

Análisis de diferentes dosis de aditivos superplastificantes en las propiedades mecánicas de una mezcla de concreto hidráulico con base a diferentes tamaños máximos nominales de agregado grueso tipo silíceo

Leonardo Díaz Arteaga, ✉ ldiaza6@unicartagena.edu.co
Jorge Torres Montero, ✉ jtorresm7@unicartagena.edu.co

Monografía presentada para optar al título de Ingeniero Civil

Director: MSC. Ramon Torres Ortega



Universidad de Cartagena
Facultad de Ingeniería (Cartagena)
Ingeniería Civil
Cartagena, Colombia
2020

Dedicatoria

Dedicado a Dios y a nuestros padres.

Agradecimientos

Agradecidos con Dios por permitirnos el logro de esta meta.

Agradecidos con nuestros padres por el apoyo en todos los momentos.

Agradecidos con la vida por permitirnos esta oportunidad.

Agradecidos con cada uno de los docentes y tutores por compartirnos sus conocimientos y experiencias.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
Capítulo I. INFLUENCIA DEL AGREGADO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.	13
INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO	13
INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO	14
INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LA ZONA DE INTERFASE Y EL MODULO DE ELASTICIDAD	16
AGREGADO SILÍCEO	16
Capítulo II. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO.	26
Capítulo III. ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES.	37
CONCLUSIONES	51
RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS	56

Lista de tablas

Tabla 1. Las composiciones de mezclas de hormigón (suspensiones cementosas) y las características de su preparación.	29
Tabla 2. Las propiedades físicas de la mezcla de hormigón y la resistencia a la compresión del hormigón.	29
Tabla 3. Análisis comparativo de resistencia a la compresión. Fuente (Autores).	51
Tabla 4. Análisis comparativo de trabajabilidad. Fuente (Autores).....	51

Lista de Figuras

Figura 1. Resistencia a la compresión con la aplicación de fibras de acero a diferentes proporciones, para los diferentes tipos de agregados. Extraído de (da Silva et al., 2017).	19
Figura 2. Efecto del tipo de agregado grueso en la resistencia del concreto con objetivo de 30 Mpa.....	22
Figura 3. Efecto del tipo de agregado grueso en la resistencia del concreto con objetivo de 60 Mpa.....	22
Figura 4. Efecto del tipo de agregado grueso en la resistencia del concreto con objetivo de 90 Mpa.....	22
Figura 5. Resistencia a compresión en función de la relación A/C.....	35
Figura 6. Resistencia a la compresión y flexión de concretos con y sin fibras con el método de curado continuo. Extraído de (Aruntaş et al., 2008).	38
Figura 7. Resistencia a la compresión y flexión de concretos con y sin fibras con el método de curado al aire libre. Extraído de (Aruntaş et al., 2008).	39
Figura 8. Variación de la resistencia a la compresión de varias pastas de cementos con diferentes dosificaciones de aditivo CFS a diferentes tiempos de curado. Extraído de (Aiad et al., 2017). ..	40
Figura 9. Variación de la resistencia a la compresión de varias pastas de cementos con diferentes dosificaciones de aditivo CGS a diferentes tiempos de curado. Extraído de (Aiad et al., 2017)...	41
Figura 10. Resistencia a la compresión en concretos sin aditivo, con aditivo plastificante y con aditivo superplastificante respectivamente. Extraído de (Barbudo et al., 2013).	43
Figura 11. Resistencia a la compresión para las diferentes muestras con dosificaciones de aditivos superplastificantes (0.3% - 1%). Extraído de (Benaïcha et al., 2019).....	45
Figura 12. Evolución de la resistencia a la compresión con diferentes dosis de aditivo superplastificante. Extraído de (Zhang et al., 2018)	47

RESUMEN

Esta monografía está principalmente enfocada en investigar la influencia que tienen los aditivos superplastificantes en mezclas de concreto hidráulico, analizando la relación que guardan las diferentes dosificaciones empleadas con las propiedades físico-mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido teniendo en cuenta el uso de agregado grueso tipo silíceo. Para esto, se realizó una recopilación de investigaciones realizadas respecto a los tres aspectos fundamentales de la investigación, estos son: el agregado silíceo, las propiedades físico-mecánicas y el aditivo superplastificante junto con la relación que guardan estos parámetros. Se observó que los agregados pétreos tienen una gran influencia en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Los concretos realizados con agregado silíceo presentan buena consistencia, sin embargo, presentan una zona de interfase débil, y esto se refleja negativamente en la resistencia. Por último, la dosificación de aditivos superplastificantes a implementar en mezclas de concreto hidráulico con agregado grueso tipo silíceo deben ser bajas, quiere decir que dependiendo de la marca de aditivo y su rango de dosificación dado en especificaciones técnicas se debe inclinar por los menores valores para obtener mejores resultados en las propiedades de estudio.

Palabras clave: Aditivos Superplastificantes, Agregados tipo silíceo, Propiedades físico-mecánicas.

ABSTRACT

This monograph is mainly focused on investigating the influence of superplasticizer additives in hydraulic concrete mixtures, analyzing the relationship between the different dosages used with the physical-mechanical properties of concrete in fresh and hardened state, taking into account the use of coarse aggregate. siliceous type. For this, a compilation of these investigations was carried out regarding the three fundamental aspects of the investigation, they are: the siliceous aggregate, the physical-mechanical properties and the superplasticizer additive together with the relationship between these parameters. Stone aggregates are believed to have a great influence on the physical and mechanical properties of concrete. The concretes made with siliceous aggregate present good consistency; however, they present a weak interface zone, and this is negatively reflected in the resistance. Finally, the dosage of superplasticizing additives to be implemented in hydraulic concrete mixtures with coarse siliceous aggregate must be low, meaning that it depends on the additive brand and its dosage range given in technical specifications should be included by the lower values for get better results on study properties.

Keywords: Superplasticizing additives, Siliceous aggregates, Physico-mechanical properties..

INTRODUCCIÓN

El concreto es el material de construcción más utilizado en las estructuras debido a su extraordinaria versatilidad en cuanto a forma ya que se puede moldear fácilmente, por su función en uso estructural y no estructural y por su economía (Aruntaş et al., 2008). El concreto puede definirse como la mezcla de un material cementante (cemento Portland hidráulico), un material de relleno como agregado o áridos, agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forman un todo compacto o piedra artificial.

Día a día debido al aumento de la demanda en la industria de la construcción la exigencia en este material ha sido mayor, así como el requerimiento de adaptabilidad a todo tipo de estructura, durante cualquier etapa, en todo tipo de ambiente y en ante cualquier condición solicitada. Esto ha generado que el uso de aditivos se extienda a nivel mundial, a tal punto que se ha llegado a considerar un componente primordial dentro de la tecnología del concreto. Colombia, al ser un país en vía de desarrollo y de crecimiento urbanístico acelerado con gran diversidad de climas y condiciones ambientales, tiene una alta demanda de concreto. Si se toma como referente a la ciudad de Cartagena, es importante resaltar el clima como una variable fundamental de análisis, ya que, al presentar un clima tropical con temperaturas elevadas, provoca que el concreto tienda a tener grandes pérdidas de agua en su estado fresco, dificultando su manejabilidad y fraguado acelerado. Indudablemente, esto genera agrietamientos y pérdidas de resistencias en su estado endurecido. Este es el motivo por el cual resulta crucial usar aditivos que permitan solventar estas dificultades y así mismo lograr obtener estructuras con mayor durabilidad a lo largo del tiempo.

Las propiedades del concreto más importante y con mayor demanda como objeto de estudio son la manejabilidad y la resistencia a la compresión. Con el fin de obtener mejores resultados en las propiedades anteriormente mencionadas se ha implementado el uso de aditivos superplastificantes. Estos aditivos aumentan la manejabilidad de las pastas de cemento y por lo tanto la manejabilidad del concreto. Este incremento en la manejabilidad hace posible disminuir el contenido de agua y de cemento (son ahorradores de pasta) manteniendo la fluidez del material y su resistencia. La disminución de la pasta de cemento en el concreto además de un beneficio económico implica: disminución de la retracción del concreto, disminución de la cantidad de calor generado, disminución de la fluencia, disminución de la permeabilidad a los líquidos y un aumento en la resistencia a la abrasión, un ligero aumento en el módulo elástico y en general una mayor

durabilidad del material (Sika). Asimismo, es importante resaltar que la evolución tecnológica más radical entre los aditivos para concreto se ha dado en los aditivos superplastificantes y estos permite aplicaciones inmediatas tales como: obtención de mezclas fluidas que permiten el bombeo del concreto, la colocación de concreto tipo tremie y elementos esbeltos y/o densamente armados; entre otros. Esto, teniendo en cuenta que el desempeño es muy alto y es posible compensar los costos.

Es fundamental tener en cuenta, que, para una mejor trabajabilidad, la fluidez de la pasta de cemento y del hormigón no solo depende de las propiedades del aditivo superplastificante, sino también en gran medida de las características del cemento. Su composición química y mineralógica, la estructura cristalina de las fases del Clinker, la naturaleza de los sulfatos cálcicos presentes y la finura del cemento influyen en la floculación (Ghorab, 2012). Para el uso de estos aditivos se deben tomar en consideración todos los parámetros influyentes y las variables involucradas en el funcionamiento óptimo de este, tales como el tipo de aditivo, el tipo de cemento, la cantidad de cemento, la cantidad de agua, la forma, la granulometría, el tipo de agregado y la dosificación de los agregados, el tiempo de mezclado, el asentamiento y las temperaturas del concreto, entre otros aspectos que determinan la funcionalidad del aditivo (Silva, s.f.).

Por otro lado, el agregado silíceo con su alta rigidez y superficie lisa genera que se presente una zona de transición interfacial débil con la pasta de cemento, por lo cual se ha implementado la incorporación de ciertas adiciones, las cuales permiten mejorar las propiedades de las mezclas a realizar. Con base al tamaño máximo nominal se ha examinado que con un tamaño máximo nominal menor para el agregado grueso el acomodamiento de las partículas es mejor, permitiendo una mayor densificación y obtención de mejores resultados en las propiedades mecánicas de la mezcla (Torres et al., 2019).

A nivel local y nacional no se ha explorado este tema de investigación a profundidad, por lo cual, la mayoría de las investigaciones que permitirán el desarrollo de este documento serán del ámbito internacional. Este es el principal motivo que impulsa el desarrollo de esta temática de investigación, motivar y desarrollar un tema que no ha sido de gran estudio en Colombia y que es de vital importancia teniendo en cuenta la evolución en la tecnología del concreto, las condiciones ambientales del país y los recursos al alcance de este.

Por tal motivo esta monografía tiene como objetivo investigar la influencia que tienen los aditivos superplastificantes en mezclas de concreto hidráulico, analizando la relación que guardan

las diferentes dosificaciones empleadas con las propiedades físico-mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido, caracterizando como principales propiedades de estudio la manejabilidad y la resistencia a la compresión, teniendo en cuenta el tipo de agregado grueso a utilizar. Esto se realizará con la división de tres capítulos en los cuales se tratará cada uno de los pilares fundamentales de estudio de esta investigación, estos son: el agregado silíceo, las propiedades físico mecánicas del concreto y los aditivos superplastificantes. El orden llevado para cada capítulo será comenzando con una conceptualización general del tema del capítulo, seguido por la presentación de una recopilación de investigaciones a nivel local en Cartagena, nacional en Colombia e internacional en algunos países de Latinoamérica y en otros lugares a nivel mundial por último una postura crítica o punto de vista propio con ciertas recomendaciones con base a la información recopilada. Teniendo la información bibliográfica se procede a hacer un análisis comparativo en base a las dosificaciones de aditivos superplastificantes y agregados gruesos tipo silíceo, con el fin de ver cómo se comporta la resistencia a la compresión y la trabajabilidad teniendo en cuenta las dos variables antes mencionadas. Por último, con el análisis ya hecho de cada investigación se va a determinar la dosificación óptima de aditivo superplastificante con base al tamaño máximo nominal de agregado silíceo, el cual arroje el mejor comportamiento de trabajabilidad en estado fresco y resistencia a la compresión en estado endurecido. Al finalizar se expresara en un cuadro comparativo las variables de las investigaciones bibliográficas que tenga en cuenta las diferentes dosificaciones utilizadas con su respectivo aditivo superplastificante y el tamaño del agregado silíceo y expresar sus resultados y poder comparar la resistencia y trabajabilidad de las diferentes investigaciones.

Capítulo I. INFLUENCIA DEL AGREGADO EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO.

El comportamiento y las características de una mezcla de concreto están definidos por el mortero, el agregado y la interfaz entre estos dos componentes. El agregado al ser el componente que se encuentra en mayor cantidad dentro de la mezcla, es el más importante e influyente en el producto final. Por lo tanto, las propiedades y características físicas y químicas que posee este se reflejan directamente en el concreto obtenido (Chan et al., 2003).

La principal forma de clasificar los agregados es desde el punto de vista de su tamaño, procedencia y densidad. Según su tamaño, existen dos grupos de agregados: los agregados finos y los agregados gruesos. Los agregados finos son aquellos cuyas partículas tienen un diámetro inferior a 4.76 mm y no menor a 0.074 mm, estos son generalmente llamados arena y los agregados gruesos son aquellos que poseen un diámetro mayor a 4.76 mm y frecuentemente son nombrados grava. Según su procedencia, se pueden clasificar en agregados naturales y agregados artificiales. Los agregados naturales son aquellos originados en fuentes naturales, estos se pueden utilizar en su granulación natural o triturándolos mecánicamente. Por otro lado, están los agregados artificiales, estos son aquellos que se adquieren a través de productos y procesos industriales. Por último, se tiene la clasificación según su densidad, esta depende de la cantidad de masa por unidad de volumen y del volumen de los poros, esta clasificación permite catalogar el agregado como ligero, normal o pesado (Niño, 2010).

Algunas otras propiedades importantes de los agregados son la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia, etc (Chan et al., 2003).

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO

La propiedad más influyente en la consistencia del concreto es la absorción, esto se debe a que las partículas absorben el agua directamente en la mezcladora reduciendo la trabajabilidad de la mezcla. Existen otros factores secundarios tales como la forma, el tamaño y la gradación que también generan una influencia en esta propiedad. Con una mayor superficie del agregado más se necesita cubrir con pasta por lo tanto la manejabilidad es menor. El agregado ideal para ocasionar

una gran consistencia en la mezcla de concreto es aquel que tiene bajos índices de absorción y un buen coeficiente de forma, es decir, un agregado redondeado (Gutiérrez & Cánovas, 1996).

