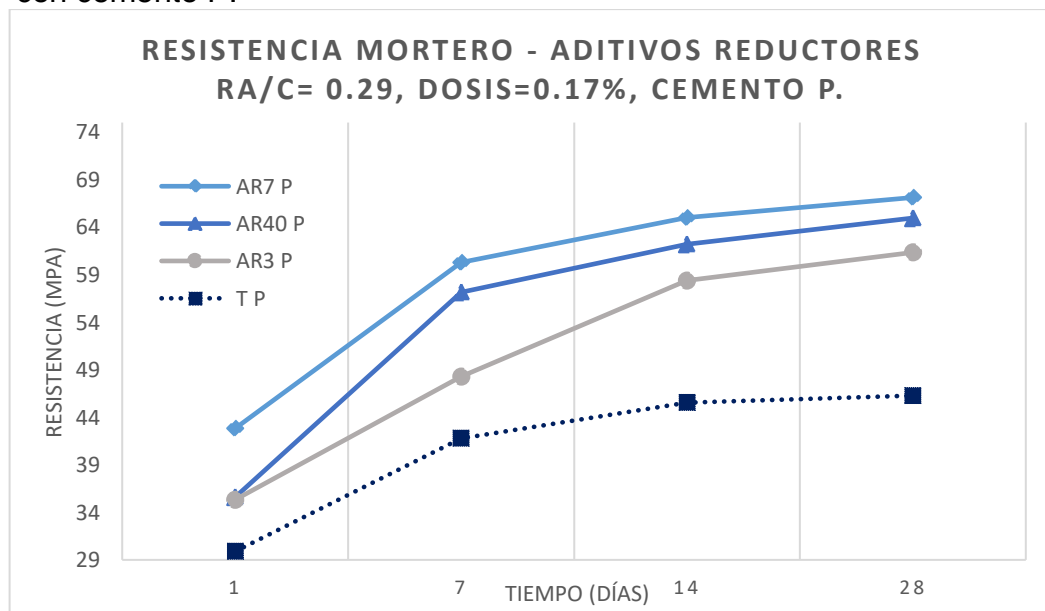
3.6.2.2 Morteros con aditivos reductores. En las gráficas 16 y 17 se muestran los resultados del ensayo de resistencia a la compresión al emplear una dosificación de 0.17% de aditivo reductor. El aditivo AR40 permitió obtener la resistencia inicial y

final más alta al ser empleado en el mortero con cemento K (gráfica 17), esto infiere que la composición química del aditivo interactuó de mejor forma con el tamaño de partícula de este cemento, como se mostró en el ítem 3.6.2.1 el cemento presentaba la mayor resistencia inicial; sin embargo con el tiempo la resistencia no se desarrollaba rápidamente (leyenda T K en la gráfica 17) como se evidencia al emplear este aditivo. De igual forma la resistencia se incrementó entre un 20-26% en las mediciones realizadas respecto al mortero sin aditivo.

Otro aspecto interesante en los valores obtenidos es el del mortero con aditivo AR7 y cemento P (gráfica 16), debido a que la tendencia indica que el cemento K genera mayores resistencias. En el caso de este mortero su resistencia después de los 14 días es mayor al mortero con el mismo aditivo pero con cemento K (gráfica 16), en las otras mediciones presenta valores muy cercanos. Lo que permitiría vender este aditivo al cliente que emplee cemento P o K sin mayor variación en la resistencia mecánica obtenida por el material.

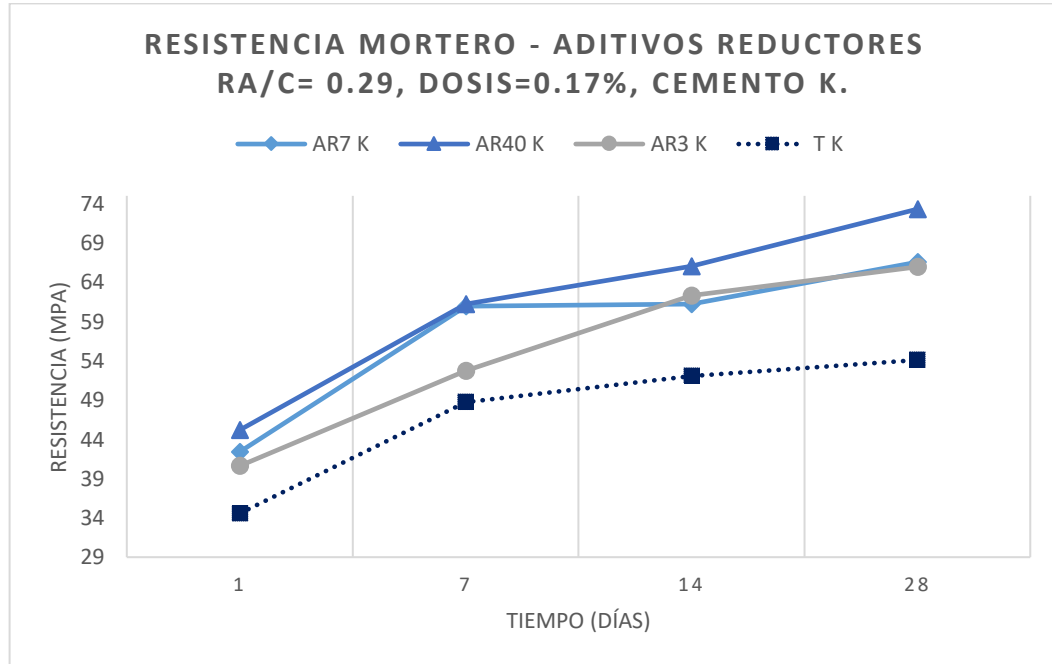
Recordando que el aditivo AR3 era inferior en cuanto a fluidez, y en el caso del cemento P el mortero podría ser manejado después de los 30 minutos, la resistencia origina una diferencia de 15 MPa a los 28 días respecto al blanco analítico (leyenda T P en la gráfica 16).

Gráfica 16. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos reductores con cemento P.



Fuente: elaboración propia.

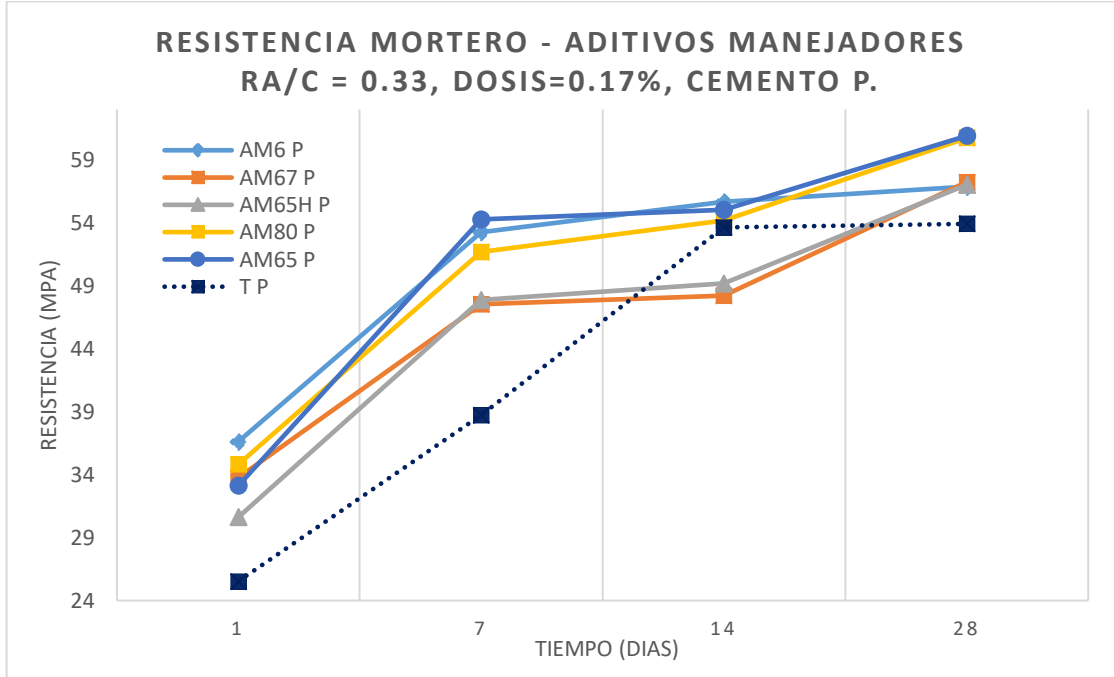
Gráfica 17. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos reductores con cemento K.



Fuente: elaboración propia.

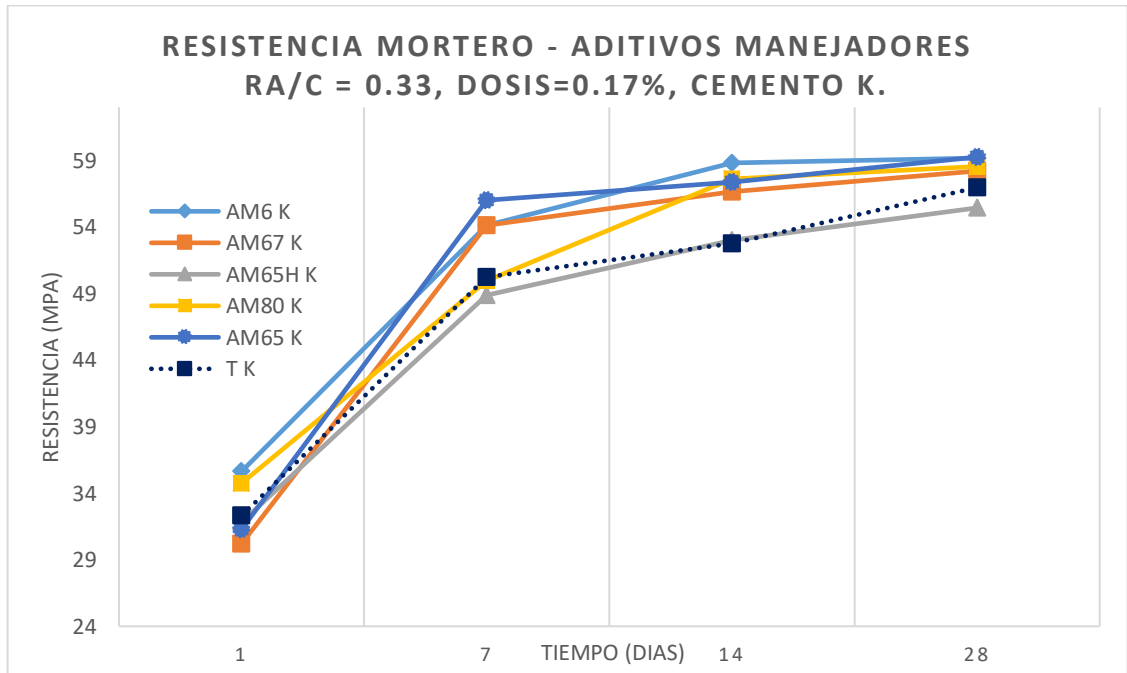
3.6.2.3 Morteros con aditivos manejadores. Las resistencias desarrolladas en los aditivos AM6 y AM80 son muy similares entre si, obteniendo una de las mayores resistencias finales en los aditivos manejadores con el aditivo AM80 y cemento P, en la gráfica 18 se muestra que las resistencias iniciales siguen siendo superiores al emplear el cemento P; sin embargo, después de las 24 horas el cemento K (gráfica 19) incrementa la resistencia de forma rápida superando al cemento P después de los 7 días de endurecimiento. La diferencia más considerable es a los 14 días en donde el aditivo AM6 difiere en 3.16 MPa al mortero con cemento P (gráfica 18); en cuanto a la diferencia con los blancos analíticos en resistencias iniciales están entre 10-11 MPa para el cemento P y 2.4-3.5 MPa en el cemento K. Posterior a los 14 días a causa de un incremento rápido de resistencia en el blanco analítico con cemento P (leyenda T P en el gráfico 18) y uno constante en el cemento K (leyenda T K en el gráfico 19) no se obtiene una diferenciación considerable entre los morteros con aditivos manejadores AM6-AM80 y los que no contienen aditivos. Por consiguiente estos aditivos permitirían al cliente mejorar la manejabilidad considerablemente, sin gran modificación de la resistencia a la compresión posterior a los 14 días.

Gráfica 18. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos manejadores con cemento P.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 19. Resistencia a la compresión en mortero de aditivos manejadores con cemento K.



Fuente: elaboración propia.

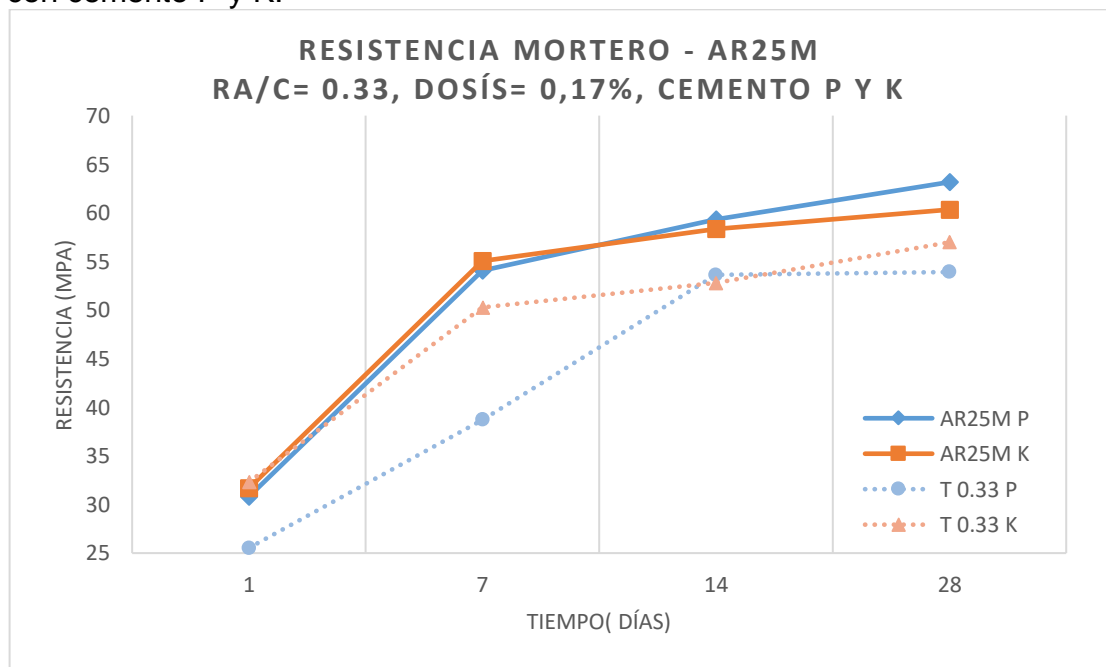
El aditivo manejador que genera su mayor incremento de resistencia en menor tiempo es el AM65 con cemento K (gráfica 19), después del primer día este valor aumenta en un 45% hasta el día 7, posteriormente su resistencia aumenta hasta llegar finalmente a los 59.26 MPa. La mayor resistencia final en este tipo de aditivos se genera al emplear en el mortero con cemento P y 0.17% de aditivo AM65, pasando de 33.12 MPa a 60.9 MPa a los 28 días (gráfica 18).

