



FACULTAD DE INGENIERÍA
Maestría en Ingeniería Civil

TRABAJO DE GRADO
Efectos de la Sílice Coloidal en las Propiedades en Estado Fresco
y Endurecido del Mortero y Concreto Hidráulico

Presentado por:
Omar Alberto Barón González
Yamil José Mercado Quiroz

Directora:
María Patricia León Neira

Bogotá D.C.
Mayo de 2012

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “Efectos de la Sílice Coloidal en las Propiedades en Estado Fresco y Endurecido del Mortero y Concreto Hidráulico.”, desarrollado por los estudiantes Omar Alberto Barón González y Yamil José Mercado Quiroz, en cumplimiento de uno de los requisitos dispuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

Director

María Patricia León Neira

Jurado 1

Jesús Orlando Castaño Tabares

Jurado 2

Jorge Camilo Díaz García

Efectos de la Sílice Coloidal en las Propiedades en Estado Fresco y Endurecido del Mortero y Concreto Hidráulico

Omar Alberto Barón González
Yamil José Mercado Quiroz

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores-investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores.

A Dios fuente de Fé, Esperanza y Sabiduría con la cual se tomaron decisiones encaminadas a realizar los estudios para esta profundización en el conocimiento de la profesión.

A mí Esposa e Hijo, por su apoyo incondicional, entendimiento y sacrificio en todos esos momentos en los cuales no pude dedicarles el tiempo suficiente por los compromisos estudiantiles.

A mí familia, quienes con su apoyo a la distancia siempre han sido fuente de inspiración con los retos propuestos en la vida.

Yamil

A Dios por permitirme adelantar este proceso de crecimiento personal y profesional acompañado del apoyo incondicional de mi familia, en donde su afecto, dedicación y colaboración en todo momento fueron mi soporte en los tiempos más difíciles y mi compañía en los momentos de alegría.

A mi madre a quien debo todo lo que soy, por todo su amor y total entrega para brindarme siempre lo mejor, por estar siempre ahí. Gracias por tantas enseñanzas, por su compromiso, su nobleza y coraje para afrontar los retos encontrados y sacarlos adelante.

A mi abuela, quien durante todo el tiempo que estuvo conmigo se convirtió en mi cómplice, mi protectora, en una madre más; quien inició este camino conmigo y en el trayecto se convirtió en una estrella, la más brillante que hay en el cielo.

Siempre seremos la familia de tres.

Omar

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos a:

Ingeniera María Patricia León Neira, Profesor Asistente de la Facultad de Ingeniería, Jefe de la Sección Geotecnia, Vías y Transporte, Directora del Proyecto por sus aportes de alto valor para la realización de este proyecto.

Ingeniera Liliana María Arias, Coordinadora de Investigación y Desarrollo de Euclid Chemical Toxement por su aporte y compromiso con el desarrollo del presente proyecto.

La Empresa Euclid Chemical Toxement, por facilitar las instalaciones físicas de los laboratorios, equipos, materiales y personal para realizar los ensayos del presente proyecto.

Ingeniero Fredy Alberto Reyes Lizcano, Director de la Maestría en Ingeniería Civil por su compromiso con los estudiantes de programa.

Ingenieros Docentes del Programa de Maestría en Ingeniería Civil que hacen parte del comité evaluador, quienes en las sesiones de presentación de los avances realizaron aportes significativos en el desarrollo del presente proyecto.

Ingenieros Miguel Santamaría y Cristian Quintana de la Empresa Euclid Chemical Toxement, quienes con coordinaciones, capacitaciones y apoyos colaboraron para el desarrollo del presente proyecto.

Ingeniero Andrés Santacruz, quien aportó la idea y realizó los contactos con la Empresa Euclid Chemical Toxement para el desarrollo del presente proyecto.

Contenido

RESUMEN	5
1. INTRODUCCIÓN	6
2. MARCO TEÓRICO.....	8
2.1 Nano-sílice en el Cemento	8
2.1.1 Estructura Química y Mineralógica del Cemento	8
2.1.2 Nano-Sílice en la Pasta de Cemento	9
2.1.3 Reacción de la Nano-sílice en Cementos Adicionados.....	10
2.2 Efecto por la Inclusión de Nano-sílice en las Propiedades del Mortero.....	10
2.2.1 Resistencia.....	11
2.3 Efecto por la Inclusión de Nano-sílice en las Propiedades del Concreto.....	13
2.3.1 Calor de Hidratación	14
2.3.2 Asentamiento.....	16
2.3.3 Resistencias a Compresión y Flexión	17
2.3.4 Permeabilidad	18
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	19
3.1 Determinación del Rango de los Porcentajes de Adición de Sílice de Acuerdo al Desempeño en Morteros	20
3.2 Caracterización Física y Química de los Materiales	20
3.2.1 Cementos.....	20
3.2.2 Sílice Coloidal	20
3.2.3 Agregados.....	21
3.2.4 Plastificante	21
3.3 Evaluación del Desempeño de Morteros Normalizados Adicionados con Sílice Coloidal.....	22
3.4 Evaluación del Desempeño de Concretos Equivalente Morteros (CEM) Adicionados con Sílice Coloidal.....	23
3.5 Determinación del Porcentaje Óptimo de Sílice.....	25
3.6 Evaluación de la Sílice en Mezclas de Concreto	25
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS	26

4.1	Determinación del Rango de los Porcentajes de Adición de Sílice de Acuerdo al Desempeño en Morteros	26
4.2	Caracterización Física y Química de los materiales	27
4.2.1	Cementos.....	27
4.2.2	Agregados.....	28
4.3	Evaluación del Desempeño de Morteros Normalizados Adicionados con Sílice Coloidal.....	29
4.3.1	Manejabilidad.....	30
4.3.2	Resistencia a la Compresión	30
4.4	Evaluación del Desempeño de Concreto Equivalente a Mortero (CEM) Adicionados con Sílice Coloidal.....	35
4.4.1	Manejabilidad.....	35
4.4.2	Resistencia a la Compresión	35
4.4.3	Permeabilidad	39
4.5	Determinación del Porcentaje Óptimo de Sílice.....	40
4.6	Evaluación de la Sílice Coloidal en las Mezclas de Concreto.....	41
4.6.1	Asentamiento.....	41
4.6.2	Temperatura de Hidratación	42
4.6.3	Resistencia a la Compresión y Flexión.....	42
4.6.4	Permeabilidad	44
5.	DISCUSIÓN	45
6.	CONCLUSIONES	46
7.	RECOMENDACIONES.....	48
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	49
	ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO.....	51
	ANEXO B. CONCRETO EQUIVALENTE A MORTERO.....	55
	ANEXO C. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD DE ADITIVOS EN PASTAS DE CEMENTO	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 2. 1. Asentamiento en Concretos, (Collepari et al, 2002)	16
Tabla 2. 2. Mejora de Resistencia a la Compresión de Concretos, (Li et al., 2004).....	17
Tabla 3. 1. Propiedades Físicas de la Sílice Coloidal	20
Tabla 3. 2. Propiedades Físicas de la Arena de Ottawa	21
Tabla 3. 3. Caracterización de los Agregados	21
Tabla 3. 4. Propiedades Físicas del Plastificante	22
Tabla 3. 5. Materiales para Morteros Normalizados	23
Tabla 3. 6. Materiales según Diseño para la Mezcla de Concreto	24
Tabla 3. 7. Materiales para Morteros CEM	25
Tabla 4. 1. Caracterización Física de los Cementos	27
Tabla 4. 2. Análisis Elemental y Composición Potencial por Fluorescencia en Rayos X de los Cementos	28
Tabla 4. 3. Caracterización de los Agregados	29
Tabla 4. 4. Granulometría de los Agregados.....	29
Tabla 4. 5. Porcentaje de inclusión de plastificante en mezclas de mortero CEM.....	35
Tabla 4. 6. Permeabilidad en Morteros CEM	39
Tabla 4. 7. Mezcla de Concreto con Porcentaje Óptimo de Sílice	41
Tabla 4. 8. Permeabilidad en Concretos	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1. Modelo Físico Simplificado de la Hidratación del Cemento Portland (Raki et al., 2010)	10
Figura 2. 2. Resistencia a la compresión de morteros adicionados con nanosílice (a) y porcentaje de mejora en resistencia (b).(Tobon Ji et al., 2011)	11
Figura 2. 3. Resistencia a la compresión de morteros adicionados con nanosílice.(Harsh et al, 2011)	12
Figura 2. 4. Absorción de agua y cambio longitudinal de morteros adicionados con nanosílice sometidos a la acción de sulfatos.) (Tobon Ji et al., 2011).	13
Figura 2. 5. Calor Vs Tiempo en el desarrollo de concretos adicionados con nanosílice, (Li et al., 2004).	14
Figura 2. 6. Curva de evolución de calor de hidratación en concretos, (Jo et al., 2007).....	15
Figura 2. 7. Resistencia a compresión y flexión de concretos, (Tadayon et al., 2010).....	18
Figura 2. 8. Porcentaje de Absorción y Coeficiente de Capilaridad,(Tadayon et al., 2010).	18
Figura 3. 1. Esquema de la Metodología	19
Figura 4. 1. Resistencias a la Compresión en Morteros Adicionados con Sílice	26
Figura 4. 2. Incremento Resistencia a 28 días en Morteros	27
Figura 4. 3. Manejabilidad de las Mezclas en Morteros	27
Figura 4. 4. Manejabilidad de las Mezclas de los Morteros Normalizados	30
Figura 4. 5. Resistencias a 7 días de los Morteros Normalizados.....	31
Figura 4. 6. Resistencias a 28 días de los Morteros Normalizados	32
Figura 4. 7. Incremento de Resistencia a 28 días Morteros Normalizados.....	32
Figura 4. 8. Resistencias a 56 días de los Morteros Normalizados	33
Figura 4. 9. Incremento de Resistencia a 56 días Morteros Normalizados.....	34
Figura 4. 10. Incremento de Resistencia para Morteros Normalizados con Cemento 1	34
Figura 4. 11. Resistencias a 7 días de los Morteros CEM	36
Figura 4. 12. Resistencias a 28 días de los Morteros CEM.....	37
Figura 4. 13. Incremento de Resistencia a 28 días Morteros CEM	37
Figura 4. 14. Resistencias a 56 días de los Morteros CEM.....	38
Figura 4. 15. Incremento de Resistencia a 56 días Morteros CEM	39
Figura 4. 16. Determinación del Porcentaje Óptimo de Sílice	40
Figura 4. 17. Asentamiento en Concretos	41
Figura 4. 18. Temperatura de Hidratación en Concretos	42
Figura 4. 19. Resistencia a la Compresión en Concretos	42
Figura 4. 20. Incremento de la Resistencia a Compresión en Concretos.....	43
Figura 4. 21. Resistencia a la Flexión en Concretos	43
Figura 4. 22. Incremento de la Resistencia a Flexión en Concretos.....	44

RESUMEN

Debido a la necesidad de la industria de la construcción de buscar materiales que permitan adelantos en cuanto a la mejora de las propiedades de los morteros y concretos a costos razonables, se han realizado investigaciones referentes al uso partículas a escala nanométrica que al ser adicionadas generen dichos beneficios. Es por esto que este estudio busca evaluar la posibilidad de encontrar dichas mejoras en las propiedades físicas y mecánicas del mortero y concreto hidráulico en estado fresco y endurecido, elaborados con los cementos nacionales y con la inclusión de sílice coloidal en las mezclas, evaluando el porcentaje óptimo de adición según la resistencia de diseño.