Para una relación agua cemento específica es beneficioso el aumento de cemento en la mezcla, esto debido a que al aumentar la cantidad de cemento también aumenta el contenido de agua, por lo tanto, la mezcla obtiene una mayor consistencia. Esto puede ser útil en caso de concretos de resistencias no muy elevadas.

La forma es un factor influyente en la consistencia, existen cuatro tipos de formas, estas son la equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica e irregular. La forma más crítica para la manejabilidad de una mezcla de concreto es la forma tabular y alargada, esto se debe a que existe una posibilidad de que se orienten en un solo plano, de modo que el agua y el espacio poroso pueden acumularse debajo de ellas. La forma más beneficiosa para el agregado grueso es la forma angular y cúbica (Lan et al., 1993).

El tamaño también contribuye en la manejabilidad de la mezcla, sin embargo, esta propiedad no solo afecta la manejabilidad si no también la demanda de agua y cemento, la economía y la durabilidad del concreto. Con la presencia de agregados muy gruesos y poco gradados se obtienen mezclas deficientes, mientras que aquellos agregados con una curva granulométrica suave y que no tienen tamaños excesivos presentan mejores resultados en las propiedades del concreto fresco (Kosmatka, 2004).

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Generalmente se le atribuye la resistencia del concreto en estado endurecido a la relación agua cemento, sin embargo, el agregado y sus propiedades juegan un papel fundamental. Las características del agregado tales como la forma, el tamaño, la textura de la superficie y el tipo de mineral tienen una gran influencia en la zona de transición por lo que afectan la resistencia del concreto (Chan et al., 2003) .

Entre las propiedades anteriormente mencionadas la textura superficial es la que tiene la mayor influencia de la adherencia entre el mortero y el agregado grueso (Ozturan & Cecen, 1997). De igual forma el tamaño máximo nominal del agregado tiene cierta importancia en la resistencia del concreto, se observó que a medida que el tamaño máximo nominal del agregado aumenta, la

resistencia del concreto se reduce, sin embargo, la gradación es incluso más fundamental que el tamaño máximo nominal, un agregado con un tamaño máximo nominal grande (1”), presenta, una granulometría más variada que permite que las partículas de agregado y pasta se pueden acomodar de una mejor forma para reducir los vacíos, formando una matriz más compacta (Torres et al., 2019).

La cantidad de agregados presentes en una mezcla también incide en la resistencia del concreto, con baja cantidad de agregados normalmente se presenta alta resistencia inicial, por otro lado, los concretos con alto contenido de agregados presentan baja resistencia inicial, esto se debe a la acumulación de esfuerzos que se ocurren alrededor del agregado debido a que este no tiene cambios en sus características físicas mientras que la pasta de cemento no llega a su punto final (Carrasquillo, 1998).

Es importante también destacar que en términos de durabilidad del concreto la capacidad de absorción juega un papel importante. Esta depende de la cantidad de espacios vacíos, como los poros y fisuras, y la permeabilidad. Existe otra propiedad de crucial importancia, esta es la densidad, un material con buena densidad podría generar un concreto denso y esto genera un efecto directo sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo. El volumen ocupado por un agregado según su peso es el que indica las características del mismo conforme a la porosidad, ligereza y permeabilidad. Estas son características que influyen en la cantidad de cemento a usar en la mezcla para alcanzar una resistencia específica, por lo tanto, influyen en la viabilidad económica.

La presencia de una alta porosidad en un agregado genera una mayor fuerza de adhesión, los agregados gruesos con alta resistencia al desgaste y alta densidad, exhiben una baja porosidad y así mismo baja adherencia a la pasta de cemento.

La presencia de materia orgánica en las partículas del agregado puede generar un efecto negativo en la fabricación del concreto, ocasionando en ciertas ocasiones una mala hidratación, asimismo una demora en el tiempo de fraguado de la mezcla y una resistencia baja en el concreto endurecido.

La presencia significativa de agregados gruesos tiene una influencia positiva en la resistencia y en las características de flujo plástico, contracción por secado y permeabilidad. Esto se debe a que la mayor influencia en estas propiedades es generada por los agregados de la mezcla y no por la pasta de cemento (Chan et al., 2003).

Los agregados establecen la cantidad de agua a usar, por lo tanto, también precisan la cantidad de cemento y pasta a usar. Los agregados con alto requerimiento de agua generan mezclas más fluidas y manejables para una relación a/c específica, pero esto genera un efecto directo en la resistencia a la compresión de forma negativa (Alexander, 1996).

INFLUENCIA DE LOS AGREGADOS EN LA ZONA DE INTERFASE Y EL MODULO DE ELASTICIDAD

Al concreto generalmente se le inicia el micro agrietamiento con la presencia de cargas en la zona de interfase (ITZ) entre el mortero y el agregado grueso. Por lo que generalmente la zona de falla siempre tiene como involucrada la zona de interfase. Es por esto que es de gran importancia el estudio y análisis de esta (Neville, 1997).

La zona de interfase está conformada por la película doble, esta es la forma en que se nombran las dos capas que recubren la parte perimetral del agregado, junto a estas está la zona de interfase principal que es aquella que se encuentra más alejada y posee los productos de hidratación del cemento (Neville, 1997).

El módulo de elasticidad del agregado no es conocido sin embargo este tiene una gran influencia en el módulo de elasticidad del concreto. La forma de las partículas del agregado grueso y sus características superficiales pueden influir también en el módulo de elasticidad del concreto y en la curvatura de la gráfica que representa esfuerzo-deformación. El tamaño de los agregados también genera un efecto en el módulo de elasticidad, resaltando que a mayor tamaño del agregado mayor módulo de elasticidad. Por último, para obtener una mejor zona de interfase los módulos de elasticidad del agregado y la pasta de cemento endurecido tiene que ser similar, esto con el fin de obtener una conducta monolítica y un mejor comportamiento de la mezcla (Chan et al., 2003).

Teniendo en cuenta la importancia del agregado y su influencia en el concreto en estado fresco, endurecido y en la zona de interfase, es importante el estudio de este componente para obtener un concreto de buena calidad.

AGREGADO SILÍCEO

El agregado silíceo también llamado canto rodado, es el tipo de agregado más común usado en la región Amazónica para la producción de concreto debido a sus razones geomorfológicas. Sin

embargo, se han realizado pocas investigaciones en las cuales se haga uso de este agregado para la producción de concretos de alta resistencia.

El agregado silíceo presenta diferentes características intrínsecas en comparación con las rocas trituradas, tales como, menor porosidad, mayor densidad y módulo de elasticidad, forma redondeada con superficie más suave y un comportamiento más suave. Estas características propias del canto rodado tienen una influencia directa en relación con la pasta del cemento y el concreto final obtenido, en la reología y comportamiento mecánico del concreto.

La presencia de agregado silíceo en una mezcla de concreto puede ocasionar sangrado y segregación en estado fresco. Además, por su rigidez y superficie suave, puede haber una incompatibilidad entre la pasta de cemento y los agregados, lo que quiere decir, que la zona de interfase existente entre la pasta de cemento y los agregados puede ser débil en comparación con el uso de rocas trituradas como agregado grueso (da Silva et al., 2017).

El canto rodado por su forma y textura lisa es directamente responsable de su adherencia al cemento, pues ofrece una adherencia inferior comparado con el triturado calizo. También se conoce que el agregado silíceo no tiene mucha porosidad, dado esto tiene una mayor densidad y resistencia al desgaste (Chan et al., 2003).

A continuación, se presentarán algunas investigaciones recopiladas a nivel local, nacional e internacional. Cabe resaltar que las investigaciones recopiladas a nivel local y nacional son muy pocas y se ven limitadas debido a que no manejan las mismas condiciones de estudio, es decir, en algunas se presentan adiciones de materiales que no abarca la presente investigación (humo de sílice, microsílíce, cenizas volantes, etc), y además su enfoque de estudio no el mismo de la presente investigación, es decir, se enfocan en otras propiedades de estudio. Esta es la principal motivación por la cual se realiza esta investigación, se hace con el fin de generar un aporte e incentivación de seguir investigando respecto a la temática e indagar y ampliar el conocimiento principalmente a nivel local y nacional.

En el presente estudio (da Silva et al., 2017) los investigadores buscaron demostrar la viabilidad de usar agregado silíceo en sustitución de agregados triturados ordinarios para la producción de concreto autocompactante con adición de fibras de acero. Para la realización de estos, inicialmente analizaron las propiedades físico-mecánicas de los tipos de agregados y examinaron cómo el reemplazo completo de agregado triturado por agregado silíceo influía en la fluidez, potencial de segregación, fluencia y viscosidad plástica de la mezcla de concreto

autocompactante y la mezcla con adición de fibras en estado fresco. También se analizó el comportamiento de tensión-deformación bajo compresión, tensión directa y flexión en estado endurecido.

Se escogieron tres tipos de agregados gruesos provenientes de diferentes fuentes naturales. Un granito triturado proveniente de una cantera localizada en la ciudad de rio de Janeiro (MG), los otros dos son cantos rodados provenientes del río Japurá (MJ) y el río de Paraná respectivamente (MP). Previo a analizar los concretos realizados con los diferentes tipos de agregados, los autores analizaron ciertas características de los agregados. Las características geométricas analizadas fueron el tamaño máximo del agregado, módulo de finura, cantidad de material en polvo, factor de forma, angularidad, esfericidad y rugosidad. Las características físicas estudiadas fueron peso específico y absorción de agua. Por último, las características mecánicas examinadas fueron la abrasión, resistencia a la compresión y módulo de elasticidad con la variación en adiciones de fibras de acero para cada tipo de agregado en tres proporciones (0.5%, 0.75%, 1%).

En términos de características geométricas, el agregado de granito triturado presenta una forma laminar/alargada mientras que los cantos rodados presentan una forma levemente redondeada. Observaron que a pesar de que los agregados silíceos tienen una estructura similar y provienen de fuentes similares que les permiten tener una textura suave, de igual forma en algunas de las muestras se presentan grietas.

Con el fin de evaluar las propiedades mecánicas se realizaron unos cilindros con el uso de cada tipo de agregado. Estos permitieron medir la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

Para el comportamiento reológico en estado fresco, en la mayoría de los casos los valores de tensión de fluencia y viscosidad plástica para el concreto autocompactante fueron menores en las muestras que realizadas con agregados gruesos tipo silíceo en comparación con las obtenidas con granito triturado. Se observó que la tensión de fluencia se reduce con la presencia de agregado silíceo. Esto sucede por su textura suave en la superficie del agregado y su forma semiesférica. Por otro lado, la viscosidad plástica es menos influenciada por el uso de canto rodado en comparación con el uso de granito triturado. En las pruebas de manejabilidad y consistencia de la mezcla, las cuales fueron evaluadas por medio de ensayos como el slump y el cono invertido, se observó que se obtenían mayores valores en comparación a las realizadas con granito triturado. Cabe resaltar

que las muestras realizadas con agregados silíceos presentaban mayor segregación, de igual forma cumplían con los parámetros de las normas. En conclusión, se podría decir que con los agregados silíceos se presenta una mejora en las propiedades reológicas para el concreto en estado fresco. Esto se ve atribuido a las características de estos agregados, tales como, su forma semiesférica, su poca angulosidad y su textura suave. Sin embargo, el potencial de segregación es mayor, por lo tanto, este debe ser un factor de mucho cuidado y control al momento de utilizar este tipo de agregado.

Mix	Compressive strength							
	$f_{c,3}$ (MPa)	CV (%)	$f_{c,7}$ (MPa)	CV (%)	$f_{c,14}$ (MPa)	CV (%)	$f_{c,28}$ (MPa)	CV (%)
MG	28.59	2.01	47.28	0.95	55.34	2.9	60.18	2.17
MG50	26.2	4.72	47.57	2.61	54.25	3.11	60.98	2.03
MG75	18.6	4.59	31.93	4.2	56.67	3.55	62.01	1.55
MG100	20.54	3.01	26.76	5.96	57.06	9.42	62.58	5.18
MP	22.14	2.84	33.04	4.87	44.82	3.2	51.1	1.37
MP50	22.18	5.94	30.1	8.16	46.19	4.29	52.03	0.95
MP75	23.77	6.52	33.86	2.93	47.85	4.78	52.2	2.78
MP100	20.74	5.03	31.11	2.35	46.73	3.76	53.53	3.24
Mj	22.33	2.45	32.14	3.21	47.54	4.78	54.1	3.24
Mj50	21.8	4.04	32.2	7.06	47.38	2.73	54.52	3.21
Mj75	22.21	6.24	31.83	4.44	47.33	4.28	55.54	4.78
Mj100	21.05	3.54	31.91	1.11	45.17	1.4	56.83	3.24

Figura 1. Resistencia a la compresión con la aplicación de fibras de acero a diferentes proporciones, para los diferentes tipos de agregados. Extraído de (da Silva et al., 2017).

En términos de resistencia, la presencia de agregados silíceos ocasiona un bajo resultado en la resistencia a la compresión para la mezcla de concreto, esto se debe a la forma y la textura de la superficie. De hecho, al ser menos angular, menos rugoso y rígido que las partículas de granito triturado el canto rodado tiene una baja adherencia con la pasta de cemento, por lo tanto, aun teniendo una mayor resistencia a la compresión del agregado, la zona de interfase en la mezcla de concreto es débil en comparación con el concreto realizado con agregados de granito triturado, por ende, con el uso de canto rodado como agregado grueso se tiene una estructura más frágil y una resistencia más baja. Observó también una mayor tenacidad en los concretos realizados con agregados silíceos. Notaron un mejor comportamiento en las mezclas con agregado silíceo con presencia de fibras de acero en comparación con las mezclas con agregados de granito triturado, especialmente cuando se tenía alta presencia de fibras. El módulo de elasticidad para las mezclas con agregados silíceos fue mayor que con los agregados de granito triturado, esto se debe al alto

módulo de elasticidad que caracteriza a los agregados silíceos en comparación con los agregados de granito triturado.

Con el análisis de la resistencia a la tracción se presentaron fallas frágiles para todas las mezclas realizadas con cualquiera de los agregados, sin embargo, con adiciones elevadas de fibras de acero todas las mezclas presentaron un comportamiento dúctil en la zona posterior al agrietamiento. Observaron un comportamiento similar al análisis de la resistencia a la compresión. Examinaron que las mezclas realizadas con agregados triturados de granito presentaron mayores resistencias a la tracción que las muestras realizadas con agregado silíceo. Es importante resaltar que la adición de fibras de acero en grandes cantidades genera mejores y óptimos resultados en las mezclas realizadas con agregados silíceos.