A los 14 días los aditivos AM67 y AM65H demuestran resistencias menores a las de su blanco analítico de cemento P y al final solo se concibe una diferencia de 3 MPa frente a este blanco. Por lo que de forma integral estos aditivos producirían su característica diferencial en un incremento en la manejabilidad y las resistencias iniciales al ser empleados, no obstante no lo harían en resistencias finales.

3.6.2.4 Morteros con las mezclas de aditivos. En esta parte del capítulo se realiza el análisis de los resultados de resistencia a la compresión de los morteros dosificados con las mezclas de aditivos. El orden está basado en la fluidez inicial alcanzada con el cemento K, de forma descendiente.

El mayor flujo inicial se logró con el aditivo AR25M, por lo tanto se muestra en la gráfica 20 los resultados en resistencia a la compresión.

Gráfica 20. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR25M con cemento P y K.



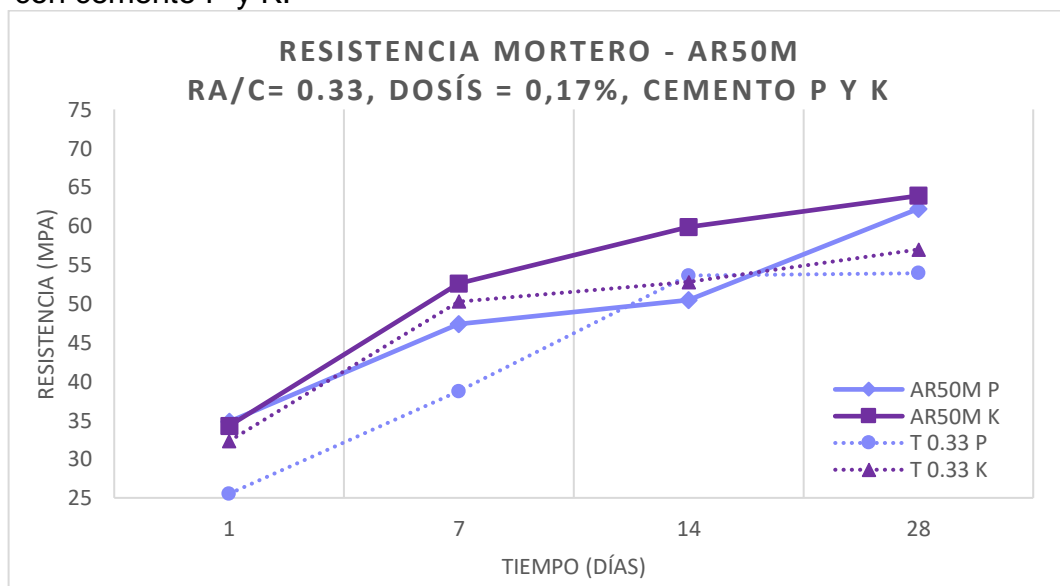
Fuente: elaboración propia.

Al igual que en la fluidez las mezclas siguieron la tendencia presentada en el aditivo AM67 a pesar de contener mayor cantidad de aditivo AR40 en su composición. Las resistencias en los dos cementos fueron muy similares, iniciando entre 30-32 MPa

para después incrementar en un 42-43% estos valores en un lapso de 7 días, posteriormente a una menor rapidez aumentó su resistencia para a los 28 días conseguir 60-65 Mpa. Esta mezcla mejoró la fluidez de los aditivos estudiados, superando incluso a los aditivos de carácter manejador que comercializa la compañía al ser empleada con el cemento K, adquiriendo resistencia final cercana a la de los aditivos reductores. Recordando que el objetivo de los aditivos reductores es disminuir la cantidad de agua requerida y por consiguiente adquirir resistencias superiores a los 28 días altas. Recapitulando, la mezcla AR25M sería un excelente producto para clientes que busquen manejabilidad inicial alta y resistencia final elevada.

Recordando que la composición 1:1 de la mezcla AR50M los resultados esperados en resistencia a la compresión en valores intermedios entre los aditivos AR40 y AM67 se cumplieron. En esta mezcla la resistencia inicial y final son cercanas (gráfica 21), pero la forma en que se desarrollan es desigual por lo que a los 7 y 14 días el cemento P es inferior por 4.73 y 9.37MPa respectivamente. En consecuencia esta mezcla es conveniente en ambos cementos si la aplicación demanda fluidez entre 14.5 y 15cm sin importar el cemento empleado.

Gráfica 21. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR50M con cemento P y K.

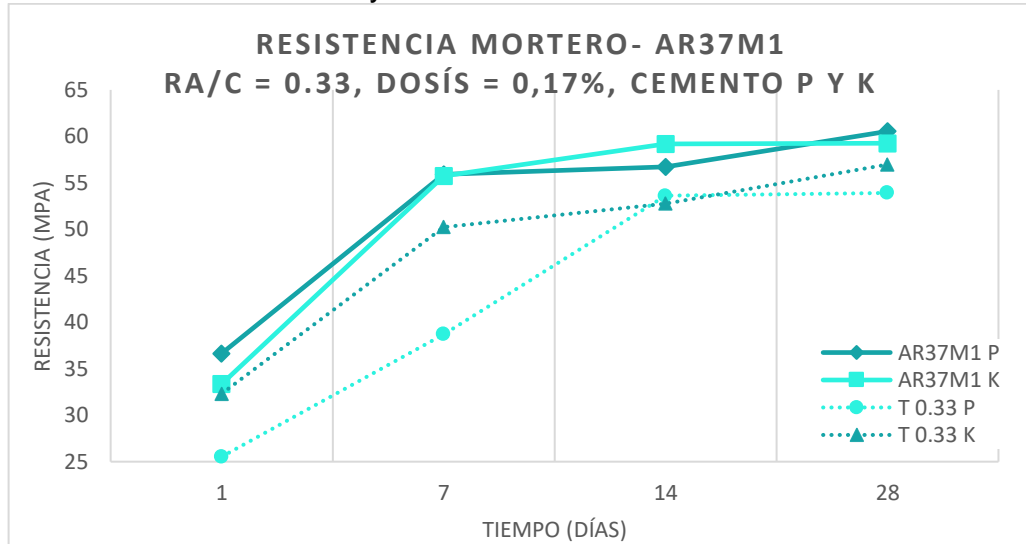


Fuente: elaboración propia.

Con un flujo inicial de 16.4 cm se encuentran las mezclas AR37M1 y AR12M3. En la primera de ellas (gráfica 22) los cementos no presentan diferencia considerable en los valores obtenidos, pero si se evidencia una tendencia a los valores del aditivo AR40, lo cual no se había presentado anteriormente. Respecto a la mezcla denominada AR12M3 (gráfica 23) la composición química y tamaño de partícula generan mayor resistencia a la compresión, la tendencia en esta mezcla es la más

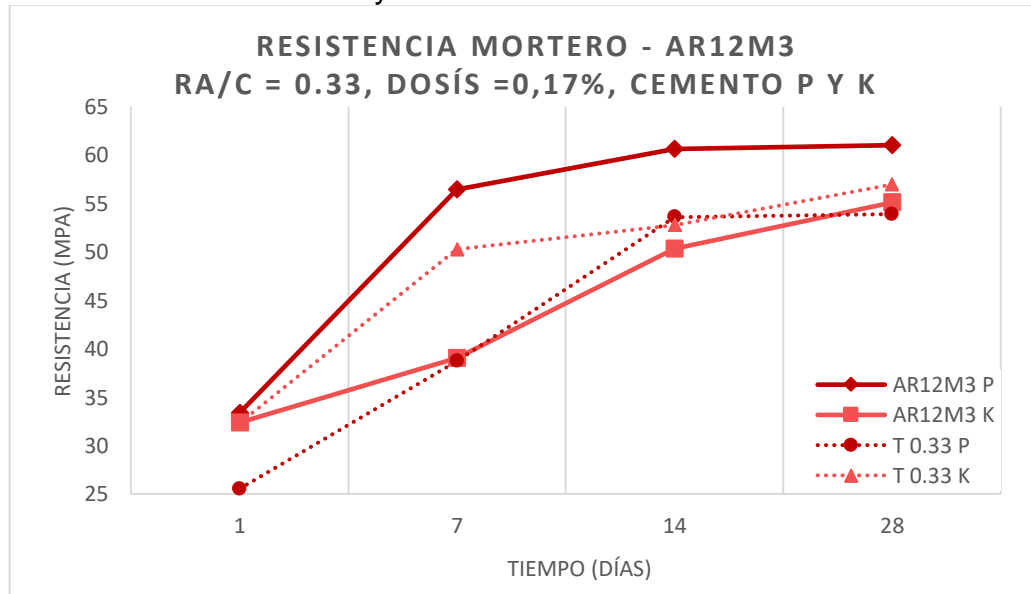
cercana a la resistencia del aditivo AR40 recordando que este presentó los mayores resultados respecto al resto de aditivos en estudio.

Gráfica 22. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR37M1 con cemento P y K.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 23. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR12M3 con cemento P y K.

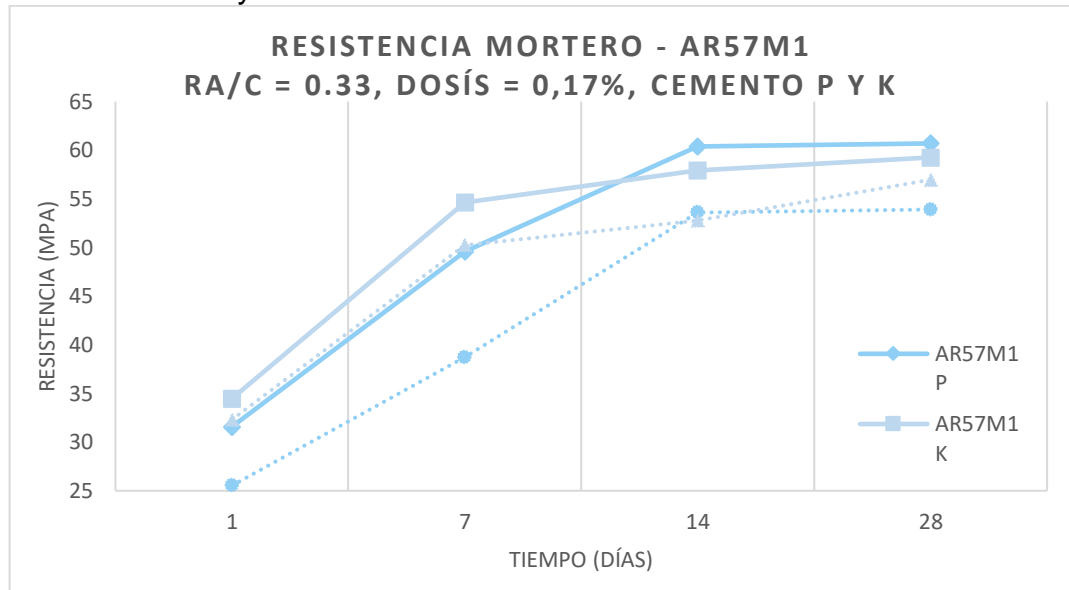


Fuente: elaboración propia.

Cuando se emplea la mezcla AR57M1 la resistencia inicial es mayor en el cemento K, a pesar de generar más manejabilidad, mateniéndose en esta posición hasta los

7 días, después el cemento P supera esta resistencia formando un mortero con la capacidad de soportar 60.7 MPa (gráfica 24).

Gráfica 24. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR57M1 con cemento P y K.

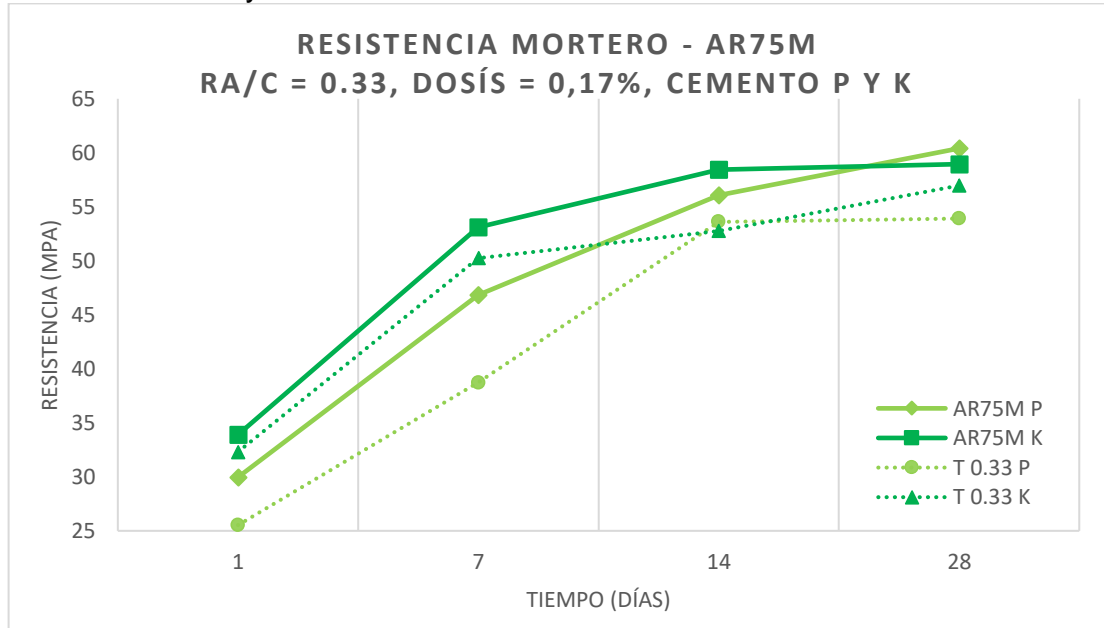


Fuente: elaboración propia.

En la gráfica 25 se muestran los resultados en resistencia a la compresión del mortero con la mezcla AR75M, el aditivo AM67 tiene mayor influencia dado que en los dos cementos la resistencia se redujo considerablemente con base en el aditivo AR40.