Dentro del proceso metodológico de la investigación, fue necesario realizar inicialmente la caracterización de los materiales al igual que la ejecución de pruebas piloto en morteros para encontrar los rangos de adición de sílice coloidal útiles en la búsqueda del incremento en las ventajas de las mezclas en cuanto a sus propiedades, posibilitando la determinación de las variables de estudio (tipo de cemento, porcentaje de adición de sílice coloidal, relación agua-material cementante, inclusión de plastificante). Posteriormente se realizaron mezclas de morteros normalizados, morteros CEM y por último se seleccionó la composición de la mezcla con mejores resultados para la elaboración final de mezclas de concreto hidráulico para ser comparadas con muestras sin adiciones de sílice coloidal.

Respecto a los resultados obtenidos, es de rescatar la acción de densificación de la sílice coloidal que con el valor óptimo de adición del 8% en peso de cemento incrementó la resistencia a compresión de los morteros y concretos en 14.4% y 24.9% respectivamente, además de lograr una reducción de la permeabilidad al pasar de una clasificación de alta a media. Por otra parte, se identifican deficiencias respecto a la reducción de la manejabilidad de las mezclas en estado fresco haciendo necesaria la inclusión de un agente plastificante, al igual que el encuentro de valores similares alcanzados en cuanto a la resistencia a flexión del concreto hidráulico sin evidenciar alguna mejora significativa.

1. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la construcción ha sido necesario incursionar en nuevas tecnologías y procesos en búsqueda de cumplir con los requerimientos en la ejecución de proyectos de edificación e infraestructura, en donde las exigencias que cada día son mayores han trazado un camino relevante en cuanto a la posibilidad de mejorar las propiedades de los materiales utilizados tales como el mortero y el concreto. Es por esto que se han ensayado diferentes alternativas de solución que van desde las adiciones que se realizan directamente sobre el cemento hasta aditivos que se integran durante los procesos de mezclado.

De este modo, se han emprendido diversas investigaciones en las cuales se ha analizado la inclusión de adiciones como cenizas volantes, escorias de alto horno, filler calcáreo, fibras, entre otras, las cuales con el uso de nuevas tecnologías de integración de nanopartículas, principalmente nanopolímeros, nano-óxidos de hierro, silicio y germanio, han cambiado la visión en cuanto al desarrollo del concreto como material, aumentando las expectativas en cuanto a la mejora de las propiedades físico-químicas de los morteros y concretos al llevar su estudio a niveles de observación de su estructura a niveles atómicos.

Dentro de los estudios realizados, se ha evidenciado un enfoque en cuanto al análisis de la nanosílice como adición, generándose un interés particular en la mejora de las propiedades de los morteros y concretos a nivel mundial. Desde la exploración para la generación de nuevas herramientas en cuanto a la composición de las fases minerales (Björnström, 2004; Li, 2004), el análisis de las mezclas en estado fresco en cuanto a los procesos de hidratación y manejabilidad (Jo et al, 2006; Li, Zhang & Ou, 2006), hasta razonamientos referentes al alcance de resistencia (Jo. et al, 2006; Li, 2004; Li, Xiao & Ou, 2004), porosidad (Jo et al, 2006) y permeabilidad (Ji, 2005) han sido relevantes en búsqueda de concretos de mayores resistencias y una durabilidad superior frente a los agentes externos que inciden en su comportamiento ante las sollicitaciones estructurales.

Frente al adelanto de experiencias en Colombia, se han realizado prácticas importantes en la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, en las cuales se han integrado materiales locales con inclusiones de nanosílice y el uso de un cemento de referencia en particular, permitiendo identificar sus ventajas en cuanto al aumento de la resistencia a compresión para morteros y concretos, al igual que sus deficiencias respecto a la reducción de la manejabilidad de las mezclas en estado fresco y su resistencia a flexión. Al mismo tiempo, al actuar como agente de densificación se ha permitido comprobar la reducción de la permeabilidad mejorando su durabilidad, resultados comparables con los obtenidos en investigaciones extranjeras.

Contando con que a nivel nacional no se ha analizado la incidencia de la nanosílice frente a la composición diversa de los cementos fabricados en Colombia, el presente trabajo de investigación pretende evaluar el efecto de la inclusión de nanosílice en las propiedades físicas y mecánicas en

estado fresco y endurecido de morteros y concretos, usando para este caso sílice coloidal, tres cementos de diferentes casas productoras nacionales y materiales locales en la realización de las mezclas. De esta manera se hace posible hacer paralelamente una comparación entre los resultados obtenidos en esta investigación y las experiencias encontradas como referencia, brindando en nuevo conocimiento respecto al desarrollo del material.

2. MARCO TEÓRICO

Se han realizado diferentes investigaciones que han proporcionado valiosos aportes respecto a las cualidades que deben aportar los materiales para garantizar la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto. En cuanto a la adición de nanosílice en el concreto, se ha evidenciado que genera los siguientes efectos en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido: (a) Acelera el proceso de hidratación, por lo cual se reduce la manejabilidad (Jo et al, 2006); (b) Provoca la formación de tobermorita (C-H-S) gracias a su elevada energía superficial (Björnström, 2004; Li, 2004); (c) Reduce la porosidad en el concreto lo que posibilita la generación de estructuras más compactas (Jo et al, 2006); (d) Disminuye significativamente la permeabilidad (Ji, 2005); (e) Induce el incremento de agua y superplastificante en la mezcla para reducir problemas de manejabilidad y la aparición de microfisuras (Li et al., 2006 y Tobón et al., 2007).

2.1 Nano-sílice en el Cemento

Es fundamental para el estudio del efecto de la sílice coloidal en las propiedades del mortero y concreto hidráulico, realizar inicialmente un análisis de la estructura química del cemento como principal agente en la composición de la matriz cementante, para posteriormente examinar su incidencia en morteros y concretos. La interacción entre el cemento, adiciones minerales, materiales pétreos y adiciones como la sílice coloidal son determinantes para la valoración de los resultados obtenidos en cuanto a las propiedades de las mezclas desde pastas de cemento hasta morteros y concretos.

2.1.1 Estructura Química y Mineralógica del Cemento

En la fabricación del cemento son usados como principales componentes minerales la cal (60%-70%), sílice (17%-25%), alúmina (3%-8%) y óxidos de hierro (1%-6%), los cuales interactúan con la formación de cristales durante la conformación del clínker de cemento portland generando productos químicos o fases minerales.

El producto principal el silicato tricálcico (C_3S) o alita, el cual durante la hidratación del cemento, es el principal responsable de propiedades relevantes como la resistencia y la contracción, ya que libera gran cantidad de calor de hidratación (120 cal/g) al hidratarse rápidamente, determinando así la velocidad de fraguado y la resistencia inicial del cemento.

Del mismo modo, el silicato dicálcico (C_2S) o belita se hidrata lentamente haciendo que se produzca un endurecimiento tardío debido a un menor calor de hidratación (63 cal/g) que contribuye principalmente con el alcance de resistencias tardías posteriores a los 28 días.

Las fases minerales de aluminato tricálcico (C_3A) y ferro aluminato tricálcico (C_4AF) tienen una rápida reacción con el agua contribuyendo especialmente en el fraguado donde es fundamental el control de esta reacción debido a la liberación de calor de hidratación (207 cal/g y 100 cal/g respectivamente) donde se puede generar la aparición de fisuras por contracción debido a la pérdida de agua, sin embargo su acción en el alcance de resistencia no es relevante.

2.1.2 Nano-Sílice en la Pasta de Cemento

Actualmente, la tecnología de nanopartículas atrae considerable atención debido a una amplia variedad de posibles aplicaciones, para el caso del concreto, es de relevancia el conocimiento respecto a la síntesis, proceso, caracterización y aplicación de nanopartículas. La nanosílice (NS) corresponde a nanopartículas de sílice cuyo tamaño oscila entre 1nm – 100 nm, amorfas e insolubles en agua, con área superficial específica (200 – 230) m^2/g , la cual forma una dispersión acuosa coloidal estable de partículas de SiO_2 , al diluirse en agua denominada Sílice Coloidal. Estas partículas se mantienen sin aglomerarse debido a que superficialmente tienen cargas negativas y se estabilizan con iones positivos.

Siendo la tobermorita o silicato de calcio hidratado (C-S-H) el producto principal de la hidratación del cemento Portland con una conformación cercana a un 60% el volumen de la pasta de cemento, el resolver la estructura de este material a escala nanométrica es una parte esencial para conocer su comportamiento. La relación molar de CaO de SiO_2 (C / S) es uno de los principales parámetros en la definición y control de las propiedades de un sistema de silicato de calcio hidratado C-S-H, cuyo valor normalmente varía de 1.2 a 2.1 en las fases silicato hidratado, mas con una relación C / S cercana a 1.1, las propiedades químicas y físicas cambian notablemente. He aquí donde cobra importancia el estado del agua en un sistema de C-S-H, la cual puede estar presente dentro de la estructura intermedia de C-S-H (ya sea en forma de H_2O y OH^-), puede ser físicamente adsorbida en la superficie de las fases sólidas o estar alojada en poros capilares(10-50 nm de diámetro en pastas bien hidratada y tan grandes como 5.3 μm en edades tempranas) entre grupos C-S-H como se muestra en la figura 2.1(Raki et al., 2010).