Con el análisis de la flexión se obtuvieron resultados similares a los obtenidos en la resistencia a la compresión y a la tracción.

Como conclusión se pudo demostrar que el agregado silíceo tiene una forma más esférica y menos angular en comparación con el agregado de granito triturado. También, se observó que el agregado silíceo sirve como una potencial alternativa para la producción de concreto autocompactante de alto rendimiento dada las resistencias alcanzadas y la manejabilidad en estado fresco. Otra observación fue la ventaja en las propiedades reológicas en el agregado silíceo y la reducción en la manejabilidad con la dosificación de fibras de acero.

De la investigación previamente mencionada se observa que el agregado silíceo aun con sus características físicas (textura suave, alta densidad y poca rugosidad) y poca compatibilidad con la pasta de cemento tiene un gran potencial para la producción de concretos autocompactantes, sin embargo tiene un alto potencial de segregación. Dadas las características de la investigación, en la cual se realizan adiciones de fibras de acero se presenta un buen comportamiento para concretos con agregados silíceos, esto se debe a que la presencia de fibras de acero permite una disminución en la fluidez de la mezcla pero al ser un agregado que tiene buenas características de fluidez y además adicionar aditivos superplastificantes que ayudan aún más a la fluidez y a la resistencia a la compresión se obtiene un comportamiento positivo, por lo cual el agregado silíceo en esas condiciones de trabajo tiene un buen desempeño. Como recomendación, a medida que se aumente la cantidad de fibras de acero en la mezcla se debe aumentar la dosis de aditivos superplastificante para que se compense y así obtener una buena manejabilidad y resistencia a la compresión.

En otra investigación a nivel internacional (Abdullahi, 2012), los autores analizaron el comportamiento de diferentes mezclas de concreto haciendo uso de tres tipos de agregados gruesos (cuarcita, granito y canto rodado). Para ello realizaron un estudio preliminar de laboratorio en el cual examinaron la granulometría, la densidad y la gravedad específica de los agregados. Luego, evaluaron la resistencia a la compresión realizando 75 cubos de concreto con los diferentes tipos de agregados, por último realizaron los ensayos a los 3, 7, 14, 21 y 28 días de curado.

Los autores midieron la consistencia con el método del slump y obtuvieron los valores más altos con el uso del agregado silíceo, esto debido a su superficie suave y su forma redondeada. Por otro lado, los otros agregados (cuarcita y granito) necesitan un mayor contenido de agua dadas sus superficies rugosas y angulares, por lo tanto, sus valores en términos de consistencia fueron más bajos.

Los investigadores notaron que el tipo de agregado usado tiene una gran influencia en la resistencia a la compresión del concreto. Se obtuvieron los mejores resultados en la resistencia para las mezclas de concreto realizadas con cuarcita triturada, seguido por concreto realizado con canto rodado y, por último, se obtuvieron los menores valores para los concretos realizados con granito triturado como agregado grueso.

De la investigación anteriormente mencionada se puede resaltar que indudablemente el agregado silíceo en términos de consistencia es el que mejor se comporta y en términos de resistencia le falta mejoras, sin embargo, la implementación de aditivos superplastificantes con dosificaciones bajas y una disminución en la relación agua cemento de la mezcla permitirá un alcance de un concreto apto para unas condiciones de trabajo de gran exigencia.

En otra investigación (Ozturan & Cecen, 1997), los autores evaluaron la influencia de tres tipos de agregados gruesos en la resistencia a la compresión, flexión y tracción en mezclas de concreto producidas en diferentes niveles de resistencia. Evaluaron las muestras a los 28 días de curado, clasificando las muestras en tres rangos de resistencias (30, 60 y 90 MPa) y haciendo uso de tres tipos de agregados gruesos diferentes (basalto, caliza y grava). Los investigadores hicieron uso de cemento de alta resistencia con el fin de poder obtener los concretos de alta resistencia (90 Mpa) con los diferentes tipos de agregados, sin embargo, no cambiaron los otros parámetros usados.

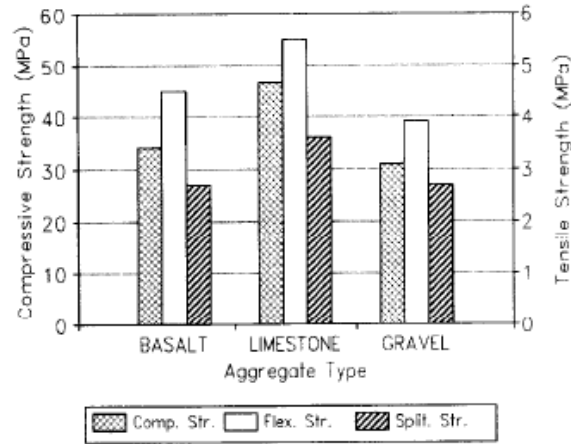


Figura 2. Efecto del tipo de agregado grueso en la resistencia del concreto con objetivo de 30 Mpa.

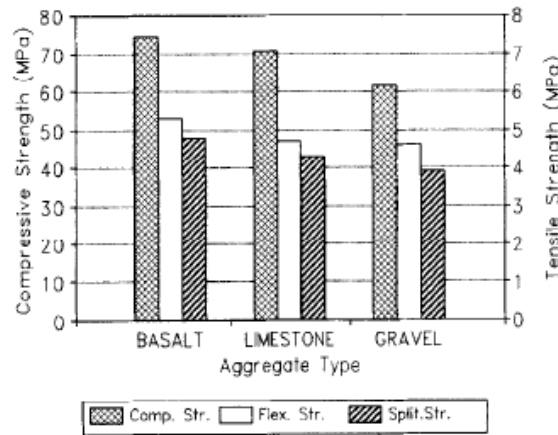


Figura 3. Efecto del tipo de agregado grueso en la resistencia del concreto con objetivo de 60 Mpa.

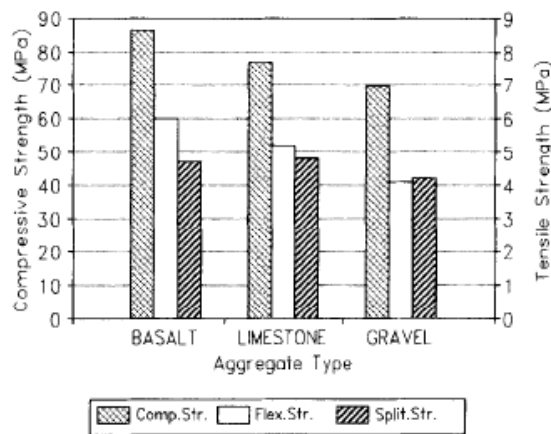


Figura 4. Efecto del tipo de agregado grueso en la resistencia del concreto con objetivo de 90 Mpa.

Los autores observaron que el impacto de cada tipo de agregado en la resistencia varía dependiendo del rango de resistencia que se maneje. En los concretos de alta resistencia observaron un mayor grado de influencia, percibiendo entre un 10 y 20% mejores resultados en la resistencia a la compresión, tracción y flexión para los concretos hechos con basalto y caliza en comparación con los concretos hechos con grava como agregado grueso de la mezcla. Cabe resaltar que las mezclas de concreto realizadas con basalto tuvieron mejores resultados que las realizadas con caliza. Por otro lado, para el grado de resistencia bajo (30 MPa) las diferencias entre las mezclas con los distintos tipos de agregados fueron menores, obteniendo un mejor resultado para el concreto hecho con caliza. Esto se debe a la fuerte interacción que se generó entre la pasta de cemento y el agregado calizo. Es importante destacar que los resultados obtenidos para cada propiedad mecánica variaban. En el caso del grado de alta resistencia para el concreto, se obtuvo una mejoría aproximada del 30% en la resistencia a la tracción y flexión mientras que en la resistencia a la compresión la influencia generada fue mínima. Por lo tanto, se concluyó que en la resistencia a la tracción la pasta de cemento juega un papel fundamental mientras que en la resistencia a la compresión el factor influyente es el tipo de agregado usado.

Es importante identificar que cada propiedad pone a prueba diferentes componentes de la mezcla, según esta investigación el agregado silíceo es de los que presenta peores condiciones para las propiedades mecánicas de estudio, por lo tanto, la implementación de una adición como las observadas en otros estudios sería de gran ayuda y mejoraría indudablemente las condiciones del concreto permitiendo así llegar a realizar concretos con agregado grueso tipo silíceo de muy buenas prestaciones.

En otra investigación los autores (Tapia & Steve, 2019) analizaron la superficie específica y la interacción entre el mortero y dos tipos de agregados gruesos de diferente origen. Los agregados usados fueron canto rodado y piedra triturada.

Con el fin de realizar la comparación entre los dos tipos de agregados, los autores mantuvieron los mismos materiales y condiciones para la realización de las pruebas. Se tuvo la misma granulometría y tamaño máximo de los agregados, se mantuvo el mismo cemento, la misma agua y el mismo agregado fino.

Con las pruebas de calidad de compresión y flexión los investigadores obtienen mejores resultados con el agregado grueso de piedra triturada en comparación con el agregado grueso de canto rodado, con valores mayores hasta en un 14.65% en superficie específica y 19.54% en

adherencia con el mortero. Estos resultados permitieron desarrollar 10.91% y 19.75% mayores resistencias a la compresión y tracción respectivamente para el agregado grueso de piedra triturada en comparación con el agregado de canto rodado.

Indudablemente se obtienen mejores valores para otro tipo de agregados si se estudia la interacción existente entre el mortero y los agregados. Esto no quiere decir que el agregado silíceo no sirva para realizar un concreto de alta calidad, simplemente hay que buscar otras alternativas que mejoren el concreto y lo permitan adaptarse a las necesidades del proyecto. Estas alternativas podrían ser, adiciones de otros implementos, tales como humo de sílice, fibras de acero, microsíllice, etc. La adición de aditivos superplastificantes también sería de gran ayuda si se mantienen unas condiciones de trabajo en las cuales se disminuya el contenido de agua evitando la segregación e implementando dosificaciones bajas o medias dependiendo del tipo de aditivo superplastificante, esto teniendo claro que este tipo de agregados no necesita gran hidratación para dar una mezcla con buena consistencia.

Como análisis propio de todas las investigaciones recopiladas, está claro que el agregado silíceo presenta ciertas ventajas cuando se examina en términos de demanda de agua y trabajabilidad, dado su forma redondeada, textura suave y su estructura poco porosa. Sin embargo, se observó que en términos de resistencia este no es el agregado pétreo que genera los mejores efectos, esto debido a que por su misma estructura la zona de interfase entre la pasta de cemento y el agregado silíceo es débil dada su poca compatibilidad. Ahora bien, con el objeto de estudio de la presente investigación, el cual es con relación a los aditivos superplastificantes y las propiedades mecánicas, cabe resaltar varios aspectos fundamentales.

El primer punto es que la dosificación de aditivos superplastificantes a implementar en mezclas de concreto hidráulico con agregado grueso tipo silíceo deben ser bajas, quiere decir que dependiendo de la marca de aditivo y su rango de dosificación dado en especificaciones técnicas siempre se debe inclinar por los menores valores para obtener mejores resultados en las propiedades de estudio. Si se inclina por dosificaciones altas puede suceder que en términos de manejabilidad se presenten problemas de segregación y en términos de resistencia se mantenga la misma resistencia que una muestra sin presencia de aditivos o incluso disminuya, en cualquier de los dos casos no es viable económicamente. Esto se debe a que el agregado silíceo por su naturaleza presenta buenas características en términos de demanda de agua y consistencia.

El segundo punto es que el tamaño máximo nominal a usar en las mezclas de concreto hidráulico debe ser pequeño, esto dado que se obtiene una mejor densificación de la mezcla por las partículas más pequeñas lo que quiere decir que existe un mejor acomodamiento entre las partículas, quedan menos vacíos, hay mayor compatibilidad entre el mortero y el agregado grueso y esto conlleva a una mezcla con mejores resultados en la consistencia y la resistencia.

El tercer punto es que la implementación de adiciones tales como humo de sílice, fibras de acero, cenizas volantes, entre otras, son de gran aporte en las propiedades mecánicas de concretos con agregados gruesos tipo silíceos. Es importante resaltarlo dado que por lo general la implementación de estas adiciones aunque mejoran las características mecánicas también requieren una mayor hidratación en la mezcla, por lo tanto la implementación de estas en conjunto con los aditivos superplastificantes desarrollan concretos con muy buenas características. Cabe destacar que el agregado silíceo es de los que mejor reacciona a las adiciones que se realicen.

El cuarto punto va encaminado a que dependiendo la propiedad mecánica de estudio la dosificación óptima puede variar, esto se debe a que el enfoque de los esfuerzos se puede generar en distintas partes. Para la resistencia a la compresión el esfuerzo se concentra principalmente en los agregados y su interacción con la pasta de cemento, por otro lado para la resistencia a la tracción el esfuerzo va enfocado en la pasta de cemento. Sin embargo para ambas propiedades con presencia de agregados silíceos se recomiendan dosificaciones bajas para mejores resultados.

Capítulo II. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO.

En la ciudad de Cartagena se han realizado una serie de investigaciones con las cuales se busca obtener un concreto que brinde unas propiedades de resistencia que estén por encima del concreto convencional. Desde el punto de vista local no es común el uso de este tipo concreto en las estructuras.

Sin embargo, en la investigación (Sanes, 2017) se implementó la adición de microsílíce y microfibras de polipropileno en una mezcla de concreto cuya resistencia oscila entre 3000 y 4000 PSI. Sus pruebas son realizadas por medio de cilindros con base a la norma NTC - 673.

Los autores observaron que la aplicación de este tipo de adiciones genera resultados positivos en la resistencia a la compresión y en la resistencia a la tracción gracias al humo de microsílíce y a las microfibras de polipropileno respectivamente, aumentando su resistencia a los 7 y 28 días con adiciones progresivas desde el 1% hasta el 3%, posteriormente a esto se observó una disminución en la resistencia. En comparación a la muestra patrón, la resistencia aumenta gracias a las adiciones del microsílíce en promedio en un 4%, es decir, para la muestra de 3000 PSI aumentó en promedio a 3199 PSI y para la muestra de 4000 PSI aumento a 4124 PSI. Otro factor importante a destacar es el uso de agregado silíceo (canto rodado) con un tamaño máximo nominal de 1” con adiciones químicas como los son el SikaFume® y el SikaFiber® AD (Sanes, 2017). Analizando la investigación presentada anteriormente, la resistencia se limita a 3000 y 4000 PSI por lo que el diseño de mezcla y las adiciones que están realizando es para alcanzar esa resistencia, sin embargo el humo de sílice mejora una propiedad mecánica que es la resistencia a la compresión, aunque disminuye mucho la trabajabilidad ya que manejan un asentamiento promedio de 7,5 cm. Ahora teniendo en cuenta que al usar agregado grueso tipo silíceo se observa en los resultados un comportamiento positivo con este ya que aumenta la resistencia por encima de los 4000 PSI.

