



**UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO**

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EVALUACION DE ALCANOLAMINAS ÚTILES COMO
AYUDA DE MOLIENDA PARA CLINKER Y QUE MEJOREN
LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MORTERO
ESTÁNDAR DE CEMENTO.”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A

ED BEN AVRAHAM ACEVEDO SÁNCHEZ

MÉXICO, D.F.

2011





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: Profesor: Anaya Durand Isaías Alejandro

VOCAL: Profesor: Moreno Padilla Caritino

SECRETARIO: Profesor: Costa González Dalmau

1er. SUPLENTE: Profesor: Texta Mena José Agustín

2do. SUPLENTE: Profesor: Pérez Ramírez José Guadalupe

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

Laboratorio de Construcción de la Unidad de Aplicaciones de Grupo Petroquímico Beta.

ASESOR DEL TEMA:

Ing. Dalmau Costa González

SUSTENTANTE:

Ed Ben Avraham Acevedo Sánchez

- **Agradecimientos.**

Mi primordial agradecimiento es a mi Dios Jehová que me ha permitido y dado las herramientas necesarias para culminar este trabajo.

También agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México en específico a la Facultad de Química que han sido parte importante de mi educación integral.

Asimismo reconozco a la empresa Grupo Petroquímico Beta y a todas las personas que en esta laboran como parte fundamental de esta tesis ya que sin ellos no hubiera sido posible la realización de este proyecto.

Además gratifico a todas las personas que directa o indirectamente han contribuido a mi formación plenaria como persona y profesionista en especial a mi hermano Eduardo siendo sus consejos de gran ayuda a lo largo de mi vida, a Julio, David, Juan, Iván G. Iván S. Alejandro, Fabián, Ulises, Eder, Edwin, Jorge, Mariana, Elizabeth, Marena, Jonathan, Néstor, Roberto, Emanuel, Miguel y todos aquellos que me han brindado su apoyo ya que han sido como hermanos extras en mi vida.

- **Dedicatoria.**

A mis padres Eduardo Acevedo Reyes y Cecilia Sánchez Quintana que han llenado mi vida de amor y gozo, los amo.

Esta tesis forma parte de un proyecto de investigación de la empresa Grupo Petroquímico Beta para el desarrollo de una alcalonamina útil como ayuda de molienda para Clinker y que mejore la resistencia a la compresión del mortero estándar de cemento, las formulaciones de los aditivos usados en este trabajo no son reveladas ya que pertenecen a la empresa.



• **Índice General.**

| | Páginas |
|---|---------|
| 1. Resumen | 8 |
| 2. Definiciones | 9 |
| 3. Introducción | 11 |
| 3.1. El cemento | 11 |
| 3.1.1. En la actualidad | 13 |
| 3.1.2. Composición química | 16 |
| 3.1.3. Tamaño de partícula | 18 |
| 3.1.4. Resistencia mecánica del gel | 19 |
| 3.1.5. Molienda | 21 |
| 3.2. El mortero estándar | 24 |
| 3.2.1. Asentamiento y sangrado | 25 |
| 3.2.2. Características del agua | 26 |
| 3.2.3. Agregados | 28 |
| 3.2.4. Resistencia mecánica | 29 |
| 4. Antecedentes | 31 |
| 4.1. Aditivos de molienda de cemento | 31 |
| 4.2. Aditivos para mortero | 33 |
| 4.3. Ayudantes de molienda de cemento que ayudan al desempeño de la pasta | 40 |
| 5. Planteamiento del problema | 41 |
| 6. Justificación | 41 |
| 7. Objetivo general | 42 |

| | | |
|----------|---|----|
| 8. | Objetivos particulares | 42 |
| 9. | Diseño y Métodos | 42 |
| 9.1. | Diagrama de flujo | 43 |
| 9.2. | Tipo de diseño | 43 |
| 9.3. | Procedimientos | 44 |
| 9.3.1. | Técnicas de medición | 46 |
| 9.3.1.1. | Eficiencia de molienda | 46 |
| 9.3.1.2. | Tamaño de partícula del cemento | 46 |
| 9.3.1.3. | Finura del cemento | 47 |
| 9.3.1.4. | Relación agua-cemento del mortero | 48 |
| 9.3.1.5. | Resistencia a la compresión del mortero | 49 |
| 9.4. | Análisis estadístico | 51 |
| 10. | Resultados | 51 |
| 10.1. | Eficiencia de molienda | 51 |
| 10.2. | Tamaño de partícula del cemento | 52 |
| 10.3. | Finura del cemento | 53 |
| 10.4. | Relación agua-cemento del mortero | 54 |
| 10.5. | Resistencia a la compresión del mortero | 55 |
| 11. | Discusión | 57 |
| 12. | Conclusiones | 62 |
| 13. | Perspectivas | 64 |
| 14. | Referencias | 64 |

1. Resumen.

Los problemas asociados en forma directa al proceso de molienda de clinker son la tendencia a la formación de grumos de cemento, que no siempre se rompen en el momento de la elaboración de morteros y hormigones, ocasionando problemas de heterogeneidad en las mezclas.

Los aditivos de molienda de cemento (AMC) son compuestos orgánicos polares como las alcalonaminas que arreglan sus dipolos y reducen las cargas electrostáticas de la superficie de las nuevas partículas de cemento formadas, esto contribuye a minimizar los fenómenos de aglomeración de partículas y aumentar la eficiencia del proceso alcanzándose menores diámetros de partícula en la molienda, análogamente, la anulación de las cargas superficiales en las partículas del cemento conduce a mejorar la movilidad del cemento en el silo y conductos de transporte. Los AMC también permiten la solución de algunos iones metálicos como Fe^{3+} y Al^{3+} , por lo que se incrementa la actividad del compuesto C_4AF (aluminoferrito de tetra calcio) e inhibe la formación de $\text{Fe}(\text{OH})_3$ y $\text{Al}(\text{OH})_3$ en la superficie de la partícula del cemento. Esta acción puede facilitar el grado de hidratación de las fases de silicato y aluminato en la partícula del cemento, además, también reducen (en pequeñas escalas) la tensión superficial del agua, permitiendo la humectación del cemento en polvo y la disolución altamente reactiva de los compuestos del cemento que aunado a la mejor distribución de tamaño de partícula alcanzada en la molienda ocasiona un incremento en la resistencia a la compresión del mortero (22,9).

Objetivo. Evaluar y encontrar de forma experimental la alcalonamina que tenga el mejor comportamiento tanto como ayudante de molienda como aditivo para mejorar la resistencia a la compresión del mortero.

2. Definiciones.

Arcilla.- Material natural constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposición de minerales de aluminio.

Cal.- Producto de calcinación de piedras calizas, los diferentes tipos dependen principalmente del contenido de arcillas.

Caliza.- Roca sedimentaria compuesta mayoritariamente por carbonato de calcio.

Cemento de alto horno.- Producto obtenido de la molienda de clinker Portland, escoria granulada de alto horno y sulfato de calcio.

Cemento geopolimérico.- Cemento a base de polímeros inorgánicos tipo aluminosilicatos resultado de una reacción de policondensación.

Cemento Natural.- Conglomerante obtenido por cocción de margas calizas a una temperatura de entre 1000° y 2000 °C.

Cemento puzolánico.- Mezcla de cemento Portland con puzolana.

Clinker Portland.- Sustancia resultante de la calcinación en un horno de piedras calizas con 20-40% de arcillas, es la principal materia prima de la que se obtiene el cemento Portland.

Conglomerante.- Material capaz de unir fragmentos de uno o varios materiales y dar cohesión al conjunto mediante transformaciones químicas.

Emulsiones Bituminosas.- Es una dispersión de pequeñas gotas de un ligante hidrocarbonado (normalmente betún asfáltico) que actúa como fase dispersa, en una solución de agua y un agente emulsionante (fase continua) de carácter aniónico o catiónico, que posee características tensoactivas que permiten la fabricación y la posterior estabilidad del conjunto.

Encofrado.- Formaleta que soporta la estructura del hormigón hasta su fraguado.

Finura Blaine.- Medida de la finura de materiales en polvo, expresado usualmente como superficie por unidad de masa (m^2/kg).

Fraguar.- Cuando el compuesto alcanza la solidez o resistencia requerida.

Hormigón.- Conglomerante también denominado concreto es la mezcla de cemento, piedra grava, arena y agua.

Mortero.- Mezcla de cemento, agregado fino y agua que sirve como conglomerante.

Permeabilidad.- Capacidad de un material para que un fluido lo atraviese sin alterar su estructura interna.

Puzolana.- Material que contiene sílice y/o aluminio que reacciona con hidróxido de calcio en un ambiente húmedo para formar un cemento.

Revenimiento.- Ensanchamiento de la pasta de cemento al aplicar cierta fuerza, se utiliza como medida de la consistencia o fluidez.

Sinterización.- Tratamiento térmico de una mezcla para incrementar la fuerza entre las partículas creando enlaces más fuertes.

Trabajabilidad.- Es la facilidad de colocar, consolidar y acabar al concreto recién mezclado.

Yeso.- Producto conglomerante resultado de la calcinación de la piedra aljez.

3. Introducción.

3.1. El cemento.

Hace 5.000 años aparecen al norte de Chile las primeras obras de piedra unidas por un conglomerante hidráulico procedente de la calcinación de algas, estas obras formaban las paredes de las chozas utilizadas por los indios. Los egipcios emplearon morteros de yeso y de cal en sus construcciones monumentales.

En Troya y Micenas, dice la historia que, se emplearon piedras unidas por arcilla para construir muros, pero, realmente el hormigón confeccionado con un mínimo de técnica aparece en unas bóvedas construidas cien años antes de J.C. Los romanos dieron un paso importante al descubrir un cemento que fabricaban mezclando cenizas volcánicas con cal viva. En Puteoli conocido hoy como Pozzuoli se encontraba un depósito de estas cenizas, de aquí que a este cemento se le llamase "cemento de puzolana".

Con hormigón, construye Agripa, en el año 27 antes de J.C. el Panteón en Roma, que sería destruido por un incendio y reconstruido posteriormente por Adriano en el año 120 de nuestra era y que, desde entonces, desafió el paso de tiempo sin sufrir daños hasta el año 609 se transformó en la iglesia de Santa María de los Mártires. Su cúpula de 44 metros de luz está construida en hormigón y no tiene más huecos que un lucernario situado en la parte superior.

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

A finales del siglo XVIII se empezó a experimentar con los diferentes tipos de cemento para incrementar la fuerza y la durabilidad del hormigón.

Así, en 1758 John Smeaton, un ingeniero de Leeds (Reino Unido), ideó un nuevo mortero al reconstruir el faro de Eddyston, en la costa de Cornish. Smeaton descubrió que los morteros formados por la adición de una puzolana a una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción del agua de mar y que la presencia de arcilla en las cales las mejoraba, haciendo que éstas fraguasen bajo el agua y que una vez endurecidas fuesen insolubles.

Posteriormente, Rev James Parker creó accidentalmente un nuevo tipo de cemento investigando la reacción de las piedras de cal en el fuego. Este nuevo material fue patentado y se usó ampliamente en el siglo XIX, conociéndose con el nombre de “cemento romano”, ya que se pensaba, erróneamente, que era el mismo que 2.000 años antes usó este pueblo.

En 1824 Joseph Aspdin, un constructor de Wakefield (Reino Unido), calcinó en un horno una mezcla de tres partes de piedra caliza por una de arcilla, este fue el padre del cemento moderno y se llamó Portland porque su aspecto era similar al de las calizas de la isla de Portland. Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción, no obstante, puede decirse con acierto que el padre del cemento fue el químico francés Vicat, que propuso en 1817 un sistema de fabricación, que se sigue empleando en la actualidad, que estableció las mezclas de calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente, apareciendo como consecuencia los primeros cementos naturales.

Años después, en 1838 Brunel emplea por primera vez un cemento procedente de la fábrica de Aspdin en el que se había logrado una parcial sinterización al elegir una temperatura adecuada de cocción. Este cemento se aplicó en la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres (14).

3.1.1. *En la actualidad.*

El cemento Portland, tal y como hoy lo conocemos, fue producido en 1845 por Isaac C. Johnson al moler finamente los nódulos sobrecocidos que quedaban a la salida del horno de Apsdin. Con esta idea mejoró las dosificaciones y aumentó las temperaturas de cocción hasta lograr la sinterización de la mezcla.

De todos los conglomerantes hidráulicos el cemento Portland y sus derivados son los más empleados en la construcción debido a estar formados, básicamente, por mezclas de caliza, arcilla y yeso que son minerales muy abundantes en la naturaleza, su precio relativamente bajo en comparación con otros materiales y tener unas propiedades muy adecuadas para las metas que deben alcanzar, dentro de los conglomerantes hidráulicos entran también los cementos de horno alto, los puzolánicos y los mixtos, teniendo todos éstos un campo muy grande de empleo en hormigones para determinados medios, así como los cementos aluminosos "*cementos de aluminato de calcio*", que se aplican en casos especiales ya que soportan altas temperaturas y rápido fraguado.

Los cementos se emplean para producir morteros y hormigones cuando se mezclan con agua y áridos, naturales o artificiales, obteniéndose con ellos elementos constructivos prefabricados o contruidos "*in situ*".

El hormigón es uno de los materiales de construcción más extensamente empleado en la edificación, ofreciendo una gran versatilidad en su uso. Su capacidad para adoptar la forma del molde que lo contiene, su resistencia mecánica, su estabilidad ante el fuego y el aislamiento acústico que proporciona son algunas de sus características más apreciadas tradicionalmente, a las que se viene a sumar otra faceta no menos importante en los últimos años: su inercia térmica, que cada vez es más valorada en términos de eficiencia energética y, en definitiva, en términos de rentabilidad.

Así, es preciso tener en cuenta que el uso de hormigón en las edificaciones permite que en éstas exista una mayor estabilidad térmica, ya que suaviza las variaciones de la temperatura interna. Asimismo, reduce el consumo energético de calefacción entre un 2% y un 5% y, cuando se combina con climatización, puede reducir la energía utilizada hasta un 50%. Además, este ahorro en el consumo energético permite disminuir las emisiones de CO₂ relacionadas con el mismo.

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, diques, etc. en la segunda mitad del siglo XIX promocionó el uso de este producto y sus fábricas, especialmente las de cemento natural, que empezaron a extenderse por doquier.

Igualmente beneficiosa para el desarrollo de la industria fue la invención de los hornos rotatorios para la calcinación y el molino tubular para la molienda, ya que contribuyeron a reducir los costos de fabricación e incrementar la disponibilidad de este material, pudiendo producirse el cemento Portland en cantidades comerciales.