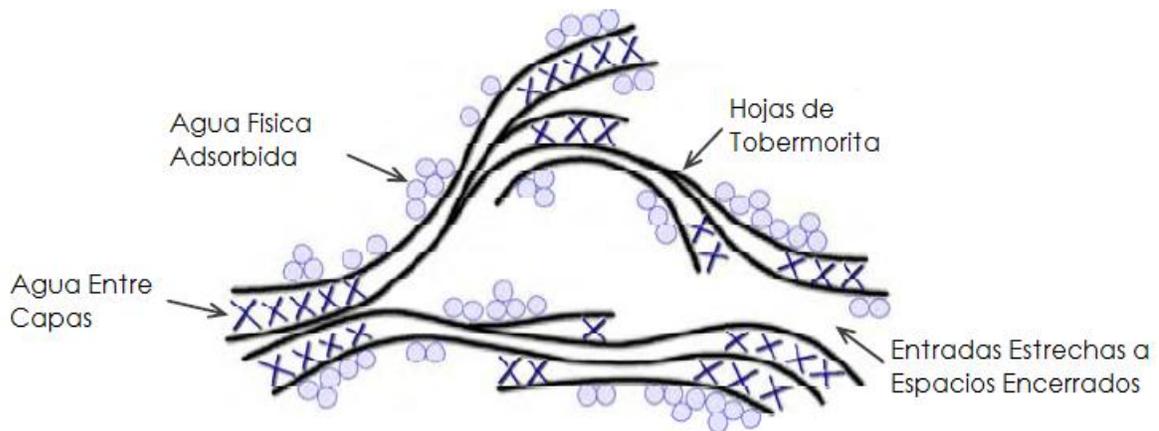


Figura 2. 1. Modelo Físico Simplificado de la Hidratación del Cemento Portland (Raki et al., 2010)

2.1.3 Reacción de la Nano-sílice en Cementos Adicionados

Los estudios realizados sobre el uso de nanopartículas en el cemento han sido encaminados a la inclusión de minerales como complemento cementante tales como escorias, cenizas de alto horno, filler calcáreo, entre otros. Adiciones puzolánicas con contenidos importantes de sílice y aluminio facilitan el retardo de la velocidad de fraguado del cemento al tener una reacción de hidratación con una liberación menor de calor, sin embargo el alcance de resistencia se ve reducido a edades tempranas; su principal contribución radica en la mejora en propiedades como la durabilidad y permeabilidad en donde se reduce el impacto de la reacción de hidróxidos de calcio con sulfatos y cloruros, los cuales son los agentes de ataque de mayor relevancia para el cemento, al igual que la densificación del cemento como material llenante; adiciones como las cenizas volantes y escorias de alto horno tienen aportes notables en el alcance de resistencias a edades tempranas debido a sus altos contenidos de sílice. (Duda, 1977)

2.2 Efecto por la Inclusión de Nano-sílice en las Propiedades del Mortero

Las propiedades más estudiadas en cuanto a las mezclas de morteros han sido el alcance de resistencia y durabilidad, en donde se han usado diferentes tipos de cementos, variaciones en contenidos de nanosílice, relación agua – material cementante, entre otros. Los principales logros alcanzados en el estudio de morteros han sido una etapa crucial en el análisis de las propiedades de los concretos hidráulicos.

2.2.1 Resistencia

Con el desarrollo de experiencias en cuanto a la adición de nanosílice en morteros se ha evidenciado un aumento en la resistencia alcanzada tanto a edades iniciales como tardías. Es de referencia el estudio realizado a nivel local en la Universidad Nacional de Medellín por Tobon et al., (2011), en donde se realizaron mezclas de morteros con cemento Portland tipo III, adicionados con nanosílice con porcentajes de sustitución de 1%, 3%, 5% y 10%, contando con la falla de las muestras a edades de 1, 3, 7 y 28 días de curado normal. Se alcanzaron importantes mejoras en cuanto a resistencia a compresión, donde cabe destacar los resultados obtenidos para morteros con la sustitución de 10% de cemento por nanosílice y a los 7 días de tiempo de curado, donde las muestras presentaron un aumento de 10 MPa de resistencia a compresión, superior a valores encontrados para la muestra patrón a los 28 días como se muestra en la figura 2.2.

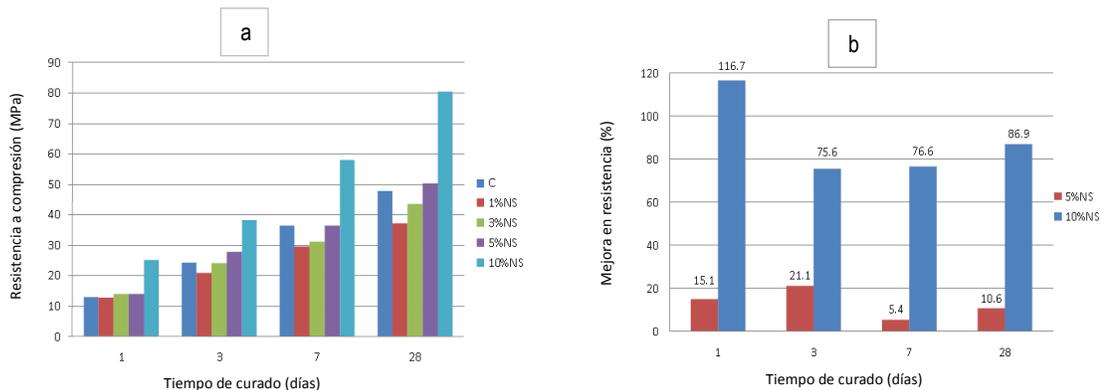


Figura 2. 2. Resistencia a la compresión de morteros adicionados con nanosílice (a) y porcentaje de mejora en resistencia (b). (Tobon Ji et al., 2011)

Se evidencia la importancia de la actividad que tiene este material a edades tempranas. Con 5% de nanosílice, las mejoras están siempre por debajo del 25% en comparación con la muestra patrón. Con 10% de nanosílice, para un día de curado, se alcanza una mejora cercana al 120% y para el resto de las edades de curado, la mejora rondaba el 80%.

Del mismo modo, se destaca la investigación acerca de las propiedades físicas de las mezclas de mortero adicionado con nanosílice realizada por (Harsh et al, 2011), en la cual se utilizó nanosílice con tamaño de la partícula de 15 nm con contenidos del 3% y 5% en peso de cemento, al igual que diversos tipos de cemento tales como Cemento Portland Ordinario (OPC) y un cemento con adición mineral del 25% de puzolanas (PPC), en comparación con una muestra patrón sin adiciones, para la realización de mezclas de mortero con una relación 1:3 de cemento y arena, con cubos de 70,6 mm. De esta manera se evaluó la resistencia a la compresión en donde se obtuvo resultados con un aumento entre el 10%-49% y 5%-24%, respectivamente, en resistencia a la compresión a edades de 1 y 28 días; además, la ganancia de resistencia relativa a compresión en las mezclas con cemento

portland ordinario y nanosílice fue menor en comparación con los valores obtenidos respecto a las mezclas con la adición mineral de ceniza volante y nanosílice, como se muestra en la Figura 2.3.

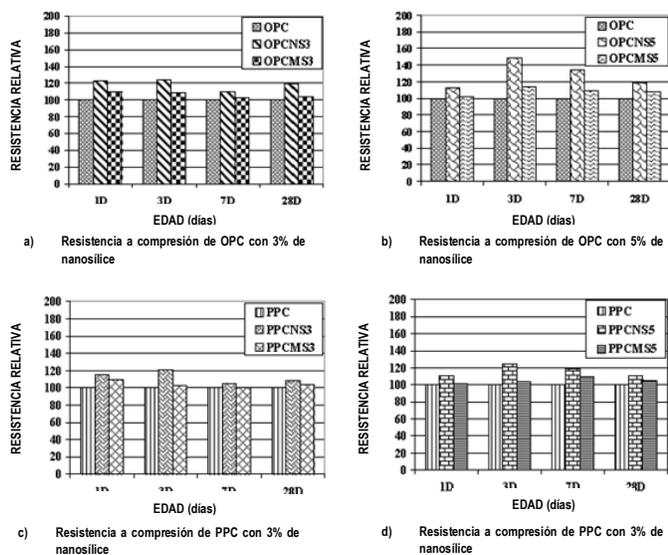


Figura 2. 3. Resistencia a la compresión de morteros adicionados con nanosílice.(Harsh et al, 2011)

Asimismo, para las mezclas con contenido de nanosílice de 3% y 5%, se obtuvo un aumento en el requerimiento de agua para una consistencia normal entre 23% y 49% de la exigencia de agua, además de requerirse el uso de una dosis de superplastificante entre un 0.45% y 0.70% en peso de cemento para mantener la consistencia normal del cemento únicamente para las mezclas de mortero con adición de nanosílice.

2.2.2 Durabilidad

Respecto a la durabilidad de los morteros adicionados con nanosílice se ha encontrado que se ve reducido el ataque por ácidos debido a la reducción del tamaño de poros por la acción llenante de la nanosílice. Según Tobon, et al., (2011), con las prácticas realizadas de mezclas de mortero con porcentajes de adición de nanosílice del 1%, 3%, 5% y 10% sometidas a la acción de sulfatos durante 30 semanas, se evidenció que la absorción de agua en las muestras adicionadas tiene una menor tasa de absorción de agua en comparación con la muestra patrón como se muestra en la Figuras 2.4.; esto sugiere que la adición de mineral produce un refinamiento de poros en morteros gracias a su tamaño y su actividad puzolánica. Con la sustitución de un 1% se logra una expansión

66,7% menos que la muestra de control. Con 5% y 10% de sustitución del cemento por nanosílice, la expansión de morteros mezclados es 97,4% inferior en comparación con la muestra patrón, siendo la expansión prácticamente cero (0,01%), en las 30 semanas de inmersión. De esto, puede decir que con sólo 5% de sustitución del cemento por nanosílice es posible controlar la expansión de morteros sometidos al ataque de sulfato.

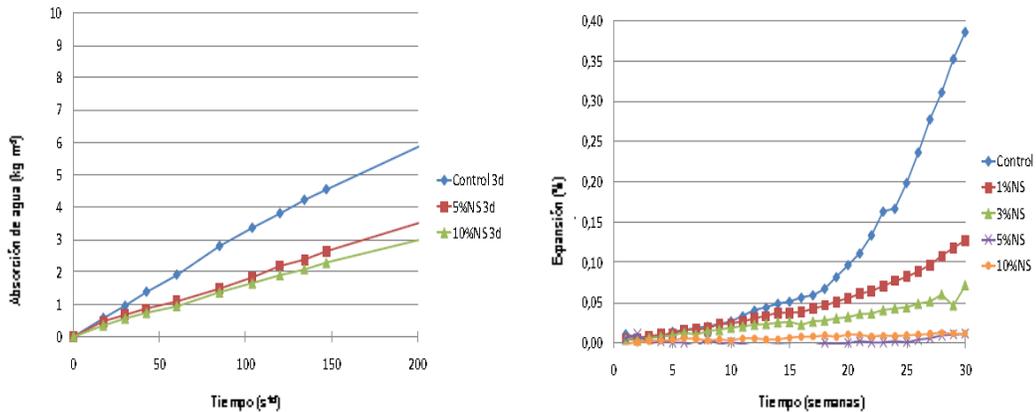


Figura 2. 4. Absorción de agua y cambio longitudinal de morteros adicionados con nanosílice sometidos a la acción de sulfatos.) (Tobon Ji et al., 2011).

2.3 Efecto por la Inclusión de Nano-sílice en las Propiedades del Concreto

El concreto es un material frágil compuesto por agregados pétreos contenidos en una matriz de pasta de cemento que tiene una estructura porosa que contiene micro (<2 nm de diámetro) y mesoporosidad fina (2-50 nm). Dependiendo de sus componentes, puede ser muy resistente a la compresión, pero en general es débil en tracción y flexión, igualmente tiene una baja resistencia a la fractura. Concretos típicos, elaborados con mezclas de agregado grueso de grava, arena, cemento y agua, suelen permitir la constitución estructural del concreto menos densa, donde la interacción de los agregados con la matriz cementante puede inducir en el peor de los casos la falla del material (Raki et al., 2010).