Por otra parte, en un estudio llevado a cabo en la universidad de Cartagena (Quiñones & Causil, 2012), se realizaron adiciones de micro sílice con el fin de evaluar su incidencia en propiedades tales como manejabilidad, durabilidad y resistencia para una mezcla de concreto realizada con cemento portland tipo I. Esto con el fin de mejorar la calidad del concreto producido en obras realizadas en zonas rurales.

La metodología planteada constó de cinco fases, en las cuales inicialmente se hizo una recolección de datos, luego, se adquirieron y estudiaron las características fisicoquímicas de los

materiales a usar, posteriormente, se elaboraron las mezclas y ensayos en estado fresco y endurecido, por último, se organizó la información recopilada para su posterior análisis y conclusiones. Toda esta metodología se realizó teniendo en cuenta que el único elemento variante en las muestras era el contenido de microsílíce.

Se pudo observar que en términos generales el efecto de humo de sílice y microsílíce en ciertas proporciones establecidas por los investigadores causan efectos positivos en las obras a desarrollar con la inclusión de este. Obteniendo así, reducción en la exudación y segregación del concreto, lo cual permite mejor resistencia y durabilidad del concreto, así como una estructura arquitectónicamente más agradable (Quiñones & Causil, 2012).

Con los estudios previamente presentados se analiza que a nivel local se han desarrollado investigaciones relacionadas con esta innovadora tecnología de los concretos de alta resistencia. Por lo tanto, se puede llevar a cabo el desarrollo de diversas investigaciones acerca de cómo influye los diferentes aditivos superplastificantes en las propiedades de resistencia y trabajabilidad en el concreto. Sin embargo se presenta una ausencia de información a nivel local con respecto a otros tipos de aditivos superplastificantes u otros tamaños máximos nominales de agregado silíceo, aunque Cartagena es una ciudad que tiene un campo de infraestructura en crecimiento, es decir, el ámbito de la construcción se está desarrollando, aquí se encuentran diferentes materiales con los cuales se desarrollaría esta tecnología de concretos de alta resistencia.

En la ciudad de Changsha, China (Zhang, Deng, Taheri, Deng, & Ke, 2018) han determinado que en las industrias de cemento y concreto se ha descubierto que al reducir la humedad presente en la mezcla se aumenta la resistencia de esta. Sin embargo, al reducir el contenido de agua aplicada a la mezcla se genera pérdida en la consistencia. En la presente investigación los autores están enfocados en aumentar la resistencia a la compresión y tener una buena consistencia en la pasta de cemento CPB (cemented paste backfill), para ello optaron por un aditivo superplastificante de tipo polinaftaleno sulfonato en la hidratación, consistencia y resistencia de la pasta de cemento. Los autores optaron por cuatro dosificaciones de aditivo (0.0%, 0.2%, 0.4% y 0.8%) del peso del cemento. Como método de medida de la fluidez de las mezclas los investigadores utilizaron el método del cono de Abrahms (Slump) con el cual se pudo observar que a medida que se aumenta la dosificación del aditivo aumenta la fluidez de la mezcla. Se presentan los siguientes resultados.

Para los efectos de consistencia, obtuvieron asentamientos de 16.5, 20.5, 22, 24.5 centímetros respectivamente con las dosificaciones del aditivo. Con respecto a los resultados de resistencia a

los 28 días los especímenes alcanzan una resistencia de 0.7, 0.8, 1.1 y 1.2 MPa respectivamente, y es notable un aumento de la resistencia con respecto a una edad de 14 días que son 0.5, 0.6, 0.7 y 0.9 respectivamente.

Por lo cual se concluye que en términos de fluidez la mezcla el aditivo usado genera un efecto positivo. En términos de resistencia, se constató que a mayor tiempo de curado mayor resistencia adquirida de la mezcla. Por otro lado, con relación a la dosificación y la resistencia se comprobó que a mayor dosificación de aditivo, el aumento en la resistencia inicial de la mezcla no era tan notable, sin embargo, con el paso de los días el aumento de las dosis se genera una ganancia acelerada de resistencia en las mezclas lo que quiere decir que a mayor dosificación de aditivo mayor resistencia de la mezcla (Zhang, Deng, Taheri, Deng, & Ke, 2018).

Con respecto al comportamiento de las propiedades mecánicas y físicas presentadas anteriormente también se analizaron otros tipos de aditivos superplastificantes que ayudan a mejorar la consistencia, la fluidez, la relación A/C y por supuesto la resistencia a la compresión.

Hay diferentes tipos de aditivos superplastificantes, en esta investigación (Ibragimov & Fediuk, 2019) se observa el uso de Relamiks T-2 y Remicrete SP60, los cuales contienen naftaleno formaldehído y policarboxilato. Aquí determinan muchas propiedades de la mezcla, cemento, mortero y del hormigón. Uno de los objetivos de esta investigación es ver que tanto aumentan las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y resistencia al prima) de las mezclas hormigón. Las suspensiones cementosas obtenidas por activación mecanoquímica en estado líquido se prepararon como nuevas composiciones, en base a las cuales se crean hormigones con alta resistencia temprana, esto realizado por medio de un aparato de pulsación giratoria (RPA). Hay diferentes composiciones de mezclas de hormigón unas con activaciones mecánica cementosa y con aditivos u otras sin activación o sin aditivos, por último, se encuentra la muestra de control la cual es sin activación y sin aditivo. A continuación, se observa los resultados de cada composición y como mejora sus propiedades de resistencia a la compresión con las adiciones proporcionadas.

Composición	El nombre de la composición y características del método de preparación de la mezcla de concreto (pasta de cemento)	Nota
1	Control	Sin aditivos ni activación

2	Con activación mecánica de suspensión cementosa	Sin aditivos
3	Modificado con aditivo relamiks T-2	Sin activación
4.4	Con MCA y relamiks T-2	-
5.5	Modificado con aditivo remicrete SP60	Sin activación
6.6	Con MCA y remicrete SP60	-

Tabla 1. Las composiciones de mezclas de hormigón (suspensiones cementosas) y las características de su preparación.

Nota: Fuente (Ibragimov & Fediuk, 2019).

Composición	W/C	Densidad (kg/m ³)	Contenido de aire la mezcla (%)	Separación de agua de la mezcla (%)	Temperatura de Mezcla, °C	Resistencia a la compresión del hormigón (Mpa)		
							3 días	28 días
1	0,42	2389	1,05	0,33	21,6	7,1	19,57	40,53
						100%	100%	100%
2	0,42	2424	0,94	0,3	22,7	12,76	29,01	46,15
						194%	148%	114%
3	0,31	2472	0,88	0,06	22,3	12,81	32,42	51,7
						180%	146%	128%
4.4	0,31	2485	0,64	0,03	23,1	22,53	46,38	62,81
						331%	237%	155%
5.5	0,3	2476	0,69	0,09	22	12,32	31,89	57,55
						174%	163%	142%
6.6	0,3	2472	0,7	0,04	23,5	19,62	45,01	65,72
						276%	230%	162%

Tabla 2. Las propiedades físicas de la mezcla de hormigón y la resistencia a la compresión del hormigón.

Nota: Fuente (Ibragimov & Fediuk, 2019)

Estos resultados son impresionantes al compararlos con la composición de control ya que al observar la composición 4.4 que contiene el aditivo superplastificante Relamiks T-2 y activación mecánica se dan cuenta de que en el primer día la resistencia aumenta en un 331%, al tercer día en un 237% y a los 28 días en un 155%. Si se compara esto mismo con solo la adición de relamiks T-2 se observa que aumenta la resistencia 63-84% en el primer día, 27-43% al tercer día y un 14-21% a los 28 días. Si tenemos la MCA con la adición de Remicrete SP60, la resistencia máxima del concreto durante la compresión el primer día aumenta en un 53-59%, en el tercer día, en un 12-

41%, en el día 28 en un 6-14% en comparación con la composición, obtenida por la adición tradicional de Remicrete SP60.

Con estos resultados observados se quedan solamente con la composición 3 y 5.5 los cuales solo se adicionan los aditivos superplastificantes Relamiks T-2 y Remicrete SP60. Al comparar estas dos muestras con la composición de control nos damos cuenta que la resistencia aumenta en un 80% en el primer día y disminuye hasta un 26% en comparación a la muestra de control para el aditivo Relamiks T-2. El Remicrete SP60 aumenta en un 76% en el primer día y disminuye hasta un 42% en comparación a la muestra de control (Ibragimov & Fediuk, 2019).

Analizando los datos y lo que aporta cada aditivo superplastificante concluimos que si la necesidad es obtener mayor resistencia a una edad muy temprana el aditivo Relamiks T-2 sería la mejor opción, sin embargo, el Remicrete también da una gran resistencia temprana y a los 28 días por lo tanto el Remicrete SP60 es mejor en general.

Con esto se hizo hincapié en los concretos de alta resistencia ya que es una tecnología poco común aplicada en el país y en la ciudad de Cartagena. Por lo tanto, gracias a diferentes autores que han llevado a cabo investigaciones realizadas en distintos países desarrollados que manejan esta tecnología, se puede dar pie a otros estudios con los cuales se puedan analizar otras propiedades físico-mecánicas del concreto y poder observar que innovaciones se pueden aplicar para mejorar este producto que es muy importante en las estructuras y en el campo de la ingeniería civil.

El concreto presenta tres estados de estudio, cuando se encuentra en estado fresco, en proceso de fraguado y en estado endurecido, los cuales presentan propiedades físicas y mecánicas. En estado endurecido hay un estudio con el cual se puede concluir que un concreto tiene un buen comportamiento estructural, esta propiedad es la resistencia a compresión. Sin embargo, existen otras propiedades que se deben estudiar para tener mejores resultados en su vida útil.

Existen diversos ensayos que se realizan para garantizar la calidad de un concreto, tales como los grados de manejabilidad, durabilidad, velocidad de fraguado y apariencia en estado fresco. En estado endurecido se evalúan ciertas propiedades mecánicas, estas son la resistencia a la compresión, a la flexión y a la tracción.

En la presente investigación se hará referencia a dos propiedades en estado fresco (Trabajabilidad) y en estado endurecido (Resistencia a la compresión), las cuales son importante y determinantes para calificar a un concreto óptimo y que tenga un buen comportamiento estructural.

Trabajabilidad o manejabilidad

Esta propiedad consiste en determinar una compactación adecuada del concreto en estado fresco al momento de ser colocado para que cubra todos los espacios y no genera segregación alguna. Los conceptos que explican a profundidad su función son los siguientes:

- La compacidad es la facilidad con la que el concreto se compacta sin generar espacios y reducir el volumen de vacíos.
- Plasticidad la cual permite que se deforme sin llegar a romperse.
- La consistencia permite que la masa tome la forma de los diferentes sistemas de encofrados.

Al observar las propiedades de la trabajabilidad y en qué consiste cada una, se analiza qué factores afectan a estas propiedades.

En una mezcla de concreto es importante la cantidad de agua que se aplica a la mezcla, ya que se debe tener en cuenta un factor de “seguridad” para esta, Esto se debe a que al reaccionar el cemento con el agua se produce una reacción exotérmica, es decir, existe una liberación de calor por lo tanto se evapora una parte del agua de mezclado, por lo tanto el agua utilizada en la mezcla es el 15% aproximadamente del volumen total del concreto, del cual el 5% es para hidratarlo y el otro 10% es el agua evaporable (Niño Hernandez, 2010).

Un factor muy importante son las propiedades que contienen los agregados a utilizar en la mezcla ya que pueden afectar mucho al concreto en estado fresco dependiendo de su forma, textura, densidad, absorción, materia orgánica y contenido de finos. La gradación y la forma son propiedades muy importantes al momento de obtener un concreto fresco con buena apariencia y trabajabilidad, lo mismo al obtener un concreto endurecido con buenas propiedades mecánicas.

La absorción es clave cuando el concreto se encuentra en estado fresco, ya que el agua de mezclado se puede reducir a tal punto que disminuye la trabajabilidad y puede afectar el rendimiento del concreto, por lo tanto, se debe tener cuidado y agregar la respectiva cantidad de agua con el cual se contrarreste este factor. Una buena manejabilidad en la mezcla se tiene cuando hay índices bajos de absorción y un coeficiente bueno de forma, es decir, preferiblemente que sea redonda (Chan Yam , 2003).

Las propiedades de los agregados también varían del lugar de extracción el cual debe cumplir con una normatividad ambiental para poder realizar dicha actividad, sin embargo, puede que no cumpla los ensayos establecidos en la norma ya sea de granulometría, aplanamiento o forma (Torrado, 2013).

Otro factor que también afecta la relación A/C son las condiciones climáticas, las cuales por efecto de evaporación por altas temperaturas se pierde agua de mezclado y también ocurren intercambios de calor dentro del concreto y modificación en los tiempos de fraguado.

“Por lo general un concreto es trabajable en la mayoría de las circunstancias, cuando durante su desplazamiento mantiene siempre una película de mortero de al menos 1/4” sobre el agregado grueso” (Villanueva, 2014, p. 33, p. 3).

Para determinar la Trabajabilidad del concreto en su estado fresco observamos la consistencia de esta la cual se refiere al grado de fluidez que tiene la mezcla, es decir, que tan seca o fluida se encuentra en su estado plástico, sin embargo, no es una medida directa de la trabajabilidad o manejabilidad. El ensayo realizado para esta propiedad es el Slump o el Cono de Abrahms. Las especificaciones y elementos usados para este ensayo se encuentran descrito en la norma I.N.V.E – 404 – 13.

Resistencia a la compresión

Cuando el concreto se encuentra en estado endurecido es capaz de soportar grandes esfuerzos de resistencia a la compresión, flexión, tracción y corte, dependiendo de las propiedades del agregado y cemento. El esfuerzo en el cual el concreto tiene mejor desempeño es de compresión, por lo tanto, es al que más importancia se le atribuye. Se considera una resistencia normal menor a 6000 PSI, de alta resistencia entre 6000 - 14000 PSI a los 28 días de edad y de ultra alta resistencia cuando es superior a 14000 PSI (Niño Hernandez, 2010).

“En cuanto a la resistencia de la pasta hidratada, se conoce que el cemento al contacto con el agua se hidrata y forma una masa semicristalina discontinua llamada “gel”, que con el transcurso del tiempo adquiere resistencia, la cual será mayor a medida que se incrementa el grado de hidratación” (Niño Hernandez, 2010, p. 119).