Es a partir de 1900 cuando los cementos Portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz del consumo de cementos naturales.

Actualmente, el cemento portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo, se puede decir que el cemento es el alma del hormigón, yendo destinada, prácticamente, toda su producción a enlazar piedras sueltas para crear el material pétreo que conocemos como hormigón.

Las investigaciones llevadas a cabo por Michaelis y Le Chatelier, en 1870 y 1880, fueron fundamentales y muy meritorias para el desarrollo de este material. En ellas se apoya toda la investigación actual que emplea técnicas de análisis muy sofisticadas y rápidas.

En la misma forma que la Revolución Industrial supuso la progresiva desaparición de los procesos de producción artesanales, el desarrollo de las nuevas tecnologías actuales han permitido la evolución y mejora del cemento y de su proceso de fabricación.

Actualmente, la investigación sobre el cemento se ha centrado en fomentar las adiciones al cemento para mejorar algunas de sus propiedades y minimizar la huella ambiental de su producción. Además, el uso de algunos residuos industriales, como materia prima del cemento, es una vía de reciclado de desechos que suponían un grave problema ambiental, como en el caso del uncel que además de suponer una vía de reciclado sirve como aislante térmico, esto permite a la industria ser más eficaz medioambientalmente tanto por la utilización del residuo como por la menor emisión de CO₂ que su uso supone al ahorrar energía.

Por otra parte, el creciente nivel de tecnificación de los usuarios ha provocado una mayor exigencia en las prestaciones del cemento, lo que ha favorecido la diferenciación del producto y el aumento de la competencia.

Así, por ejemplo, la industria ha desarrollado nuevos principios activos que aplicados al cemento portland y sus derivados producen que los cementos con los que se utiliza sean capaces de oxidar y eliminar las sustancias contaminantes que se depositan sobre la superficie de las construcciones, mediante el uso de la luz y oxígeno.

Igualmente, se ha avanzado en el desarrollo de conglomerantes inorgánicos fabricados con cemento, como el cemento geopolimérico, que posee unas propiedades únicas y un importante potencial en el campo de los materiales sostenibles.

Con todo, una de las tecnologías que más posibilidades de futuro ofrece a los cementos es la nanotecnología, que mediante el control y manipulación de la materia a una escala menor que un micrómetro, es decir,

a nivel de átomos y moléculas, permite mejorar las propiedades de los materiales.

En el caso de la industria cementera, la creación de nanoestructuras hace posible controlar propiedades fundamentales de los productos, sin cambiar su composición química. Así, esta tecnología puede suponer el desarrollo de unos procesos productivos completamente nuevos, de gran eficiencia energética, gran rendimiento y con un mínimo consumo de recursos naturales (1).

3.1.2. *Composición química.*

Los cementos están compuestos de diferentes materiales (componentes) que adecuadamente dosificadas mediante un proceso de producción controlado, le dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado, a continuación se describen sus principales componentes.

Clínker.- El Clínker Portland contiene principalmente Silicato tricálcico (C_3S) de 40 a 60%, Silicato bicálcico (C_2S) de 20 a 30%, Aluminato tricálcico (C_3A) de 7 a 14% y Aluminoferrito tetracálcico (C_4AF) de 5 a 12%, estos valores se ajustan para dar lugar a Clínker con diferentes características.

. Caliza.- Su especificación en masa es de mínimo el 75% de $CaCO_3$, de arcilla menor a 1.2% y de carbono orgánico total de máximo 0.5%.

Cenizas volantes calcáreas.- Se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. La ceniza volante calcárea es un polvo fino que tiene propiedades hidráulicas y/o puzolánicas, contiene $CaO(>10\%)$, $SiO_2 (>=25\%)$, Al_2O_3 y Fe_2O_3 y otros compuestos.

Cenizas volantes silíceas.- Se obtienen de la misma forma que las Cenizas volantes calcáreas, es un polvo fino de partículas esféricas que tiene

propiedades puzolánicas, contiene SiO_2 reactivo ($\geq 25\%$), CaO ($< 10\%$), Al_2O_3 , Fe_2O_3 , y otros compuestos.

Clínker Aluminato de Calcio.- El clínker de cemento de aluminato de calcio es un material hidráulico que se obtiene por fusión o sinterización de una mezcla homogénea de materiales aluminosos y calcáreos conteniendo elementos normalmente expresados en forma de óxidos, siendo los principales los óxidos de aluminio, calcio y hierro (Al_2O_3 , CaO , Fe_2O_3), y pequeñas cantidades de óxidos de otros elementos (SiO_2 , TiO_2 , SO_3 , Na_2O , K_2O , etc.). El componente mineralógico fundamental es el aluminato monocálcico (CaOAl_2O_3).

Escoria granulada de horno alto.- La escoria granulada de horno alto se obtiene por enfriamiento rápido de una escoria fundida es obtenida por la fusión del mineral de hierro en un horno alto contiene principalmente CaO , SiO_2 , MgO y en menor cantidad Al_2O_3 y otros componentes.

Humo de Sílice.- El humo de Sílice se origina por la reducción de cuarzo de elevada pureza con carbón en hornos de arco eléctrico, para la producción de partículas esféricas muy finas de silicio y aleaciones de ferrosilicio, contiene principalmente SiO_2 .

Puzolana natural.- Las puzolanas naturales son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias de composición silícea, que finamente molidos y en presencia de agua reaccionan para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia, contiene SiO_2 reactivo ($> 25\%$), Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO y otros compuestos.

Puzolana natural calcinada.- Las puzolanas naturales calcinadas son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico, contienen SiO_2 reactivo ($> 25\%$), Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , y otros compuestos. (13)

La norma NMX-C-414-ONNCCE-2000 establece las cantidades de cada componente así como las características especiales que deben tener los distintos cementos Portland (19).

3.1.3. *Tamaño de partícula.*

El grado de finura del cemento tiene efectos ambivalentes en el mortero. Al aumentar la finura el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez, y también se manifiesta mayor disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de mortero. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el mortero, cuyas consecuencias son indeseables porque se traducen en mayores cambios volumétricos del mortero y posibles agrietamientos en las estructuras.

Cuando se fabrica cemento portland simple, prácticamente se muele un solo material (clinker) que es relativamente homogéneo y de dureza uniforme, de manera que al molerlo se produce una fragmentación y pulverización gradual que se manifiesta en el cemento por curvas de granulometría continua.

En cuanto a la finura de molienda de los cementos portland-puzolana la ASTM C204-00 (3) nos describe el método para evaluar esta propiedad por la permeabilidad al aire del cemento y la C430-96(2003) (5) describe el método para evaluar esta propiedad por tamizado, estos valores según la ASTM C595-03 (6) son meramente informativos, es decir, el criterio del estándar concede a estos resultados un valor informativo de aceptación o rechazo a petición del comprador, lo cual puede interpretarse como que no los considera índices decisivos para juzgar la calidad del cemento portland-puzolana.

3.1.4. Resistencia mecánica del gel.

Hay dos teorías clásicas sobre el endurecimiento del cemento. La que propuso H. Le Chatelier en 1882 afirma que los productos de hidratación del cemento tienen una solubilidad menor que los compuestos originales, de tal forma que los hidratos se precipitan desde una solución sobresaturada. El precipitado se encuentra en forma de cristales alargados y entrelazados que poseen propiedades altamente cohesivas y adhesivas.

La teoría coloidal propuesta por W. Michaelis en 1893 establece que los aluminatos cristalinos, los sulfoaluminatos y los hidróxidos de calcio dan la resistencia inicial del material. El agua saturada de cal ataca posteriormente a los silicatos, lo que origina un silicato de calcio hidratado, bastante insoluble, y forma una masa gelatinosa. Esta masa se endurece gradualmente, debido a la pérdida de agua, ya sea por secado externo o por hidratación de los núcleos no hidratados de los granos de cemento; obteniéndose de esta manera cohesión.

A la luz de los conocimientos modernos, parece que ambas teorías contienen elementos verdaderos y no son incompatibles. En particular, los químicos especializados en la materia han encontrado que muchos, si no es que la mayoría de los coloides se componen de partículas cristalinas que, aunque son extremadamente pequeñas, poseen grandes áreas superficiales, las cuales dan lo que parecen ser propiedades diferentes a las de los sólidos normales. De esta manera el comportamiento coloidal es esencialmente una función del área superficial de las partículas más que de la regularidad de la estructura interna de ellas.

En el caso del cemento Portland, se comprobó que al mezclarlo con gran cantidad de agua, produce una solución sobresaturada en Ca(OH)_2 dentro de las primeras horas, con una concentración de hidrato de silicato de calcio en forma metaestable. Este hidrato se precipita rápidamente, de acuerdo con la teoría de Le Chatelier; el endurecimiento consiguiente puede deberse al retiro del agua del material hidratado, como postula Michaelis.

Después del periodo latente, continua la precipitación de hidrato de silicato de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Un trabajo experimental posterior ha mostrado que los hidratos de silicato de calcio son de hecho cristales engranados extremadamente pequeños (medidos en nanómetros), los cuales, debido a su tamaño, podrían describirse también como gel. Si se mezcla cemento con una pequeña cantidad de agua, el grado de cristalización es probablemente más pobre y se obtienen cristales malformados. De este modo, la controversia Le Chatelier–Michaelis se reduce simplemente a un asunto de terminología, puesto que se trata del gel compuesto por cristales. Además la solubilidad de la sílice aumenta muy considerablemente con un pH arriba de 10, así que es posible para el mecanismo de Michaelis operar inicialmente y para el caso de Le Chatelier hacerlo mas tarde.

No se ha comprendido completamente cual es la fuente real de resistencia del gel, pero probablemente se debe a dos tipos de enlaces cohesivos. El primero es la atracción física entre las dos superficies solidas, separadas solo por los pequeños poros de gel (de menos de 3 nm); a esta atracción se le designa generalmente como fuerza de Van Der Waals.

El segundo tipo de fuente de cohesión es el enlace químico. Puesto que el gel de cemento es del tipo de expansión limitada (es decir, que las partículas no pueden dispersarse por adición de agua), parece ser que las partículas de gel están reticuladas por fuerzas químicas. Estas son mucho mas fuertes que las fuerzas de Van Der Waals, pero los enlaces químicos cubren solo una pequeña fracción del límite de la partícula de gel, por lo tanto, no podemos estimar la importancia relativa de los enlaces físicos y químicos, pero no hay duda de que ambos contribuyen a la adquisición de la considerable resistencia de la pasta de cemento endurecida (18).

3.1.5. Molienda.

Una amplia variedad de equipos de reducción de tamaño de partícula están disponibles para la molienda de cemento, las razones principales de la falta de estandarización de equipos de molienda para cada materia prima son las cualidades del producto exigido, la variedad de materiales y los requerimientos en el balance económico entre el costo de la inversión y el costo de la operación.

Los equipos de molienda pueden ser clasificados de acuerdo a la forma en que las fuerzas se aplican, según se indica:

1. Entre dos superficies solidas (Fig. 1a, aplastamiento o desgaste; Fig. 1b, esquila; Fig. 1c, aplastamiento de un lecho de partículas).
2. Impacto en una superficie sólida (Fig. 1d), o entre dos partículas (Fig. 1e).
3. Por acción cortante del medio circundante (Fig. 1f molino coloidal).
4. No mecánicos por introducción de energía (Choque térmico acción explosiva, electrohidráulicos).

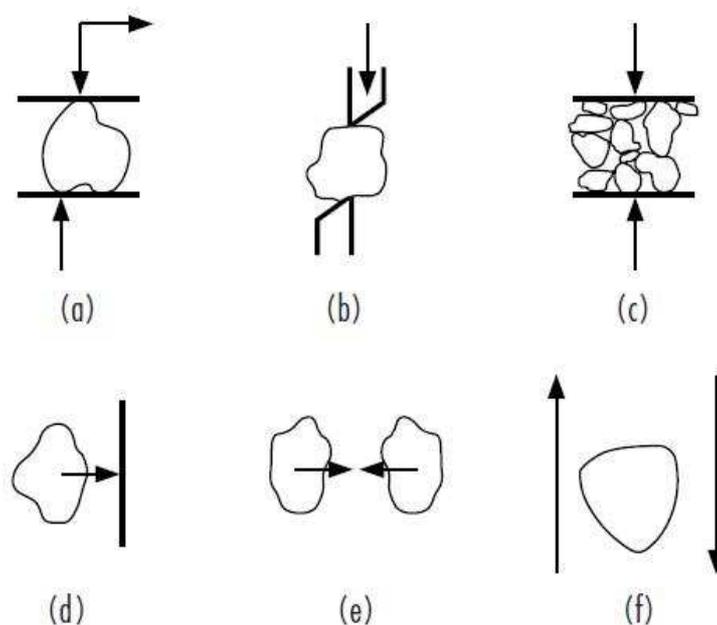


Fig. 1. Fuerzas aplicadas para causar reducción de tamaño en partículas.

Una serie de principios generales rigen la selección de los molinos, esta selección puede estar basada en las características del material de molienda como en el tamaño de las partículas, la dureza de estas, la cohesividad etc. Por ejemplo para el caso del cemento que tiene una tendencia a ser cohesivo cuando esta húmedo, un molino a presión mostraría una tendencia de empaquetamiento de los finos a la salida de la zona de trituración dificultando la libre descarga, por esto se sugieren molinos de impacto siempre que la roca no sea más dura y abrasiva que la de la piedra caliza con un 5 por ciento de sílice, ya que generalmente se muelen grandes cantidades de cemento por hora de este material los molinos giratorios son los que alcanzan mayor capacidad, por estos motivos los molinos más comúnmente usados en la industria del cemento son los molinos de bolas.

Los molinos de bolas tienen una capa cilíndrica de acero que gira sobre un eje horizontal, se cargan con un medio de molienda, por ejemplo, bolas de acero, pedernal, porcelana o varillas de acero, el cilindro es movido por la acción de un motor eléctrico y la reducción del tamaño o pulverización se realiza por medio del volteo de las bolas sobre el material que queda entre ellas (Fig. 2).