Es de anotar el uso de adiciones de nano-óxidos a mezclas de concretos en las cuales se ha tenido como resultado el aumento de la resistencia a la compresión, en este caso de nano-SiO₂. La diversas experiencias al igual que en mezclas de morteros han sido realizadas contando con variables como el tipo de cemento, características de los agregados, adiciones minerales, contenido de agua en las mezclas y en algunos casos agentes fluidificantes para mantener la manejabilidad de las mismas.

2.3.1 Calor de Hidratación

El estudio de la generación de calor durante el desarrollo de fraguado del concreto ha sido una parte fundamental en el análisis de la interacción de la sílice coloidal como inclusión en el concreto. Experiencias como la de Li et al., (2004) han proporcionado resultados que muestran cómo se produce el calentamiento máximo, comparando igualmente mezclas con diferentes cementos y la adición de nanosílice. Respecto al tiempo en el que ocurre el calentamiento máximo, para la muestra HFAC (Concreto de Alta Resistencia con Adición de Cenizas Volantes al 50%) ocurre alrededor de 30-40 h, mientras que para la mezcla de SHFAC (Concreto de Alta Resistencia con Adición de Cenizas Volantes (46%) y nanosílice (4%)) es similar a la de PCC (Concreto de Cemento Portland de Referencia), que se produce alrededor de 15 a 25 h. Respecto a la temperatura máxima alcanzada, para la mezcla PCC es de unos 65°C, la de SHFAC es ligeramente inferior a la de PCC alrededor del 61°C, y la temperatura máxima de HFAC es la más baja, cerca de 51°C, como se muestra en la figura 2.5.

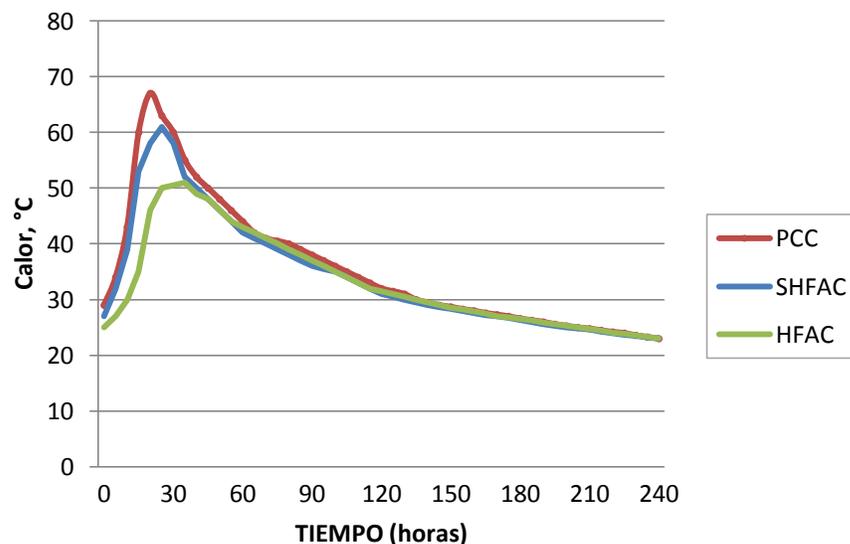


Figura 2. 5. Calor Vs Tiempo en el desarrollo de concretos adicionados con nanosílice, (Li et al., 2004).

Estos resultados indican que hay dos efectos diferentes a considerar con respecto al comportamiento de los materiales: por un lado, el calor de hidratación del cemento portland (PC), por otro lado, la influencia de la sustitución del PC por adiciones, que sólo puede diluir los efectos de la hidratación del PC o puede acelerar la hidratación. En el caso de HFAC, debido a que la ceniza volante tiene una actividad baja inicial y el peso del PC en HFAC es sólo la mitad de los que en el PCC, las temperaturas de HFAC aumentan de manera más lenta y la temperatura máxima es

menor. En el caso de SHFAC, las temperaturas aumentan más rápido y la temperatura máxima superior a la de HFAC; esto se debe a que la nano-SiO₂ tiene una actividad alta y de gran superficie específica (6.400 cm²/g) y puede proporcionar un gran número de sitios de nucleación, lo que significa que la nano-SiO₂ puede activar las cenizas volantes, así como el cemento (H. Li et al., 2004).

Otras investigaciones como la realizada por Jo et al., (2007), comparan las tasas de evolución de calor de concretos adicionados con partículas de nano-SiO₂ al 10% del peso de cemento (NS10), concretos con cemento portland ordinario (OPC) y concretos con inclusión de humo de sílice de 10% del peso de cemento (SF10). Como se muestra en la Figura 2.6, cuando se mezcla con agua, un período de evolución rápida del calor se produce (Fase 1), seguido por un período de inactividad de la inducción de calor en la reacción (Fase 2) razón por la cual el cemento permanece en estado plástico por varias horas, con un comportamiento similar para las tres mezclas de concreto. Al final del período de adaptación, el C₃S ha empezado a reaccionar de nuevo rápidamente hasta alcanzar una velocidad máxima al final del período de aceleración (Fase 3), que corresponde a la tasa máxima de la evolución de calor; a partir de entonces, la velocidad de reacción es más lenta (fase 4) hasta que alcanza un estado estacionario; es ahí donde se evidencian las diferencias en el tiempo en el cual se genera el pico de calor en donde estos resultados indican que la adición de nanopartículas de sílice aumenta la cantidad de calor que se desprende durante el fraguado y endurecimiento del concreto. Sin embargo, una mayor dosis de superplastificante puede retardar la hidratación temprana de la pasta de cemento que contiene nano-SiO₂.

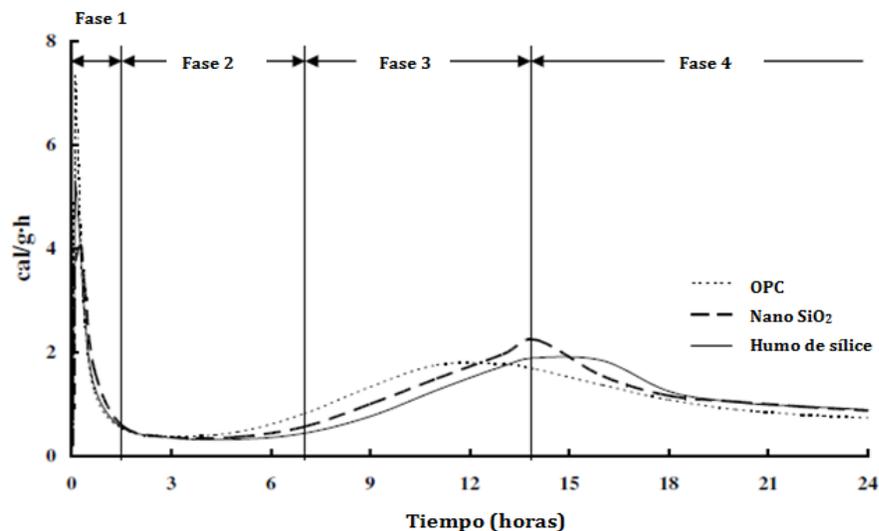


Figura 2. 6. Curva de evolución de calor de hidratación en concretos, (Jo et al., 2007).

2.3.2 Asentamiento

En cuanto al asentamiento en concretos, ha sido posible detectar que la adición de nanosílice permite contar con una mezcla más cohesiva, con una reducción de la pérdida de agua y la tendencia a la segregación; sin embargo, para una cantidad mayor de adición de partículas de nanosílice se requiere la adición de un agente plastificante.

En la Tabla 2.1. se muestran los resultados obtenidos por Collepari et al., (2002) respecto al flujo de asentamiento y la pérdida de agua para concretos realizados con cemento Tipo III con una composición del 60% de cemento portland y 40% de escorias, la inclusión de tres adiciones minerales correspondientes a piedra caliza molida (GL), cenizas volantes (FA) y cenizas de fondo en solución del 48% en agua (GFA), al igual que la adición de nanosílice del 1% y 2% en peso de cemento en comparación con una muestra patrón sin adición.

Tabla 2. 1. Asentamiento en Concretos, (Collepari et al, 2002)

Mezcla	Gravedad Específica (kg/m ³)	SLUMP						Capacidad de sangrado (% por volumen de concreto)	Aspecto** (Clasificación visual)
		Después de mezclado			30 minutos después				
		mm	s	*	mm	s	*		
GL/0	2429	790	20	720	25		0.12	Segregación leve Justo Bueno	
GL/1	2429	780	20	650	30		0.06		
GL/2	2429	790	20	670	27		0.06		
FA/0	2402	790	30	750	35		0.11	Segregación leve Justo Bueno	
FA/1	2349	790	29	660	40		0.09		
FA/2	2393	800	30	740	36		0.07		
GFA/0	2442	790	20	700	25		0.06	Justo Bueno Excelente	
GFA/1	2442	780	20	700	26		0.04		
GFA/2	2442	790	20	730	25		0.03		

* Tiempo necesario para obtener el asentamiento definitivo

** Justo=cohesivo, bueno=muy cohesivo, excelente=extremadamente cohesivo

Los resultados determinaron que con la adición de una mayor proporción de nanosílice (2%), se tuvo un menor sangrado en las mezclas permitiendo que se encontrara un asentamiento adecuado de la mezcla sin descartar la cohesividad de la misma. Del mismo modo, se obtuvo un mejor resultado con la hidratación previa de las cenizas volantes en donde la pérdida de agua fue muy cercana al 50% en comparación con las mezclas de piedra caliza molida y las cenizas volantes sin saturar.

2.3.3 Resistencias a Compresión y Flexión

Respecto a los estudios adelantados para la evaluación de la resistencia del concreto a flexión y compresión, se ha encontrado un aumento en el alcance de resistencias a diferentes edades, siendo de mayor incidencia su contribución a compresión que a flexión. Experiencias como la realizada por Li et al., (2004) referente al análisis del desarrollo de resistencia del concreto con cemento portland (PCC), concreto con cemento sustituido en un 50% del peso por ceniza volante - FA (HFAC), y el concreto (SHFAC) que incorpora una combinación de 50% FA y el 4% de nano-SiO₂, se encontró una tendencia general de aumento de la resistencia hasta los 2 años de edad para todos los concretos. El comportamiento de HFAC en edades tempranas es diferente de la de PCC y SHFAC, donde a pesar de presentarse una alta resistencia a la edad de prueba final, el desarrollo de la resistencia es la más lenta antes del primer año. El desarrollo de la resistencia de SHFAC es similar a la del PCC, sólo con valores ligeramente bajos antes de 56 días; en comparación con los resultados de HFAC, la resistencia a edad temprana a la compresión de la adición en gran volumen de las cenizas volantes se incrementó significativamente cuando se añadió el 4% de nano-SiO₂, aumentando la resistencia a la compresión en 3 días a un 81%. Con la ganancia de resistencia a edades tardías del mismo modo, se puede indicar que SHFAC puede lograr una adecuada resistencia a la compresión temprana, mientras mantienen una resistencia alta a largo plazo, esto se puede apreciar en la Tabla 2.2.