En el concreto endurecido se presenta unos factores que inciden en su resistencia tales como la relación A/C, características de los agregados, el tipo de cemento, aditivos, al momento del diseño y otros cuando se desencofran que vienen siendo el curado y la edad del concreto.

Influencia de los agregados

Las propiedades tales como el tamaño, la forma y el tipo de material afectan la resistencia del concreto ya que existe una interacción mecánica entre la pasta de cemento y el agregado grueso por lo que la textura del agregado es responsable en la adherencia. “En un trabajo de investigación se encontró que concretos fabricados con agregados triturados resistieron más que los de canto

rodado; el esfuerzo de compresión a los 28 días para los concretos hechos con agregados gruesos de grava redonda estuvo entre el 10 y 20 por ciento más bajos que los concretos preparados con agregados triturados” (Chan Yam , 2003, p. 43)

El tamaño máximo de un mismo tipo de agregado tiene dos efectos opuesto en la resistencia a la compresión. Lo agregados de tamaños máximos mayores necesitan menos agua de mezclado que los agregados de tamaños máximos menores. Por lo tanto, si se tiene dos mezclas que tengan la misma relación A/C y la misma consistencia se presentara resistencia más bajas cuando se utilicen agregados de tamaño máximo mayor (Niño Hernández, 2010). Con esto se infiere que mientras el tamaño máximo del agregado sea menor, esta hace que la resistencia a la compresión sea mayor.

Relación A/C

Esta relación se define como la cantidad de agua agregada a la mezcla, sin incluir la absorbida por los agregados sobre la cantidad de cemento. La relación A/C esta estrechamente relacionada con la resistencia, ya que entre mayor sea la cantidad de agua suministrada en la mezcla hay una cantidad de agua que no se cambia con el cemento por lo tanto el agua que se evapora termina haciendo que la pasta se vuelve más porosa y disminuya su resistencia.

Contenido de cemento

El cemento es el material químicamente activo en la mezcla, es decir, es el que reacciona con el agua y finalmente le dará la resistencia al concreto. Entre mayor cantidad de cemento se utilice en la mezcla mayor resistencia se obtendrá, sin embargo esto llega a un límite ya que hay un punto en donde el cemento no se hidrata y pasa a tomar un estado inerte, por lo tanto esto produce que el concreto se agriete y pierda adherencia en los agregados causando una pérdida de resistencia (Niño Hernandez, 2010).

Aditivos

Para obtener grandes resistencias por encima de los 5000 PSI es necesario el uso de aditivos químicos o adiciones. Hay diferentes tipos de aditivos, unos que ofrecen altas resistencias a temprana edad como los acelerantes (tipo E), sin embargo la resistencia disminuye a una edad posterior. Existen los reductores de agua o los aditivos superplastificantes (tipo F) los cuales ayudan a obtener elevadas resistencias ya que disminuye la relación A/C utilizando una dosificación que puede variar dependiendo del fabricante del aditivo.

Curado del concreto

El concreto entra a una etapa de curado en la cual se encuentra a una temperatura y una humedad adecuada con el objeto de obtener una durabilidad y resistencia esperada. Existe una diversidad de métodos para el curado del concreto. A continuación se explica el curado del concreto con aplicación de agua con selladores (Argos).

El curado con aplicación de agua se puede realizar en estado de niebla evitando agregar grandes chorros de agua que puedan afectar la composición, ya que se pone en contacto directo con el concreto.

Para el curado con selladores se pueden utilizar películas plásticas de bajo peso (polietileno) en el concreto, de por lo menos 0,1 mm de espesor, y que se pueden conseguir en diversas presentaciones como plásticos transparentes, blancos o negros. Estas se colocan sobre la superficie del concreto una vez pueda soportarlas y sin dañar los acabados finales. El polietileno genera un ambiente hermético entre el plástico y la superficie del concreto. Sin embargo, se pueden presentar coloraciones en la superficie del concreto por acumulación de agua (Argos, párr. 9).

Edad del concreto

El concreto después de su fraguado comienza a adquirir resistencia a medida que pasa el tiempo. Para concretos convencionales se dice que adquiere su resistencia final a los 28 días sin embargo los concretos de alta resistencia pueden tardar hasta 90 días en adquirir su resistencia final.

Ensayo de resistencia a la compresión (I.N.V.E – 410 – 13)

Este ensayo se utiliza para determinar la resistencia de especímenes cilíndricos de concreto el cual consiste en aplicar una carga axial sobre el cilindro hasta que falle. La resistencia se determina dividiendo la carga axial entre en el área transversal del cilindro. Este ensayo se puede realizar a los 7, 14 y 28 días, con el objeto de analizar si el concreto está cumpliendo con la resistencia de diseño. Si el concreto no cumple con esta resistencia a los 7 días o a los 14 días no se coloca a disposición.

En el año 1918 Duff Abrams demostró que la relación A/C está estrechamente relacionada con la resistencia del concreto ya que son inversamente proporcional. Esto lo expreso matemáticamente de la siguiente manera.

$$R = \frac{A}{B \frac{a}{c}}$$

Donde,

R = resistencia a la compresión

A, B = Constantes empíricas para unas determinadas condiciones

$\frac{a}{c}$ = Relación agua cemento

Esta relación se ve gráficamente de la siguiente manera

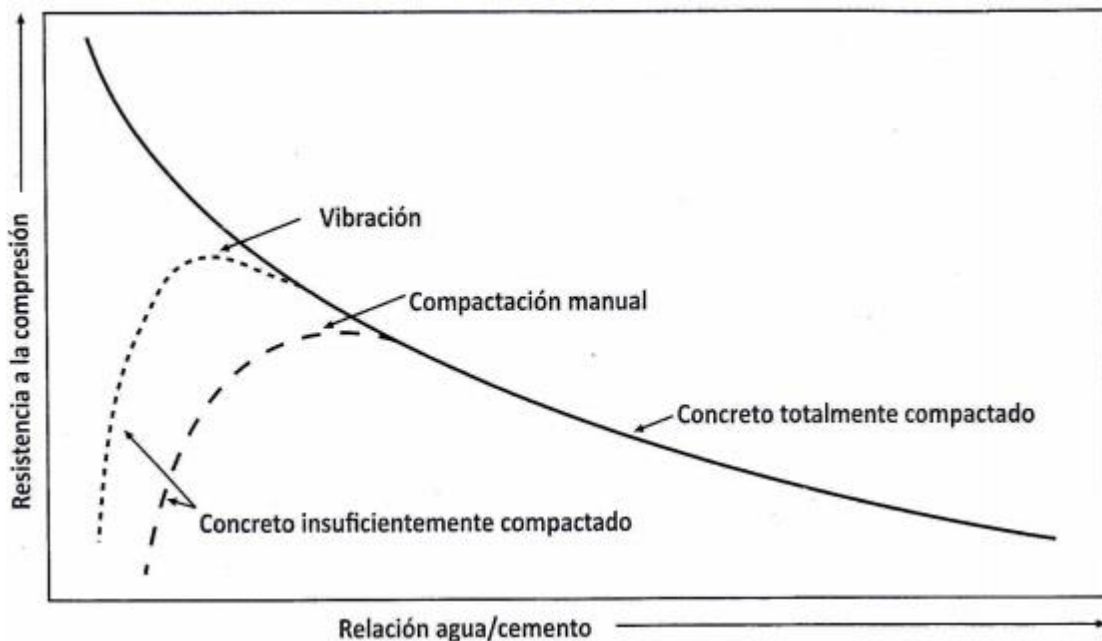


Figura 5. Resistencia a compresión en función de la relación A/C.

Nota: Fuente (Niño Hernandez, 2010, p. 121)

Observando la gráfica podemos concluir que cuanto menos es la relación agua/cemento, mayor es la resistencia a compresión del concreto. De todas maneras, hay que tener en cuenta que si la relación agua cemento disminuye mucho se puede volver porosa y puede afectar su durabilidad y su resistencia puede decrecer. Se observa que se puede utilizar relaciones de agua/cemento más bajas cuando se realiza una compactación con vibrador.

Teniendo en cuenta todo lo visto en este capítulo se puede concluir que la resistencia y la trabajabilidad depende mucho de las características de los agregados, los diferentes efectos que producen los aditivos y los más importante la relación A/C que es una propiedad que es directamente afectada por el tipo de agregado a utilizar y la dosificación de cualquier tipo de aditivo. Por lo tanto, para tener una fluidez de la pasta de concreto adecuada junto con una

resistencia a la compresión del concreto en estado endurecido alta es necesario una baja relación A/C ya que el canto rodado es un agregado pétreo poco poroso, es decir, no tiene mucha absorción, facilita la fluidez de la pasta y por ende se tiene altas resistencias a la compresión como se observa en la figura 1. Siendo así el uso de un aditivo puede ser con unas dosificaciones bajas y así obtener un concreto de alta resistencia.

Capítulo III. ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES.

Los aditivos se consideran componentes del concreto o mortero que, junto con el agua, el cemento hidráulico, los agregados y en ciertas ocasiones fibra de refuerzo, se adicionan a la mezcla antes o durante su mezclado (Niño, 2010). Los aditivos son usualmente usados para cambiar o mejorar algunas propiedades en el concreto en estado fresco, durante el fraguado o en estado endurecido. Existen diferentes aditivos, estos varían según la función que cumplen. En las industrias de cemento y concreto se ha descubierto que al reducir la humedad presente en la mezcla se aumenta la resistencia de esta. Sin embargo, al reducir el contenido de agua aplicada a la mezcla se genera pérdida en la consistencia, por lo tanto, día a día se ha implementado el uso de aditivos superplastificantes que permiten mantener la fluidez de la mezcla y elevar la resistencia de esta (Zhang et al., 2018).

Los aditivos superplastificantes son los más usados (Aruntaş et al., 2008). Estos rellenan los poros entre las partículas de cemento lo cual permite el incremento en la fluidez de las mezclas y la reducción de agua. Con un menor contenido de agua la relación agua cemento disminuye, por lo tanto, se presenta un incremento en la resistencia a la compresión de la mezcla en estado endurecido. Además, la dosificación de aditivos superplastificantes genera mejoras en las características mecánicas de las mezclas. Estos también permiten la obtención de mezclas fluidas, las cuales son de gran utilidad cuando se presentan refuerzos densamente armados y áreas de difícil acceso (Manomi et al., 2018). Otro beneficio de la reducción del agua y la implementación de los aditivos superplastificantes es el aumento en la durabilidad del concreto (Aiad et al., 2017). Los aditivos superplastificantes pueden generar dos efectos. Reducen el contenido de agua sin modificar la consistencia o aumentan la manejabilidad manteniendo el mismo nivel de agua. Incluso puede generar los dos efectos (Barbudo et al., 2013). Con las dosificaciones de aditivos superplastificantes menores del 5% se reduce el agua hasta en un 30% mientras se mejora la trabajabilidad, el rendimiento mecánico, las propiedades reológicas y la durabilidad de la mezcla (Mangane et al., 2018). Estas características desarrolladas con el uso de aditivos han permitido desarrollar beneficios como concretos bombeables y adaptables a diferentes tipos de proyectos (Aiad et al., 2017).

A nivel local, nacional e internacional se han realizado estudios analizando la influencia y los beneficios generados por los aditivos superplastificantes en las propiedades físico-mecánicas del concreto, observando el comportamiento de este con diferentes dosificaciones y permitiendo así, conocer mejor su funcionamiento. Estos estudios han permitido un desarrollo en la tecnología del concreto. Lo cual ha generado un incremento en la eficiencia en términos de dosificaciones óptimas que permiten un mejor comportamiento en las mezclas. Es por esto que se ha desarrollado esta investigación, generando así un mayor impulso en el estudio de la temática que permita el avance y la mejoría en las propiedades del concreto haciéndolo más versátil a cualquier tipo de innovación en estructuras y ampliando la durabilidad en estas mismas. A continuación, se presentarán algunos estudios a nivel internacional y nacional sobre el desarrollo y la acogida que ha tenido el tema a nivel científico.

En el estudio de (Aruntaş et al., 2008) a nivel internacional, se encontró que los autores analizaron los efectos generados en una mezcla de concreto hidráulico con la aplicación de aditivos superplastificantes y fibras de acero con diferentes condiciones de curado. Las dosificaciones del aditivo empleadas fueron 1.0%, 1.5% y 2.0% en peso de cemento. Se estudiaron dos condiciones de curado, curado húmedo continuo y curado al aire libre.

En estado fresco se examinaron varias propiedades. La consistencia se analizó con el método del cono de Abrams (slump) y se observó que con la implementación del aditivo y el aumento en la dosificación también aumenta la trabajabilidad de las muestras. Este aumento en el slump estuvo entre 192 y 292% comparado con la muestra patrón.

Concrete type	Strength (MPa)	Continuous moist curing					
		Fibrous			Non-fiber		
		28 days	90 days	180 days	28 days	90 days	180 days
CC	Compressive	457	428	420	313	355	383
SPC 1.0		466	468	444	359	391	411
SPC 1.5		474	442	428	373	384	403
SPC 2.0		462	411	409	333	370	385
CC	Flexural	6.7	7.0	-	5.9	6.3	-
SPC 1.0		7.3	7.2	-	5.4	7.2	-
SPC 1.5		6.7	8.0	-	5.3	7.0	-
SPC 2.0		6.6	7.5	-	5.0	6.8	-

Figura 6. Resistencia a la compresión y flexión de concretos con y sin fibras con el método de curado continuo. Extraído de (Aruntaş et al., 2008).

Open air curing					
Fibrous			Non-fiber		
28 days	90 days	180 days	28 days	90 days	180 days
339	367	393	283	320	327
372	425	429	339	364	404
385	405	408	336	361	397
372	403	399	254	340	367
4.5	6.2	-	3.1	5.9	-
5.0	6.8	-	3.5	6.3	-
4.6	7.1	-	3.9	6.0	-
4.5	6.9	-	3.7	5.4	-

Figura 7. Resistencia a la compresión y flexión de concretos con y sin fibras con el método de curado al aire libre. Extraído de (Aruntaş et al., 2008).

En estado endurecido se estudió la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión. Para la resistencia a la compresión se observó que en comparación con la muestra patrón, la implementación del aditivo aumenta la resistencia, sin embargo, al aumentar la dosificación de este, se observa una disminución en la resistencia de la muestra. Teniendo en cuenta el estudio a mediano plazo (28 días) se obtuvo mejores resultados en la dosificación de 1.5% seguida por la de 1.0%, con poca diferencia entre estas dos y por último 2.0% para muestras con presencia de fibras de acero. Por otro lado, con un análisis a largo plazo (180 días) la dosificación de aditivo con mejores resultados en términos de resistencia a la compresión para las muestras con presencia de fibras de acero fue la de 1.0%.