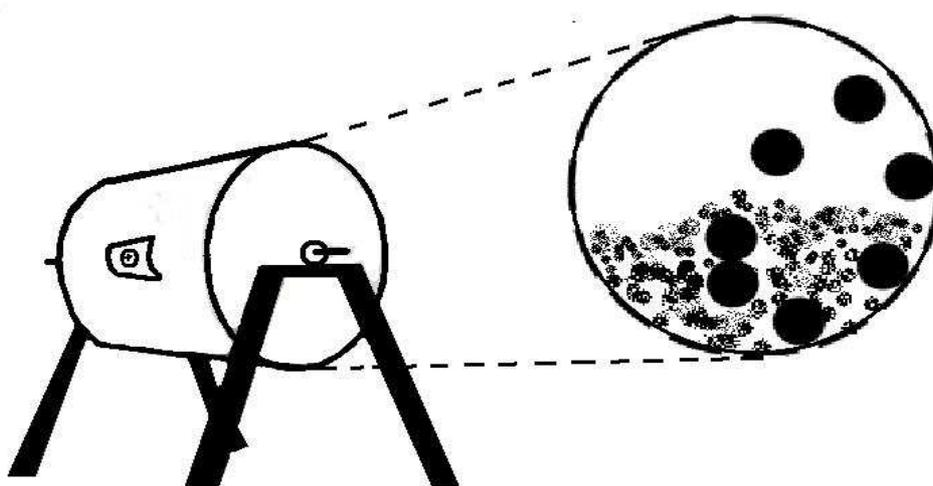


Fig. 2. Molino de bolas.

Estos molinos son fáciles de operar y sus aplicaciones son muy variadas, operan en húmedo o en seco, ya sea por lotes en circuito abierto o en circuito cerrado con clasificadores de tamaño.

Al rotar el molino y elevar su carga existe una velocidad de rotación mas allá de la cual un elemento de la carga tendrá la suficiente fuerza para adherirse a la pared del molino, esta velocidad que no se debe alcanzar pues las bolas dejarían de golpear el material de molienda es la velocidad crítica (N_c) y depende del diámetro del molino, por este motivo la velocidad óptima no debe exceder el 80% de la velocidad crítica para molienda en seco. La Ecuación 1 obtenida a partir de un balance de fuerzas muestra la forma de calcular esta fuerza propia de cada molino.

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$$

Ecuación 1. Velocidad de rotación crítica del molino de bolas.

Donde N_c es la velocidad crítica (rpm) y D es el diámetro interno del molino (m).

El molino de bolas funciona entre 30% y 40% de nivel de llenado y su principal característica es que permite pulverizar material más fino que otro tipo de molino. Esto es debido a que las bolas presentan más superficie de contacto con el mineral lo que permite alcanzar con mayor facilidad partículas más finas. (20,21)

3.2. *El mortero estándar.*

El mortero estándar de cemento portland, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales, sus proporciones son descritas en la ASTM C109/C109M-02 (2) como sigue: una parte de cemento por 2.75 partes de arena en peso y se usa una relación agua-cemento de 0.485.

Al mezclar estos componentes y producir lo que se conoce como una revoltura de mortero, se introduce de manera simultánea un cuarto participante representado por el aire.

La mezcla íntima de los componentes del mortero convencional produce una masa plástica que puede ser moldeada y compactada con relativa facilidad; pero gradualmente pierde esta característica hasta que al cabo de algunas horas se torna rígida y comienza a adquirir el aspecto, comportamiento y propiedades de un cuerpo sólido, para convertirse finalmente en el material mecánicamente resistente que es el mortero endurecido.

Los cementantes que se utilizan para la fabricación del mortero son hidráulicos, es decir, fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella, característica que los distingue de los cementantes aéreos que solamente fraguan y endurecen en contacto con el aire.

El cemento no es lo mismo que el mortero, es uno de los ingredientes que se usan en él, la mayoría de los cementos para mortero hidráulico que se producen en México son elaborados a base de clinker Portland, por cuyo motivo se justifica centrar el interés en éste y en los cementos a que da lugar.

Para la elaboración del clinker Portland se emplean materias primas capaces de aportar principalmente cal y sílice, y accesoriamente óxido de hierro y alúmina, para lo cual se seleccionan materiales calizos y arcillosos de

composición adecuada. Estos materiales se trituran, dosifican, muelen y mezclan íntimamente hasta su completa homogeneización, ya sea en seco o en húmedo.

La materia prima así procesada, ya sea en forma de polvo o de lodo, se introduce en hornos rotatorios donde se calcina a temperaturas de alrededor de 1400 °C hasta que alcanza un estado de fusión incipiente. En este estado se producen las reacciones químicas requeridas y el material se subdivide y aglutina en fragmentos no mayores a 6 cm, cuya forma se regulariza por efecto de la rotación del horno. A este material fragmentado, resultante de la calcinación, se le denomina clinker portland.

Una vez frío, el clinker se muele conjuntamente con una reducida proporción de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que tiene la función de regular el tiempo de fraguado, y con ello se obtiene el polvo fino de color gris que se conoce como cemento portland ordinario (17,19).

3.2.1. *Asentamiento y sangrado.*

En cuanto el mortero queda en reposo, después de colocarlo y compactarlo dentro del espacio cimbrado, se inicia un proceso natural mediante el cual los componentes más pesados (cemento y agregados) tienden a descender en tanto que el agua, componente menos denso, tiende a subir. A estos fenómenos simultáneos se les llama respectivamente asentamiento y sangrado, cuando se producen en exceso se les considera indeseables porque provocan cierta estratificación en la masa de mortero, según la cual se forma en la superficie superior una capa menos resistente y durable por su mayor concentración de agua.

Los principales factores que influyen en el asentamiento y el sangrado del mortero son de orden intrínseco, y se relacionan con exceso de fluidez en las mezclas, características deficientes de forma, textura superficial y granulometría en los agregados particularmente falta de finos en la arena y/o en el cemento (10).

Consecuentemente, las medidas aplicables para moderar el asentamiento y el sangrado consisten en inhibir la presencia de dichos factores, para lo cual es pertinente, disminuir el contenido de agua que sea posible, inclusive utilizando aditivos reductores de agua, utilizar agregados con adecuada composición granulométrica o ensayar el uso de un aditivo incluso de aire, particularmente cuando no sea factible cumplir con la medida anterior o utilizar un cemento de mayor finura.

Sin embargo, existe el efecto opuesto ya mencionado en el sentido de que un aumento de finura en el cemento tiende a incrementar el requerimiento de agua de mezclado en el mortero. Por tal motivo, es preferible aplicar esta medida limitadamente seleccionando el cemento apropiado por otras razones más imperiosas y, si se presenta problema de sangrado en el mortero, tratar de corregirlo por los otros medios señalados, dejando el cambio de cemento por otro más fino como última posibilidad. (16)

3.2.2. *Características del agua.*

Como componente del mortero convencional, el agua suele representar aproximadamente entre 10% y 25% del volumen del mortero recién mezclado, dependiendo del tamaño máximo de agregado que se utilice y de la fluidez que se requiera. Esto le concede una influencia importante a la calidad del agua de mezclado en el comportamiento y las propiedades del mortero, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos significativos en el mortero.

El problema que existe en el agua de mezcla reside en las impurezas y la cantidad de éstas, que ocasionan reacciones químicas con los componentes del cemento produciendo efectos dañinos para el concreto como: retardo en el endurecimiento, reducción de su resistencia, eflorescencia, contribución a la corrosión del acero, cambios volumétricos, etc.

Hasta el momento no existen criterios uniformes en cuanto a los límites permisibles para las sustancias que pueden presentarse en el agua que va a ser empleada en la preparación del concreto.

Una práctica bastante común consiste en utilizar el agua potable para fabricar mortero sin ninguna verificación previa, suponiendo que toda agua que es potable también es apropiada para elaborar mortero; sin embargo, hay ocasiones en que esta presunción no se cumple, porque hay aguas potables con contenido de sales, citratos o con pequeñas cantidades de azúcares, que no afectan su potabilidad pero pueden hacerlas inadecuadas para la fabricación de mortero.

Los requisitos de calidad del agua de mezclado para mortero no tienen ninguna relación obligada con el aspecto bacteriológico (como es el caso de las aguas potables), sino que básicamente se refieren a sus características físico-químicas, se ha encontrado experimentalmente en los estudios que las aguas con contenido individuales de cloruros, sulfatos y carbonatos sobre las 5000 ppm ocasionan reducción de resistencias en el orden del 30% con relación a la mezclas con agua libre de estas sustancias.

La materia orgánica por encima de las 100 ppm reduce la resistencia e incorpora aire, las aguas que contienen ácido húmico y otros ácidos orgánicos no se deben utilizar porque puede disminuir la estabilidad del volumen de la mezcla, el agua pura y el agua de lluvia tiende a deslavar la cal de cemento y no deben ser empleadas en la elaboración del concreto, así mismo el agua de mar con concentración del 3.5% en sales crea una posible

acción corrosiva del acero embebido en el concreto lo que genera el deterioro de la mezcla (26).

El mortero realizado para este trabajo se preparo con agua proveniente del alcantarillado que según información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua en el Valle de México es agua potable, misma que se distribuye a través de la red de agua entubada y da servicio a viviendas, sectores agrícolas e industriales en el Distrito Federal, aunque en este documento no se informa de la constitución del agua (11).

3.2.3. *Agregados.*

El mortero hidráulico es la aglutinación mediante una pasta de cemento de un conjunto de partículas de roca cuyas dimensiones comprenden desde micras hasta centímetros. Para el caso de mortero estándar solo se utiliza agregado del tipo considerado como fino ya que la experiencia ha demostrado la conveniencia que dentro de ese intervalo dimensional se hallen representados todos los tamaños de partículas y que, una vez que se ha establecido mediante pruebas la composición del mortero con determinados agregados, debe mantenerse razonablemente uniforme esta composición durante la producción, a fin de que las características y propiedades del mortero resulten dentro de un marco de variación predecible.

La composición granulométrica de la arena estándar se analiza cribándola a través seis mallas normalizadas según la ASTM C778-02 (7) debiendo cumplir los requisitos de la Tabla 1, para asegurar una razonable continuidad en la granulometría de la arena, con esto, se deja abierta la posibilidad de que se puedan emplear arenas con ciertas diferencias granulométricas, siempre y cuando se demuestre mediante pruebas que la arena en cuestión permite obtener mortero de las características y propiedades requeridas.

| Malla ASTM. | % Filtrado. |
|-----------------------------|--------------------|
| 1.18 mm (No. 16) | 100 |
| 850 μm (No. 20) | 100 |
| 600 μm (No. 30) | 96 a 100 |
| 425 μm (No. 40) | 65 a 75 |
| 300 μm (No. 50) | 20 a 30 |
| 150 μm (No. 100) | 0 a 4 |

Tabla 1. Requerimientos de la arena estándar.

3.2.4. Resistencia mecánica.

La mas común de todas las pruebas sobre mortero endurecido es la prueba de resistencia a la compresión, en parte porque es fácil de practicarse, y en parte porque muchas, aunque no todas, de las características deseables del mortero están relacionadas cualitativamente con su resistencia; pero fundamentalmente por la importancia intrínseca de la resistencia a la compresión del mortero en el diseño estructural.

Las pruebas de resistencia a la compresión en especímenes tratados de manera normal, las cuales incluyen compactación completa y curado húmedo durante un periodo específico, arrojan resultados que representan la cualidad potencial del mortero. Por supuesto, el mortero en la estructura puede ser inferior en realidad, por ejemplo, a causa de una compactación inadecuada, segregación, o un curado pobre. Estos efectos tienen importancia si queremos saber cuándo debe removerse la cimbra, o cuando se debe poner en servicio la estructura. Para este propósito, los especímenes de prueba son curados en condiciones tan cercanamente similares como sea posible a aquellas existentes en la estructura real. Incluso entonces, los efectos de temperatura y de humedad no serían los mismos en un espécimen

de prueba que en una masa de concreto relativamente grande. Por otro lado, los especímenes estandarizados se prueban a edades prescritas, generalmente a los 28 días ya que a esa edad la resistencia se vuelve casi constante, pruebas adicionales hechas con frecuencia a 3 y 7 días se realizan para monitorear el endurecimiento. Se utilizan dos tipos de especímenes de pruebas de compresión: cubos y cilindros, el empleo de uno u otro tipo de espécimen difiere conforme al país en que se realizan las pruebas, comúnmente en México se realizan pruebas con cubos aunque la diferencia entre los resultados no debería variar con el uso de cilindros.

En las pruebas con cubos los especímenes son colados en moldes de acero o de fierro colado de construcción sólida, que deberán estar en conformidad con las reducidas tolerancias de la forma cúbica. El molde y su base deben fijarse uno al otro con abrazaderas durante el colado a fin de prevenir fugas del mortero. Antes de ensamblar el molde, habrá que cubrir sus superficies acoplantes con aceite mineral, y se deberá aplicar una delgada capa de aceite similar en las superficies internas del molde a fin de prevenir el desarrollo de adherencia entre el molde y el concreto. El molde es llenado en dos capas, cada capa de concreto se compacta con una varilla de acero cuadrada de 25 mm de base. El apisonado deberá continuarse hasta que el mortero del cubo este completamente compactado, después que la superficie superior del cubo se ha nivelado por medio de una llana, el cubo se almacena en reposo durante 24 horas a una temperatura de 20 ± 5 °C y una humedad relativa de al menos 90%.

En la prueba de compresión, el cubo, es colocado con las caras coladas en contacto con las platinas de la máquina de pruebas, es decir, la posición del cubo cuando se prueba es perpendicular con respecto a aquella como se coló. La carga sobre el cubo deberá aplicarse a una rapidez constante de esfuerzo de 0.2 a 0.4 MPa/segundo (18').

El método de ASTM para probar la resistencia del cemento es prescrito en la ASTM C109/C109–M02 (2).

4. Antecedentes.

4.1. Aditivos de molienda de cemento.

El principal objetivo del proceso de molienda es disminuir el tamaño de partícula de la materia prima aunque adicionalmente se ha demostrado que los aditivos de molienda permanecen en el producto terminado proporcionándole características adicionales al cemento (30). La cantidad de energía necesaria por el proceso para obtener la finura correcta es solo parcialmente usada para la creación de una nueva superficie ya que gran parte de la energía total es perdida en forma de calor.

Aunque los aditivos, a diferencia del cemento, el agregado y el agua, no son componentes esenciales de la mezcla de mortero, son componentes importantes cuyo uso se extiende cada vez más: en muchos países, una mezcla que no contiene aditivos es actualmente una excepción, los aditivos, aunque no siempre son baratos, no representan necesariamente gasto adicional pues su empleo da como resultado ahorros en términos económicos y ambientales.

Principalmente a causa de la aglomeración de las partículas más finas por fuerzas electrostáticas la eficacia de la molienda decrece rápidamente mientras que la finura aumenta por esto no es posible exceder ciertos valores de finura, incluso extendiendo el tiempo de molienda (Fig. 3) (24).