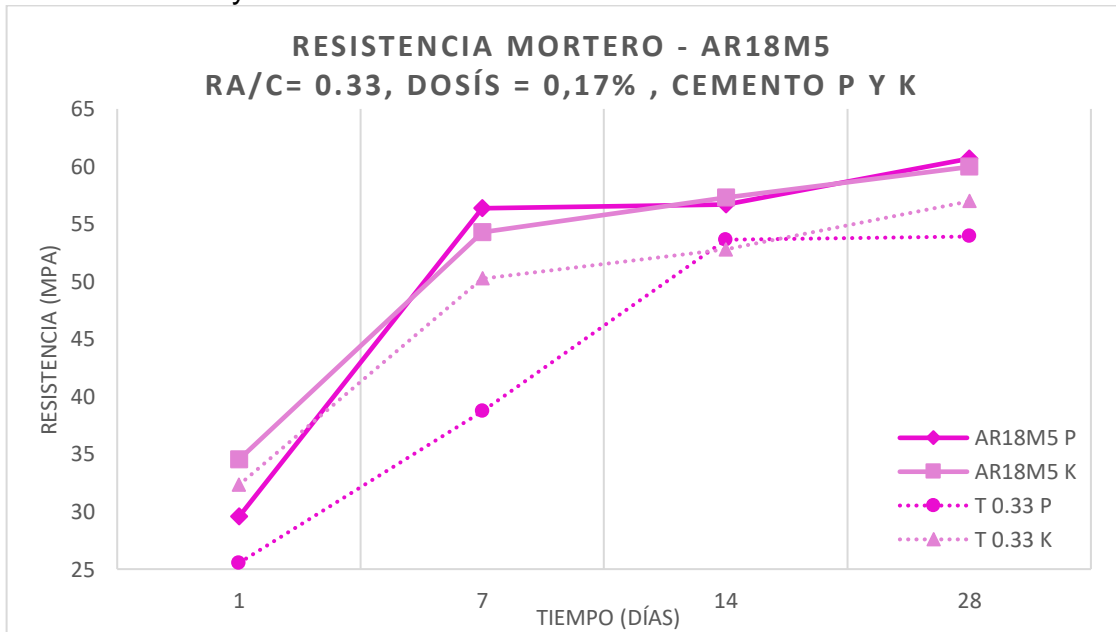
Posterior a la fluidez inicial del aditivo AR75M se encuentra la mezcla AR18M5 (gráfica 26), en donde se observa un aumento en el desarrollo de la resistencia inicial rápido pasando de un valor inicial menor en un 37% en el caso del cemento K y de 47.5 % en el cemento P. En cuanto a los componentes que hacen parte de la mezcla, la resistencia se vio influenciada por la presencia de los aditivos manejadores, a pesar de que se encuentra en un 57% la cantidad de aditivo AM65H no se observó una disminución significativa a causa del mismo.

Gráfica 25. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR75M con cemento P y K.



Fuente: elaboración propia

Gráfica 26. Resistencia a la compresión en mortero de la mezcla AR18M5 con cemento P y K.



Fuente: elaboración propia.

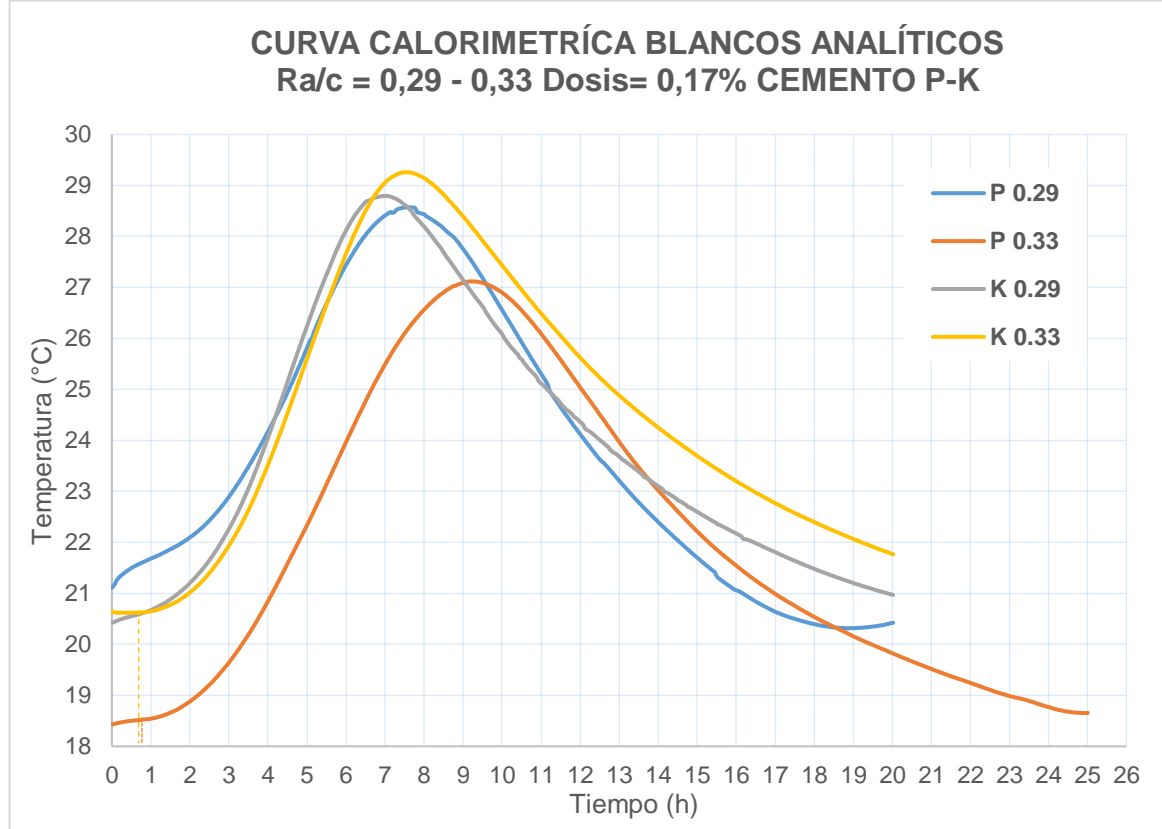
3.6.3 Calorimetría. Empleando el procedimiento del ítem 2.4.3 del capítulo 2, con el equipo y software de calorimetría semiadiabática, se graficó la variación en la temperatura del mortero respecto al tiempo. Esto con el fin de analizar el

comportamiento en la hidratación del cemento a partir de las curvas de evolución de la temperatura de los morteros al emplear los aditivos y estimar de forma aproximada el tiempo de fraguado en los morteros. Las curvas de calorimetría generadas se analizarán primero por el cemento empleado (blancos analíticos) y posteriormente por los aditivos y mezclas incorporadas.

3.6.3.1 Blancos analíticos. La curva de calorimetría de los blancos analíticos (testigos) a las diferentes relaciones agua cemento (0.29-0.33) utilizadas durante el proyecto se muestra en la gráfica 27. En ella se pueden identificar directamente las zonas características del fenómeno de hidratación, así como la temperatura máxima alcanzada por la mezcla y el tiempo requerido para obtener esta temperatura. De forma intrínseca se puede deducir el tiempo requerido para el fraguado inicial, y la temperatura en el fraguado final. En la curva no se evidencia la primera zona de hidratación esto es causado porque esta sucede en los primeros minutos, en donde se inicia el mezclado del cemento con el agua, por lo que debido a su rapidez es difícil determinar esta temperatura por la duración requerida en el proceso de homogenizado. En el caso de las relaciones a/c de 0.29 no es apreciable la zona de estabilidad térmica (periodo de inducción), esto fundamentado en que al incorporar menos agua en la mezcla el cemento busca reaccionar rápidamente para generar los productos alrededor de sus partículas demandando el agua a alta velocidad e impidiendo el flujo de la misma entre estas. Por el contrario las mezclas con mayor cantidad de agua (Ra/c 0.33) si permiten determinar gráficamente la duración y temperatura del periodo de inducción, en la gráfica 28 se muestran dos líneas paralelas al eje, las cuales permiten estimar que en el caso del cemento K la mayor manejabilidad se presentara hasta aproximadamente 1 hora y en el caso del cemento P en 1.07 horas.

Se generaron mayores temperaturas en tiempo 0 en los morteros con menores Ra/c , esto relacionado con que al tener menor cantidad de agua, la reacción se lleva a cabo a una mayor velocidad, generando mayor calor el cual es evidenciado por un incremento en la temperatura, recordando que en la calorimetría semiadiabática las muestras se encuentran perfectamente aisladas, por lo que no hay pérdidas de calor al ambiente.

Gráfica 27. Curva calorimétrica blancos analíticos.



Fuente: elaboración propia.

Después de la fase de inducción, se presenta la zona del inicio del fraguado. Respecto a los blancos analíticos el denominado P 0.29 comienza este proceso antes, en aproximadamente 2.05 horas a una temperatura de 22.13 °C y finalizando a las 7.26 horas con una temperatura máxima de 28.57°C. Por lo cual, teóricamente el tiempo de proceso de fraguado del cemento P a $Ra/c=0.29$ es de 5.2 horas, generando una diferencia en la temperatura de 6.44°C producto de la reacción entre los silicatos y el agua presente en la mezcla⁶⁰. Al emplear la misma Ra/c en el cemento K el fraguado inicia a las 1.9 horas posterior a las 3.81 horas se genera la temperatura más alta en la reacción (28.79 °C).

Comparando los cementos en una misma relación agua cemento, se establece que el proceso de hidratación del cemento P, a pesar de iniciar a una mayor temperatura requiere más tiempo de reacción, esto es debido a que contiene mayor cantidad de belita respecto al cemento K y esta fase es la que más se tarda en hidratar. Al aumentar la relación agua cemento en el mortero P, se requiere más tiempo para alcanzar el fraguado final y la temperatura máxima alcanzada es menor.

⁶⁰ GUEVARA FALLA, Génesis. *et al.* Op. Cit., p. 82.

Posterior al pico máximo inicia la zona en donde se disipa la temperatura alcanzada por la disminución en la velocidad de hidratación, esto es causado debido a que los productos se acumulan en la superficie de las partículas de cemento, dificultando la entrada de agua. En la gráfica 27 se observa que este proceso toma más tiempo a mayores relaciones agua cemento, en el caso del cemento P los productos se forman más rápidamente por lo cual la temperatura decae más drásticamente.

Las curvas calorimétricas permiten ser escaladas tanto a la fluidez como a la resistencia a la compresión. En el caso de la fluidez el cemento K generó mayores valores tanto en su blanco analítico como al emplear aditivos y mezclas en la curva esto evidencia en el desplazamiento del pico máximo hacia la derecha lo que indica que el cemento requiere mayor tiempo para su endurecimiento incrementando así la manejabilidad de los morteros. El diferencial entre la temperatura inicial y la máxima alcanzada es un indicio de la resistencia mecánica del material, por lo que a mayor delta se esperan mayores resistencias. Esto se comprobó mediante la gráfica 11, en donde se muestra que la mayor resistencia final se presenta a una $Ra/c = 0.33$ en la cual la diferencia entre la temperatura máxima e inicial en los cementos P y K son de 8.7°C y 8.61°C respectivamente.

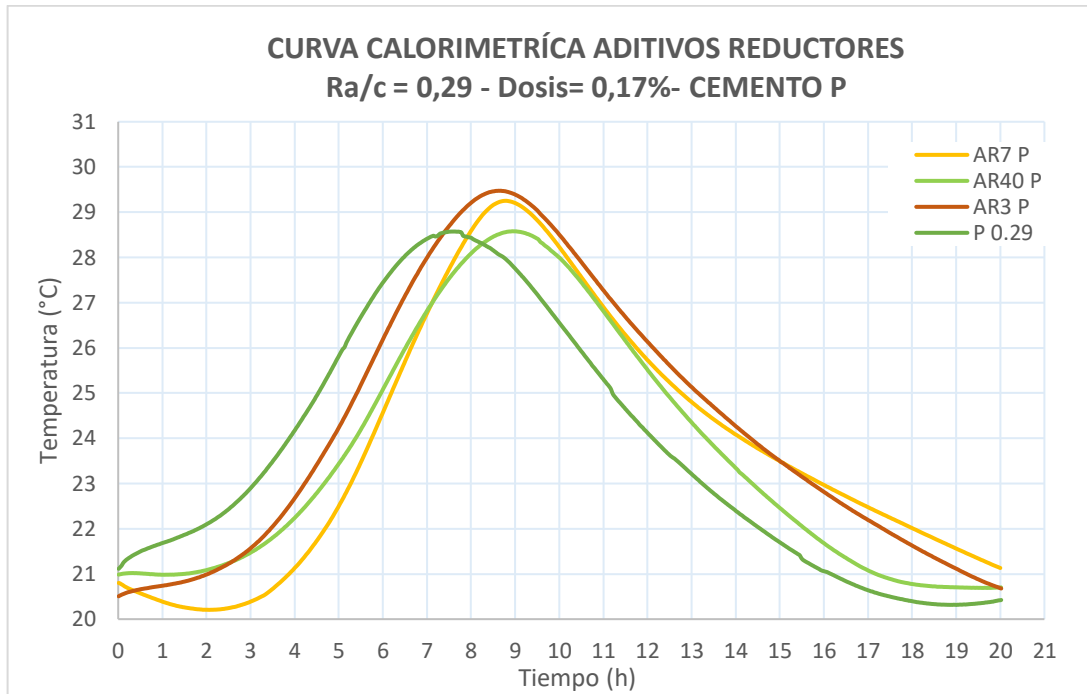
3.6.3.2 Curva calorimétrica de aditivos reductores. A partir de las curvas mostradas en las gráficas 28 y 29 se analiza el comportamiento de los aditivos AR7, AR40 y AR3 en los morteros con cemento P. Para posteriormente realizar lo mismo con el cemento K. Esto con el fin de tener un orden lógico.

➤ **Morteros con cemento P.** Al emplear aditivos reductores en los morteros con cemento P se evidencia una reducción en la temperatura inicial del perfil térmico, esto es originado gracias a que el aditivo permite que la reacción entre el agua y el cemento se lleve a cabo de forma gradual (gráfica 28). El aditivo AR40 presenta una zona amplia de inducción hasta aproximadamente 2 horas lo cual produce alta manejabilidad en este intervalo de tiempo, de forma análoga el aditivo AR7 se mantiene hasta las 2.5 horas con alta fluidez. El comportamiento inicial con el reductor AR3 es muy similar al blanco analítico correspondiente, esto fundamenta la dificultad en el manejo del mortero con este aditivo lo que representó su baja fluidez (ítem 3.6.1.1 del capítulo 3).

En cuanto al inicio del fraguado el aditivo AR3 (2.78 horas) empezó primero esta fase, seguido por el AR40 (2.85 horas) y finalizando con el AR7 (3.2 horas) lo que indicaría que el aditivo AR7 puede extender más tiempo su manejabilidad. Las temperaturas máximas estuvieron muy cercanas entre si, el aditivo AR40 tuvo una duración de 5.11 horas en su proceso de fraguado para llegar a temperatura de 28.58°C , el tiempo entre el fraguado inicial y final del aditivo AR3 fue de 4.85 horas generando 29.47°C al final del mismo, por último el aditivo AR7 empleo 4.74 horas durante su fraguado generando una temperatura de 29.25°C en su proceso de hidratación. La estabilización térmica a causa de la acumulación de productos en

las partículas de cemento se demoró más en el aditivo AR7, seguido por el AR40 y con una tendencia similar al blanco analítico el AR3.