Para la resistencia a la flexión se mostró un mismo comportamiento en las muestras que no poseen fibras de acero y las que sí lo poseen. Se observó que la dosificación de aditivo superplastificante genera un efecto positivo en el cual se obtienen mejores resistencias comparada con la muestra patrón. Sin embargo, para el caso de muestras exentas de fibras de acero y con el método de curado húmedo continuo si se incrementa la dosificación de aditivo se pierde resistencia a la flexión. Cuando se examinan las muestras a los 90 días, se observa que las mejores muestras son las poseedoras de fibras de acero con dosificaciones de 1.5% y 2.0% en peso del cemento.

Según la anterior investigación se corrobora que para el caso de estudio las dosificaciones altas de aditivos superplastificantes mantienen o disminuyen la resistencia de las mezclas por lo que se recomiendan dosificaciones bajas para que se cumpla con la función objetivo y permitan una viabilidad en términos económicos.

En la investigación de (Aiad et al., 2017) trabajaron con dos diferentes aditivos superplastificantes, ciclohexanona formaldehído sulfanilato (CFS) y ciclohexanona sulfanilato

glioxílico (CGS). Ellos evaluaron la influencia que generan estos aditivos en las propiedades mecánicas y fisicoquímicas de la pasta de cemento. Las dosificaciones de los aditivos se hicieron en las proporciones de 0, 0.25, 0.50, 1.00 como porcentaje en masa del cemento.

Con el análisis de la consistencia es evidente que, al aumentar la dosificación de aditivos superplastificantes, la cantidad de agua a utilizar en la mezcla se reduce. Se observó que a medida que se baja la cantidad de agua a usar y se aumenta la dosificación del aditivo la consistencia aumenta en los dos casos de aditivos usados, por lo tanto, el uso de aditivos superplastificantes permite mejorar la consistencia de la mezcla y reducir los niveles de agua a usar en esta.

Con base a los tiempos de fraguado con el uso del aditivo CFS se reduce el uso de agua para la mezcla y se acelera el tiempo de fraguado, por lo cual se podría decir que el aditivo superplastificante CFS actúa como un aditivo reductor de agua y acelerante. Por otro lado, con la aplicación del aditivo CGS se pudo experimentar un aumento en los tiempos de fraguado de la mezcla, por lo tanto, este se podría catalogar como un aditivo reductor de agua y retardante.

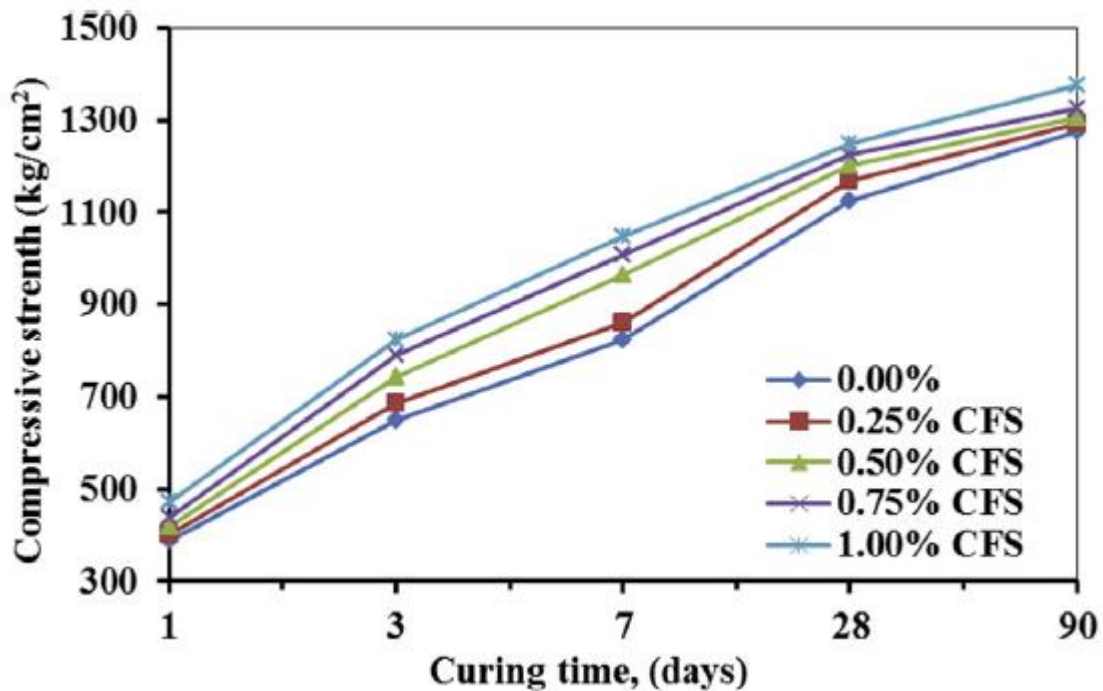


Figura 8. Variación de la resistencia a la compresión de varias pastas de cementos con diferentes dosificaciones de aditivo CFS a diferentes tiempos de curado. Extraído de (Aiad et al., 2017).

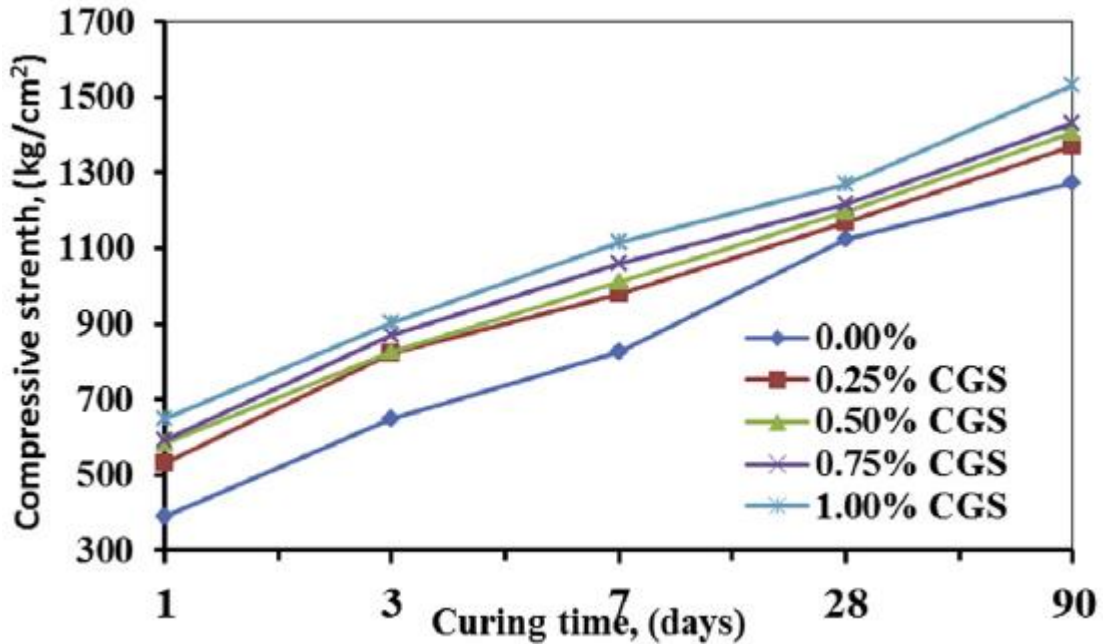


Figura 9. Variación de la resistencia a la compresión de varias pastas de cementos con diferentes dosificaciones de aditivo CGS a diferentes tiempos de curado. Extraído de (Aiad et al., 2017).

Otra propiedad muy importante analizada por los investigadores fue la resistencia a la compresión. Se observó un aumento prolongado de Resistencia a la compresión a edades tempranas (3 días) luego un aumento gradual hasta los 28 días y posterior a eso se mantuvo un ligero aumento. Con el uso de los dos aditivos superplastificantes se generó un incremento en la resistencia a la compresión de la mezcla, observando que, a mayor dosificación de aditivo, menor contenido de agua y mayores resistencias a la compresión se obtuvieron.

Como análisis de la investigación previamente mencionada, los aditivos superplastificantes aparte de mejorar las manejabilidad en estado fresco y la resistencia en estado endurecido pueden actuar como acelerante o retardante en los tiempos de fraguado de la mezcla, esto quiere decir que dependiendo de las condiciones de trabajo que se requieran es importante escoger un aditivo superplastificante que se ajuste a los tiempos de fraguado del proyecto, ya sea acelerante o retardante o en su defecto alguno que no modifique los tiempos de fraguado. También se debe evaluar la dosificación a emplear teniendo en cuenta los tiempos de fraguado, es decir, en caso de que sea un aditivo reductor de agua y retardante, a mayor dosificación del aditivo, mayor será la demora en el tiempo de fraguado.

Otro punto a destacar es que en esta investigación se disminuye el contenido de agua y se implementa el uso de aditivos superplastificantes, por consiguiente, existe un aumento prolongado en la resistencia a la compresión. Haciendo una comparación de esta investigación con otras, se observó que en otros proyectos había una disminución de la resistencia a la compresión cuando se empleaban dosificaciones altas, esto se debe a que en esos casos la relación agua cemento se mantiene constante, lo que generaba que se obtuvieron mezclas excesivamente fluidas donde la resistencia se ve afectada negativamente.

En la investigación de (Barbudo et al., 2013) realizada a nivel internacional, se optó por hacer uso de agregados reciclados y aditivos plastificantes. Se hizo uso de agregado natural con varias series de reemplazo de agregados reciclados (0%, 20%, 50% y 100%). Se hicieron muestras sin aditivo, con aditivo plastificante tradicional y con aditivo superplastificante.

En estado fresco se analizaron varias propiedades. Una de las propiedades a analizar fue la reducción en la relación agua cemento con la aplicación de las diferentes variaciones previamente mencionadas. Se pudo observar que con la aplicación de aditivos se reduce la cantidad de agua requerida en la mezcla por lo cual se obtiene una baja relación agua cemento. Con la aplicación del aditivo plastificante tradicional y superplastificante se redujo la relación A/C aproximadamente en un 17% y 26% respectivamente comparada con la referencia. Con el análisis de manejabilidad se trató de manejar igual, adicionando la cantidad de agua necesaria a medida que se usaban agregados reciclados.

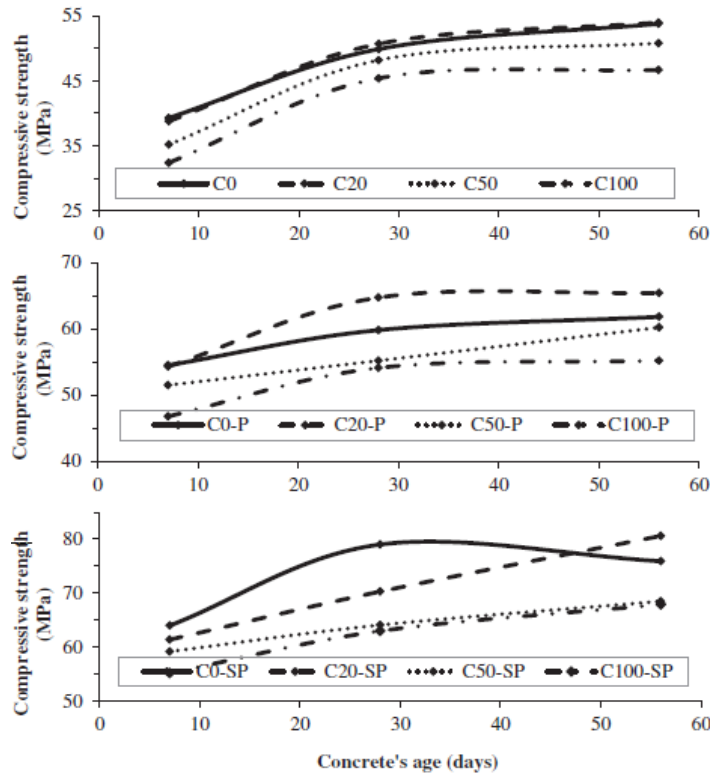


Figura 10. Resistencia a la compresión en concretos sin aditivo, con aditivo plastificante y con aditivo superplastificante respectivamente. Extraído de (Barbudo et al., 2013).

En estado endurecido, se encontró que la resistencia a la compresión es superior cuando se aplica aditivos superplastificantes, sin embargo, con el uso del aditivo plastificante también se generan unas mejoras en esta propiedad, pero los mayores resultados se obtuvieron en la aplicación del aditivo superplastificante. Con estos resultados se demuestra que la hidratación con el uso de aditivos reductores de agua es mayor que en una mezcla de concreto sin uso de estos.

Otra propiedad estudiada fue la resistencia a la tracción en la cual se tiene bastante variación en los resultados, esto se debe a que la resistencia no solo depende de los agregados sino también de la cantidad y calidad de conexiones entre ellos con la matriz de cemento.

El módulo de elasticidad incrementa con el uso de aditivos y decrece con el aumento de uso de agregado reciclado. Se observó que con el uso de agregados naturales y el uso de cualquier de los dos aditivos usados en la investigación genera una caída del 23 % aproximadamente. Otro punto importante para destacar en esta propiedad es que existe una relación importante entre el módulo de elasticidad y la resistencia.

De acuerdo a la resistencia a la abrasión el uso de aditivos plastificantes y superplastificantes disminuye la cantidad de agua requerida, mejora la compactación del concreto y reduce la pérdida en la resistencia a la abrasión.

Como análisis de la anterior investigación, la presencia de agregados reciclados genera un aumento en la demanda de agua de la mezcla, por lo tanto, se ve influenciada la dosificación óptima de aditivos superplastificantes, lo que quiere decir que en este caso no se recomiendan dosificaciones bajas del aditivo, si no por el contrario dosificaciones altas que compensen la demanda de agua generada por los agregados reciclados y permitan una mejoría en las propiedades físicas y mecánicas del concreto.

En el estudio de (Benaicha et al., 2019) se examinó la relación existente entre la reología y la resistencia a la compresión de concreto autocompactante. Se hizo uso de un aditivo superplastificante con ocho dosificaciones diferentes, partiendo desde 0.3% hasta 1.0% en peso del cemento.

En estado fresco, entre las propiedades incluidas en la reología está la trabajabilidad. Esta propiedad fue estudiada por medio del ensayo de slump. Con ese ensayo los autores determinaron que a medida que se incrementa la dosificación de aditivo superplastificante el diámetro de flujo de caída aumenta, lo que quiere decir, que aumenta la trabajabilidad de la mezcla.