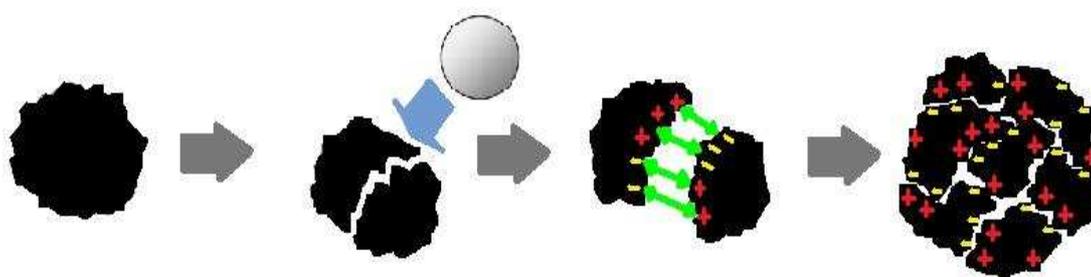


Fig. 3. Aglomeración de partículas por fuerzas electrostáticas.

Los ayudantes de molienda (AMC) son comúnmente cadenas de hidrocarburos modificados con un grupo funcional polar como las aminas, los glicoles, los acetatos etc. que utilizados a dosis de entre 0.01% y 0.05% en peso total de sólidos (28) incrementan la eficiencia de la molienda e inhiben el empaquetamiento del cemento molido (29,31), esto ya que arreglan sus dipolos y reducen las cargas electrostáticas de la superficie de las nuevas partículas de cemento formadas (Fig. 4).

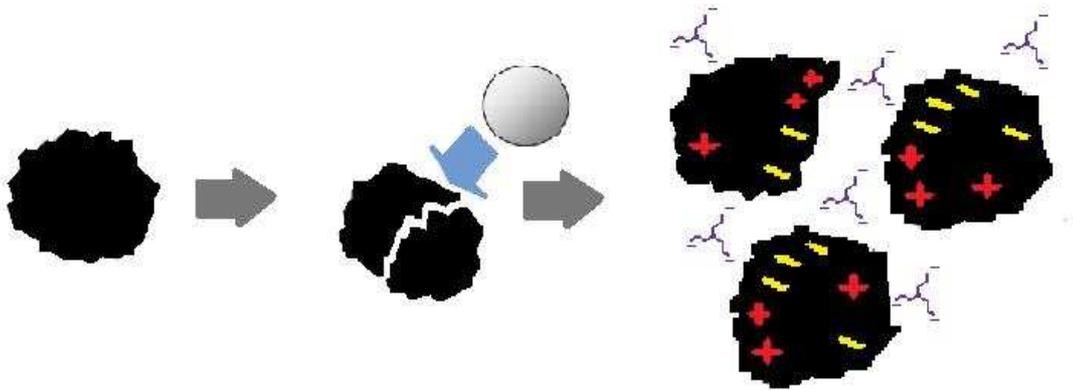


Fig. 4. Reducción de cargas electrostáticas.

Esto contribuye a minimizar los fenómenos de aglomeración de partículas y aumentar la eficiencia del proceso alcanzándose menores diámetros de partícula en la molienda, análogamente, la anulación de las cargas superficiales en las partículas del cemento conduce a mejorar la movilidad del cemento en el silo y conductos de transporte.

El objetivo del empleo de tales aditivos es minimizar el costo de fabricación mientras se maximiza la calidad del cemento además de otros beneficios colaterales como los ecológicos. La rentabilidad de un aditivo se evalúa tomando dos parámetros principales:

1. Aumento de producción. La evaluación, entonces, tiene lugar estrictamente en términos de ahorro energético, y podremos establecer de forma muy sencilla el umbral de rentabilidad del aditivo empleado, es

decir, el aumento de producción mínimo necesario para compensar el costo del producto.

2. Aumento de calidad del cemento a igualdad de consumo eléctrico en la molienda. Esto ocurrirá si fijamos el parámetro de alimentación al molino, manteniendo, por consiguiente, el mismo costo de energía. De esta manera, el efecto del aditivo provocaría una disminución del caudal circulante en el circuito, que sería compensado actuando sobre el separador para aumentar el caudal de retorno, y por tanto aumentando la finura del producto terminado.

Pero no es el aumento de producción y de calidad los únicos efectos favorables que puede proporcionar un aditivo de molienda. Por ejemplo, la mayor fluidez del cemento tratado mejorará las operaciones de transporte neumático, ensacado, extracción de silos, la carga y descarga de cubas. Y la mayor finura aumenta el área superficial del cemento provocando incremento en su resistencia mecánica etc. (12).

4.2. Aditivos para mortero.

Los aditivos son tan viejos como el concreto, es sabido que durante el Imperio Romano se empezaron a adicionar sustancias, tales como, sangre y leche de animales, a los materiales cementantes, y así, mejorar las propiedades y aumentar la durabilidad. Sin embargo, sólo hasta el siglo XX con la industrialización del cemento, se ha iniciado el estudio sistemático de los aditivos para las múltiples aplicaciones que hoy en día tiene el concreto, en las cuales el comportamiento de una mezcla sin aditivos, en muchos casos no es el deseado.

Los aditivos para mortero son productos que son incorporados en el momento del amasado en una cantidad no mayor del 5% en masa, con relación al contenido de cemento en el mortero con objetivo de modificar las propiedades de la mezcla en estado fresco y/o endurecido, los aditivos para mortero de uso más generalizado se describen a continuación.

Reductores de agua (fluidificantes o plastificantes).- Consiguen aumentar la fluidez de las pastas de cemento, de forma que para una misma cantidad de agua, se obtienen hormigones más dóciles y trabajables, que permiten una puesta en obra mucho más fácil y segura. La composición de estos aditivos reductores de agua puede ser variable, aunque en ella suelen aparecer sustancias de origen natural como los lignosulfonatos y sintéticos como las aminas o las sales de ácidos hidroxicarboxílicos.

El efecto fluidificante suele permitir una reducción de agua del orden de un 8 o un 10 % frente al hormigón patrón, inmediatamente después de la adición de estos aditivos se produce un efecto dispersante que aumenta la trabajabilidad del hormigón o del mortero. Este efecto se mantiene durante un tiempo limitado, hasta que las partículas de cemento empiezan a aglomerarse.

La dosis de aditivos fluidificantes suele oscilar entre un 0,2 y un 0,8 %, en peso sobre el cemento. Con esta adición se obtiene un buen efecto dispersante que mejora la trabajabilidad del hormigón durante un tiempo cercano a una hora, un efecto secundario que suele aparecer con la adición de este tipo de aditivos es un ligero retraso en el inicio del fraguado. Esto supone una ventaja en cuanto a que prolonga el tiempo para la puesta en obra, especialmente cuando las temperaturas elevadas reducen el tiempo abierto de los morteros y hormigones.

Superfluidificantes (superplastificantes).- Los superfluidificantes, o reductores de agua de alta actividad, son productos que al ser incorporados al hormigón aumentan, significativamente su trabajabilidad, para una misma relación agua/cemento, o producen una considerable reducción de esta relación si se mantiene su trabajabilidad.

Las formulaciones de estos productos están basadas principalmente en dos materias primas, de tipo polimérico:

- a) Sales de melamina formaldehído sulfonada.
- b) Sales de naftaleno formaldehído sulfonado.

Estas moléculas pueden actuar sobre el cemento de forma tenso-activa, reconduciendo el agua por la pasta del hormigón, haciéndola más fluida, y neutralizando las cargas electrostáticas de los gránulos de cemento, produciendo su defloculación, lo cual favorece su hidratación. Ya que esta comienza por la parte exterior de los granos de cemento y los cristales formados crean una membrana que dificulta la progresión de esta hidratación hacia el interior del grano, cuantos más pequeños sean, mayor cantidad de cemento se hidratará.

Como vemos, los superfluidificantes actúan sobre el cemento, por tanto, su eficacia está en función de la composición del cemento, sobre todo su contenido en C_3A y alcalinos.

Las ventajas que aportan al hormigón este tipo de productos son importantes, ya sea en su estado fresco o endurecido, para el hormigón fresco podemos citar: facilidad de bombeo, facilidad de rellenar encofrados muy armados, desarrollo rápido de las resistencias, ausencia de segregación, mayor compactación, pasta cementante más densa y homogénea. Y una vez endurecido, su estructura tendrá: menos fisuras, menos porosidad, mayor impermeabilidad, mejor adherencia en la interfase pasta-árido y pasta-armadura, mayores resistencias mecánicas, menores deformaciones, mayor durabilidad, mayor resistencia a los ciclos hielo-deshielo, menor permeabilidad al agua, mejora de la resistencia al fuego, etc.

La cantidad a poner oscila entre el 1% y el 3%, en relación al peso de cemento, en función de los resultados requeridos. No obstante, y teniendo en cuenta que estos productos no retrasan el fraguado y endurecimiento del

hormigón, hay casos en los que puede subirse esta dosificación hasta el 5%, sobre todo para fabricar hormigones de altas resistencias.

Acelerantes de fraguado.- Los aditivos acelerantes son aquellos cuya función principal es adelantar el tiempo de fraguado del cemento, la utilización del acelerante de fraguado está principalmente indicada en aquellos hormigones donde es necesario tener resistencias elevadas a temprana edad.

Las aplicaciones principales de un acelerante de fraguado están en aquellos hormigones que: necesitan un desencofrado rápido, están en presencia de agua o se desea favorecer el desarrollo de resistencias en clima frío.

Los acelerantes de fraguado se dividen en dos grupos, aquellos que su composición base son cloruros y los exentos de cloruros, los primeros pueden atacar a las armaduras con la mínima presencia de humedad.

Debido a la gran cantidad de factores que influyen en el proceso de fraguado del cemento, como son dosificaciones, tipo de cemento, temperatura de los componentes del hormigón, temperatura ambiente, masa de hormigón, dosificación del acelerante, etc. no se puede saber a priori cuánto es el aceleramiento obtenido con una dosificación de aditivo acelerante, por lo que es necesario hacer un ensayo previo con los mismos componentes y condiciones que se tengan en obra y de esta forma poder determinar la dosificación óptima para la aceleración de fraguado que queremos.

Debido a que la reacción del aditivo acelerante con el cemento es exotérmica y ésta se produce en un espacio de tiempo corto, la elevación de la temperatura del hormigón puede ser considerable por lo que se debe extremar el curado de dicho hormigón y así evitar de esta forma las fisuras que se podrían producir debido a la retracción térmica.

Retardadores de fraguado.- Como su nombre lo indica los aditivos retardadores de fraguado son aquellos cuya función principal es retrasar el tiempo inicial de fraguado del cemento, las aplicaciones principales del retardador del fraguado están en aquellos hormigones que: se coloquen en grandes volúmenes; evita una elevación considerable de la temperatura debida al calor de hidratación, tengan que ser transportados a largas distancias: aumenta el tiempo de puesta en obra del hormigón y su manejabilidad, las condiciones de colocación sean lentas; por dificultades de acceso, se coloquen con temperaturas ambientales altas; compensa la caída rápida de trabajabilidad, etc.

Una sobredosificación accidental del aditivo retardador trae consigo un retraso del fraguado considerable tanto más acusado cuanto mayor sea la sobredosificación, así mismo las resistencias iniciales serán bajas, aunque las finales no se vean afectadas por ello.

Debido a la gran cantidad de factores que influyen en el proceso del fraguado del cemento, como son cantidad y tipo de cemento, temperatura de los componentes del hormigón, temperatura ambiente, volumen del hormigón, dosificación del retardador, etc. no se puede determinar a priori el retraso que vamos a tener, por lo que es necesario hacer un ensayo con los mismos componentes y condiciones que se tengan en obra, y de esta forma poder determinar la dosificación óptima para el retraso de fraguado que queremos.

Aireantes (inclusores de aire)- Son aquellos cuya función principal es producir en el hormigón un número elevado de finas burbujas de aire, de diámetros comprendidos entre 25 y 200 micras, separadas y repartidas uniformemente. Estas burbujas deben permanecer tanto en la masa del hormigón fresco como en el endurecido.

Principalmente los aireantes están basados en resinas, jabones sintéticos y jabones minerales, los aireantes confieren al hormigón dos propiedades principales, una en su estado fresco dándole mayor fluidez, y otra en el hormigón endurecido dándole mayor durabilidad. La primera

propiedad es debida a que el aire ocluido actúa como fino que no absorbe agua y como rodamiento de bolas mejorando el deslizamiento entre los áridos. La segunda propiedad, darle mayor durabilidad al hormigón endurecido, es el motivo principal de la utilización de los aireantes en la actualidad. Esta mayor durabilidad se produce al cortar la red capilar y por otra parte actuando de cámara de descompresión en el caso de helarse el agua del capilar, o de las sales expansivas debidas a sales de deshielo.

Los aditivos aireantes se emplean generalmente en aquellos hormigones que: pueden estar sometidos a ciclos de hielo-deshielo o tengan un bajo contenido en finos.

La cantidad del aire ocluido en el hormigón mediante un aditivo aireante depende de la dosificación de éste, de la cantidad de cemento, tipo de cemento y finura de molido de éste, de la cantidad de finos, de la granulometría, consistencia del hormigón y tiempo de amasado, por lo que se debe hacer ensayos con los mismos componentes del hormigón y condiciones de la obra para determinar la dosificación óptima de aireante para obtener la cantidad de aire ocluido requerido a las necesidades de la obra.

Impermeabilizantes (hidrófugos).- Los aditivos impermeabilizantes pueden actuar de varias maneras, pero su efecto es principalmente hacer concreto repelente al agua. El concreto absorbe agua porque la tensión superficial en los poros capilares de la pasta de cemento hidratado “jala” agua por succión capilar. Los aditivos impermeabilizantes tienen como meta evitar esta penetración de agua en el concreto. Su comportamiento depende, en gran medida de si la presión aplicada del agua es baja; como en el caso de lluvia o si se aplica una presión hidrostática; como en el caso de estructuras que retienen agua, ejemplos de productos empleados como impermeabilizantes son el ácido esteárico y algunas grasas vegetales y animales. Este tipo de aditivo aumenta el ángulo de contacto entre las paredes de los poros capilares, de manera que el agua es “expulsada” de los poros.

Otra forma de acción de un aditivo impermeabilizante lo tenemos en la forma de material muy fino que contiene estearato de calcio o alguna resina de hidrocarburos que producen superficies repelentes al agua. Aunque es valioso impartir al concreto las propiedades repelentes al agua, en la práctica, el recubrimiento completo de todas las superficies de poros capilares es difícil de lograr, con la consecuencia de que la impermeabilización completa es improbable de alcanzar. Además de su acción repelente al agua algunos aditivos impermeabilizantes, también efectúan el bloqueo de poros a través de un componente conglomerante.