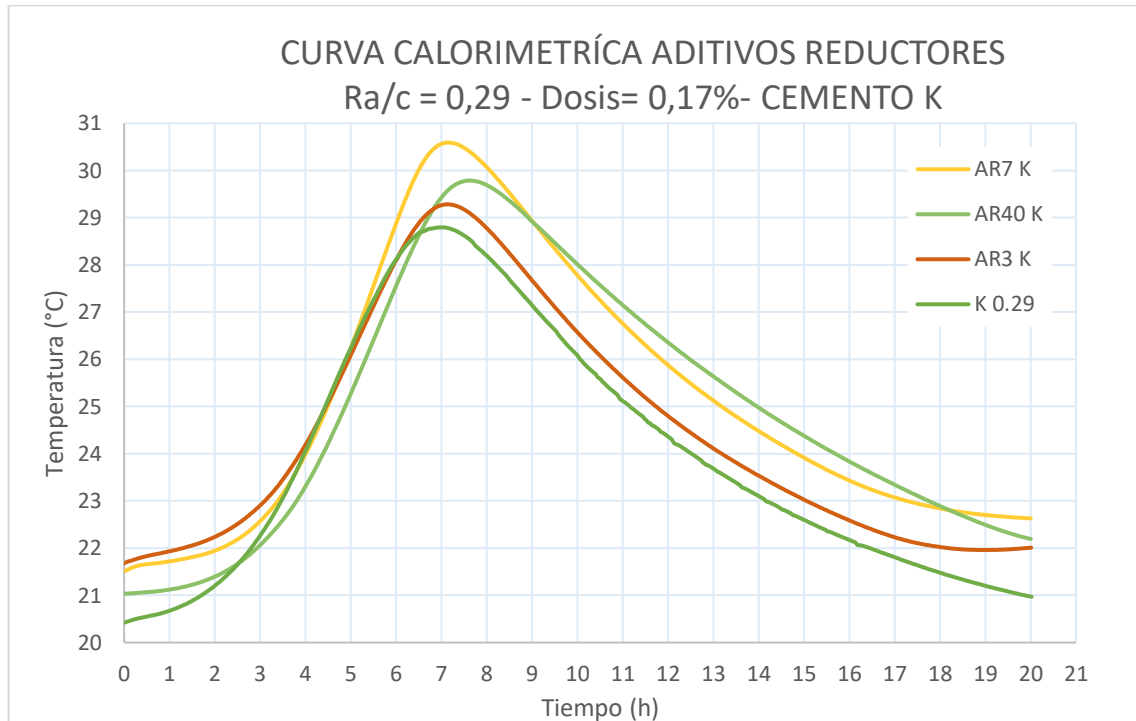
Gráfica 28. Curva calorimétrica aditivos reductores en morteros con cemento P.



Fuente: elaboración propia.

➤ **Morteros con cemento K.** El comportamiento en la temperatura inicial difiere a el cemento P (gráfica 29), en esta calorimetría la temperatura del blanco analítico es menor lo cual permite predecir que en este caso el aditivo no cumple su función desde el tiempo 0. En todos los aditivos es posible visualizar la zona de inducción la cual se encuentra hasta las 1.5 horas. Esto justificaría la manejabilidad superior del cemento K, y la afinidad que presentan estos polímeros con la composición del cemento. El fraguado inicial es muy cercano entre aditivos se presentó entre las 2.6-2.72 horas, de forma análoga el fraguado final estuvo entre las 6.1-6.5 horas. La mayor temperatura fue de 30.59 °C con el aditivo AR7, seguido por 29.79°C del AR40 y por último 29.28 °C. En general las curvas siguieron valores muy cercanos entre sí, por lo cual con el cemento K los aditivos reductores permitirían obtener resultados replicables. Dado que las curvas tanto en el cemento P como K presentaron comportamientos similares entre sí, se puede sugerir que, la composición química de los aditivos empleados y fundamentalmente su grupo funcional es el mismo.

Gráfica 29. Curva calorimétrica aditivos reductores en morteros con cemento K.



Fuente: elaboración propia.

3.6.3.3 Curva calorimétrica de aditivos manejadores. En las gráficas 30 y 31 se demuestra una diferencia notable entre los cementos.

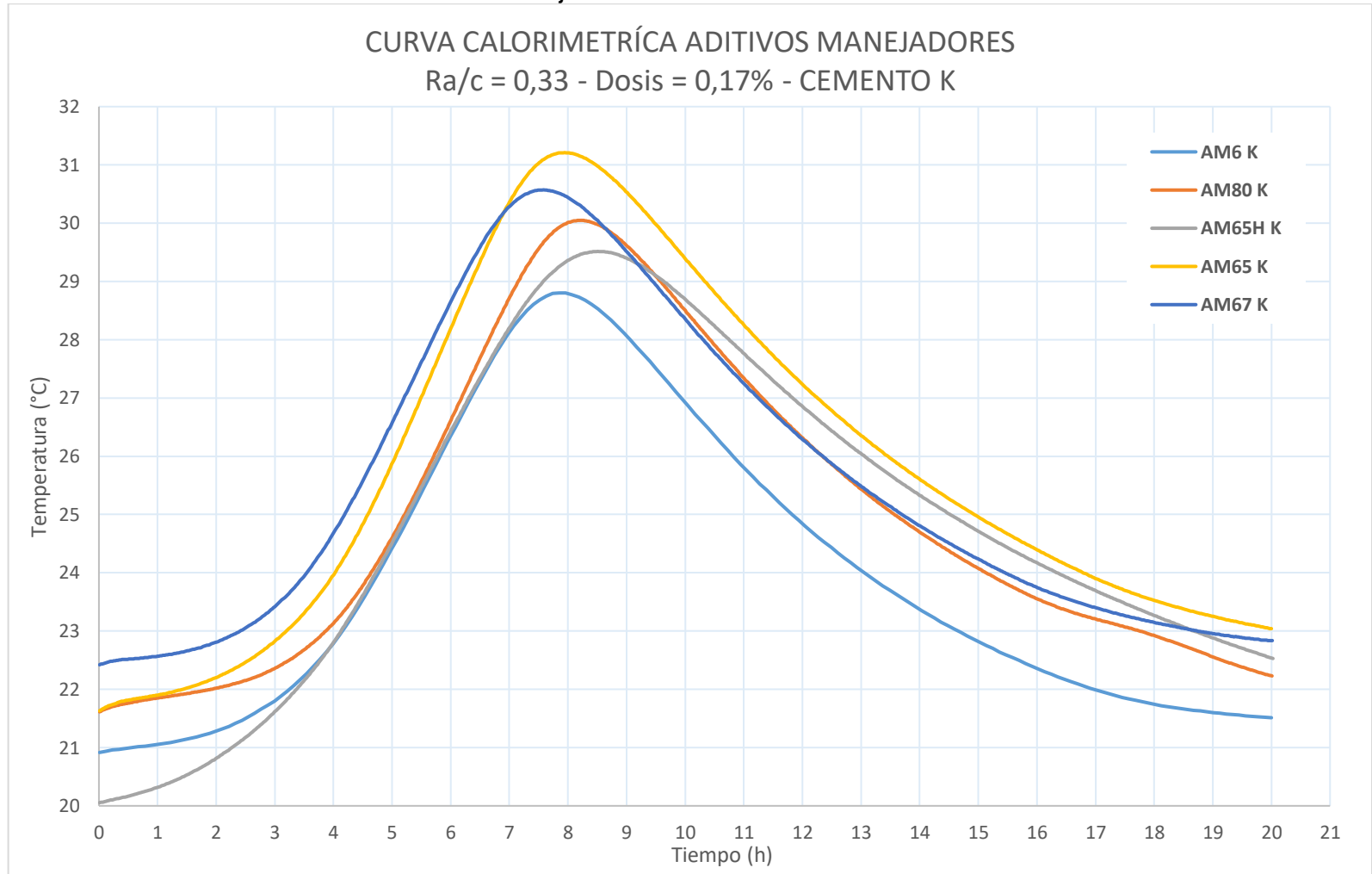
➤ **Morteros con cemento K.** En el caso del cemento K (gráfica 30) la hidratación se genera en menor tiempo y su temperatura inicial y máxima es más elevada. Esto se argumenta en su porcentaje de C_3S , C_2S y C_3A el cual suma el 76.68% de su composición, al ser superior genera mayor velocidad en la hidratación y por consiguiente incremento en la temperatura en un menor tiempo de reacción. La capacidad de los aditivos manejadores de incrementar y mantener constante la fluidez del mortero se demuestra en la fase de inducción que se presenta de forma común en todos los aditivos de este tipo, en promedio tuvo una duración de 1.5 horas. Tiempo después inicio la fase de fraguado, se presenta primero en el mortero con aditivo AM65H (2.27 horas) posteriormente en los aditivos AM67(2.63 horas), AM65(2.9 horas) y AM80(3.2 horas), la duración del fraguado estuvo entre 3.86-4.97 horas. El aditivo AM65H tardo 4.97 horas en el proceso de fraguado por lo que se induce que la composición química de este polímero permite mediante la interacción con el cemento K mejorar el tiempo de este proceso por una disminución en la velocidad de reacción. La temperatura máxima alcanzada producto de la hidratación del cemento fue de 31.21°C en el caso del AM65 y la menor se presentó en el aditivo AM65H con un valor de 29.52°C. A partir del delta de temperatura se confirmó que la mayor resistencia sería obtenida con el aditivo AM65 en el caso del

cemento K. Los productos de hidratación se generaron a mayor temperatura y al dosificar el aditivo AM6 ocurrió en menor tiempo respecto a los otros aditivos manejadores.

➤ **Morteros con cemento P.** La naturaleza química y composición de los aditivos manejadores tiene más afinidad con el cemento P (gráfica 31). Esto se manifestó tanto por el mayor tiempo de la fase de inducción (3- 4 horas) como por el desplazamiento de la curva en la fase fraguado. La temperatura inicial es menor, lo que demuestra que los aditivos empiezan a realizar su función en menor tiempo que en el cemento K. En este cemento es más notoria la diferencia en temperaturas máximas siendo menor el aditivo AM65H (27.06°C) y mayor en el aditivo AM65 (29.71°C). Otro aspecto considerable es la amplitud que presenta la curva en el mortero con aditivo AM65H lo cual muestra que permite obtener a una menor velocidad de reacción la mayor cantidad de productos, los cuales incrementan la resistencia mecánica del material.

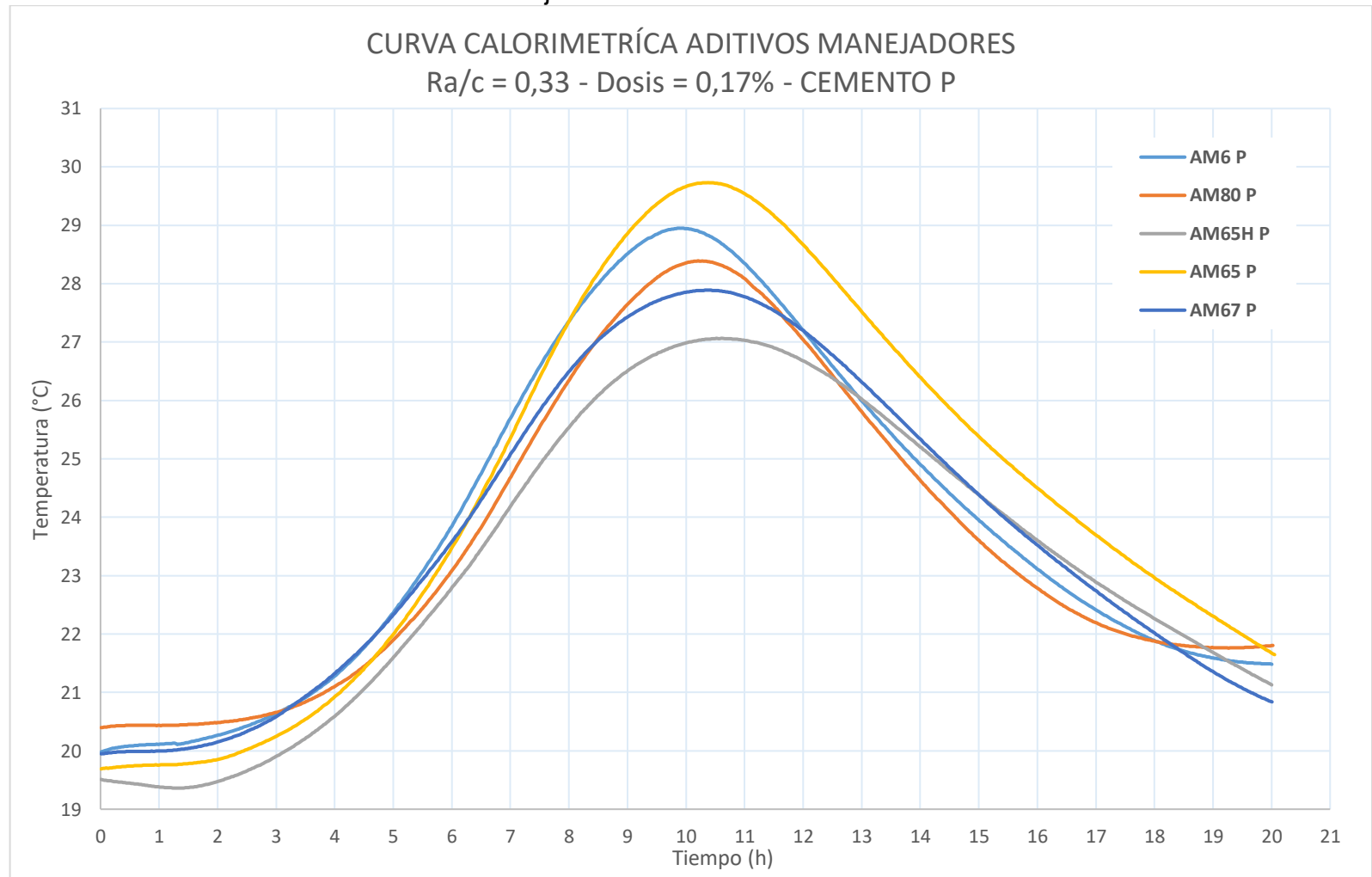
Como conclusión los aditivos manejadores en estudio tienen mas afinidad durante la hidratación del cemento P, lo que les permite tanto mayor tiempo de manejabilidad debido a el incremento en el tiempo de fraguado inicial. Tambien se generan mayor cantidad de productos por lo que la resistencia a la compresión seria mayor.

Gráfica 30. Curva calorimétrica aditivos manejadores en morteros con cemento K.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 31. Curva calorimétrica aditivos manejadores en morteros con cemento P.



Fuente: elaboración propia.

3.6.3.4 Curva calorimetrica de mezclas de aditivos. En esta parte del capítulo se analizarán los perfiles térmicos resultantes de la adición de las mezclas al mortero en los dos cementos, los cuales se muestran en las gráficas 32 y 33. Es importante recordar que la formulación de estas mezclas se encuentra de forma detallada en la tabla 8 del capítulo 2. De primera vista se destaca la diferencia en los puntos máximos entre los cementos, la amplitud de las curvas, y duración y forma en que desciende la temperatura después del fraguado.