Tabla 2. 2. Mejora de Resistencia a la Compresión de Concretos, (Li et al., 2004).

Mezcla	Resistencia a compresión (MPa)							Ganancia de resistencia desde 28 días a 2 años (%)	
	1 día	3 días	7 días	28 días	56 días	112 días	360 días		720 días
PCC	40.5	51.2	66.8	81.1	87.9	91.2	96.3	103.7	27.9
HFAC	16.8	27.6	35.0	54.4	71.6	85.7	95.4	108.5	99.4
SHFAC	30.4	43.9	3 días	75.8	85	92.2	104.5	115.9	52.9

De otro lado, en el estudio de Tadayon et al., (2010) se observa que la resistencia a la compresión y tensión mejoran cuando se añaden nanopartículas de sílice en una pequeña cantidad, este resultado es consecuencia del aumento de la resistencia consolidada de la interfaz de la pasta de cemento-agregado por los efectos de incluir nano partículas de sílice. En la figura 2.7 se muestra la resistencia a la compresión y tensión de todas las muestras a los 7, 28 y 91 días, en donde se evidencia que para todas las edades de falla se obtuvo una mejora en la resistencia del concreto con la inclusión de nanosílice.

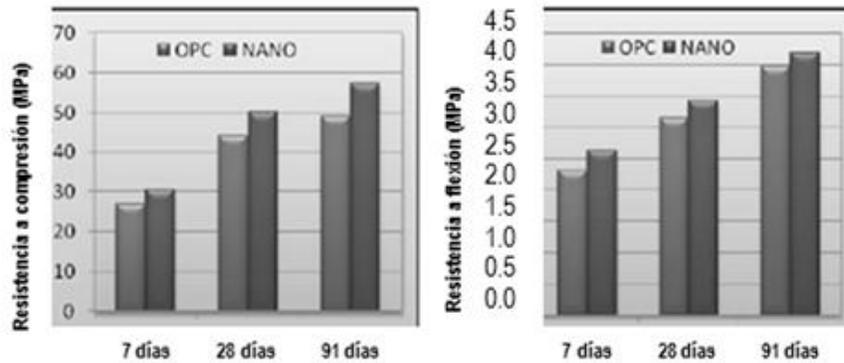


Figura 2. 7. Resistencia a compresión y flexión de concretos, (Tadayon et al., 2010).

2.3.4 Permeabilidad

Se ha demostrado experimentalmente que se reduce la permeabilidad de los concretos por la acción densificadora de la nanosílice en comparación con mezclas convencionales. En el estudio de Tadayon (2010), se evidencia que la incorporación de nanopartículas reduce la absorción de agua de concreto que la mezcla de referencia como se muestra en la figura 2.8.

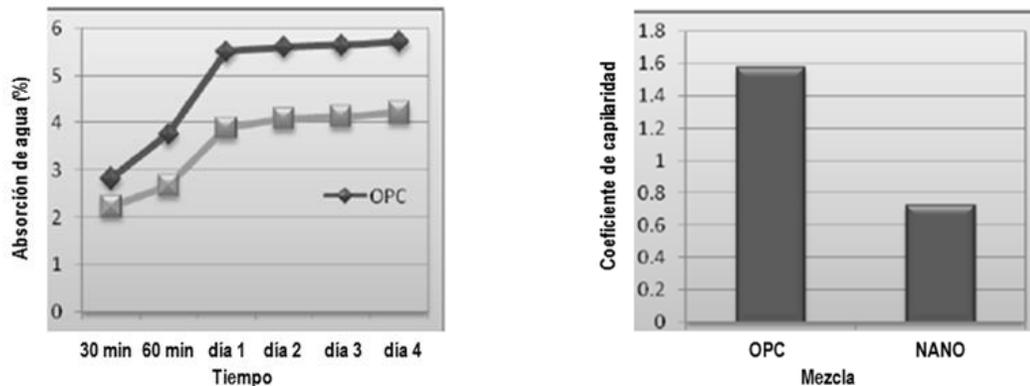


Figura 2. 8. Porcentaje de Absorción y Coeficiente de Capilaridad,(Tadayon et al., 2010).

El mecanismo de los efectos de las nanopartículas sobre la resistencia a la absorción de agua y capilaridad del concreto supone que estas se dispersan uniformemente, los productos de hidratación difunden y envuelven las nanopartículas como núcleo. Las nanopartículas al reaccionar con los cristales $\text{Ca}(\text{OH})_2$ como material puzolánico hacen que la matriz de cemento sea más homogénea y compacta, reduciendo la sortividad con el bloqueo de los tubos capilares para permitir mejoras en cuanto a la resistencia a la absorción de agua. (Tadayon et al., 2010).

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En la figura 3.1, se muestra la metodología establecida para la consecución del objetivo general del proyecto. Para esto, mediante la determinación del rango de los porcentajes de adición de sílice de acuerdo al desempeño en morteros, la realización de ensayos de laboratorio para la caracterización física y química de los materiales empleados, de tal forma que se pudiera definir el comportamiento del cemento con la adición de la sílice mediante la evaluación del desempeño de morteros adicionados con sílice coloidal y la evaluación del desempeño de concreto equivalentes morteros (CEM) adicionados con sílice coloidal con ajuste de manejabilidad. Posteriormente analizando los resultados se obtuvo el porcentaje óptimo de adición de sílice coloidal con el cemento que presentó mejor desempeño. Con el porcentaje óptimo de adición y cemento, se realizan las mezclas de concreto para analizar los resultados y concluir con esto el objetivo del proyecto.

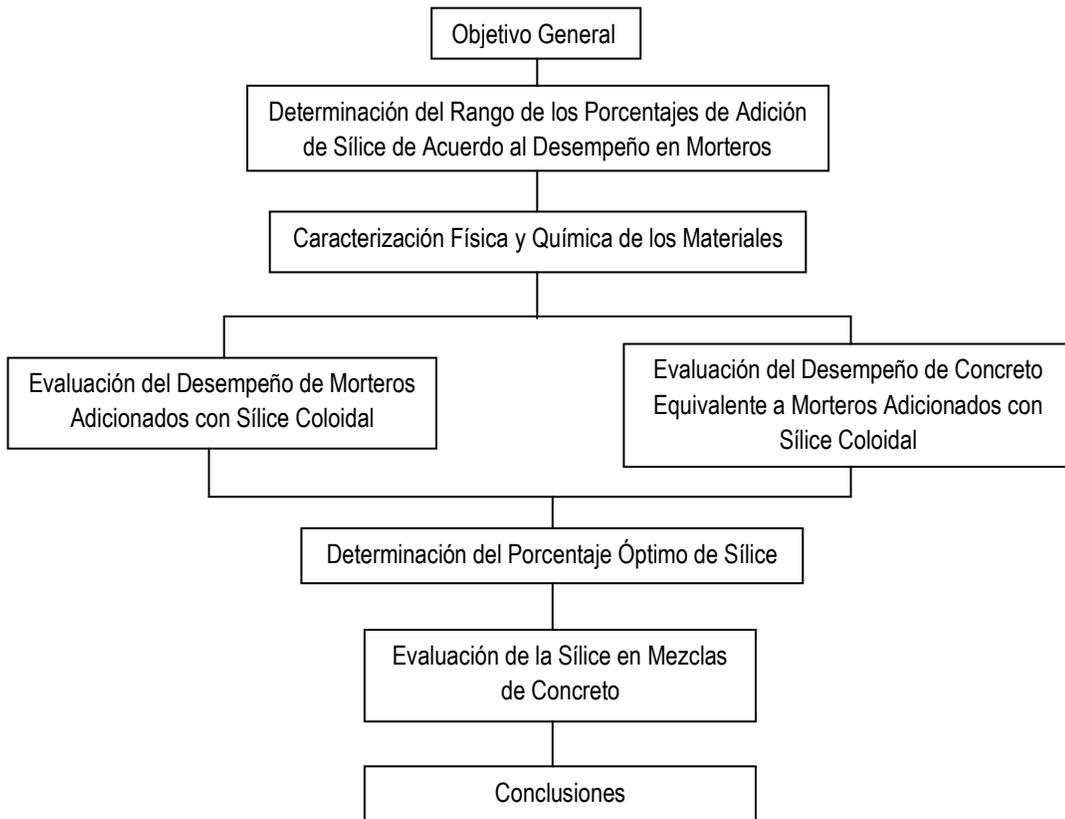


Figura 3. 1. Esquema de la Metodología

3.1 Determinación del Rango de los Porcentajes de Adición de Sílice de Acuerdo al Desempeño en Morteros

Para determinar el rango de porcentajes de adición de sílice coloidal y las edades de falla a evaluar se realizaron mezclas en morteros con porcentajes de adición de 0, 3, 6, 9, 12 y 15%, con el objeto de evaluar resistencias a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días en cubos de morteros, con los resultados de esta prueba se definió el rango de porcentajes de adición de sílice a trabajar y las edades de falla.

3.2 Caracterización Física y Química de los Materiales

3.2.1 Cementos

Se seleccionaron 3 cementos Colombianos Tipo 1 con el fin de evaluar los más representativos. Los cementos más usados cuentan con diferentes características químicas, ya que cada fabricante utiliza diferentes tipos de materias primas.

Con el fin de poder analizar el comportamiento de la sílice con los diferentes tipos de cementos se procedió a evaluar el módulo de finura y gravedad específica según las normas NTC 294-05 y NTC 221-99 respectivamente, y análisis químico por difracción en rayos X, según la norma ASTM C1365-06.

3.2.2 Sílice Coloidal

Las propiedades físicas y químicas de la sílice coloidal utilizada para el desarrollo del proyecto se obtuvieron de la ficha técnica del fabricante, las cuales se describen en la Tabla 3.1.

Tabla 3. 1. Propiedades Físicas de la Sílice Coloidal

Densidad g/cm ³ (20°C)	1.4
pH	9.4
Sólidos en suspensión	50%
Contenido de agua	50%

3.2.3 Agregados

Para la etapa de evaluación del desempeño de morteros adicionados con sílice se utilizó arena de Ottawa por ser esta una arena normalizada, dado que se buscaba evaluar el comportamiento sin la intervención de otros factores. Las propiedades físicas de la arena de Ottawa empleada en el desarrollo del proyecto se obtuvieron de la ficha técnica, descritas en la Tabla 3.2.

Tabla 3. 2. Propiedades Físicas de la Arena de Ottawa

Forma del Grano	Redondo
Dureza (Mohs)	7
Mineral	Cuarzo
pH	7
Gravedad Especifica (g/cm ³)	2.65

Posteriormente en la etapa de mezclas de concretos equivalentes a morteros (CEM) y concretos, se utilizó la arena y la grava, a las cuales se les realizaron los ensayos de caracterización descritos en la Tabla 3.3.