Un efecto colateral de algunos aditivos impermeabilizantes es el de mejorar la trabajabilidad de la mezcla debido a la presencia de cera dividida finamente o de emulsiones bituminosas, que incluyen algo de aire. Estas también mejoran la cohesión del concreto pero pueden dar por resultado una mezcla "pegajosa". A causa de la naturaleza de los aditivos impermeabilizantes. Un último comentario que hacer sobre los aditivos impermeabilizantes es que, como se desconoce muchas veces su composición exacta, es vital cerciorarse de que no contengan cloruros, si es probable que el concreto vaya a emplearse en una situación en la cual sea sensible a corrosión inducida por cloruro. Los aditivos impermeabilizantes se deberán distinguir de los repelentes de agua, basados en resinas de silicona, los cuales se aplican a la superficie del concreto. Las membranas aprueba de agua son recubrimientos de betún con base en emulsión, posiblemente con látex de hule, los cuales producen una película correosa con algún grado de elasticidad.

Antibacteriales.- Algunos organismos tales como bacterias, hongos o insectos pueden afectar el concreto en forma adversa. El agente común en el ataque bacterial es un ácido orgánico o mineral que reacciona con la pasta de cemento hidratado. Inicialmente, el agua alcalina de los poros dentro de la pasta de cemento hidratado neutraliza el ácido, pero la acción continua de la bacteria da por resultado el ataque más profundo. La limpieza de la superficie es inefectiva, porque la textura de la superficie tosca del concreto aloja la

bacteria y es necesario incorporar en la mezcla algunos aditivos especiales que son tóxicos para los organismos atacantes: estos pueden ser antibacteriales, fungicidas o insecticidas. Se ha hallado que el sulfato de cobre y el pentaclorofenol controlan el crecimiento de algas o liquen sobre concreto endurecido (15).

4.3. Aditivos de molienda de cemento que ayudan al desempeño de la pasta.

Los “aditivos de molienda modernos” son el resultado de más de 50 años de investigaciones continuadas y actividades de desarrollo combinadas con análisis detallados de su influencia en los procesos de producción de cemento y en la calidad del mismo. Estos aditivos de molienda combinan los beneficios “tradicionales” de aumento de rendimiento de los molinos y mejoran la fluidez del cemento seco junto con los beneficios adicionales secundarios de la pasta por ejemplo: reducir o aumentar el tiempo de fraguado, optimizar el desarrollo de resistencias, reducir la demanda de agua etc. Estos aditivos son formulados cuidadosamente para cumplir con los requerimientos específicos del fabricante de cemento.

Para asegurar la aplicación óptima de los aditivos de molienda del cemento existe un número importante de parámetros que deben ser considerados como: la tendencia al apelmazamiento o “coating”, las características de flujo del material, el nivel de llenado, las relativas al sistema específico de molienda, las presentaciones del cemento, los objetivos del cliente y los factores específicos económicos.

Las principales ventajas de una aplicación exitosa de un aditivo de molienda se materializan en la reducción del consumo energético relacionado con la mejora de la eficiencia de molienda y la posibilidad de reducir la finura de consigna mientras las propiedades del cemento son mejoradas como

consecuencia de una más estrecha distribución del tamaño de los granos y/o mejora de las características de hidratación.

La reducción asociada del tiempo de funcionamiento para una capacidad anual dada puede proporcionar otros tipos de beneficios tales como maximizar el empleo de energía eléctrica y permitir reducir los costos de reparación y mantenimiento. Lo último es evidente ya que aquello está estrechamente relacionado con el tiempo de funcionamiento de la planta más que con las toneladas molidas (23,25).

5. Planteamiento del problema.

La empresa Grupo Petroquímico Beta desea desarrollar una alcalonamina útil como ayuda de molienda para Clinker que además mejore la resistencia a la compresión del mortero, para este fin, se necesita evaluar el desempeño de varios ayudantes de molienda de cemento así como el impacto que el uso de estos tiene en la resistencia a la compresión que desarrolla el mortero formulado con el cemento producto, así con el conocimiento de los resultados de las evaluaciones determinar cuál de los ayudantes cumple con lo requerido.

6. Justificación.

Actualmente Grupo Petroquímico Beta produce y comercializa un producto funcional como ayudante de molienda, sin embargo, con el propósito de aumentar la rentabilidad del aditivo se desea suplir a este por un producto que además de cumplir con su función principal aumente la resistencia a la compresión del cemento producto, para con esto aumentar el valor específico del producto ya que cumpliría dos funciones.

7. Objetivo General.

Determinar cuál de los aditivos evaluados funciona mejor como ayudante de molienda y a su vez incrementa la resistencia a la compresión del mortero estándar de cemento.

8. Objetivos particulares.

Calculo de la velocidad óptima del molino de bolas utilizado en la experimentación.

Evaluar los aditivos como ayudantes de molienda de cemento a distintas dosificaciones; tomando como parámetros la eficiencia de la molienda, la finura del cemento producto por su permeabilidad al aire según lo establecido en la ASTM C204-00 así como su tamaño de partícula por tamizado según la ASTM C430-96(2003).

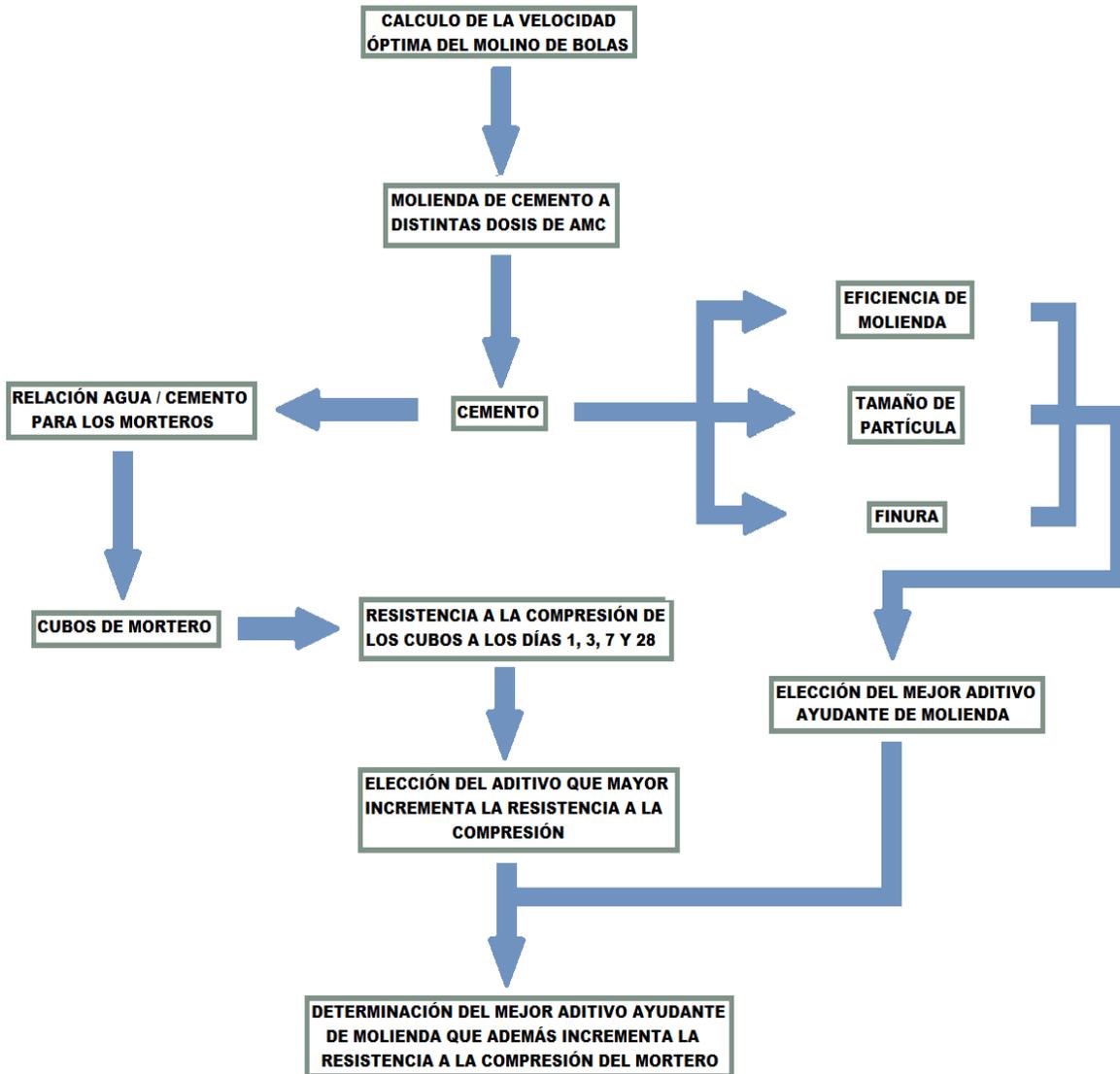
Determinación de la relación agua–cemento para la producción de los morteros según la ASTM C1437–01 (8) utilizando una mesa de fluidez como la definida en la ASTM C230/C230M–03 (4).

Valorar las resistencias que presentan los morteros estándar preparados con el cemento producto de las moliendas a diferentes edades conforme el procedimiento definido en la ASTM C109/C109–02.

9. Diseño y métodos.

El estudio se desarrollo en el Laboratorio de Construcción de la Unidad de Aplicaciones de la empresa Grupo Petroquímico Beta.

9.1. Diagrama de flujo.



9.2. Tipo de diseño.

1. Prolectivo, primero se realiza el proyecto y los datos se obtienen después del diseño del estudio.
2. Observacional, ya que no existe ninguna intervención sobre los diferentes cementos producidos.
3. Longitudinal, ya que describe la evolución del fenómeno tal como sucede, implica la recolección de los datos en varios cortes en el tiempo.

4. Cuantitativa, otorga un valor numérico a la prueba por lo que los resultados se analizan con estadística.
5. Comparativo, se utilizan pruebas que se comparan entre diferentes grupos.(27)

9.3. Procedimientos.

La producción de cemento se llevo a cabo en un molino de bolas con las siguientes características:

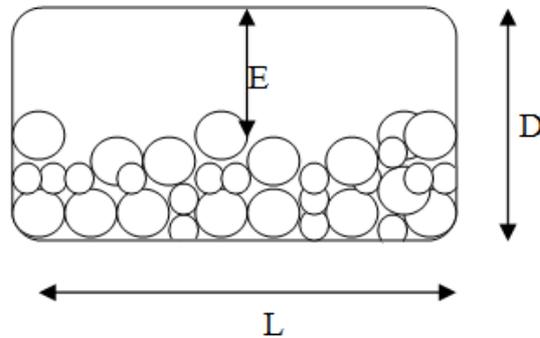


Fig. 5. Dimensiones del molino de bolas.

En el cual D es el diámetro del cilindro (30 cm), L es su longitud (50 cm) y E es el espacio libre de bolas dentro del molino (18 cm); las bolas son de 4 y 5 cm de diámetro y pesan 0.250 y 0.540 Kg respectivamente, el peso total de las bolas pequeñas es de 20.267 Kg y el de las grandes de 20.747 Kg, su velocidad optima fue calculada como el 75% de la velocidad critica (Ecuación1) obteniendo como resultado 58 rpm y su carga fue establecida en 4 Kg (95% peso de clinker, 5% peso de yeso y el aditivo en estudio tuvo diferentes dosificaciones 0.02%, 0.05% y 0.08% en relación al total de sólidos).

La molienda se llevo a cabo por un lapso de 1 hora y una vez producido el cemento se calculo la eficiencia de la molienda; a continuación se estimo el tamaño de partícula tamizando 50 g en malla ASTM. No. 325 y después se le midió su finura por medio del aparato Blaine.

Para conocer la relación agua-cemento ideal se partió de morteros con formulación estándar (23.62 % peso cemento, 64.95 % peso de arena y 11.43 % peso de agua), se les midió su revenimiento con la mesa de fluidez, si esta no entraba dentro del rango de 110 ± 5 mm dando 25 golpes en 15 segundos se proponía otra fórmula de mortero hasta alcanzar la fluidez deseada.

La granulometría de la arena utilizada en todas las pruebas de mortero es presentada en la Tabla 2.

| Malla | % Filtrado |
|-----------------------------|-------------------|
| 850 μm (No. 20) | 99.50 |
| 600 μm (No. 30) | 90.50 |
| 425 μm (No. 40) | 73.15 |
| 180 μm (No. 80) | 40.75 |
| 150 μm (No. 100) | 1.70 |

Tabla 2. Granulometría de la arena utilizada.

Una vez conocida la relación agua cemento se realizaron los morteros necesarios para elaborar 12 cubos de 5 X 5 cm a los cuales por grupos de 3 se les midió su resistencia a la compresión que presentaban a las edades de 1, 3, 7 y 28 días.

De los datos obtenidos de eficiencia de molienda, tamizado, y finura Blaine se definió cual aditivo funcionaba mejor como ayudante de molienda y de los datos de resistencia a la compresión del mortero se determino cual de los aditivos incrementaba en mayor medida esta propiedad.

Una vez conocido cual aditivo y a que dosificación actuaba mejor en la molienda de cemento y en la resistencia del mortero se concluyo cual combinaba de mejor forma estas dos características.

9.3.1. Técnicas de medición.

9.3.1.1. Eficiencia de molienda.

Consistió en pesar la cantidad de material obtenido después de la molienda y relacionarlo con la cantidad de producto alimentado por medio de la siguiente ecuación:

$$\eta = (\sigma / \varepsilon) \times 100$$

Ecuación 2. Eficiencia de molienda.

Donde η es la eficiencia de la molienda en porciento, σ es la cantidad de cemento obtenido (g) y ε es el peso de la carga del molino (g).

9.3.1.2. Tamaño de partícula del cemento.

El tamizado del cemento producto se realizo en un tamiz Ro – Tap colocando 50 g de muestra en malla ASTM No. 325 y tamizándolo durante 7 minutos, el porciento de cemento fino se calculo como sigue:

$$\% \delta = (\omega / \lambda) \times 100$$

Ecuación 3. Porciento de cemento fino en el producto.

Donde $\% \delta$ es el % de cemento fino, ω es la cantidad de cemento que pasa la malla (g) y λ es el peso de la muestra tamizada (g).