➤ **Mortero con mezclas de aditivos y cemento K.** Las mezclas que solo presentan dos componentes AR75M, AR50M y AR25M mostraron temperaturas iniciales cercanas sin importar la dosificación de aditivos AR40 y AM67. Los tiempos de la fase de inducción son apreciables en la curva (gráfica 32); sin embargo, a pesar del aditivo AR25M obtener la mayor fluidez incluso superior a los aditivos manejadores que comercializados por la compañía solo muestra 1.5 horas de este proceso lo cual justificaría el rápido descenso en su manejabilidad, seguido por el AR75M (1 hora). El fraguado inicia y finaliza en tiempos muy cercanos, el inicio se encuentra entre las 2.47-2.67 horas y el final a las 6.66-6.87 horas lo que indica que el proceso de hidratación sigue un mismo fenómeno por lo que a pesar de tener diferentes cantidades de aditivo reductor y manejador su naturaleza química es equivalente. Al seguir la misma ruta en la hidratación las temperaturas máximas son cercanas (29.18-30.16 °C), por que en este caso el delta entre la temperatura más alta y la inicial no es un punto de comparación o determinante para los resultados en la resistencia a la compresión.

Cuando la composición de aditivo AR40 se fija en un 25% y sus otros componentes son el AM67 y el AM65H se obtienen los aditivos AR18M5 y AR57M1. Por el contrario de las mezclas AR25M-AR50M y AR75M la proporción en los componentes de las mezclas si muestra comportamientos diferentes en las curvas calorimetricas, la desigualdad más destacable se observa en la mezcla AR57M1. Aunque las curvas tienen una etapa de inducción cercana la forma en la que crecen después de esta es diferente, por lo que la velocidad en la hidratación no es equivalente. Generando una diferencia en el tiempo final de fraguado de 38 minutos pero en temperatura de 0.45°C.

Por último se presentan las mezclas AR12M3 y AR37M1, cuyo comportamiento es prácticamente igual pero difiere en su temperatura inicial. La mezcla AR37M1 tiene una temperatura en el tiempo 0 de 18.44°C siendo la menor temperatura registrada respecto aditivos reductores y manejadores, presentando una desigualdad de 1.01°C con la mezcla AR12M3. Como se especificó anteriormente las mezclas no presentan diferencias considerables entre si, sin embargo al analizar sus componentes las mezclas desplazaron la temperatura máxima y tiempo de fraguado de los aditivos AR40 y AM67 sin modificar el tiempo de la fase de inducción.

➤ **Mortero con mezclas de aditivos y cemento P.** Por el contrario de las curvas obtenidas con el cemento K, en el cemento P estas difieren mucho en su

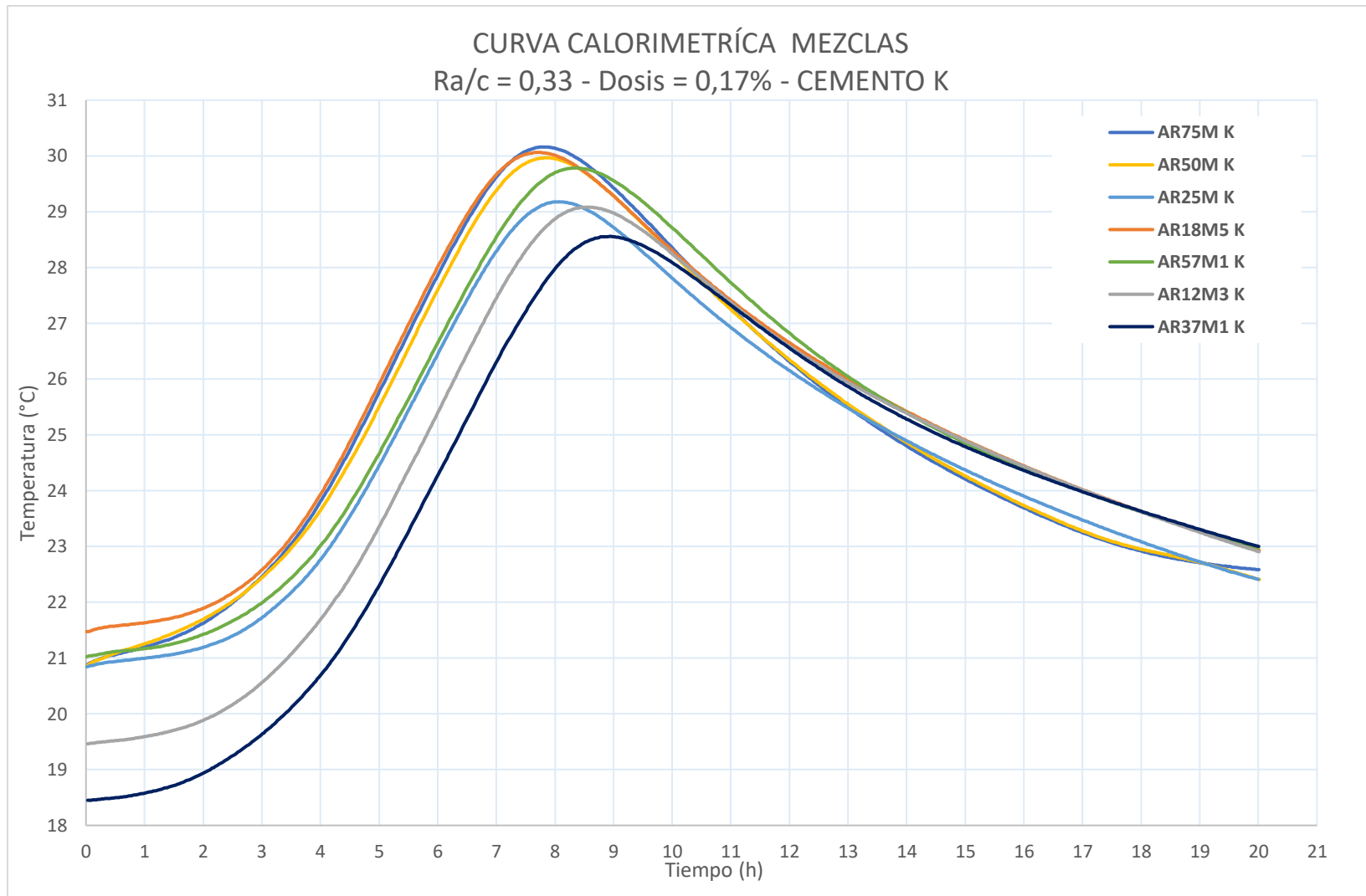
comportamiento, tanto en los tiempos de inducción como en el de fraguado. Inicialmente se analizaron las mezclas que contienen solo AR40 y AM67 las cuales son la AR25M-AR75M y AR50M, después las mezclas que contienen los tres aditivos A18M5-AR57M1-AR12M3 y AR37M1.

La temperatura inicial de la mezcla AR25M fue superior a las AR75M y AR50M por 2.07°C. Los tiempos de inducción fueron mayores respecto al cemento K, este periodo fue más representativo en la mezcla AR25M llegando hasta las 2.5 horas y siendo superior por 1 hora a las mezclas AR75M y AR50M. El inicio de la zona de fraguado de las mezclas AR75M y AR50M presentó una mínima diferencia (0.6 minutos), contrario al AR25M que empezó a las 3.02 horas pero finalizó en menor tiempo (8.11 horas). Este comportamiento indicaría que el aditivo inicialmente permite que las partículas de cemento y agua reaccionen gradualmente, pero la interacción entre estas partículas al entrar en contacto es inmediata realizando su proceso de hidratación rápidamente.

A pesar de que la cantidad de aditivo AR40 en las mezclas AR18M5 y AR57M1 es inferior a la de los aditivos manejadores el tiempo de fraguado disminuyó de forma considerable, lo que manifiesta que el aditivo reductor presenta mayor afinidad con el cemento P. La influencia de los aditivos manejadores se muestra en la fase de inducción pues tanto la mezcla AR18M5 y principalmente la AR57M1 presentan largos tiempos de inducción superando el tiempo de sus componentes manejadores. Los tiempos de fraguado final en las mezclas fueron cercanos sin embargo las temperaturas máximas alcanzadas difieren por 3°C. Después del fraguado la curva de la mezcla AR18M5 presenta mayor longitud en su descenso lo que infiere mayor cantidad de productos respecto a la mezcla AR57M1.

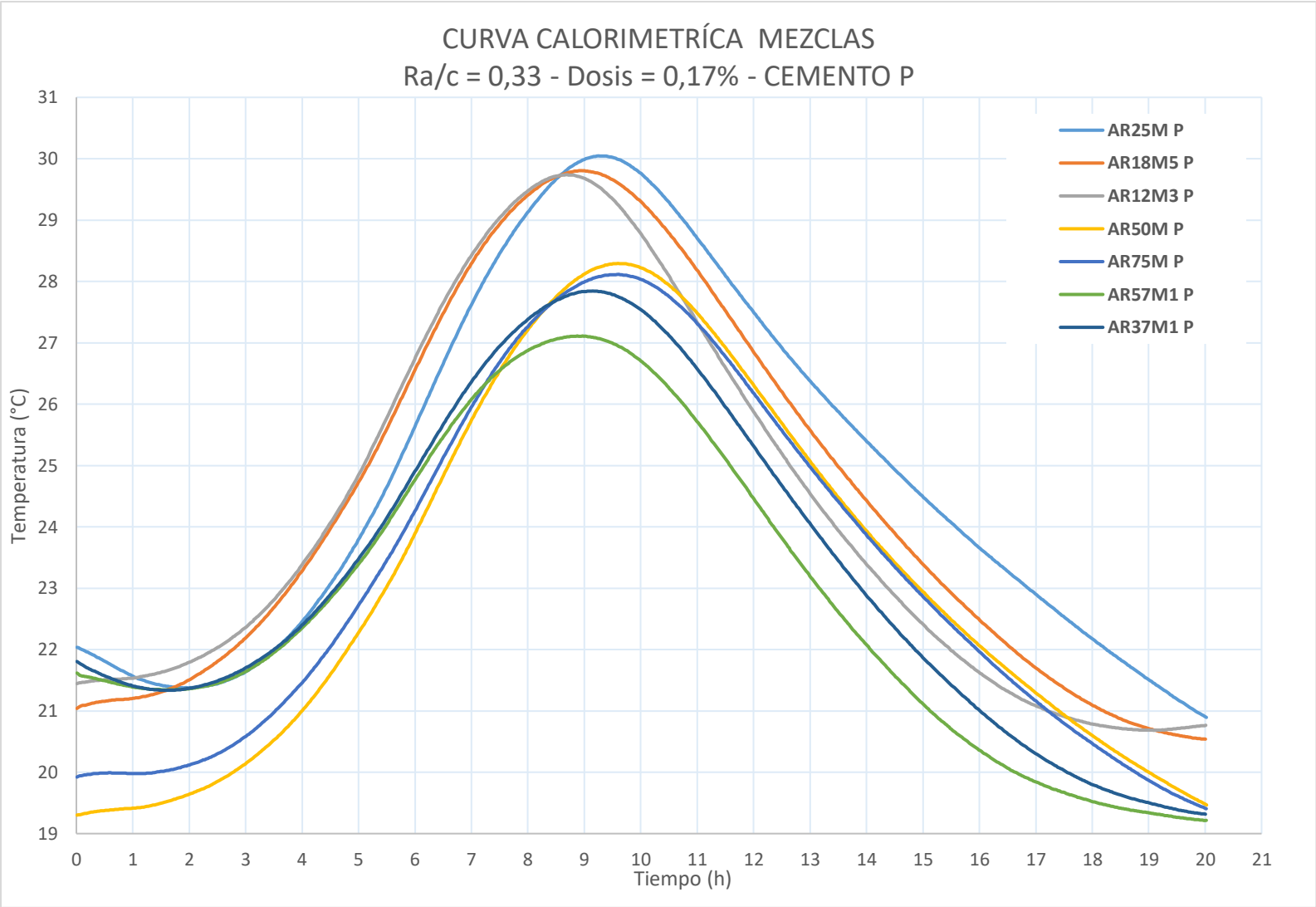
Cuando se incorporan las mezclas AR12M3 y AR37M1 al mortero inicialmente su temperatura es muy cercana, sin embargo con el paso del tiempo la mezcla AR12M3 inicia primero su fraguado disminuyendo la fase de inducción y por consiguiente la manejabilidad respecto a los aditivos de carácter manejador que tiene en su composición. Comportamiento contrario a la mezcla AR37M1 cuya fase de inducción tiene una duración de 2.5 horas aproximadamente, la reacción de hidratación con esta mezcla presenta baja velocidad generando una temperatura máxima inferior por 2°C a la mezcla AR37M1.

Gráfica 32. Curva calorimétrica mezclas de aditivos en cemento K.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 33. Curva calorimétrica mezclas de aditivos en cemento P.



Fuente: elaboración propia.

3.6.4 Usos recomendados para las mezclas de aditivos formuladas. Para concluir, debido a la gran cantidad de aditivos estudiados y por consiguiente de resultados obtenidos se sintetizó la información en la tabla 20. No es posible decir ciertamente cual es el mejor o peor aditivo, debido a que cada mortero dependiendo de las propiedades obtenidas puede ser empleado para un uso determinado.

La mezcla AR25M es adecuada en suelos nivelados a mano, morteros autonivelantes para piso o revestimiento en muros y vigas, empleando sistemas de colocación manual o por bombeo y sin requerir vibración en su colocación⁶¹. Esto a causa de la manejabilidad alta inicial y de la capacidad de mantenerse y decrecer de forma gradual. Es destacable que la mezcla funciona de forma silimar en al emplear los cementos P o K, por lo cual puede ser comercializado a constructores que empleen estos cementos asegurando propiedades semejantes, recordando que la resistencia a la compresión después de los 28 días superior a los 60 MPa.

En el caso de que el tiempo sea un factor predominante, la mezcla AR18M5 permite buena manejabilidad tanto inicial como final en un tiempo de fraguado menor sin sacrificar la resistencia mecánica al utilizar el cemento P (60.68 MPa), por lo que el material se tardará menos en endurecer agilizando el tiempo de aplicación bien sea como mortero de relleno⁶² o recubrimiento en mampostería estructural.

Las mezclas AR75M y AR50M a pesar de no presentar un flujo inicial alto, tienen la capacidad de mantener este valor a tiempos mayores a los 60 min en los dos cementos. Lo que representaría aditivos adecuados para la adhesión de elementos con peso representativo⁶³, de igual forma permitirían mantener la mezcla en reposo mayor tiempo por lo que en obras de construcción el mortero con estas mezclas generaría disminución de esfuerzo y tiempo por parte del constructor para su elaboración, manejo y aplicación.

Debido a la similitud en las propiedades de desempeño de las mezclas de aditivos AR57M1, AR12M3 y AR37M1 al emplear el cemento P y K, su uso adecuado es en elementos que requieran compactación rápida pero acabado superficial fino, como la adhesión de baldosas, tejas o la elaboración de muros de contención.

⁶¹ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Morteros. 2017. 119 p.

⁶² NATIONAL READY MIXED CONCRETE ASSOCIATION. Hormigón el concreto en la práctica CIP-Relleno fluido. 2010. 1 p.

⁶³ UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Op.cit., p.120.

Tabla 20. Resumen propiedades de desempeño obtenidas.