Table 4 – Compressive strength on 160 mm diameter × 320 mm high cylindrical specimens.			
Mixtures SCC's	Compressive strength (MPa)		
	1 day	7 days	28 days
N	29.4	33.3	50.8
SCC-SP1	45.2	60.8	73.48
SCC-SP2	40.64	55.48	71.44
SCC-SP3	35.3	46.28	65.2
SCC-SP4	32.24	41.5	59.88
SCC-SP5	29.24	37.84	53.24
SCC-SP6	26.64	33.56	45.24
SCC-SP7	18.88	27.24	38.7
SCC-SP8	15.04	20.76	29.44

Figura 11. Resistencia a la compresión para las diferentes muestras con dosificaciones de aditivos superplastificantes (0.3% - 1%). Extraído de (Benaicha et al., 2019)

En estado endurecido se examinó la resistencia a la compresión. Esta propiedad aumenta para la muestra realizada con la dosificación de aditivo más baja (0.3%) entre las dosificaciones de estudio. Por otro lado, se observó que con el aumento de la dosificación para las otras muestras (0.4%-1.0%) la resistencia a la compresión tenía un decrecimiento. Sin embargo, algunas dosificaciones obtenían valores superiores a la muestra sin aditivos, pero desde la aplicación de 0.8% hasta 1.0% en peso de cemento se captó una resistencia aún menor que la muestra sin presencia de aditivo.

En el trabajo de investigación de (Manomi et al., 2018) se analizó la influencia de cenizas volantes y varios tipos de aditivos superplastificantes en las propiedades mecánicas y la durabilidad de mezclas de concreto hidráulico. Las cenizas volantes fueron implementadas en varios rangos (0, 15, 25 and 35% en masa) como reemplazo de cemento. Se usaron cuatro bases de aditivos superplastificantes (policarboxilato eter, Lignosulfonato, melamina sulfonada formaldehído y naftaleno formaldehído sulfonato). La relación A/C se mantuvo constante en 0.37 y las dosis usadas en los aditivos fueron las dosis de saturación. Estas dosis de saturación fueron medidas por dos métodos.

Las propiedades mecánicas analizadas fueron la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción, las cuales se evaluaron después de 28 días. Se observó que no había mucha diferencia en la resistencia a la compresión y a la tracción con el uso de aditivos superplastificantes, sin embargo, hubo un incremento en la resistencia a la compresión para la mayoría de los casos. Esto se debe a que la aplicación de aditivos mejora la compactación. Los aditivos base policarboxilato eter y melamima sulfonada formaldehido tuvieron los mejores resultados con la adición de cenizas volantes en el rango de 35%. El aditivo con mejores resultados en términos de grandes demandas de agua para la mezcla es el aditivo base policarboxilato eter. Por otro lado, los aditivos base lignosulfonato y naftaleno formaldehido sulfonato se les reduce la resistencia con el incremento en el rango de cenizas volantes.

Como análisis, las cenizas volantes generan mayor demanda de agua en la mezcla para alcanzar una dosificación óptima, por lo tanto se necesitan dosificaciones altas de aditivos superplastificantes. Por otro lado la composición química del aditivo tiene una influencia en la dosificación óptima, quiere decir que teniendo en cuenta las condiciones del estudio mientras que los aditivos base policarboxilatos generan un aumento en la resistencia del concreto, los aditivos base lignosulfonato generan una disminución. Se llega a la conclusión de que para llegar a una dosificación óptima se necesita saber la composición química del aditivo superplastificante.

En la investigación de (Zhang et al., 2018) se enfocan en el efecto del aditivo superplastificante de tipo polinaftaleno sulfonato en la hidratación, consistencia y resistencia de la pasta de cemento. Los autores optaron por cuatro dosificaciones de aditivo (0.0%, 0.2%, 0.4% y 0.8%) en peso del cemento.

Como método de medida de la fluidez de las mezclas los investigadores utilizaron el método del cono de Abrahams (Slump) con el cual se pudo observar que a medida que se aumenta la dosificación del aditivo aumenta la fluidez de la mezcla. Por lo cual se concluye que en términos de fluidez la mezcla el aditivo usado genera un efecto positivo.

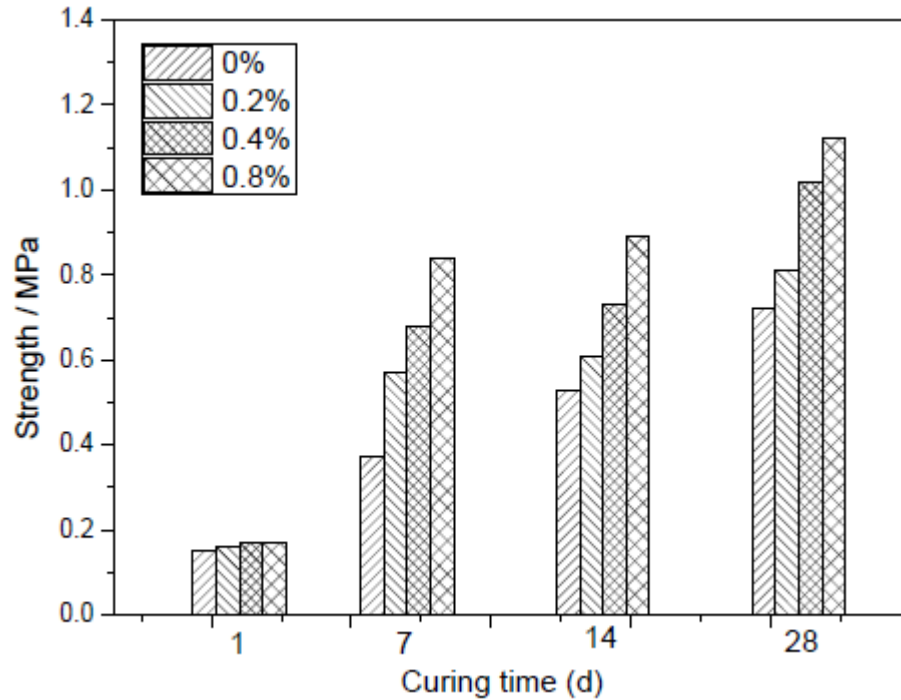


Figura 12. Evolución de la resistencia a la compresión con diferentes dosis de aditivo superplastificante. Extraído de (Zhang et al., 2018)

En términos de resistencia, se constató que a mayor tiempo de curado mayor resistencia adquirida de la mezcla. Por otro lado, con relación a la dosificación y la resistencia se comprobó que a mayor dosificación de aditivo el aumento en la resistencia inicial de la mezcla no era tan notable, sin embargo, con el paso de los días el aumento de las dosis se genera una ganancia acelerada de resistencia en las mezclas lo que quiere decir que a mayor dosificación de aditivo mayor resistencia de la mezcla.

En la investigación de (Mangane et al., 2018) realizada a nivel internacional, se estudian las propiedades mecánicas y la trabajabilidad de la pasta de cemento con la adición de varios superplastificantes. Evaluaron el efecto de las dosificaciones de los aditivos en la hidratación de la pasta de cemento. Hicieron uso de cinco grupos de aditivos superplastificantes principales (lignosulfonato, naftaleno, melamina y policarboxilatos) a 5, 7, y 10% por peso del cemento.

Las dosificaciones de aditivos requeridas para obtener la consistencia deseada (7 in) fueron 7%, 6%, y 5.4% por peso del cemento para lignosulfonato, nafataleno y policarboxilatos respectivamente.

Con el análisis de la consistencia, los autores observaron que dependiendo de la dosificación y del tipo de aditivo superplastificante los resultados varían. El aditivo que alcanzó los mejores resultados fue el policarboxilato, el cual con una dosificación de 5% alcanzó un valor de 150 mm. Se observó un resultado similar con la implementación de aditivos lignosulfonatos y un rendimiento ligeramente mejor que en el aditivo base naftaleno y melamina. Con la implementación de los aditivos se logró la consistencia buscada con baja demanda de agua. En términos del agua para los aditivos base lignosulfonato con el incremento de la dosificación del aditivo de 5% a 10% se mantuvo el contenido de agua en 26%. El aditivo tipo policarboxilato presentó la menor demanda de agua, reduciendo de 22.9% a 18.7%. Con un bajo contenido de agua aumenta el porcentaje sólido, por lo tanto, se tienen mejores resultados en términos de resistencias mecánicas. Se realizó un análisis de los tiempos en el cual notaron que con el aditivo base policarboxilato a pesar de generar una gran consistencia después de treinta minutos empezaba a perderla. Con los otros aditivos se observó un mayor desempeño en este ámbito, obteniéndose valores de más de una hora para el aditivo base melamina.

En términos de resistencias se observó que la implementación de aditivos genera unos efectos positivos en la mezcla. Sin embargo, se examinó que estos efectos dependen del tipo de aditivo y de la dosificación usada. El aditivo base policarboxilato fue el que presentó los valores más altos en todos los días de curado evaluados. Luego, los aditivos base lignosulfonatos mostraron los mejores resultados en las propiedades mecánicas, seguidos por aditivos base naftaleno y melamina. Con dosificaciones muy altas se notaba un leve retardo en el tiempo de fraguado. Por lo tanto, los autores optaron por la dosificación óptima de 5% para los aditivos superplastificantes base lignosulfonato y melamina y 7% para los aditivos base policarboxilatos y naftaleno.

Con base a las propiedades anteriores analizadas se notó un efecto positivo con la implementación de aditivos superplastificantes en mezclas de concreto. Sin embargo, el tipo de aditivo y la dosificación usada influye en los resultados. Esto se debe a la forma en la cual actúa cada tipo de aditivo tratado y su composición interna.

En la investigación de (Moreno, 2017) realizada a nivel nacional los autores determinaron el efecto que tiene el contenido de agua y diferentes tipos de aditivos superplastificantes (SPs) sobre parámetros de trabajabilidad y resistencia a la compresión de morteros hechos con cemento híbrido (CH) compuesto de cenizas volantes (FA), por sus siglas en inglés (Fly Ash) adicionada con cemento portland ordinario (CPO) y activada con hidróxido de sodio en estado sólido (NaOH). Se

utilizaron tres tipos diferentes de SPs: los SPs basados en lignosulfonato (LS), los SPs basados en naftaleno sulfonatos (NS) y los SPs basados en policarboxilatos (PC).

Los resultados de la investigación muestran que la cantidad de agua influye notablemente en la fluidez de pastas, pero no en morteros, así como tampoco tiene mayor influencia en la resistencia a compresión. Los diferentes SPs tienen efectos diferentes, mientras que los LS y PC afectan la fluidez de pastas y morteros, el NS tiene muy poco efecto. En términos de resistencia, tanto LS como NS mostraron aumentos respecto a la muestra control, mientras que el PC redujo, considerablemente, su resistencia.

Es importante resaltar la diferencia entre las investigaciones anteriormente mencionadas. En algunos de los estudios analizados la relación agua cemento se mantiene constante y la dosificación del aditivo varía y en otras investigaciones a medida que se aumenta la dosificación del aditivo se disminuye el contenido de agua. Este efecto genera que para los casos donde se disminuye la relación agua cemento y se aumentará la dosificación de aditivos los resultados fueran positivos, mejorando la consistencia y la resistencia. Por otro lado, las investigaciones que mantenían la relación agua cemento y aumentaban las dosificaciones de aditivos, aunque mejorara la consistencia, tenían efectos negativos en la resistencia.

Cabe resaltar que en algunas de las investigaciones recopiladas los autores hacían inclusión de otro tipo de componentes, tales como fibras de acero, agregados reciclados, cenizas volantes, entre otros. Estos componentes adicionales a la investigación también tienen una influencia en los resultados obtenidos de cada estudio. Esto se debe a que se debe evaluar la interacción e influencia que genera cada uno de estos componentes con los aditivos. Para efectos de equidad, se intentó comparar las diferentes investigaciones tratando de igualar los casos de estudio, es decir, muestras donde no existieran adiciones de otros componentes aparte de los aditivos superplastificantes. Aun buscando la forma de mantener condiciones similares en la comparación de los estudios recopilados, hay que destacar que siempre existen variedades en los implementos, cada investigación maneja sus materiales propios, por lo cual esto puede influir en la variedad de resultados obtenidos.

Como análisis propio, se podría destacar que indudablemente la aplicación de aditivos superplastificantes genera un efecto positivo en las propiedades del concreto, principalmente en la manejabilidad para estado fresco y resistencias en estado endurecido, incluso en términos de durabilidad también genera un efecto positivo, sin embargo, el comportamiento que genera cada

uno según las condiciones de estudio es diferente. Como recomendación es muy importante al momento de la aplicación de aditivo superplastificante disminuir el contenido de agua a aplicar a la mezcla. Otra recomendación es tener conocimiento del tipo de superplastificante que se va a usar, dado que dependiendo de este y la dosificación en la cual se use, variarían los resultados obtenidos. No se puede estimar una dosificación óptima para los aditivos superplastificantes, debido a que para cada uno su dosificación varía y también depende de los otros materiales a utilizar.

En conclusión, la dosificación óptima varía dependiendo del aditivo y los materiales usados en la muestra de estudio. Es importante resaltar que la dosificación del aditivo también genera una influencia en los tiempos de fraguado de las mezclas. Dependiendo del aditivo superplastificante, este puede actuar como retardante o acelerante.

A nivel internacional el uso y estudio de los aditivos ha crecido exponencialmente y ha avanzado de la misma forma, sin embargo, aunque a nivel nacional y local también se ha implementado más el uso de estos, las investigaciones al respecto no son muchas. Es por esto que se ha desarrollado esta investigación, generando así un mayor impulso en el estudio de la temática que permita el avance y la mejoría en las propiedades del concreto haciéndolo más versátil a cualquier tipo de innovación en estructuras y ampliando la durabilidad en estas mismas.

CONCLUSIONES

Con el análisis y recopilación de las investigaciones previamente mencionadas a nivel local, nacional e internacional, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

Resistencia a la compresión (Mpa)																
Investigaciones	TMN Agregado síliceo	Dosificación														
		Relamisk T-2		Remicrete SP60		Microsilice						Humo de sílice				
		1%		1%		0%	1%	2%	3%	4%	6%	9%	0%	5%	7%	10%
Ibragimov & Fediuk, 2019	-	51,7		57,55		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quiñones & Causil, 2012	1"	-	-	-	-	24	24,2	-	27	-	31	39	-	-	-	-
Torres et al., 2019	1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	56	65	70	67
	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	52	59	65	51
	1"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	42	50	62	54
Sanes, 2017	1"	-	-	-	-	28	28,7	28,4	28	26,8	-	-	-	-	-	-

Tabla 3. Análisis comparativo de resistencia a la compresión. Fuente (Autores).