9.3.1.3. Finura del cemento.

Primeramente se calibro el aparato Blaine con ayuda de material de referencia NIST No. 114, de esta calibración se obtuvo el volumen de cemento a valorar en las pruebas de permeabilidad al aire siguiendo la siguiente ecuación:

$$V = (W_A - W_B) / D$$

Ecuación 4. Volumen de cemento requerido.

Donde V es el volumen de cemento (cm³), W_A son los gramos de mercurio necesarios para llenar el cilindro sin cemento en la celda, W_B son los gramos de mercurio necesarios para llenar la porción del cilindro no ocupada por el cemento y D es la densidad del mercurio a la temperatura de la prueba.

La prueba se llevo a cabo hasta que entre dos pruebas el volumen de cemento no tuviera una diferencia mayor a 0.005 cm³.

Una vez conocido el volumen de cemento se calculo la masa de la muestra de la siguiente forma:

$$W = \rho \times V (1 - \varepsilon)$$

Ecuación 5. Peso de cemento requerido.

Donde W son los gramos de la muestra requerida, ρ es la densidad de la muestra (para cemento Portland se deberá usar un valor de 3.15 g/cm³), V es el volumen de cemento requerido (Ecuación 4) y ε es la porosidad deseada de la cama de cemento (0.500 ± 0.005).

Los valores de superficie específica del cemento producto se calcularon con el uso de la siguiente ecuación:

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}}$$

Ecuación 6. Superficie específica.

Donde S es la superficie específica (m²/kg), S_s es la superficie específica de la muestra utilizada en la calibración del aparato (m²/kg), T es el intervalo de tiempo (s) que tarda el manómetro en volver a su equilibrio inicial en nuestra prueba y T_s es el mismo intervalo de tiempo pero de la prueba estándar.

Esta ecuación es usada en el cálculo de finuras de cemento portland estándar usada en la prueba de calibración del aparato y cuando la temperatura de las pruebas no varían mas de 3°C de la temperatura de calibración, el resultado se reporta en m²/kg redondeando a la unidad más cercana.

9.3.1.4. *Relación agua / cemento del mortero.*

Para conocer la cantidad de agua que necesita el mortero preparado con nuestro cemento producto primero se partió de una mezcla de mortero con los porcentajes estándar 23.6% en peso de cemento, 11.4% en peso de agua y 65% en peso de arena.

Con esta mezcla se llenaron 2.5 cm del molde de la mesa y se apisono 20 veces, después se termino de llenar el molde y se apisono de la misma forma que la primera ocasión, consecuentemente se raso la parte superior del

molde quitando el exceso de mortero, se removió el agua que escurrió por fuera del molde y finalmente se separó este del mortero.

Finalmente se dejó que la mesa bajara en 25 ocasiones en un lapso de tiempo de 15 segundos, y se midió el diámetro final de la pasta de mortero a lo largo de 4 diámetros distintos.

Si la pasta de mortero estándar se extendía dentro del rango comprendido entre 110 ± 5 mm se mantenía esta formulación en la preparación del mortero con ese cemento, si el ensanchamiento del mortero no quedaba dentro del rango antes mencionado se variaba la cantidad de agua hasta que esta condición se cumpliera.

Una vez encontrada la formulación con la que se cumplía con el requisito de revenimiento se calculaba la relación agua-cemento (K) dividiendo la cantidad de agua en la mezcla (a) entre la cantidad de cemento en la mezcla (c) de la siguiente manera:

$$K = \frac{a}{c}$$

Ecuación 7. Relación agua-cemento en la pasta.

9.3.1.5. *Resistencia a la compresión del mortero.*

Para realizar las pruebas de resistencia a la compresión del mortero realizado con el cemento a prueba primero se cubrió con una ligera capa de grasa los moldes a utilizar para su mejor desarme, después cada lote de mortero se mezcló primero durante 15 segundos con una batidora a velocidad media posteriormente se revolvió el material que se adhirió a las paredes del envase manualmente y finalmente se batió por otros 15 segundos a la misma velocidad.

Con este mortero se realizaron 12 cubos de 5 x 5 cm de lado utilizando arena con la misma granulometría que en la prueba anterior y su correspondiente relación agua-cemento, la preparación de los cubos se llevo a cabo en 2 capas apisonando por capa en 32 ocasiones dando 4 vueltas en 10 segundos como lo indica la figura 6 y rasando la superficie al final, cada cubo se desmoldo a las 24 hrs.

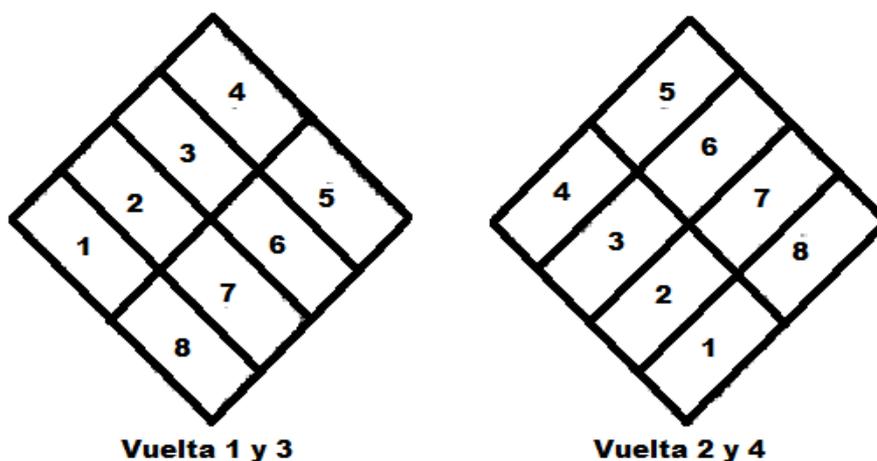


Fig. 6. Orden de apisonado.

A los cubos se les almaceno a condiciones de 22°C ± 3°C y 50% ±5% de humedad relativa hasta las edades de 1, 3, 7 y 28 días cuando a 3 cubos en el determinado lapso de tiempo se les valoro la resistencia que oponían a la compresión empleándoles con una prensa hidráulica una fuerza en relación a 900 N/s hasta su ruptura, la fuerza se aplico sobre 2 caras que tocaban las paredes del molde para tener una superficie regular y se tomo como valor de resistencia a la compresión el promedio de las fuerzas máximas que soporto cada ensayo hasta antes de su ruptura a los distintos tiempos entre el área de una cara del cubo como se describe en la Ecuación 8.

$$R_{MAX} = \frac{F}{A}$$

Ecuación 8. Resistencia máxima a la compresión.

Donde R_{MAX} es la resistencia máxima que soporto la prueba (MPa), F es el total de la fuerza aplicada sobre el ensayo (N) y A es el área donde se aplicó la carga (mm^2), el valor reportado se redondea al 0.1 MPa más cercano.

9.4. *Análisis estadístico.*

La desviación máxima permisible entre tres especímenes del mismo lote de mortero para una misma edad es 8.7% del promedio y 7.6 cuando dos cubos representan una prueba por edad.

Si el promedio de tres ensayos diverge del rango máximo permisible se desecha el valor que difiere mayormente del promedio y se verifica el nuevo rango de las dos pruebas restantes si este no entra dentro del nuevo máximo permisible la prueba se deberá repetir. (2')

10. Resultados.

10.1. *Eficiencia de molienda.*

Se realizaron 16 moliendas de cemento para comparar la eficiencia de 4 aditivos ayudantes de molienda contra el aditivo que actualmente comercializa la empresa (AMC) y una prueba testigo sin aditivo, cada ayudante de molienda fue adicionado en 3 dosificaciones distintas (0.02%, 0.05% y 0.08% en relación al peso del cemento). En la Tabla 3 se muestran el peso de la carga y producto del molino así como sus consecuentes eficiencias conforme la Ecuación 2.

| PRUEBA | CARGA (kg) | OBTENIDO (kg) | EFICIENCIA (%) |
|-------------------|------------|---------------|----------------|
| Aditivo 1 (0.02%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 1 (0.05%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 1 (0.08%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 2 (0.02%) | 4000 | 3620 | 90.5 |
| Aditivo 2 (0.05%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 2 (0.08%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 3 (0.02%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 3 (0.05%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 3 (0.08%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 4 (0.02%) | 4000 | 3295 | 82.4 |
| Aditivo 4 (0.05%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Aditivo 4 (0.08%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Comercial (0.02%) | 4000 | 3251 | 81.3 |
| Comercial (0.05%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Comercial (0.08%) | 4000 | 4000 | 100 |
| Testigo | 4000 | 3283 | 82.1 |

Tabla 3. Eficiencia de molienda.

10.2. *Tamaño de partícula del cemento.*

La cantidad de cemento fino en el cemento producto se cuantifico en relación a la cantidad filtrada por malla ASTM No.325 (45 μ m) conforme la Ecuación 3, en la Tabla 4 son presentados los resultados.

| PRUEBA | MUESTRA (g) | FILTRADO (g) | CEMENTO FINO (%) |
|-------------------|-------------|--------------|------------------|
| Aditivo 1 (0.02%) | 50.0 | 7.0 | 14.0 |
| Aditivo 1 (0.05%) | 50.0 | 5.6 | 11.2 |
| Aditivo 1 (0.08%) | 50.0 | 16.0 | 32.0 |
| Aditivo 2 (0.02%) | 50.0 | 5.4 | 10.8 |
| Aditivo 2 (0.05%) | 50.0 | 11.3 | 22.6 |
| Aditivo 2 (0.08%) | 50.0 | 16.8 | 33.6 |
| Aditivo 3 (0.02%) | 50.0 | 4.7 | 9.4 |
| Aditivo 3 (0.05%) | 50.0 | 12.2 | 24.4 |
| Aditivo 3 (0.08%) | 50.0 | 18.7 | 37.4 |
| Aditivo 4 (0.02%) | 50.0 | 8.2 | 16.4 |
| Aditivo 4 (0.05%) | 50.0 | 13.6 | 27.2 |
| Aditivo 4 (0.08%) | 50.0 | 17.8 | 35.6 |
| Comercial (0.02%) | 50.0 | 7.6 | 38.0 |
| Comercial (0.05%) | 50.0 | 9.4 | 18.8 |
| Comercial (0.08%) | 50.0 | 10.4 | 20.8 |
| Testigo | 50.0 | 7.2 | 14.4 |

Tabla 4. Porcentaje de cemento fino.

10.3. Finura del cemento.

El volumen de cemento necesario en la celda del aparato Blaine para cada prueba se estimó en 2.0417 cm^3 correspondiendo a este el peso de 3.2156 g.

Se tomó el promedio de dos mediciones de tiempo para calcular la permeabilidad al aire de los cementos producto, estos resultados son mostrados en la Tabla 5, para su estimación se tomó como valor de la superficie específica del cemento utilizado en la calibración (S_s) $381.8 \text{ m}^2/\text{kg}$

según el certificado de este material y el tiempo de su prueba de permeabilidad (Ts) fue 89.09 s.

| PRUEBA | TIEMPO (s) | PERMEABILIDAD AL AIRE (m ² /s) |
|-------------------|------------|---|
| Aditivo 1 (0.02%) | 39.98 | 256 |
| Aditivo 1 (0.05%) | 36.67 | 245 |
| Aditivo 1 (0.08%) | 36.63 | 245 |
| Aditivo 2 (0.02%) | 39.50 | 254 |
| Aditivo 2 (0.05%) | 38.36 | 250 |
| Aditivo 2 (0.08%) | 33.63 | 235 |
| Aditivo 3 (0.02%) | 35.50 | 241 |
| Aditivo 3 (0.05%) | 36.71 | 245 |
| Aditivo 3 (0.08%) | 40.63 | 258 |
| Aditivo 4 (0.02%) | 41.27 | 260 |
| Aditivo 4 (0.05%) | 37.86 | 249 |
| Aditivo 4 (0.08%) | 39.41 | 254 |
| Comercial (0.02%) | 34.76 | 238 |
| Comercial (0.05%) | 33.22 | 233 |
| Comercial (0.08%) | 41.08 | 259 |
| Testigo | 34.14 | 236 |

Tabla 5. Permeabilidad al aire del cemento producto.

10.4. Relación agua cemento del mortero.

Para la determinación de la relación agua-cemento se utilizó una mesa de fluidez como la establecida en la ASTM C230/C230M-03, se intentó mantener una fluidez entre 110 ± 5 mm como lo indicado en el estándar ASTM C1437-01, los resultados de fluidez de cada mortero con la relación agua-cemento correcta se exponen en la Tabla 6.

| PRUEBA | AGUA (%) | CEMENTO (%) | RELACION A/C | FLUIDEZ (mm) |
|-------------------|----------|-------------|--------------|--------------|
| Aditivo 1 (0.02%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 115 |
| Aditivo 1 (0.05%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 114 |
| Aditivo 1 (0.08%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 113 |
| Aditivo 2 (0.02%) | 11.24 | 23.61 | 0.476 | 109 |
| Aditivo 2 (0.05%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 114 |
| Aditivo 2 (0.08%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 114 |
| Aditivo 3 (0.02%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 112 |
| Aditivo 3 (0.05%) | 11.36 | 23.61 | 0.481 | 114 |
| Aditivo 3 (0.08%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 114 |
| Aditivo 4 (0.02%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 115 |
| Aditivo 4 (0.05%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 112 |
| Aditivo 4 (0.08%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 108 |
| Comercial (0.02%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 115 |
| Comercial (0.05%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 112 |
| Comercial (0.08%) | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 108 |
| Testigo | 11.43 | 23.61 | 0.484 | 109 |

Tabla 6. Relación agua-cemento.