Tipo de aditivo	Aditivo	Cemento	Fluidez a los 5 min (cm)	Fluidez a los 90 min (cm)	Resistencia inicial (MPa)	Resistencia final (MPa)	Inicio del fraguado (h)	Final del fraguado (h)	Tiempo de fraguado (h)	T Max fraguado (°C)
Reductor	AR3		9.9	Seco	35.33	61.34	2.78	7.63	4.85	29.47
	AR7		16.4	10.8	42.83	67.12	3.2	7.94	4.74	29.25
	AR40		11.3	Seco	35.6	64.96	2.85	7.96	5.11	28.58
Manejador	AM65		13.2	14.2	33.12	60.9	3.36	8.86	5.5	29.73
	AM65H		12.55	11	30.62	57.02	3.07	8.81	5.74	27.06
	AM67		11.7	12.1	33.76	57.24	3.19	8.44	5.25	27.89
	AM80		14.7	13.6	34.81	60.73	3.71	9.38	5.67	28.39
	AM6	P	16.3	15.7	36.62	56.87	2.88	8.8	5.92	28.95
	AR75M		14.9	15	29.96	60.41	2.85	8.16	5.31	28.11
	AR50M		15.1	14.6	34.8	62.21	2.84	8.55	5.71	28.29
	AR25M		17.4	15.4	30.81	63.16	3.02	8.11	5.09	30.05
Mezclas	AR18M5		16.6	15.2	29.55	60.68	2.45	7.75	5.3	29.8
	AR57M1		14.1	13.5	31.58	60.7	2.65	8.11	5.46	27.11
	AR12M3		15.4	13.3	33.36	61.03	2.46	7.71	5.25	29.74
	AR37M1		14.9	13.7	36.64	60.54	2.79	8.02	5.23	27.84
Reductor	AR3		11.4	10.1	40.62	65.96	2.59	6.11	3.52	29.28
	AR7		15.5	11.4	42.41	66.56	2.72	6.20	3.48	30.59
	AR40		13.2	10.4	45.19	73.31	2.68	6.49	3.81	29.79
Manejador	AM65	K	14.6	15.1	31.29	59.26	2.9	6.86	3.96	31.21
	AM65H		13.8	12.6	31.83	55.44	2.27	7.24	4.97	29.52
	AM67		14.1	13.1	30.20	58.21	2.63	6.49	3.86	30.57
	AM80		16.7	14.2	34.75	58.55	3.2	7.17	3.97	30.05
	AM6		17.1	16.6	35.64	59.18	0.86	6.8	5.94	19.89

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. (Continuación).

Tipo de aditivo	Aditivo	Cemento	Fluidez a los 5 min (cm)	Fluidez a los 90 min (cm)	Resistencia inicial (MPa)	Resistencia final (MPa)	Inicio del fraguado (h)	Final del fraguado (h)	Tiempo de fraguado (h)	T Max fraguado (°C)
	AR75M		15.1	14.4	33.9	58.95	2.55	6.66	4.11	30.16
	AR50M		16.5	15.3	34.27	63.88	2.47	6.7	4.23	29.97
	AR25M		18	15.6	31.68	60.33	2.67	6.87	4.2	29.18
Mezclas	AR18M5	K	14.5	13.1	34.52	59.96	2.32	6.5	4.18	30.06
	AR57M1		15.4	14.2	34.47	59.26	2.59	7.13	4.54	29.79
	AR12M3		16.4	14.4	32.37	55.11	2.75	7.23	4.48	29.08
	AR37M1		16.4	15.1	33.35	59.26	2.72	7.60	4.88	28.56

Fuente: elaboración propia.

4. EVALUACIÓN DE COSTOS

Este capítulo tiene como fin realizar la comparación del costo de las mezclas de mortero realizadas sin aditivos, con el costo de emplear las mezclas de aditivos formuladas usando como unidad de medida el metro cúbico. Para lo cual se requiere inicialmente calcular la masa de cada materia prima en la mezcla de mortero para producir un metro cúbico total, por lo cual a partir de las densidades individuales calculadas del cemento y los agregados finos y medios en el desarrollo experimental y asumiendo la densidad del agua como 1 g/cm³ se obtuvo la densidad de la mezcla con el cemento P y K en Kg/m³ (Tabla 21).

Tabla 21. Densidad de la mezcla de mortero sin aditivos.

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad mezcla (kg/m ³)
CEMENTO P					
Cemento	400	27,93	3,08	0,86	860,33
Agregados medios	727,65	50,81	2,6	1,32	1321,15
Agregados finos	172,35	12,03	2,9	0,35	349,03
Agua	132	9,21	1	0,09	92,17
Sumatoria	1432	100	9,58	2,62	2622,70
CEMENTO K					
Cemento	400	27,93	3,04	0,85	849,07
Agregados medios	727,65	50,81	2,6	1,32	1321,06
Agregados finos	172,35	12,03	2,9	0,35	348,87
Agua	132	9,21	1	0,09	92,1
Sumatoria	1432	100	9,54	2,611	2611,102

Fuente: elaboración propia.

El mismo procedimiento matemático se llevó a cabo para cada mortero que contenía las mezclas de aditivos, teniendo en cuenta los dos cementos en estudio, obteniendo las densidades en kg/m³ de cada mortero. En el anexo B se muestra a detalle los valores empleados, sin embargo en la tabla 20 se muestra un resumen que hace énfasis en los resultados. Estableciendo la densidad de cada mortero y por medio del porcentaje en peso y empleando la ecuación 17 se calcula la masa en kilogramos requerida de cada materia prima por metro cúbico de mortero.

$$\text{Masa (Kg)} = \rho_{\text{TOTAL DEL MORTERO}} * \frac{\% \text{ Peso}}{100}$$

Ecuación 18. Kilogramos de materia prima por m³.

Los resultados obtenidos para cada mortero del cemento P y K se muestran de forma detallada en el anexo B. La tabla 23 muestra una recopilación de los resultados.

Tabla 22. Densidad del mortero con mezclas de aditivos.

Mezcla de aditivo	Costo de la mezcla de aditivo por kg	Cemento	Densidad del mortero kg/m ³
AR75M	\$11.360	P	2621,97
		K	2610,80
AR50M	\$10.723	P	2622,03
		K	2610,86
AR25M	\$10.087	P	2622,02
		K	2610,86
AR18M5	\$11.011	P	2622,02
		K	2610,86
AR57M1	\$11.249	P	2622,02
		K	2610,86
AR37M1	\$10.647	P	2622,02
		K	2610,85
AR12M3	\$10.494	P	2622,02
		K	2610,86

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. Masa de materia prima requerida para 1m³ de mortero.

Materia Prima	Sin aditivo	AR75M	AR50M	AR25M	AR18M5	AR57M1	AR37M1	AR12M3
	kg para 1m ³							
Cemento P y K	733	732,05	732,06	732,06	732,06	732,06	732,06	732,06
Agregados medios	1332,68	1331,68	1331,71	1331,71	1331,71	1331,71	1331,71	1331,71
Agregados finos	315,65	315,42	315,43	315,43	315,43	315,43	315,43	315,43
Agua	241,75	240,40	240,26	240,19	240,28	240,35	240,26	240,23
Mezcla de aditivo	0,00	2,42	2,56	2,64	2,54	2,47	2,56	2,60
Sumatoria	2622,70	2621,97	2622,03	2622,02	2622,02	2622,02	2622,02	2622,02

Fuente: elaboración propia.

Con la masa necesaria de cada materia prima para producir un metro cúbico de mezcla se calcula el costo del mortero en cada caso, con cemento P y K, sin aditivo y con las mezclas de aditivos evaluadas en el proyecto. Esto con el fin de comparar estos costos y cumplir el objetivo establecido. Al igual que en los casos anteriores por la cantidad de mezclas de aditivos empleadas los cálculos de forma específica se encuentran en el anexo B, para que el lector vea fácilmente el costo resultante se muestra en la tabla 24, se recuerda que en la tabla 22 del presente capítulo se encuentran los precios por kilogramo de las mezclas de aditivos.

Tabla 24. Costo del m³ de mortero con las mezclas de aditivos en cemento P y K.

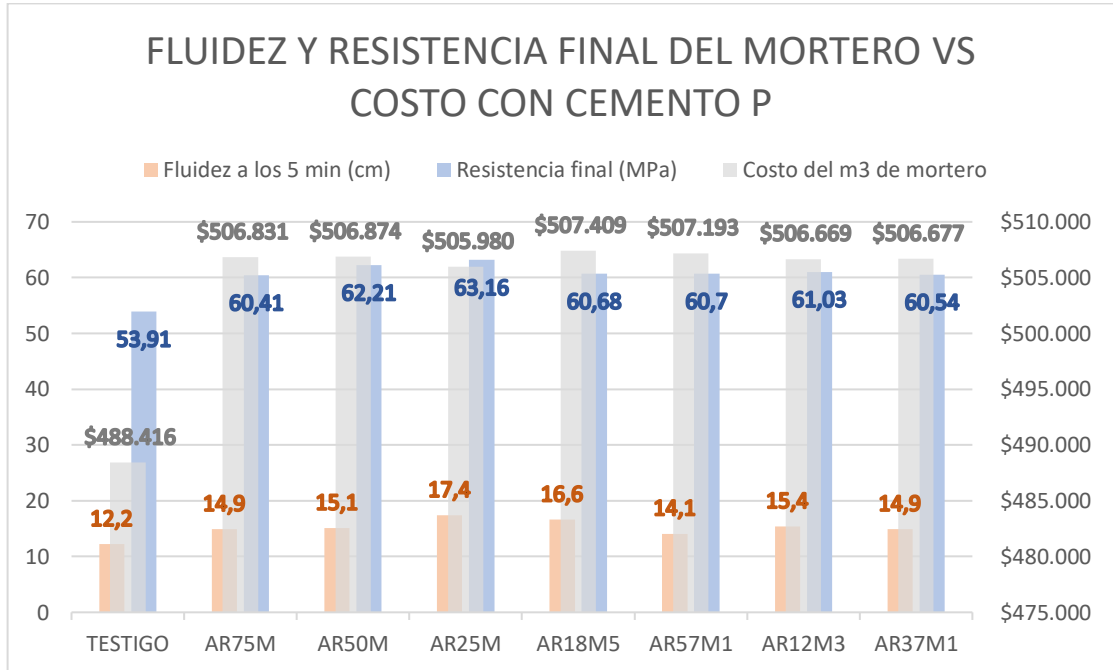
Materia Prima	Costo por kg (\$)	Sin aditivo	Costo del m ³ de mortero con la mezcla						
			AR75M	AR50M	AR25M	AR18M5	AR57M1	AR37M1	AR12M3
Cemento P	510								
A. Medios	60	\$479.755	\$506.831	\$506.874	\$505.980	\$507.409	\$507.193	\$506.677	\$506.669
A. Finos	80								
Agua	3,789								
Cemento K	520								
A. Medios	60	\$487.022	\$514.152	\$514.194	\$513.301	\$514.729	\$514.513	\$513.997	\$513.989
A. Finos	80								
Agua	3,789								

Fuente: elaboración propia.

Como se evidencia en la tabla 24 incorporar las mezclas de aditivos incrementa el costo del mortero entre \$26300 - \$27700 por cada metro cúbico de mezcla. Esto podría dar a entender que el aditivo representa un costo, más que un ahorro; sin embargo, el ahorro es fundamentado en que las mezclas de aditivos formuladas incrementaron de forma considerable la fluidez inicial del mortero y en un segundo plano su resistencia final. De igual forma las mezclas de aditivos redujeron la cantidad de cemento y agua empleada por m³ representando un ahorro considerable al emplear gran cantidad de mortero, recordando que la materia prima que más se demanda y es más costosa aparte del aditivo es el cemento. Para ver las propiedades respecto al costo del mortero se realizaron las gráficas 34 y 35 con el cemento P y K respectivamente.

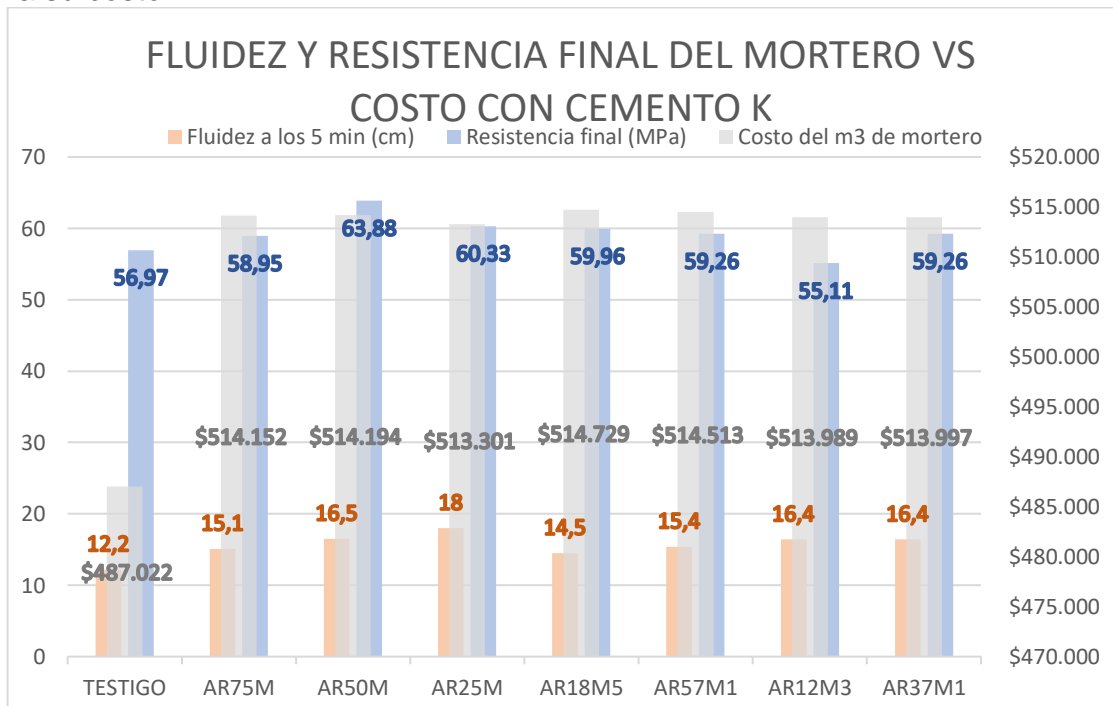
Para cuantificar los beneficios en cuanto a la fluidez y cantidad de cemento y evidenciar el ahorro neto se realizó el cálculo de la cantidad de agua y cemento adicional que requeriría cada blanco analítico para alcanzar la fluidez inicial generada por las mezclas de aditivos formuladas asumiendo que no habría segregación en el mortero y teniendo en cuenta que la relación agua cemento debe mantenerse en 0.33, debido a que si solo se agrega el agua, pero no se incrementa la cantidad de cemento, la resistencia final a la compresión disminuiría. Los cálculos de forma detallada se muestran en el anexo C, con el objetivo de comparar y evidenciar el ahorro al emplear las mezclas de aditivos se realizaron las gráficas 36 y 37.

Gráfica 34. Propiedades de desempeño del mortero con cemento P respecto a su costo.