Tabla 3. 3. Caracterización de los Agregados

ENSAYO	NORMA
Granulometría	INV E - 213
Peso Especifico y Absorción Agregado Grueso	INV E - 223
Peso Especifico y Absorción Agregado Fino	INV E - 222
Peso Unitario	INV E - 217
Contenido de Materia Orgánica	INV E - 211
Granulometría	INV E - 213

3.2.4 Plastificante

Como medio para la selección del plastificante, fue necesaria la realización del ensayo de Cono de Marsh, prueba que permite medir o comparar la fluidez de los morteros, en donde posterior al proceso de mezclado se mide el tiempo que tarda en pasar por la abertura del cono un volumen dado de mortero fluido.

Los resultados de esta evaluación permitieron analizar la interacción entre el cemento, la sílice coloidal y los plastificantes analizados (Base naftaleno y/o Base policarboxilato), para la identificación de compatibilidad de las mezclas de mortero (ver Anexo C), evidenciando así la posible ocurrencia de problemas relacionados principalmente con un rápido endurecimiento, bajo efecto fluidificante, rápida pérdida de revenimiento, segregación severa, retardo excesivo, entre otros.

Para el caso, se utilizó como aditivo plastificante un reductor de agua de alto rango, a base de policarboxilatos que aumenta drásticamente la manejabilidad de un concreto. Este plastificante cumple con la norma ASTM C-494 Tipo A como reductor de agua; sus propiedades físicas y químicas se extrajeron de la ficha técnica y se describen en la Tabla 3.4.

Tabla 3. 4. Propiedades Físicas del Plastificante

Apariencia	Líquido de baja viscosidad
Color	Verde oliva
Contenido de cloruros	Ninguno
Densidad	1.06 kg/l +/- 0.03 kg/l

3.3 Evaluación del Desempeño de Morteros Normalizados Adicionados con Sílice Coloidal

Para la evaluación del comportamiento de la sílice coloidal en las propiedades de los cementos, se realizaron las mezclas de mortero con arena normalizada con el fin de controlar los cambios por esta variable en los resultados de los morteros. La cuantificación de las proporciones de los materiales para las mezclas de morteros normalizados tienen correspondencia según la norma NTC 220-98, la cual establece que por cada parte de cemento se adicionan 2.75 partes de arena y la cantidad de agua debe ser tal que produzca una fluidez en la mesa de flujo de $110 \pm 5\%$ a 25 golpes.

Con lo descrito anteriormente se procedió a obtener la mezcla de mortero normalizado con 0% de adición de sílice coloidal y teniendo está como mezcla patrón, se obtienen las cuantías de materiales de las mezclas con 5, 6, 7, 8 y 9% de adición de sílice coloidal; teniendo en cuenta que el porcentaje de adición se encuentra en función al peso de cemento, que la composición de la sílice coloidal es 50% de sólidos suspendidos en agua y que la relación de agua – material cementante se mantiene constante como se muestra en la Tabla 3.5, a estas mezclas se le realizaron ensayos de manejabilidad y resistencia a la compresión según las normas NTC 5784-10 y NTC 220-98 respectivamente.

Tabla 3. 5. Materiales para Morteros Normalizados

Material	UN	Peso de los Materiales para 9 Cubos					
Cementos	gr	740	740	740	740	740	740
Arena	gr	2035	2035	2035	2035	2035	2035
Relación A/C		0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
Agua	ml	392.2	392.2	392.2	392.2	392.2	392.2
Sílice Coloidal	%	0%	5%	6%	7%	8%	9%
Sílice Coloidal	gr	0.0	37.0	44.4	51.8	59.2	66.6
Sólidos Sílice	gr	0.0	18.5	22.2	25.9	29.6	33.3
Agua Sílice	ml	0.0	18.5	22.2	25.9	29.6	33.3
Cemento Corregido	gr	740.0	721.5	717.8	714.1	710.4	706.7
Agua Corregida	ml	392.2	373.7	370.0	366.3	362.6	358.9

3.4 Evaluación del Desempeño de Concretos Equivalente Morteros (CEM) Adicionados con Sílice Coloidal.

La evaluación del desempeño de concreto equivalente mortero (CEM) adicionados con sílice se realizó para buscar resultados en morteros que se podrían correlacionar en concretos y con estos bajar el costo y el tiempo en la realización del presente proyecto. La metodología para realizar morteros CEM consiste en la eliminación de la fracción del agredo grueso y sustituirlo por una cierta masa de arena de la misma superficie, logrando con esto igualar las propiedades reológicas del mortero CEM a las del concreto.(Erdem TK et al, 2009).

Para obtener las cuantías de materiales del mortero CEM, se debe realizar primero el diseño de la mezcla de concreto, el cual se realizó según la norma de ACI 211.1-91, como se muestra en el Anexo A del presente documento, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

- Resistencia de diseño a 28 días, 40 MPa
- Relación agua – material cementante, 0.48
- Asentamiento objetivo, 2"
- Aire Incluido, 2%

En la Tabla 3.6 se muestra los pesos de los materiales para producir 1 m³ de concreto.

Tabla 3. 6. Materiales según Diseño para la Mezcla de Concreto

Material	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Volumen (m ³)
Cemento	371.3	3 120.0	0.119
Agua	179.0	1 000.0	0.179
Plastificante (0.15%)	0.6	1 060.0	0.001
Aire	0.0	0.0	0.020
Grueso	841.3	2 460.0	0.342
Agregado fino	833.9	2 460.0	0.339

Una vez efectuado el diseño de la mezcla de concreto, se realizó la cuantificación de los materiales del mortero CEM, partiendo de las granulometrías de la grava y la arena, teniendo estas se obtuvo la superficie específica de cada uno de los materiales considerando que cada una de las partículas son redondas y que su diámetro es el valor medio entre la malla que pasa y la malla que la retiene, con este valor se halló la superficie de la partícula y con los pesos retenidos en cada tamiz se obtuvo la superficie específica del mismo para luego realizar la suma de cada uno de los valores encontrados en los tamices y obtener la superficie específica del material.

Posteriormente, con el volumen de los agregados para 1 m³ de mezcla, con el equivalente de arena y la superficie específica de los materiales, se calculó la arena equivalente y con el factor de corrección del volumen de agregado se valoraron los pesos para 1 m³ de concreto equivalente a mortero CEM, con estos datos se calculó la cantidad de materiales para la mezcla patrón y después para las mezclas con adición de sílice, los cálculos de esta metodología se presentan en el Anexo B del presente documento.

En la elaboración de las mezclas se incluyó un aditivo plastificante a base de policarboxilato, con el fin de obtener la manejabilidad de $110\pm 5\%$, con la cual se simuló un asentamiento objeto de 10 centímetros en mezclas de concretos, las proporciones para realizar las mezclas de morteros CEM para uno de los cementos se muestran en la Tabla 3.7; a estas mezclas se le realizaron ensayos de manejabilidad, resistencia a la compresión y permeabilidad según las normas NTC 5784-10, NTC 220-98 y NTC 4483-98 respectivamente.

Tabla 3. 7. Materiales para Morteros CEM

Material	UN	Peso de los Materiales para 9 Cubos					
Cementos	gr	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5	927.5
Arena	gr	2109.5	2109.5	2109.5	2109.5	2109.5	2109.5
Relación A/C		0.52	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Agua	ml	480.2	480.2	480.2	480.2	480.2	480.2
Plastificante	%	0.00%	0.32%	0.36%	0.42%	0.48%	0.54%
Plastificante	gr	0.0	3.0	3.3	3.9	4.5	5.0
Sílice Coloidal	%	0%	5%	6%	7%	8%	9%
Sílice Coloidal	gr	0.0	46.4	55.7	64.9	74.2	83.5
Sólidos Sílice	gr	0.0	23.2	27.8	32.5	37.1	41.7
Agua Sílice	ml	0.0	23.2	27.8	32.5	37.1	41.7
Cemento Corregido	gr	927.5	904.3	899.7	895.0	890.4	885.8
Agua Corregida	ml	480.2	457.0	452.4	447.7	443.1	438.5

3.5 Determinación del Porcentaje Óptimo de Sílice

Una vez evaluado el desempeño de los morteros normalizados y de los morteros CEM, se procedió a realizar un análisis con los cementos empleados para ver cual presentaba mejor comportamiento con la adición de sílice coloidal y con este cemento se evaluó qué porcentaje de adición de sílice coloidal mostró mejor desempeño, obteniendo de esta manera el porcentaje óptimo de adición de sílice.

3.6 Evaluación de la Sílice en Mezclas de Concreto

La evaluación de la sílice coloidal en las mezclas de concreto se realiza para verificar el comportamiento de esta obtenido en las mezclas de los morteros normalizados y los morteros CEM, con el porcentaje de adición de sílice y el cemento que mostró mejor desempeño, se procedió a realizar las mezclas en concretos con los porcentajes de cero y óptimo. A las mezclas en concretos se le realizaron los ensayos de asentamiento, permeabilidad y resistencias a la compresión y flexión según las normas NTC 396-92, NTC 4483-98, NTC 673-10 y NTC 2871-04 respectivamente.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Determinación del Rango de los Porcentajes de Adición de Sílice de Acuerdo al Desempeño en Morteros

En la figura 4.1 se muestran los resultados de resistencias a la compresión obtenidos a 1, 3, 7 y 28 días de curado normal con porcentajes de adición de sílice coloidal de 0, 3, 6, 9, 12 y 15%, con los cuales se aprecia que para las resistencias de 1 y 3 días de curado, no se presentan incrementos significativos entre los diferentes porcentajes de adición de sílice. Por otra parte, mostraron mejores resultados los porcentajes superiores al 6%, con resistencias a la edad de 28 días de curado, ver figura 4.1, sin embargo con valores superiores al 9% se reduce considerablemente la fluidez de las mezcla (<80%) tal como se muestra en la figura 4.3, con lo cual se estableció que el rango de evaluación de porcentaje de adición de sílice coloidal para la elaboración de las mezclas de los morteros normalizados y los morteros CEM sería de 0%, 5%, 6%, 7%, 8% y 9% en peso de cemento a las edades de resistencia de 7, 28 y 56 días.