10.5. Resistencia a la compresión del mortero

Las valores de las resistencias a la compresión que presentaba cada tercia de cubos formulados con el uso de los aditivos en estudio fueron tratados estadísticamente como lo descrito en el punto 8.5 de esta tesis (análisis estadístico), estos resultados para cada dosificación de aditivo a las diferentes edades y la muestra testigo son mostrados en las tablas siguientes:

| Tiempo (Días) | Resistencia con aditivo 1 (MPa.) | Resistencia con aditivo 2 (MPa.) | Resistencia con aditivo 3 (MPa.) | Resistencia con aditivo 4 (MPa.) | Resistencia con comercial (MPa.) |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 12.03 | 11.15 | 9.87 | 8.12 | 8.19 |
| 3 | 18.19 | 16.9 | 17.15 | 15.20 | 15.73 |
| 7 | 25.74 | 23.09 | 23.20 | 16.71 | 20.80 |
| 28 | 23.91 | 23.64 | 22.41 | 17.62 | 18.11 |

Tabla 7. Resistencia a la compresión con dosis de 0.02% de aditivo.

| Tiempo (Días) | Resistencia con aditivo 1 (MPa.) | Resistencia con aditivo 2 (MPa.) | Resistencia con aditivo 3 (MPa.) | Resistencia con aditivo 4 (MPa.) | Resistencia con comercial (MPa.) |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 10.31 | 11.24 | 11.25 | 7.15 | 3.68 |
| 3 | 18.11 | 21.22 | 19.42 | 20.19 | 20.01 |
| 7 | 25.60 | 25.33 | 25.34 | 23.77 | 23.97 |
| 28 | 21.33 | 22.18 | 24.07 | 18.81 | 17.11 |

Tabla 8. Resistencia a la compresión con dosis de 0.05% de aditivo.

| Tiempo (Días) | Resistencia con aditivo 1 (MPa.) | Resistencia con aditivo 2 (MPa.) | Resistencia con aditivo 3 (MPa.) | Resistencia con aditivo 4 (MPa.) | Resistencia con comercial (MPa.) |
|---------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | 11.30 | 10.86 | 10.13 | 6.99 | 6.52 |
| 3 | 20.68 | 21.56 | 22.76 | 19.47 | 15.48 |
| 7 | 25.52 | 23.97 | 26.98 | 23.66 | 20.77 |
| 28 | 25.16 | 22.98 | 23.33 | 19.40 | 19.09 |

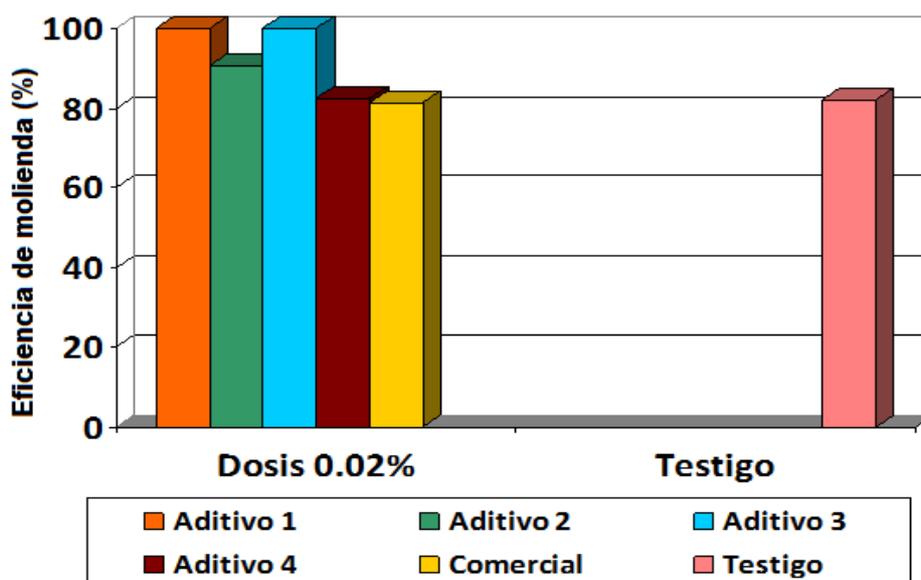
Tabla 9. Resistencia a la compresión con dosis de 0.08% de aditivo.

| Tiempo (Días) | Resistencia testigo (MPa.) |
|---------------|----------------------------|
| 1 | 6.96 |
| 2 | 12.45 |
| 3 | 17.38 |
| 4 | 14.34 |

Tabla 10. Resistencia a la compresión del mortero sin uso de aditivo.

11. Discusión.

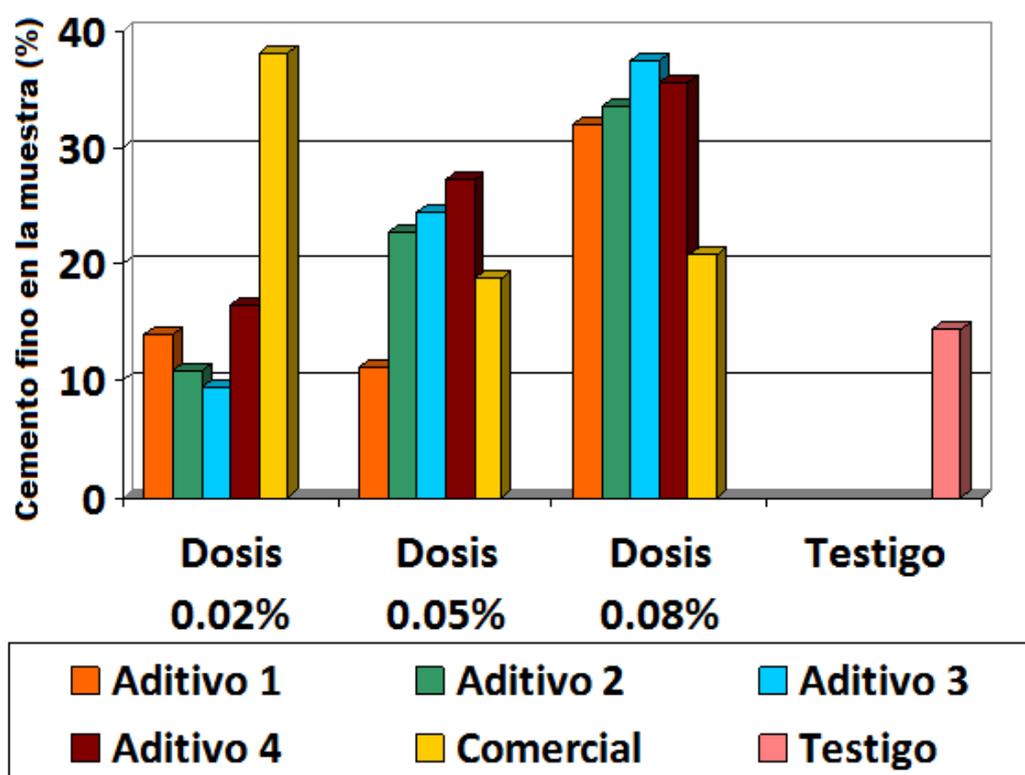
Con el fin de conocer cuál de nuestros aditivos funciona mejor como ayudante de molienda se tomaron en cuenta en cuenta 3 variables, eficiencia de la molienda, tamaño de partícula y finura del cemento producto, para valorar las eficiencias de molienda se realizó la Grafica 1 donde se muestran las diferencias entre los resultados de eficiencia (%) cuando se uso 0.02% de aditivo y del testigo ya que todas las que contenían 0.05% y 0.08% de aditivo tuvieron 100% de eficiencia.



Grafica 1. Eficiencia de molienda.

Como era de esperarse la eficiencia en la molienda crece conforme la dosificación de aditivo aumenta ya que conforme aumenta la cantidad de este puede neutralizar mayor cantidad de partículas y con esto evitar que se adhieran a la superficie de las bolas y del molino impidiendo su salida, las diferencias en cuanto a las eficiencias las encontramos a dosis de 0.02% de aditivo, siendo para este caso las que contenían al aditivo 1 y al 3 las que mayor eficiencia presentaron al alcanzar el 100% de esta.

El tamaño de partícula también es una variable dependiente de la cantidad de ayudante de molienda, por este motivo en la Grafica 2 se dibujan el porcentaje de cemento fino que contenía cada muestra de cemento agrupando los resultados por porción de aditivo.

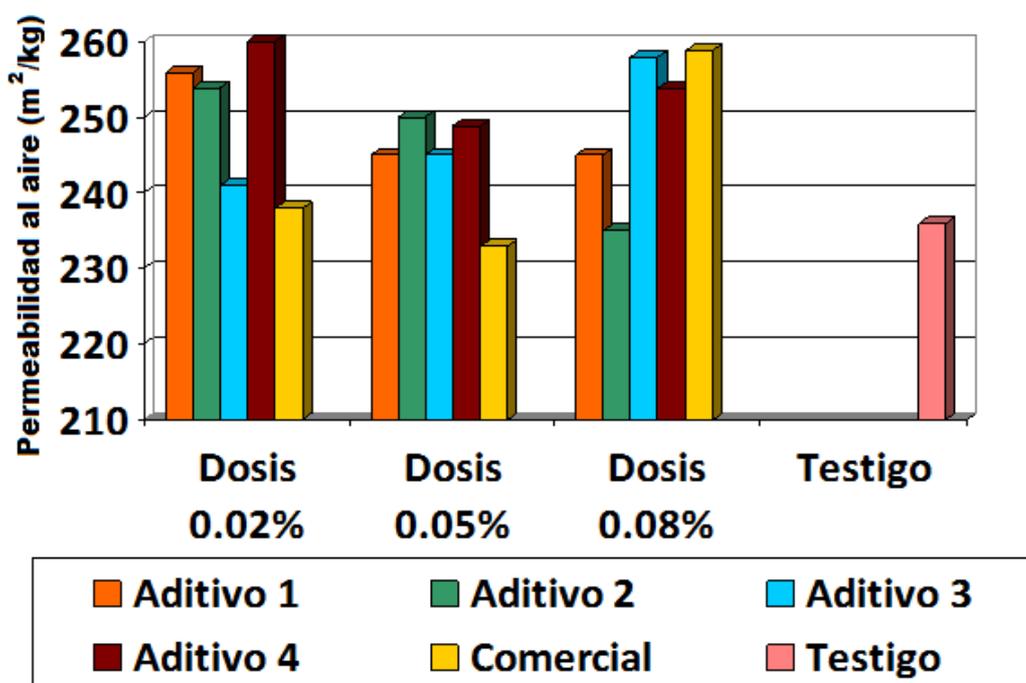


Grafica 2. Cemento fino en la muestra.

Visualizando la grafica anterior podemos corroborar que existe una tendencia a aumentar la producción de cemento fino si se maximiza la adición de aditivo, aunque también muestra que esta dependencia no es directamente proporcional para todos los aditivos ya que en algunas ocasiones el aditivo que mas causó una producción de partículas finas de cemento a una dosis no repitió este mejor desempeño a las demás.

Comparando contra el aditivo comercial solamente se cuantificó un incremento en la cantidad de finos a dosis de 0.05% y 0.08% de aditivo dando los mejores resultados los aditivos 3 y 4.

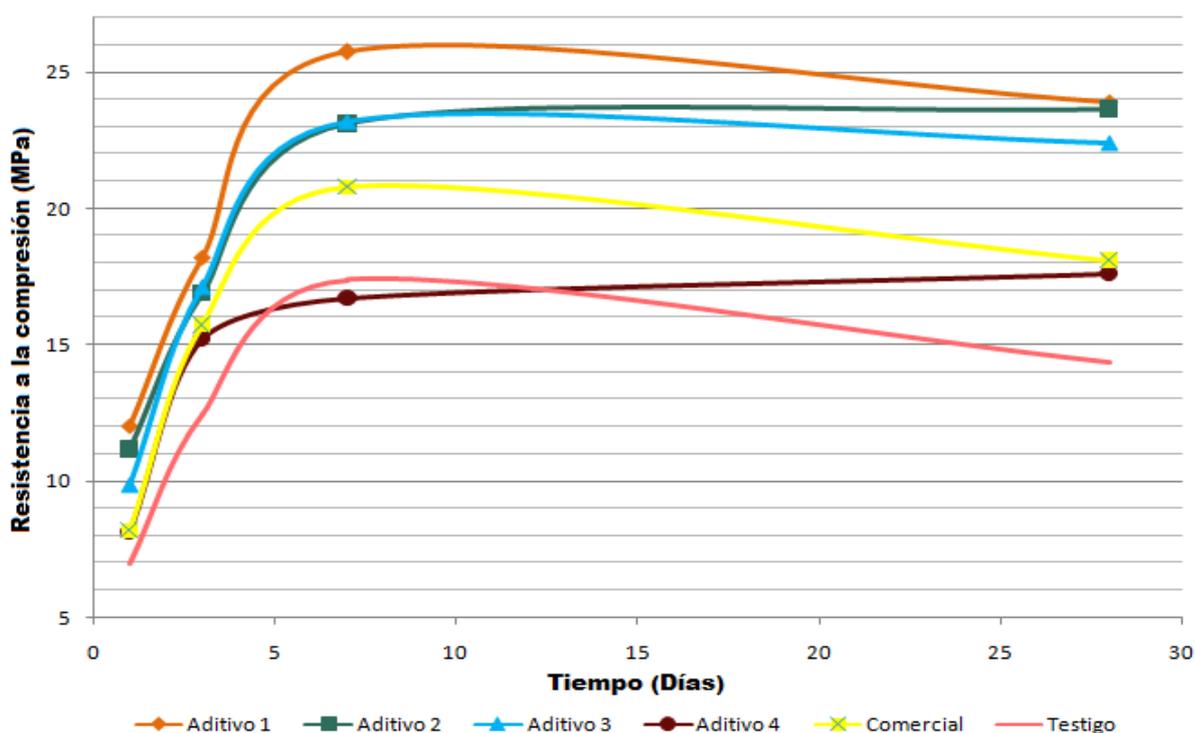
Otra forma de medir la finura del cemento es por su permeabilidad al aire, aunque a diferencia del tamizado este valor no representa la cantidad de cemento con un cierto tamaño, nos da un valor de que cemento está más fino tomando en cuenta todas sus partículas reflejado en un área superficial mayor. A continuación en la Grafica 3 se trazan los resultados de permeabilidad al aire que cada cemento mostro (m^2/kg).