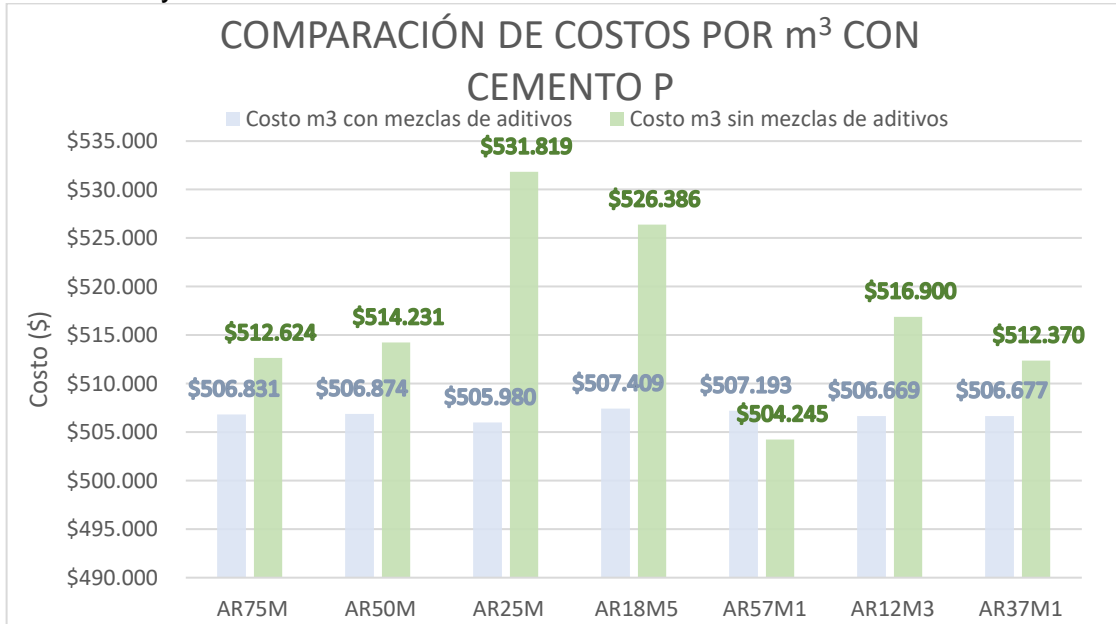
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 35. Propiedades de desempeño del mortero con cemento K respecto a su costo.



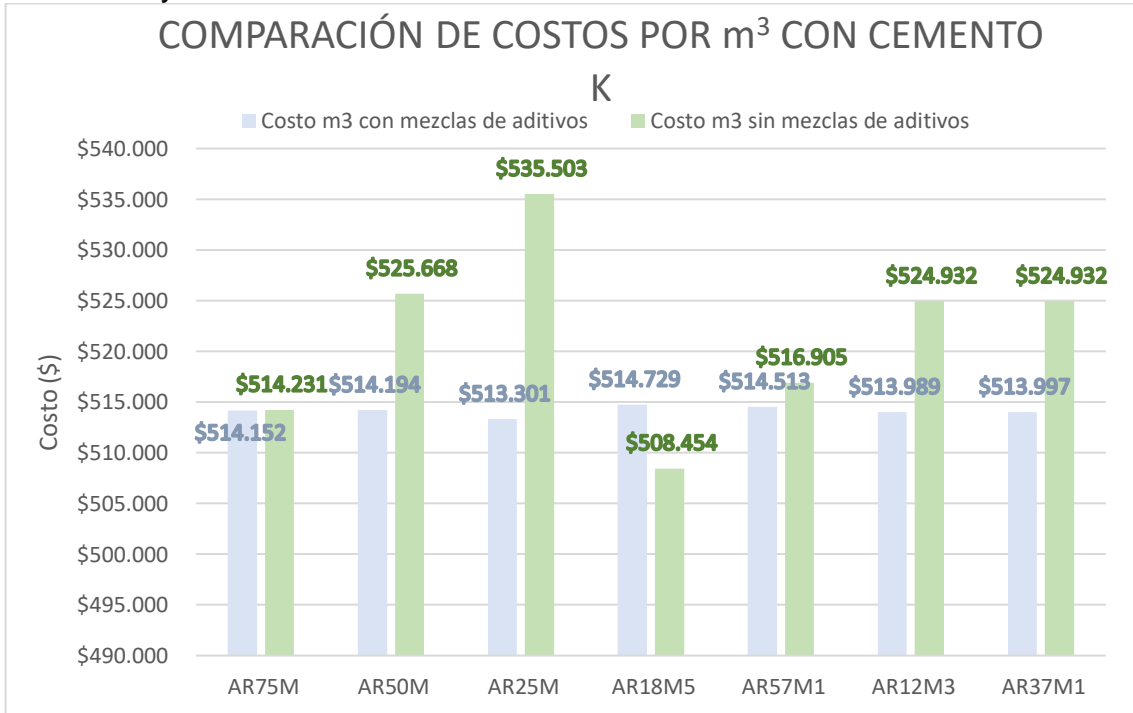
Fuente: elaboración propia.

Gráfica 36. Comparación de costos para una misma fluidez entre mortero sin aditivo y el mortero con las mezclas de aditivos en cemento P.



Fuente: elaboración propia.

Gráfica 37. Comparación de costos para una misma fluidez entre mortero sin aditivo y el mortero con las mezclas de aditivos en cemento K.



Fuente: elaboración propia.

Las gráficas 36 y 37 muestran el ahorro al emplear las mezclas de aditivos, cuando el constructor utilice el cemento P en su mortero, podrá disminuir el costo entre \$5700 y \$27900 por cada metro cúbico. De igual forma el cemento K también presenta una reducción en donde, al emplear mayor cantidad de mortero en la obra más representativa será, el rango de ahorro se encuentra entre los \$100 y \$22250. Por lo que una construcción que requiera 1000 m³ de mortero para diferentes usos, ahorraría entre \$2.391.213 y \$25.839.171 al utilizar las mezclas de aditivos formuladas en el proyecto, esto sin cuantificar el ahorro que con lleva la reducción en ahorro energético, tiempo de colocación, facilidad en la colocación y compactación y la velocidad de avance en la obra⁶⁴.

Un comportamiento para destacar es el que muestra la mezcla AR25M puesto que tanto en el cemento P como K incremento la fluidez inicial, y es la que mayor ahorro genera. Por lo cual esta mezcla cumpliría las expectativas y propiedades demandas en el diseño de la obra y de igual forma reduciría considerablemente los costos al ser empleada.

⁶⁴ GERARDO RIVERA, A. Agregados para mortero o concreto. Concreto Simple.2002, 232 p.

5. CONCLUSIONES

- Se caracterizaron los cementos, agregados y aditivos empleados. La Difracción de Rayos X y la Fluorescencia de Rayos X permitieron establecer la composición química de los cementos P y K para ser analizados en conjunto con las propiedades de desempeño del mortero. La densidad del cemento K fue inferior por 0.04 g/cm^3 respecto al cemento P, sin embargo su fluidez es de 64% siendo superior en un 6% con base al cemento P. El agregado medio absorbe 3.9% de agua.
- La relación agua cemento definida fue de 0.29 para aditivos reductores y de 0.33 para aditivos manejadores y mezclas formuladas. La prueba de la culebrilla permitió establecer una dosis de aditivo de 0.17% común a los cementos y aditivos empleados.
- Las propiedades de desempeño estudiadas (fluidez, resistencia a la compresión y tiempo de fraguado) cobran mayor significado y caracterizan mejor el material al ser llevadas a cabo y analizadas en conjunto. Al comparar los cementos P y K se concluye que la fluidez del mortero con cemento K es superior en todos los aditivos, por lo cual la composición química y características físicas de este cemento tienen mayor compatibilidad con los aditivos estudiados.
- Las mezclas de aditivos presentaron tendencias mixtas en la forma de generar la fluidez, algunas alcanzaron un punto máximo y se mantuvieron y otras presentaron la fluidez más elevada a los 5 minutos. La mezcla AR25M fue la más destacable y su desempeño fue cercano en los dos cementos. La resistencia a la compresión presentó resultados a los 28 días superiores en un 59% al emplear los aditivos respecto a los morteros convencionales que se comercializan en el país.
- En cuanto a las mezclas de aditivos no se incrementó de forma considerable la resistencia final del mortero. El tiempo de final del fraguado fue superior en el cemento P, teniendo relación con la diferencia en fluidez entre los cementos. Las mezclas mantuvieron tiempos cercanos a los presentados con los aditivos reductores y manejadores.
- A partir de la diferencia en fluidez entre los blancos analíticos y el mortero con las mezclas de aditivos se estimó el ahorro argumentado en la reducción de agua y cemento que se necesitaría para alcanzar la fluidez del mortero al incorporar las mezclas de aditivos. El ahorro por cada metro cúbico se vuelve más trascendental al demandarse mayor cantidad de material, por ejemplo si el constructor solicita 1000 m^3 de mortero ahorraría entre \$2.391.213 y \$25.839.171 dependiendo de la mezcla de aditivo utilizada.

6. RECOMENDACIONES

Para futuras investigaciones se sugiere:

- Realizar un diseño experimental que permita verificar la composición en las mezclas que optimiza las propiedades de desempeño.
- Analizar la estructura química resultante de mezclar los aditivos respecto a las mezclas destacadas.
- Escalar el estudio al concreto, con las mezclas formuladas y los cementos empleados.
- Mezclar otros aditivos con funcionalidades distintas, para estudiar nuevos comportamientos en las propiedades de desempeño.
- Corroborar el efecto de las diferencias en el tamaño de partícula de los cementos y su interacción con las mezclas de aditivos a partir de pruebas experimentales.
- Modificar la proporción empleada entre agregados finos y medios en el mortero con el fin de generar reducción de costos.

BIBLIOGRAFÍA

AITCIN, Pierre y FLATT, Robert. Science and Technology of concrete admixtures. Cambridge: Elsevier, 2016. p 12-23. (Woodhead Publishing in Civil and Structural Engineering: Number 59). ISBN 978-0-08-100693-1.

BAPAT, Jayant. Mineral Admixtures in Cement and Concrete. New York: CRC Press, 2013. p 130-136. ISBN 978-1-4398-1793-3.

BRANDT, Andrzej. Cement-Based Composites. Materials, Mechanical Properties And Performance. 2 ed. New York: Taylor & Francis Group. p 67-87. ISBN 0-203-88903-7.

DODSON, Vance. Concrete admixtures. New York: Springer Science+Business Media LLC, 1990. p 39-67.

HEWLETT, Peter. LEA'S Chemistry of Cement and Concrete. 4 ed. Oxford: Elsevier, 2001. p 95-126. ISBN 978-0-7506-6256-7.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grados y otros trabajos. Investigación. NTC 1486. Sexta actualización. Bogotá: en instituto, 2008

----- Referencias bibliográficas, contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá: el instituto, 2008, p. 12.

----- Referencias documentales para fuentes de informaciones electrónicas. NTC 4490. Bogotá: el instituto, 1998, p. 12

----- Norma Técnica Colombiana 174. Concretos. Especificaciones de los agregados para concreto. NTC 174. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000. P 5-8.

----- Norma Técnica Colombiana 3356. Concretos. Mortero premezclado para mampostería. NTC 3356. Bogotá D.C.: El Instituto, 2000. P 7-8.

----- Norma Técnica Colombiana 221. Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Segunda actualización.

----- Norma Técnica Colombiana 111. Ingeniería civil y arquitectura. Cementos. Método de ensayo para determinar fluidez de morteros de cemento hidráulico. Segunda actualización.

KIM, Geun Soo. Effect of heat generation from cement hydration on mass concrete placement. Tesis de Maestría en Ciencias. Iowa: Iowa State University, 2010. 12 p.

KURDOWSKI, Wieslaw. Cement and Concrete Chemistry. Polonia: Springer, 2014. p 279-351. ISBN 978-94-007-7944-0.

OHAMA, Yoshihiko. Handbook of polymer-modified concrete and mortars. Properties and Process Technology. Japon: Noyes Publications, 1995. p 55-125. ISBN 0-8155-1358-5.

PAGE, L.C. Durability of concrete and cement composites. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2007. p 247-274. ISBN 978-0-8493-9129-3.

Procedimiento interno 3.01.06. D- Residuos sólidos (150°C). Creada en enero 2016.

Procedimiento interno 5.01.00. °C- Densidad (20°C). Creada en enero 2016.

Procedimiento interno 5.09.05. Viscosidad reomática. Creada en enero 2016.

RAMACHANDRAN, V.S; PAROLI, Ralph; BEAUDOIN, James y DELGADO, Ana. Handbook of thermal analysis of construction materials. Ottawa: Noyes Publications, 2002. p 143-181. ISBN 0-8155-1487-5.

RIXOM, Roger y MAILVAGANAM Noel. Chemical Admixtures for concrete. 3 ed. Londres: E&FN SPON, 1999. p 329-350. ISBN 0-419-22520-X

ROUSSEL, Nicolas. Understanding the rheology of concrete. Cambridge: Woodhead Publishing, 2012. p 177-194. ISBN 978-0-85709-028-7.

SOROKA, Itzhak. Portland cement paste and concrete. Londres: The Macmillan Press LTD, 1979. 2 p

ANEXO A
CANTIDADES DE MATERIA PRIMA EN EL MORTERO PARA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.

	Cemento P o K (g)	Dosis	Aditivo (g)	RA/C	Agua teórica (ml)	Agua real(ml)	A. Finos (g)	A. Medios (g)
T 0.29			0	0,29	116	116		
T 0.33			0	0,33	132	132		
AR7			1,49			115,19		
AR40			1,45	0,29	116	115,23		
AR3			1,36			115,32		
AM6			1,33			131,35		
AM67			1,29			131,39		
AM65H			1,39			131,29		
AM80	400	0.17 %	1,27			131,41	172,35	727,65
AM65			1,32			131,36		
AR75M			1,32	0,33	132	131,36		
AR50M			1,4			131,28		
AR25M			1,44			131,24		
AR18M5			1,39			131,29		
AR57M1			1,35			131,33		
AR12M3			1,42			131,26		
AR37M1			1,4			131,28		

Fuente: elaboración propia

ANEXO B
COSTÓ DEL m³ DE MORTERO CON MEZCLAS DE ADITIVOS.