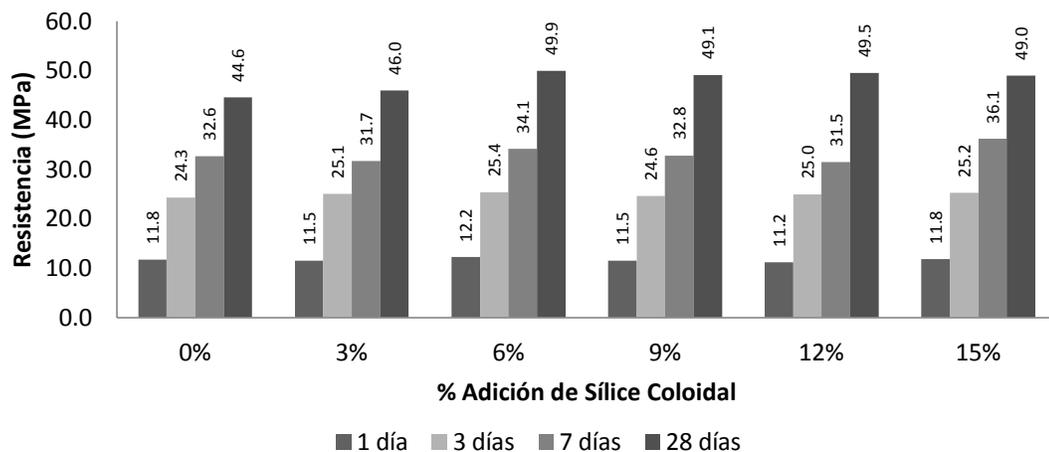


Figura 4. 1. Resistencias a la Compresión en Morteros Adicionados con Sílice

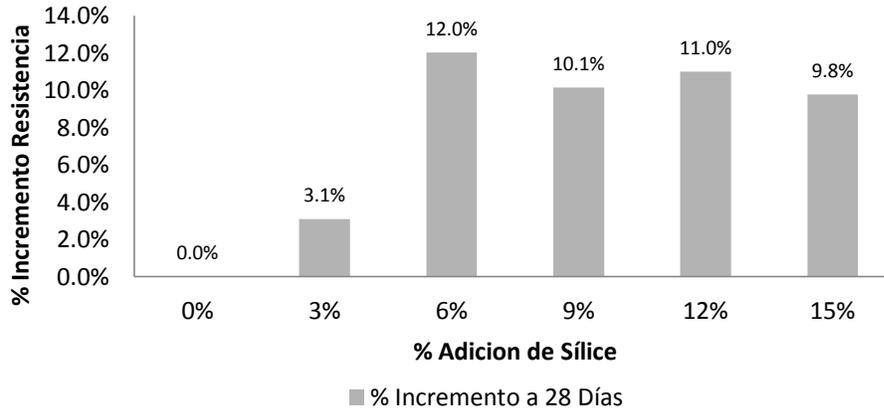


Figura 4. 2. Incremento Resistencia a 28 días en Morteros

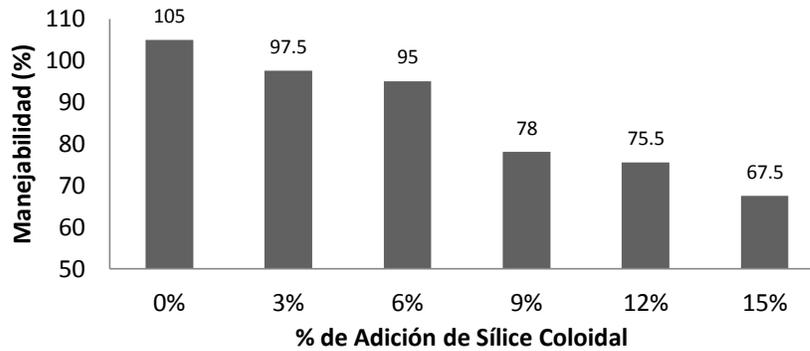


Figura 4. 3. Manejabilidad de las Mezclas en Morteros

4.2 Caracterización Física y Química de los materiales

4.2.1 Cementos

En los resultados a los ensayos de módulo de finura y gravedad específica que se muestran en la Tabla 4.1 se aprecia que el cemento 1, es más fino que los cementos 2 y 3, aunque los tres cementos presentan una gravedad específica similar.

Tabla 4. 1. Caracterización Física de los Cementos

ENSAYO	NORMA	CEMENTO 1	CEMENTO 2	CEMENTO 3
Módulo de Finura	NTC 294	4262 cm ² /g	3638 cm ² /g	3680 cm ² /g
Gravedad Especifica	NTC 221	3.06 g/cm ³	3.12 g/cm ³	2.96 g/cm ³

En el ensayo de análisis elemental y composición potencial por fluorescencia en rayos X de los cementos se muestra en la Tabla 4.2, se aprecia que los tres cementos tienen diferente composición química, ya que el cemento 3 presenta mayores porcentajes de CaO, SiO₂ y Al₂O₃; los cemento 1 y 2 presentan porcentajes similares CaO, SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃.

Tabla 4. 2. Análisis Elemental y Composición Potencial por Fluorescencia en Rayos X de los Cementos

COMPUESTOS	MASA	CEMENTO 1	CEMENTO 2	CEMENTO 3
CaO	%	55.240	56.440	60.950
SiO ₂	%	18.340	17.160	23.040
Al ₂ O ₃	%	5.120	3.870	7.110
Fe ₂ O ₃	%	3.910	2.580	2.610
MgO	%	1.060	2.490	1.160
SO ₃	%	2.920	3.420	2.570
K ₂ O	%	0.610	0.480	0.610
P ₂ O ₅	%	0.260	0.110	0.210
TiO ₂	%	0.280	0.190	0.330
Na ₂ O	%	0.200	0.890	0.120
Cr ₂ O ₃	%	0.000	0.000	0.000
SrO	%	0.070	0.320	0.090
ZnO	%	0.010	0.010	0.020
Mn ₂ O ₃	%	0.120	0.050	0.160
LOI	%	2.370	2.500	5.600
EqAlkali	%	0.601	1.206	0.521

Elaboración en Laboratorios de Euclid Chemical Toxement en Cleveland Ohio.

4.2.2 Agregados

Los resultados de las caracterizaciones de la grava y la arena empleados para elaborar las mezclas de morteros CEM y los Concretos se muestran en la Tabla 4.3 y 4.4.

Tabla 4. 3. Caracterización de los Agregados

Descripción del Ensayo	Arena		Grava	
	Norma	Resultado	Norma	Resultado
Absorción (%)		1.63		1.97
Gravedad específica Seco	INV E - 222	2.46	INV E - 223	2.46
Gravedad específica SSD		2.50		2.51
Gravedad específica aparente		2.56		2.59
Peso Unitario (g/cm ³)			INV E - 217	1.59
Modulo de Finura		2.94		-
Contenido de Materia Orgánica	INV E - 211	2.00		
Granulometría	INV E - 213	*	INV E - 213	*

*Se Muestra en la Tabla 4.4

Tabla 4. 4. Granulometría de los Agregados

Tamiz #	Arena % Pasa	Grava Gruesa % Pasa	Grava Fina % Pasa
2"	100.0%	100.0%	100.0%
1 1/2"	100.0%	100.0%	100.0%
1"	100.0%	98.4%	100.0%
3/4"	100.0%	65.2%	100.0%
1/2"	100.0%	5.3%	83.1%
3/8"	100.0%	0.5%	38.8%
Nº 4	94.2%	0.1%	0.6%
Nº 8	71.4%	0.1%	0.0%
Nº 16	57.7%	0.1%	0.0%
Nº 30	47.4%	0.0%	0.0%
Nº 50	28.2%	0.0%	0.0%
Nº 100	6.8%	0.0%	0.0%
Nº 200	2.2%	0.0%	0.0%
Fondo	0.0%	0.0%	0.0%

4.3 Evaluación del Desempeño de Morteros Normalizados Adicionados con Sílice Coloidal

Se presentan a continuación los resultados obtenidos respecto a las propiedades evaluadas para concretos normalizados en estado fresco y endurecido, realizado con los tres cementos y los porcentajes de sílice seleccionados para el estudio, tras el análisis realizado en la fase previa.

4.3.1 Manejabilidad

Como se muestra en la figura 4.4, las mezclas de mortero con los tres cementos para la muestra patrón (muestra con 0% de adición de sílice coloidal) se lograron con una manejabilidad de $110 \pm 5\%$ como se estableció en el desarrollo metodológico. Una vez se adicionó el porcentaje de sílice coloidal establecido en peso de cemento, se encontró que con el uso del cemento 1 se tiene una tendencia descendente en el porcentaje de manejabilidad que va desde una pérdida del 11% al 19% para adiciones entre el 5% y 9% respectivamente. Del mismo modo, para el cemento 2 se evidenció una tendencia similar con reducción en la manejabilidad entre el 8% y 21% respecto a adiciones entre el 5% y 9%, al igual que con el uso del cemento 3 con valores de reducción entre el 10% y 23%. Esto refleja que para los tres tipos de cemento, aun cuando su composición sea diferente, la sílice coloidal hace que las mezclas sean más cohesivas con el aumento del porcentaje de adición.

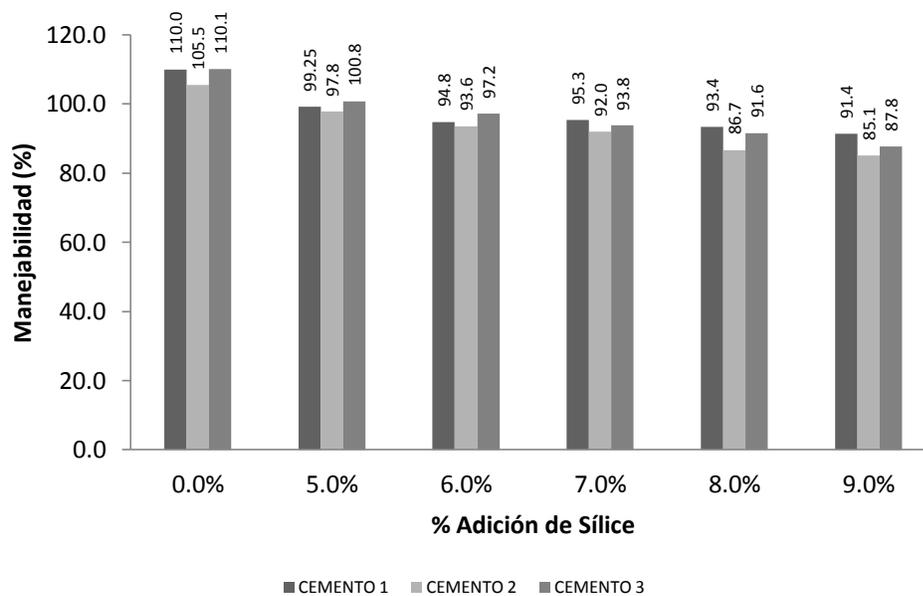


Figura 4. 4. Manejabilidad de las Mezclas de los Morteros Normalizados

4.3.2 Resistencia a la Compresión

En la figura 4.5, se observa que la resistencia a 7 días de las mezclas de morteros normalizados con adición de sílice coloidal respecto a la muestra patrón, tienen el siguiente comportamiento: para el Cemento 1 las mezclas estuvieron por debajo del resultado obtenido en la muestra patrón hasta en -3.1 MPa, excepto la adición del 7% en donde se obtuvo una mejora de 0.6 MPa; para el

Cemento 2, se presentaron valores superiores entre 0.8 MPa y 2.4 MPa para las muestras con adición de sílice coloidal entre el 7% y 9% respectivamente; mientras que para el Cemento 3 los resultados con adición permitieron un incremento de resistencia entre 0.5 MPa y 3.3 MPa, teniendo mejores resultados con las adiciones de 6% y 8% respectivamente.