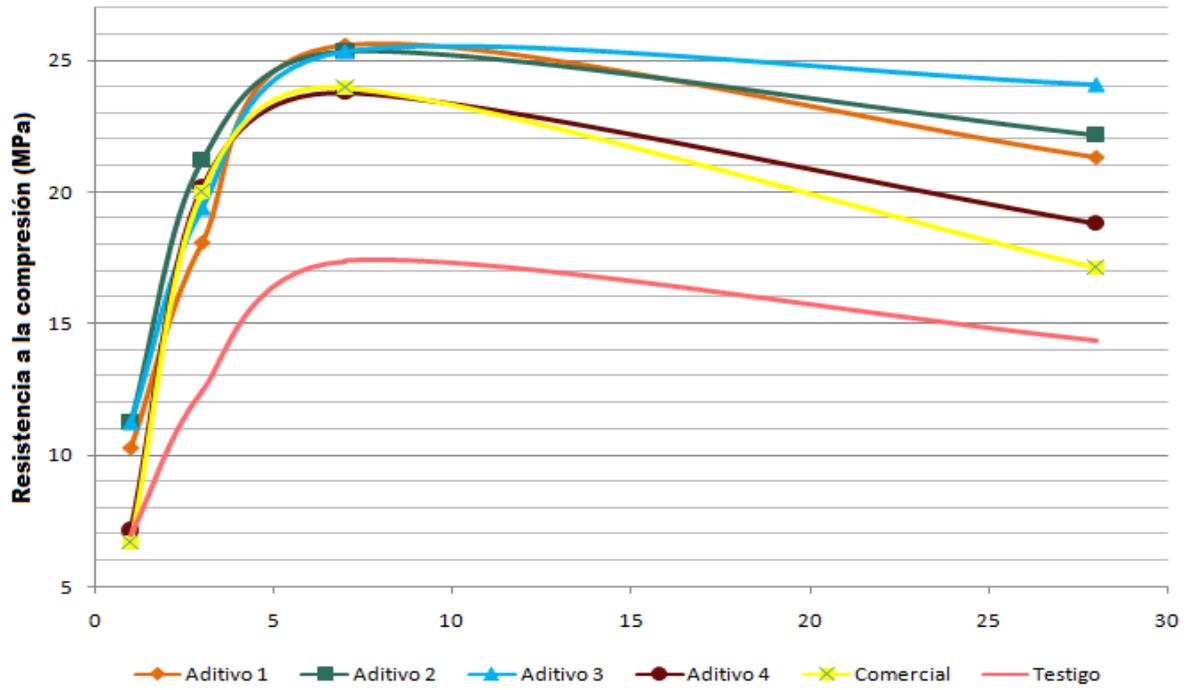
Grafica 3. Permeabilidad al aire del cemento.

Al igual que en el caso de el tamaño de partícula por tamizado, en los resultados de finura Blaine no existió un aditivo que provocara los mejores resultados para todas las dosis, superando todos los aditivos al valor del comercial a dosis de 0.02% y 0.05% y ninguno a dosis de 0.08%.

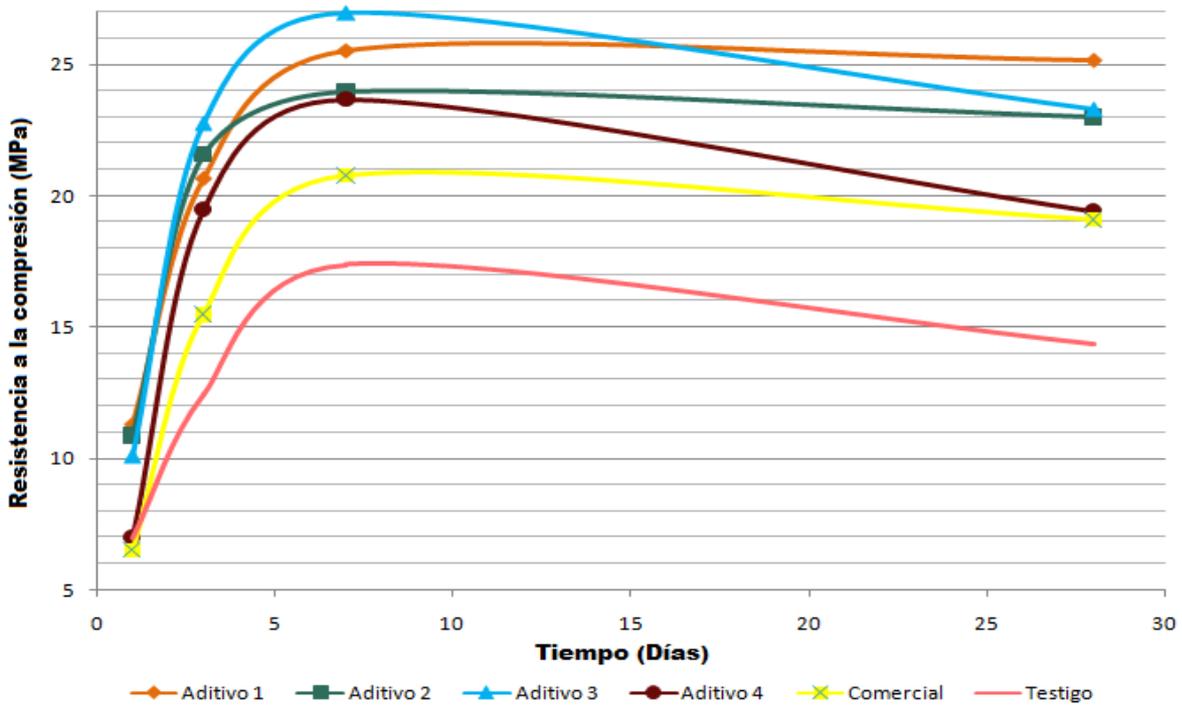
Después de haber juzgado a los aditivos con los parámetros de ayudante de molienda se procedió a valorarlos como la influencia que estos tenían para incrementar la resistencia a la compresión cuando se formaba mortero con el cemento aditivado. Para concebir de mejor forma esta propiedad mecánica del mortero se realizaron graficas que contienen el desarrollo de las resistencias que cada mortero presenta a los 1, 3, 7, y 28 días para cada dosificación de aditivo.



Grafica 4. Resistencias con dosis de 0.02% de aditivo.



Grafica 5. Resistencias con dosis de 0.05% de aditivo.



Grafica 6. Resistencias con dosis de 0.08% de aditivo.

A diferencia de las mediciones de las variables anteriores la dosificación de los aditivos no influyo considerablemente ni de manera regular a la resistencia a la compresión puesto que en algunos casos para un mismo aditivo conforme se aumentaba la dosificación la resistencia crecía y después decrecía o viceversa.

Otro aspecto que se puede observar en los graficas de los resultados es que comparando contra el cemento testigo, el aditivo ayudante de molienda incorporado durante esta permanece en el cemento producto provocando un aumento en la resistencia a la compresión de los morteros formulados con este cemento, produciendo en algunos casos un incremento de hasta el 75% de esta propiedad.

La siguiente cuestión a tratar a partir de los datos de resistencia fue cuáles de los aditivos y en que dosificación incrementan en mayor cantidad la propiedad medida en comparación con el producto que al presente es comercializado por la empresa causal de este proyecto, dando como resultado que los 3 primeros aditivos no importando la dosificación eran los que mejor desempeño presentaban incrementando en promedio el 28% de la resistencia.

12. **Conclusiones.**

Considerando que el principal objetivo de este trabajo es que la empresa que desarrolla esta investigación obtenga una remuneración económica a través de la comercialización de un nuevo aditivo, la primera conclusión a la que se llego es cual dosificación de aditivo es la óptima para cumplir con los requerimientos del material puesto que esto tiene impacto directo en el costo del producto a mercar. La dosificación que se definió como la optima es de 0.02% ya que se observo que la dosis de aditivo no tiene un impacto significativo en la resistencia a la compresión del mortero, situación objetivo de este trabajo, la dosis de 0.05% y 0.08% no son seleccionadas ya

que estas aumentarían el costo del aditivo en un 250% y 400% respectivamente para una misma resistencia de mortero, esta aumento sería opción del cliente justificada por el mayor beneficio del aditivo empleado como ayudante de molienda.

Una vez seleccionada la dosificación óptima se prosiguió a elegir de entre los 4 aditivos cual tenía el mejor desempeño en las propiedades valoradas en comparación con el aditivo actual, se concluyo que el aditivo con mejor desempeño es el **Aditivo 1** en base a que: para la dosificación óptima fue el que mayormente incremento la resistencia a la compresión del mortero (32%) esto aunado a su buen desempeño como ayudante de molienda alcanzando el 100% de eficiencia de molienda y superando al aditivo comercial en cuanto a finura Blaine.

Para mostrar el beneficio que se obtendría al utilizar el Aditivo 1 en la producción comparándolo con el que actualmente se comercializa, se puede suponer una alimentación de 100 Ton/mes de materia prima y presumiendo que ambos aditivos tuvieran el mismo costo, se obtendrían los siguientes resultados en las evaluaciones a una dosificación de 0.02% de aditivo para ambos casos:

| Alimentación 100 Ton/mes | Aditivo 1 | Aditivo comercial |
|--|-----------|-------------------|
| Cemento obtenido (Ton/mes) | 100 | 81.3 |
| Cemento fino (%) | 14.0 | 38.0 |
| Permeabilidad al aire (m ² /Kg) | 256 | 238 |
| Resistencia a la compresión (MPa) | 23.9 | 18.1 |

De esta manera se resuelve que para una misma inversión se obtendrían 18.7 Ton/mes más de producto traduciéndose en mayor ganancia, además que aunque el cemento sería relativamente menos fino tendría una mayor permeabilidad al aire ayudando al acrecimiento de la resistencia a la compresión en 5.8 MPa que significaría un aumento del 32% de esta propiedad.

13. **Perspectivas.**

Llevar a cabo una prueba con el Aditivo seleccionado a nivel planta para comparar los resultados piloto con los de el proceso real, si se confirma el mejor desempeño del producto en planta en comparación con el actual, buscar la sustitución de este por los beneficios que este cambio implica.

Teniendo el conocimiento de las formulaciones de los aditivos de este trabajo explorar los mecanismos por los cuales los aditivos ayudan a la resistencia del mortero para el desarrollo tecnológico de nuevos materiales que sirvan como aditivos para cemento.

14. **Referencias.**

- (1) Agrupación de Fabricantes de Cemento de España. Actualidad. [En línea]. <http://www.oficemen.com/reportajePag.asp?id_rep=160> [Consulta: 17-10-2010].
- (2) ASTM C109/C109M-02 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). (2') 13:5
- (3) ASTM C204-00. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air Permeability Apparatus.
- (4) ASTM C230/C230M-03 Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement.
- (5) ASTM C430-96(2003). Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45-mm (No.325) Sieve.
- (6) ASTM C595-03. Standard Specification for Blended Hydraulic Cements.
- (7) ASTM C778-02 ASTM Standard Specification for Standard Sand.

(8) ASTM C1437-01 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.

(9) Bravo A., T. Cerulli, M. Giarnetti y M. Magistri. Grinding aids: a study on their mechanism of action. En: Congreso ICCM 2003 (1º, 2003, Durban, South Africa). Milán, Italia, Divisione Additivi di Macinazione of MAPEI. pp.1-10.

(10) Breul, P., J.M. Geoffray y Y. Haddani. 2008. On-site Concrete Segregation Estimation Using Image Analysis. Journal of Advanced Concrete Technology. 6: 171-179.

(11) Comisión Nacional del Agua. 2009. Situación del Subsector Agua potable, Alcantarillado y Saneamiento. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. pp. 18-23.

(12) Estrada, A. Aditivos de molienda. [En línea] <http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&view=article&id=888&catid=46:articulos-tecnicos&Itemid=36> [Consulta: 2511-2010].

(13) Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. Componentes del cemento. [En línea]. <http://www.ieca.es/gloCementos.asp?id_rep=179> [Consulta: 17-10-2010].

(14) Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. El cemento. [En línea]. <http://www.ieca.es/reportaje.asp?id_rep=5> [Consulta: 17-10-2010].

(15) Kosmatka, S. H., B. Kerkhoff, W. C. Panarese y J. Tanesi. 2004. Diseño y Control de Mezclas de Concreto. Primera Edición. Portland Cement Association. México. Cap. 6. pp. 99-105.

(16) Kurokawa, Y., Y. Tanigawa y H. Mori. 1996. Fundamental Study on Segregation Resistivity of fresh Concrete. Transactions of the Japan Concrete Institute. 18:15-20.

(17) Luján, M, B. A. 2007. Determinación de la relación diámetro promedio de partícula medida en un granulómetro laser y resistencias tardías para un cemento tipo 1, para la implementación de un sistema de medición en línea. Trabajo de graduación. Facultad de Ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. pp.1-2.

(18) Neville, A. M. 1999. Tecnología del concreto. Primera edición Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. México. 1: pp.23-24. (18') 12: pp.405-406.

(19) NMX-C-414-ONNCCE-2004 Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba.

(20) Osorio, A., G. Restrepo y J. Marín. 2009. Molienda de clinker de cemento: evaluación de la influencia de la velocidad de giro del molino, el tiempo de residencia y la carga de los medios de molienda. Dyna Vol. 76. [En línea].

<<http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=49612069008>>

[Consulta: 17-10-2010].

(21) Perry, R. H. 1992. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Séptima edición. McGraw-Hill. México. Cap. 20. pp. 22.

(22) Quy, N. N. y N. T. Lam. 2006. The effect of triethanolamine and limestone powder on strength development and formation of hardened Portland cement structure. The Newsletter of Japan Society of Civil Engineers Concrete Committee. 5:123-131.

(23) Revuelta, D., L. Fernández, F. Dorrego y M. P. de Luxán. 2003. Influencia de los aditivos de molienda de clinker en las características intrínsecas del cemento y en el comportamiento de morteros. Instituto de Ciencias de la Construcción. Madrid, España. Pp. 1-10.

(24) Sottili, L. D. Padovani y A. Bravo. 2002. Mechanism of action of grinding aids in the cement production. Cement and Building Materials. 9:40-43.

(25) Summer, M., W. R. Grace. 1993. Tecnología moderna de los aditivos de molienda. En: Coloquios de directores y técnicos de fábricas de cemento (2º, 1993, Barcelona, España). European Technical Support Manager Cement Additives pp.1-5.

(26) Vázquez, A., F. González, L. Díaz y A. Flores. Elaboración de concretos con aguas tratadas. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. [En línea]. <<http://www.imcyc.com/revista/2001/abril2001/concretos.htm>> [Consulta: 12-11-2010].

(27) Velázquez, M. 2001. Guía para elaborar un proyecto de investigación. Revista Mexicana de Neurociencia. 2:51-55.

(28) W.R. Grace & Co., Cambridge, Mass. Cement Grinding Aid and Pack set Inhibitor. Adams, A. B., M. Emery y F. Mardulier. US, Cl. 106-90. Patent 3.094.425. 18 Junio 1963.

(29) W.R. Grace & Co., Cambridge, Mass. Grinding Aids for Hydraulic Cement. Serafin F.G. US. Cl4: C04B 7/14; B02C 23/00. Patent 4.643.362. 17 Febrero 1987.

(30) W.R. Grace & Co.-Conn., New York, N.Y. Processing Additives for Blended Cements. Gartner, E.M., S. Spring, D.F. Myers. Et al. US. Cl.5: C04B 7/02. Patent 5.017.234. 21 Mayo 1991.

(31) W.R. Grace & Co.-Conn., New York, N.Y. Strength Enhancing Additive for Certain Portland Cements. Myers, D.F., E. M. Gartner y S. Spring. US. Cl.5: C04B 07/02. Patent 5.084.103. 28 Enero 1992.