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
Cemento P	400,00	27,93	3,08	0,86	860,34	732,60	510,00	\$ 373.625
Agregados medios	727,65	50,81	2,60	1,32	1321,15	1332,69	60,00	\$ 79.961
Agregados finos	172,35	12,04	2,90	0,35	349,03	315,66	80,00	\$ 25.253
Agua	132,00	9,22	1,00	0,09	92,18	241,76	3,79	\$ 916
Sumatoria	1432,00	100,00	9,58	2,62	2622,70	2622,70	653,79	\$ 479.755
Cemento P	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,05	510,00	\$ 373.344
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,68	60,00	\$ 79.901
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,42	80,00	\$ 25.234
Agua	131,36	9,17	1,00	0,09	91,69	240,40	3,79	\$ 911
AR75M	1,32	0,09	1,05	0,001	0,96	2,42	11359,50	\$ 27.442
Sumatoria	1432,68	100,00	10,63	2,62	2621,97	2621,97	12013,29	\$ 506.831
Cemento P	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,06	510,00	\$ 373.352
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,28	9,16	1,00	0,09	91,63	240,26	3,79	\$ 910
AR50M	1,40	0,10	1,10	0,001	1,07	2,56	10723,00	\$ 27.475
SUMATORIA	1432,68	100,00	10,68	2,62	2622,03	2622,03	11376,79	\$ 506.874

Fuente: elaboración propia

ANEXO B.
COSTÓ DEL m³ DE MORTERO CON MEZCLAS DE ADITIVOS (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
Cemento P	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,06	510,00	\$373.351
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,24	9,16	1,00	0,09	91,60	240,19	3,79	\$ 910
AR25M	1,44	0,10	1,09	0,001	1,10	2,64	10086,50	\$ 26.582
Sumatoria	1432,68	100,00	10,67	2,62	2622,02	2622,02	10740,29	\$505.980
Cemento p	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,06	510,00	\$373.351
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,29	9,16	1,00	0,09	91,64	240,28	3,79	\$ 910
AR18M5	1,39	0,10	1,10	0,001	1,07	2,54	11010,66	\$ 28.010
Sumatoria	1432,68	100,00	10,68	2,62	2622,02	2622,02	11664,45	\$507.409
Cemento P	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,06	510,00	\$373.351
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,33	9,17	1,00	0,09	91,67	240,35	3,79	\$ 911
AR57M1	1,35	0,09	1,10	0,001	1,04	2,47	11249,34	\$ 27.794
SUMATORIA	1432,68	100,00	10,68	2,62	2622,02	2622,02	11903,13	\$507.193

Fuente: elaboración propia

**ANEXO B.
COSTÓ DEL m³ DE MORTERO CON MEZCLAS DE ADITIVOS (Continuación).**

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
Cemento P	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,06	510,00	\$373.351
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,26	9,16	1,00	0,09	91,62	240,23	3,79	\$ 910
AR12M3	1,42	0,10	1,10	0,001	1,09	2,60	10493,50	\$ 27.271
Sumatoria	1432,68	100,00	10,68	2,62	2622,02	2622,02	11147,29	\$506.669
Cemento P	400,00	27,92	3,08	0,86	859,93	732,06	510,00	\$373.351
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,28	9,16	1,00	0,09	91,63	240,26	3,79	\$ 910
AR37M1	1,40	0,10	1,10	0,001	1,07	2,56	10646,50	\$ 27.279
Sumatoria	1432,68	100,00	10,68	2,62	2622,02	2622,02	11300,29	\$506.677

Fuente: elaboración propia

ANEXO B
COSTÓ DEL m³ DE MORTERO CON MEZCLAS DE ADITIVOS (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
Cemento K	400,00	27,93	3,04	0,85	849,07	732,52	520,00	\$380.910
Agregados medios	727,65	50,81	2,60	1,32	1321,06	1332,59	60,00	\$ 79.956
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,51	80,00	\$ 25.241
Agua	132,00	9,21	1,00	0,09	92,10	241,55	3,79	\$ 915
Sumatoria	1432,00	99,98	9,54	2,61	2611,10	2622,17	663,79	\$487.022
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,05	520,00	\$380.664
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,68	60,00	\$ 79.901
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,42	80,00	\$ 25.234
Agua	131,36	9,17	1,00	0,09	91,69	240,40	3,79	\$911
AR75M	1,32	0,09	1,05	0,00	0,96	2,42	11359,50	\$ 27.442
Sumatoria	1432,68	100,00	10,59	2,61	2610,80	2621,97	12023,29	\$514.152
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,06	520,00	\$380.672
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,28	9,16	1,00	0,09	91,63	240,26	3,79	\$ 910
AR50M	1,40	0,10	1,10	0,00	1,07	2,56	10723,00	\$ 27.475
SUMATORIA	1432,68	100,00	10,64	2,61	2610,86	2622,03	11386,79	\$514.194

Fuente: elaboración propia

ANEXO B
COSTÓ DEL m³ DE MORTERO CON MEZCLAS DE ADITIVOS (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm³)	Densidad parcial (g/cm³)	Densidad de la mezcla (kg/m³)	kg por m³	Costo unitario (kg)	Total
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,06	520,00	\$380.672
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,24	9,16	1,00	0,09	91,60	240,19	3,79	\$ 910
AR25M	1,44	0,10	1,09	0,001	1,10	2,64	10086,50	\$ 26.582
Sumatoria	1432,68	100,00	10,63	2,61	2610,86	2622,02	10750,29	\$513.301
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,06	520,00	\$380.672
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,29	9,16	1,00	0,09	91,64	240,28	3,79	\$ 910
AR18M5	1,39	0,10	1,10	0,001	1,07	2,54	11010,66	\$ 28.010
Sumatoria	1432,68	100,00	10,64	2,61	2610,86	2622,02	11674,45	\$514.729
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,06	520,00	\$380.672
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,33	9,17	1,00	0,09	91,67	240,35	3,79	\$ 911
AR57M1	1,35	0,09	1,10	0,001	1,04	2,47	11249,34	\$ 27.794
Sumatoria	1432,68	100,00	10,64	2,61	2610,86	2622,02	11913,13	\$514.513

Fuente: elaboración propia

ANEXO B
COSTÓ DEL m³ DE MORTERO CON MEZCLAS DE ADITIVOS (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,06	520,00	\$ 380.672
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,26	9,16	1,00	0,09	91,62	240,23	3,79	\$ 910
AR12M3	1,42	0,10	1,10	0,00	1,09	2,60	10493,50	\$ 27.271
Sumatoria	1432,68	100,00	10,64	2,61	2610,86	2622,02	11157,29	\$ 513.989
Cemento K	400,00	27,92	3,04	0,85	848,76	732,06	520,00	\$ 380.672
Agregados medios	727,65	50,79	2,60	1,32	1320,53	1331,71	60,00	\$ 79.903
Agregados finos	172,35	12,03	2,90	0,35	348,87	315,43	80,00	\$ 25.234
Agua	131,28	9,16	1,00	0,09	91,63	240,26	3,79	\$ 910
AR37M1	1,40	0,10	1,10	0,00	1,07	2,56	10646,50	\$ 27.279
Sumatoria	1432,68	100,00	10,64	2,61	2610,85	2622,02	11310,29	\$ 513.997

Fuente: elaboración propia

ANEXO C
COSTO DEL m³ DE MORTERO AL IGUALAR LA FLUIDEZ AL BLANCO ANALÍTICO.

	Cantidad en la mezcla (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
AR75M								
Cemento P	473	30,94	3,08	0,95	952,80	810,21	510	\$413.209
Agregados medios	727,65	47,59	2,6	1,23	1237,33	1246,40	60	\$74.785
Agregados finos	172,35	11,27	2,9	0,32	326,89	295,22	80	\$23.618
Agua	156	10,20	1	0,10	102,02	267,21	3,78	\$ 1.012
Sumatoria	1529	100	9,58	2,61	2619,06	2619,06	653,78	\$512.624
AR50M								
Cemento P	476,82	31,08	3,08	0,95	957,26	814,00	510	\$415.142
Agregados medios	727,65	47,43	2,6	1,23	1233,16	1242,20	60	\$74.533
Agregados finos	172,35	11,23	2,9	0,32	325,78	294,22	80	\$ 23.538
Agua	157,35	10,26	1	0,10	102,56	268,62	3,78	\$ 1.018
Sumatoria	1534,17	100,00	9,58	2,61	2618,78	2619,06	653,78	\$514.231
AR25M								
Cemento P	519,54	32,66	3,08	1,00	1005,77	855,25	510	\$436.182
Agregados medios	727,65	45,74	2,6	1,18	1189,12	1197,84	60	\$71.871
Agregados finos	172,35	10,83	2,9	0,31	314,15	283,71	80	\$ 22.698
Agua	171,45	10,78	1	0,10	107,76	282,23	3,78	\$ 1.069
SUMATORIA	1590,99	100,00	9,58	2,61	2616,82	2619,06	653,78	\$531.819

Fuente: elaboración propia

ANEXO C
COSTO DEL m³ DE MORTERO AL IGUALAR LA FLUIDEZ AL BLANCO ANALÍTICO (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
				AR18M5				
Cemento P	506,02	32,17	3,08	0,99	990,80	842,52	510,00	\$429.684
Agregados medios	727,65	46,26	2,60	1,20	1202,71	1211,53	60,00	\$ 72.692
Agregados finos	172,35	10,96	2,90	0,32	317,74	286,96	80,00	\$ 22.957
Agua	167,00	10,62	1,00	0,11	106,17	278,05	3,79	\$ 1.054
Sumatoria	1573,02	100,00	9,58	2,62	2617,42	2619,06	653,79	\$526.386
				AR57M1				
Cemento P	453,90	30,19	3,08	0,93	929,72	790,58	510,00	\$403.197
Agregados medios	727,65	48,39	2,60	1,26	1258,16	1267,39	60,00	\$76.043
Agregados finos	172,35	11,46	2,90	0,33	332,39	300,19	80,00	\$24.015
Agua	149,79	9,96	1,00	0,10	99,61	260,90	3,79	\$ 989
Sumatoria	1503,69	100,00	9,58	2,62	2619,89	2619,06	653,79	\$504.245
				AR12M3				
Cemento P	483,11	31,32	3,08	0,96	964,63	820,27	510,00	\$418.336
Agregados medios	727,65	47,17	2,60	1,23	1226,48	1235,47	60,00	\$ 74.128
Agregados finos	172,35	11,17	2,90	0,32	324,02	292,63	80,00	\$ 23.410
Agua	159,43	10,34	1,00	0,10	103,36	270,69	3,79	\$ 1.026
Sumatoria	1542,54	100,00	9,58	2,62	2618,48	2619,06	653,79	\$516.900

Fuente: elaboración propia

ANEXO C
COSTO DEL m³ DE MORTERO AL IGUALAR LA FLUIDEZ AL BLANCO ANALÍTICO (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
AR37M1								
Cemento P	472,48	30,91	3,08	0,95	952,13	809,64	510,00	\$412.917
Agregados medios	727,65	47,61	2,60	1,24	1237,82	1246,90	60,00	\$ 74.814
Agregados finos	172,35	11,28	2,90	0,33	327,02	295,34	80,00	\$ 23.627
Agua	155,92	10,20	1,00	0,10	102,02	267,18	3,79	\$ 1.012
Sumatoria	1528,40	100,00	9,58	2,62	2618,99	2619,06	653,79	\$512.370
AR75M								
Cemento K	476,82	31,08	3,08	0,96	957,26	814,01	510,00	\$415.143
Agregados medios	727,65	47,43	2,60	1,23	1233,17	1242,21	60,00	\$ 74.532
Agregados finos	172,35	11,23	2,90	0,33	325,79	294,23	80,00	\$ 23.538
Agua	157,35	10,26	1,00	0,10	102,56	268,62	3,79	\$ 1.018
Sumatoria	1534,17	100,00	9,58	2,62	2618,78	2619,06	653,79	\$514.231
AR50M								
Cemento K	504,24	32,10	3,08	0,99	988,81	840,83	510,00	\$428.823
Agregados medios	727,65	46,33	2,60	1,20	1204,53	1213,36	60,00	\$ 72.802
Agregados finos	172,35	10,97	2,90	0,32	318,22	287,40	80,00	\$ 22.992
Agua	166,40	10,59	1,00	0,11	105,94	277,47	3,79	\$ 1.051
Sumatoria	1570,64	100,00	9,58	2,62	2617,51	2619,06	653,79	\$525.668

Fuente: elaboración propia

ANEXO C
COSTO DEL m³ DE MORTERO AL IGUALAR LA FLUIDEZ AL BLANCO ANALÍTICO (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm³)	Densidad parcial (g/cm³)	Densidad de la mezcla (kg/m³)	kg por m³	Costo unitario (kg)	Total
AR25M								
Cemento K	528,89	32,99	3,08	1,02	1015,94	863,90	510,00	\$440.588
Agregados medios	727,65	45,38	2,60	1,18	1179,91	1188,56	60,00	\$ 71.313
Agregados finos	172,35	10,75	2,90	0,31	311,72	281,52	80,00	\$22.522
Agua	174,53	10,89	1,00	0,11	108,85	285,09	3,79	\$ 1.080
Sumatoria	1603,42	100,00	9,58	2,62	2616,41	2619,06	653,79	\$535.503
AR18M5								
Cemento K	463,45	30,56	3,08	0,94	941,33	800,46	510,00	\$408.232
Agregados medios	727,65	47,99	2,60	1,25	1247,63	1256,78	60,00	\$ 75.407
Agregados finos	172,35	11,37	2,90	0,33	329,61	297,68	80,00	\$ 23.814
Agua	152,94	10,09	1,00	0,10	100,86	264,15	3,79	\$ 1.001
Sumatoria	1516,39	100,00	9,58	2,62	2619,43	2619,06	653,79	\$508.454
AR57M1								
Cemento K	483,12	31,32	3,08	0,96	964,64	820,28	510,00	\$418.341
Agregados medios	727,65	47,17	2,60	1,23	1226,47	1235,46	60,00	\$ 74.128
Agregados finos	172,35	11,17	2,90	0,32	324,02	292,63	80,00	\$ 23.410
Agua	159,43	10,34	1,00	0,10	103,35	270,69	3,79	\$ 1.026
Sumatoria	1542,55	100,00	9,58	2,62	2618,49	2619,06	653,79	\$516.905

Fuente: elaboración propia

ANEXO C
COSTO DEL m³ DE MORTERO AL IGUALAR LA FLUIDEZ AL BLANCO ANALÍTICO (Continuación).

	Cantidad (g)	% Peso	Densidad Individual (g/cm ³)	Densidad parcial (g/cm ³)	Densidad de la mezcla (kg/m ³)	kg por m ³	Costo unitario (kg)	Total
AR12M3								
Cemento K	502,44	32,04	3,08	0,99	986,78	839,10	510,00	\$427.943
Agregados medios	727,65	46,40	2,60	1,21	1206,37	1215,22	60,00	\$ 72.913
Agregados finos	172,35	10,99	2,90	0,32	318,71	287,83	80,00	\$ 23.027
Agua	165,80	10,57	1,00	0,11	105,73	276,90	3,79	\$ 1.049
Sumatoria	1568,24	100,00	9,58	2,62	2617,59	2619,06	653,79	\$524.932
AR37M1								
Cemento K	502,44	32,04	3,08	0,99	986,78	839,10	510,00	\$427.943
Agregados medios	727,65	46,40	2,60	1,21	1206,37	1215,22	60,00	\$ 72.913
Agregados finos	172,35	10,99	2,90	0,32	318,71	287,83	80,00	\$ 23.027
Agua	165,80	10,57	1,00	0,11	105,73	276,90	3,79	\$ 1.049
Sumatoria	1568,24	100,00	9,58	2,62	2617,59	2619,06	653,79	\$524.932

Fuente: elaboración propia