Asentamiento (cm)																
Investigaciones	TMN Agregado síliceo	Dosificación														
		Relamisk T-2		Remicrete SP60		Microsilice						Humo de sílice				
		1%		1%		0%	1%	2%	3%	4%	6%	9%	0%	5%	7%	10%
Ibragimov & Fediuk, 2019	-	-		-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Quiñones & Causil, 2012	1"	-	-	-	-	13	10	-	13	-	17	22	-	-	-	-
Torres et al., 2019	1/2"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	22	22,5	23
	3/4"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24	23	26	24
	1"	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	23	25	25
Sanes, 2017	1"	-	-	-	-								-	-	-	-

Tabla 4. Análisis comparativo de trabajabilidad. Fuente (Autores).

Como podemos observar en la tabla # se presenta una serie de investigaciones las cuales hacen un análisis comparativo realizando ensayos de resistencia a la compresión, teniendo en cuenta el tamaño máximo nominal del agregado síliceo y la dosificación de los diferentes aditivos superplastificantes, microsilice o humo de sílice. Claramente se observa que al usar humo de sílice

se obtienen resistencias por encima de los 8000 PSI utilizando tamaño máximo de ½". Sin embargo, en la investigación de (Ibragimov & Fediuk, 2019) usaron el aditivo superplastificante remicrete SP60 y a los 28 días obtuvieron resistencias alrededor de los 58 Mpa. De la tabla anterior se puede concluir que 3 de las 4 investigaciones son de ámbito nacional en las cuales se manejaron agregado silíceo presentando un mejor desempeño el tamaño máximo nominal de ½" por lo que obtienen resistencias bastante altas aplicando una dosificación de humo de sílice al 7%. En el ámbito internacional el aditivo remicrete SP60 y Relamisk T-2 a 1% de dosificación alcanzaron una alta resistencia y sería aceptable en los resultados de esta investigación. La trabajabilidad para obtener un concreto de alta resistencia ronda en un asentamiento de 8 o 9 pulgadas aproximadamente valor completamente aceptable en la investigación. Los resultados de la investigación como se observan en la tabla 6 las mezclas son bien manejables y pueden ayudar a tener una buena consistencia en estado fresco.

La resistencia del concreto depende más que todo de estas propiedades: relación de agua cemento, el grado de compactación, la relación de cemento a agregado, la unión entre el mortero y el agregado, y la clasificación, forma, resistencia y tamaño del agregado.

Los agregados pétreos influyen mucho en las propiedades físicas y mecánicas del concreto. Gracias a su forma, textura y el tamaño de las partículas, estas ayudan a que el cemento tenga una mejor adherencia en el agregado utilizado. Se analizó que el agregado silíceo al tener una textura lisa, una forma redondeada y poca porosidad presenta una zona de interacción débil con el mortero, por lo tanto no brinda las mejores características de resistencia en comparación a un agregado calizo, sin embargo, la implementación de aditivos superplastificantes con dosificaciones bajas y una disminución en la relación agua cemento de la mezcla permite un alcance de un concreto apto para unas condiciones de trabajo de gran exigencia. Por otro lado, en términos de consistencia el agregado grueso tipo silíceo es el que mejor se comporta y permite alcanzar una buena trabajabilidad de la mezcla,

El tamaño máximo nominal a usar en las mezclas de concreto hidráulico debe ser pequeño (entre 5/16" - 1/2"), esto dado que se obtiene una mejor densificación de la mezcla por las partículas más pequeñas lo que quiere decir que existe un mejor acomodamiento entre las partículas, quedan

menos vacíos, hay mayor compatibilidad entre el mortero y el agregado grueso y esto conlleva a una mezcla con mejores resultados en la consistencia y la resistencia.

La implementación de adiciones tales como humo de sílice, fibras de acero, cenizas volantes, entre otras, son de gran aporte en las propiedades mecánicas de concretos con agregados gruesos tipo silíceos. Es importante resaltarlo dado que por lo general la implementación de estas adiciones, aunque mejoran las características mecánicas también requieren una mayor hidratación en la mezcla, por lo tanto la implementación de estas en conjunto con los aditivos superplastificantes desarrollan concretos con muy buenas características. Cabe destacar que el agregado silíceo es de los que mejor reacciona a las adiciones que se realizan.

Dependiendo de la propiedad mecánica de estudio la dosificación óptima puede variar, esto se debe a que el enfoque de los esfuerzos se puede generar en distintas partes. Para la resistencia a la compresión el esfuerzo se concentra principalmente en los agregados y su interacción con la pasta de cemento, por otro lado para la resistencia a la tracción el esfuerzo va enfocado en la pasta de cemento. Sin embargo para ambas propiedades con presencia de agregados silíceos se recomiendan dosificaciones bajas para mejores resultados.

Como principal conclusión, para llegar a la dosificación de aditivo superplastificante que genere los mejores resultados en las propiedades mecánicas, principalmente en la resistencia a la compresión, se necesitan realizar una serie de ensayos con parámetros definidos, es decir, especificando un aditivo superplastificante, un cemento, una relación agua cemento, un tamaño máximo nominal del agregado grueso, un agregado fino, entre otros, variando únicamente la dosificación o cómo es el caso de estudio las dosificaciones y el tamaño máximo nominal del agregado grueso. Sin embargo, según las investigaciones previamente analizadas se pudo observar la dosificación de aditivos superplastificantes a implementar en mezclas de concreto hidráulico con agregado grueso tipo silíceo deben ser bajas, quiere decir que dependiendo de la marca de aditivo y su rango de dosificación dado en especificaciones técnicas se debe inclinar por los menores valores para obtener mejores resultados en las propiedades de estudio. Si se inclina por dosificaciones altas puede suceder que en términos de manejabilidad se presenten problemas de segregación y en términos de resistencia se mantenga la misma que una muestra sin presencia de

aditivos o incluso disminuya, esto se debe a que el agregado silíceo por su naturaleza presenta buenas características en términos de demanda de agua y consistencia. En cualquier de los dos casos no es viable económicamente. Se recomienda realizar varios ensayos para poder llegar a una dosificación óptima y precisa, con el fin de obtener los mejores resultados.

RECOMENDACIONES

Se recomienda para futuras investigaciones aplicar los resultados alcanzados, con el fin de corroborar la información obtenida y lograr resultados más específicos, variando únicamente las dosificaciones y el tamaño máximo nominal, manteniendo los demás implementos y parámetros constantes. Otra recomendación es realizar ensayos experimentales, esto permitirá conseguir unos resultados más característicos y obtener un soporte más denso, además, se podrán realizar comparaciones con las mismas condiciones de estudio.

Se recomienda seguir investigando sobre el agregado silíceo, debido a que la información encontrada no era muy reciente ni abundante, también se recomienda que la investigación se amplíe, es decir, que se estudien otras propiedades mecánicas tales como la resistencia a la flexión, tracción, módulo de elasticidad, entre otros.

Se sugiere que al momento de hallar una dosificación óptima para el agregado tipo silíceo de cierta fuente, se experimente la misma dosis en otro agregado del mismo tipo de una fuente diferente, esto con el fin de evaluar si se puede conseguir una dosificación óptima generalizada para el agregado grueso tipo silíceo y así conocer a mayor profundidad sobre este. Se sugiere lo mismo para el tamaño máximo nominal del agregado grueso.

Se recomienda que se evalúe la misma investigación con agregados reciclados, con el fin de ver que tan influyente es el hecho de experimentar con ese tipo de material en las propiedades de físico-mecánicas evaluadas en el presente estudio.

Teniendo en cuenta las diferentes investigaciones recopiladas a nivel nacional e internacional, en Colombia se observa que aun se desconoce de las ventajas de los concretos de alta resistencia ya que el promedio con el que se trabaja en el país es alrededor de los 24 Mpa. Se recomienda seguir indagando en esta tecnología innovadora con la cual se puede aprovechar al máximo las características de los concretos de alta resistencia que comparativamente con otros países es baja.

REFERENCIAS

- Abdullahi. (2012). Effect of aggregate type on Compressive strength of concrete. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(3), 791–800. <https://doi.org/10.6088/ijcser.00202030008>
- Aiad, I., Al-Sabagh, A. M., Shafek, S. H., Adawy, A. I., & Abo-EL-Enein, S. A. (2017). Effect of some prepared superplasticizers (Cyclohexanone Based) on compressive strength and physico-chemical properties of oil well cement pastes. *Egyptian Journal of Petroleum*, 26(3), 843–850. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2016.10.019>
- Alexander, M. G. (1996). Aggregates and the Deformation Properties of Concrete. *ACI Materials Journal*, 93(6). <https://doi.org/10.14359/9863>
- Argos, 3. (s.f.). *Técnicas para el buen curado del concreto*. Obtenido de <https://www.360enconcreto.com/blog/autores/id/580#autores>
- Aruntaş, H. Y., Cemalgil, S., Şimşek, O., Durmuş, G., & Erdal, M. (2008). Effects of super plasticizer and curing conditions on properties of concrete with and without fiber. *Materials Letters*, 62(19), 3441–3443. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2008.02.064>
- Barbudo, A., De Brito, J., Evangelista, L., Bravo, M., & Agrela, F. (2013). Influence of water-reducing admixtures on the mechanical performance of recycled concrete. *Journal of Cleaner Production*, 59, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.022>
- Benaicha, M., Hafidi Alaoui, A., Jalbaud, O., & Burtschell, Y. (2019). Dosage effect of superplasticizer on self-compacting concrete: Correlation between rheology and strength. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(2), 2063–2069. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.015>
- Carrasquillo, A. C. and R. L. (1998). High-Performance Concrete: Influence of Coarse Aggregates on Mechanical Properties. *ACI Materials Journal*, 95(3). <https://doi.org/10.14359/369>

-
- Chan Yam , J. L. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 2, 39-46.
- da Silva, M. A., Pepe, M., de Andrade, R. G. M., Pfeil, M. S., & Toledo Filho, R. D. (2017). Rheological and mechanical behavior of High Strength Steel Fiber-River Gravel Self Compacting Concrete. *Construction and Building Materials*, 150, 606–618. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.030>
- Ghorab, H. Y. (2012). Interacción entre cementos de diferente composición y aditivos superplastificantes.
- Gutiérrez, P. A., & Cánovas, M. F. (1996). High-performance concrete: Requirements for constituent materials and mix proportioning. *ACI Materials Journal*. <https://doi.org/10.14359/9807>
- Ibragimov, R., & Fediuk, R. (2019). Improving the early strength of concrete: Effect of mechanochemical activation of the cementitious suspension and using of various superplasticizers. (E. Ltd, Ed.) *Construction and Building Materials*, 226, 839-848. [doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.313](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.313)
- INVIAS, (2013). Resistencia a la compresión de cilindros de concreto INV E - 410-13. Colombia
- Issa, S. A., Islam, M., Issa, M. A., & Yousif, A. A. (2000). Specimen and Aggregate Size Effect on Concrete Compressive Strength. *Cement, Concrete and Aggregates*, 22(2), 103–115. <https://doi.org/10.1520/CCA10470J>
- Kosmatka, S. H. K. W. et al. (2004). Diseño y control de mezclas de Concreto. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 62, Issue 8). https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto_-_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland_Cement_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53
- Lan, L., Chan, P., Zollinger, D., & Lytton, R. (1993). Quantitative Analysis of Aggregate Shape Based on Fractals. *ACI Materials Journal*, 90(4). <https://doi.org/10.14359/3894>
- Mangane, M. B. C., Argane, R., Trauchessec, R., Lecomte, A., & Benzaazoua, M. (2018). Influence of superplasticizers on mechanical properties and workability of cemented paste backfill. *Minerals Engineering*, 116(March), 3–14. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2017.11.006>

-
- Manomi, N., Sathyan, D., & Anand, K. B. (2018). Coupled effect of superplasticizer dosage and fly ash content on strength and durability of concrete. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24033–24042. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.196>
- Moreno, N. (2017). *Efecto del contenido de agua y adición de superplastificantes (sps) sobre la trabajabilidad y resistencia a la compresión de pastas y morteros hechos a base de cemento híbrido (ch)*.
- Neville, A. (1997). Aggregate Bond and Modulus of Elasticity of Concrete. *ACI Materials Journal*, 94(1). <https://doi.org/10.14359/287>
- Niño Hernadez, J. R. (2010). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO - Tomo 1 MAteriales, Propiedades y Diseños de Mezclas*. Bogotá: Asocreto.
- Ozturan, T., & Cecen, C. (1997). *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of concretes with different strengths*. 27(2), 165–170.
- Quiñones, J., & Causil, H. (2012). Estudio Comparativo de Manejabilidad, Durabilidad, Resistencia y Costos de mezclas de Concreto In Situ, Adicionadas con Microsilice. Cartagena, Colombia.
- Sanes, D. (2017). Influencia de microfibras de polipropileno y microsílice en la resistencia de concretos de 4000 y 3000 psi. Cartagena, Colombia.
- Sika. (s.f.). *Sika*. Obtenido de Sika: <https://col.sika.com>
- Silva, O. J. (s.f.). *360 en concreto*. Obtenido de 360 en concreto: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/generalidades-tipos-de-aditivos-para-el-concreto>
- Tapia, A., & Steve, H. (2019). Estudio comparativo de las propiedades de adherencia, superficie específica de los agregados gruesos de canto rodado de piñipampa y piedra triturada de caicay, e influencia sobre las propiedades resistentes de flexión y compresión del concreto $f'c$ 280 kg/. *Universidades*, 70(80), 98–101. <https://doi.org/10.36888/udual.universidades.2019.80.19>
- Torrado, L. (Junio de 2013). Propiedades Mecánicas de los Agregados Ante Variaciones Climáticas: Reporte de caso en Bucaramanga. *11*, 30-39.
- Torres, R., Barboza, G., & Barrios, M. (2019). *Estudio de las variaciones de las características mecánicas de concretos con agregados silíceos y adición de humo de sílice*.

-
- Villanueva, G. A. (2014). *Influencia del Aditivo Superplastificante reductor de agua en las características del concreto de alta resistencia*. (Tesis Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería, Cajamarca, Perú.
- Zhang, J., Deng, H., Taheri, A., Deng, J., & Ke, B. (2018). Effects of superplasticizer on the hydration, consistency, and strength development of cemented paste backfill. *Minerals*, 8. doi:10.3390/min8090381