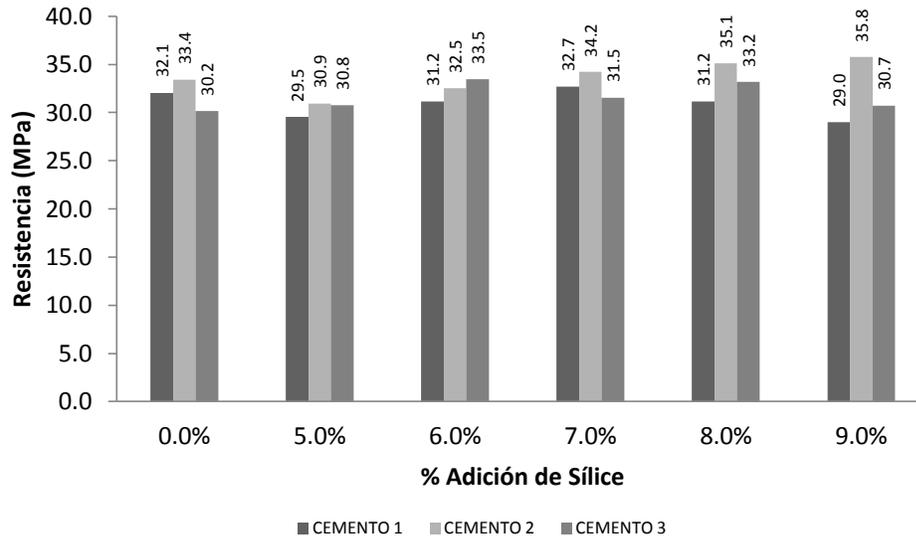


Figura 4. 5. Resistencias a 7 días de los Morteros Normalizados

Estos resultados permitieron establecer que a 7 días de curado el comportamiento de las muestras presentó en todos los casos un incremento con la adición del 7% de sílice coloidal; sin embargo su variación no muestra una influencia significativa en la ganancia de resistencia de los morteros normalizados.

En la figura 4.6, se observa que la resistencia a 28 días de las mezclas de morteros normalizados con adición de sílice coloidal respecto a la muestra patrón, mostró para el cemento 1 un incremento ascendente tras una mayor adición, con valores superiores en 4.7 MPa y 5.2 MPa para inclusiones de sílice coloidal de 8% y 9% respectivamente; para el Cemento 2 se presentó la misma situación que la descrita en el cemento 1, con valores superiores de 1.3 MPa y 1.1 MPa para las inclusiones de sílice coloidal del 8% y 9% respectivamente; en tanto que para el Cemento 3 los valores no mostraron una tendencia, se hace referencia para este caso los resultados obtenidos para el 5% y 9% donde se presentó una pérdida de resistencia llegando a valores cercanos a -3 MPa y un incremento superior en 2.3 MPa con la adición del 6% de sílice coloidal.

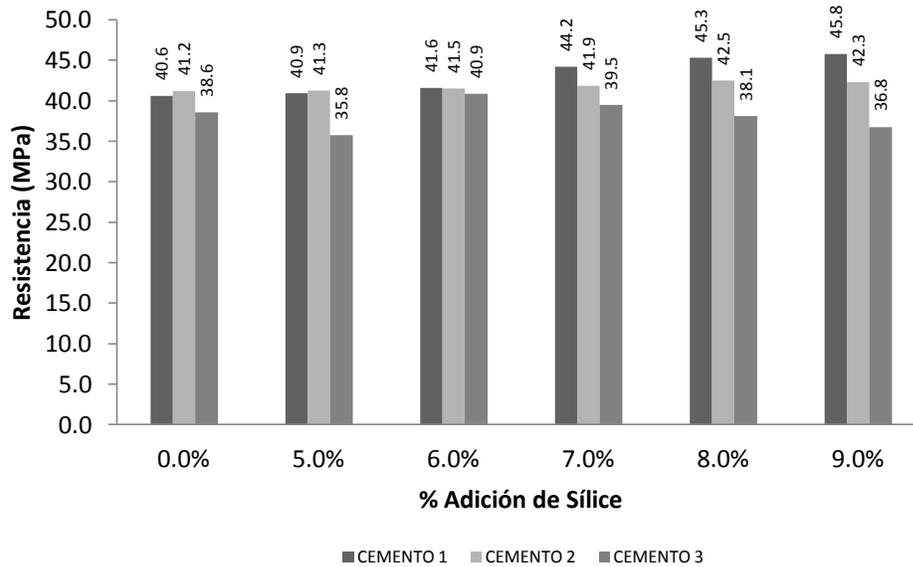


Figura 4. 6. Resistencias a 28 días de los Morteros Normalizados

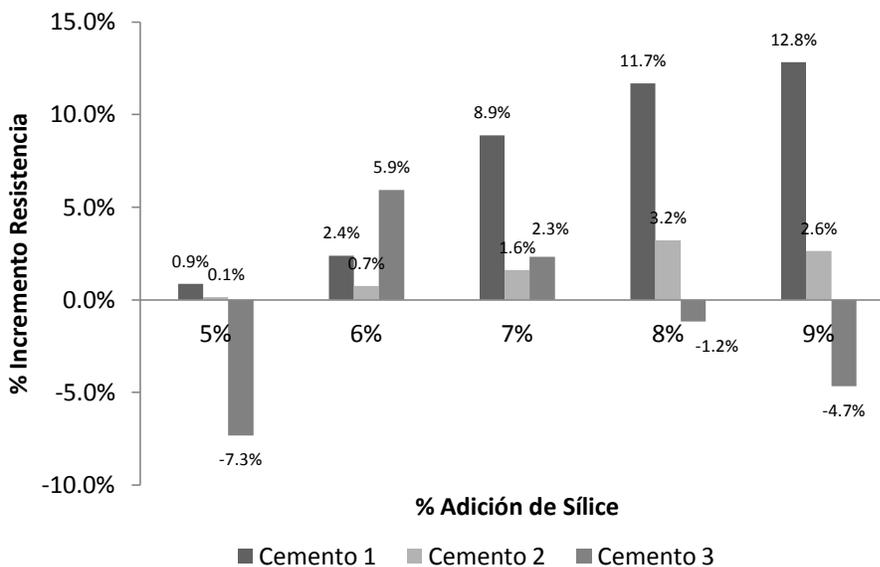


Figura 4. 7. Incremento de Resistencia a 28 días Morteros Normalizados

Contando con los resultados anteriores al igual que lo expuesto en la figura 4.7, se tiene que las mezclas de mortero normalizado realizadas con el cemento 1 fueron las que evidenciaron un mejor desempeño con la adición de sílice coloidal, ya que los valores de resistencia presentaron un incremento relevante entre el 8 y 13% con porcentajes de adición del 7, 8 y 9% con respecto a la muestra de referencia.

De acuerdo con la figura 4.8, se observa que la resistencia a 56 días de las mezclas de morteros normalizados con adición de sílice coloidal respecto a la muestra patrón, con el uso del cemento 1 presentaron un incremento máximo de 3.2 MPa con el 8% de adición; para el Cemento 2 se obtuvo un valor máximo de 0.4 MPa con el 8% de adición; y para el Cemento 3 un valor máximo de 0.9 MPa con el 6% de adición.

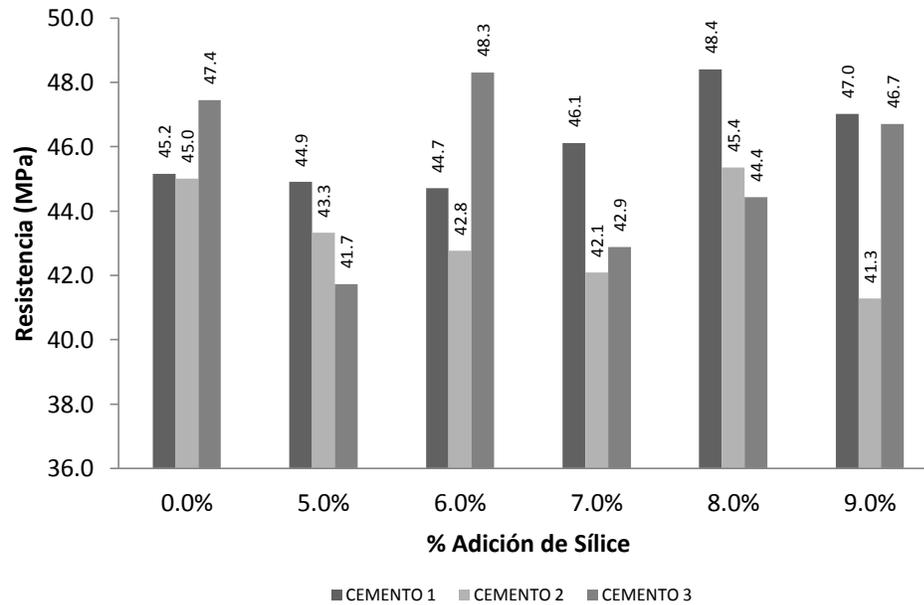


Figura 4. 8. Resistencias a 56 días de los Morteros Normalizados

Con base en la información detallada anteriormente y contando además con los resultados expuestos en la figura 4.9, es de anotar que el comportamiento del cemento 1 es el único que muestra cambios beneficiosos en cuanto al alcance de resistencia a compresión de forma apreciable luego de 56 días de curado, en donde se presenta para un 8% de adición de sílice coloidal un incremento en resistencia del 7.2% con respecto a la muestra patrón, siendo estas mezclas las que mostraron mejores resultados, del mismo modo se evidencia que en todos los casos con un 5% de adición de sílice coloidal se produjo una pérdida de resistencia en comparación con las muestras patrón.

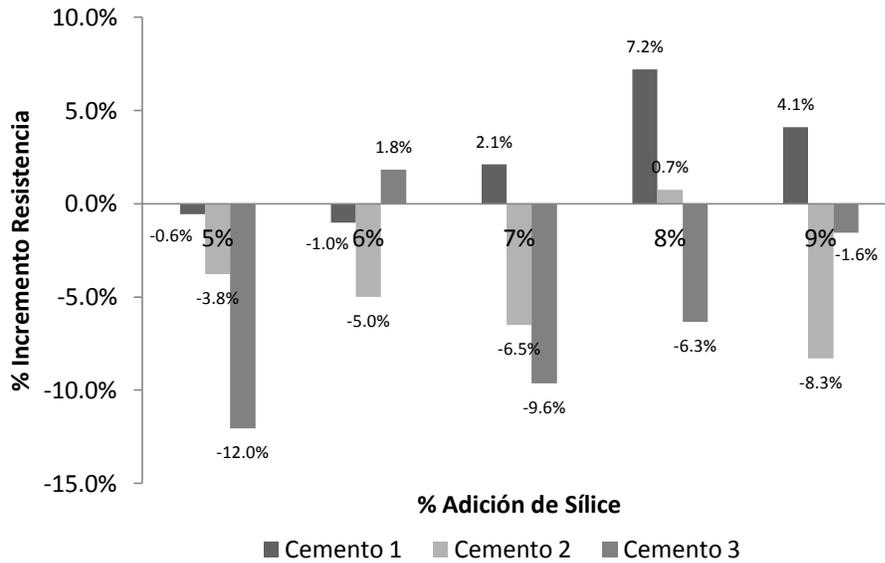


Figura 4. 9. Incremento de Resistencia a 56 días Morteros Normalizados

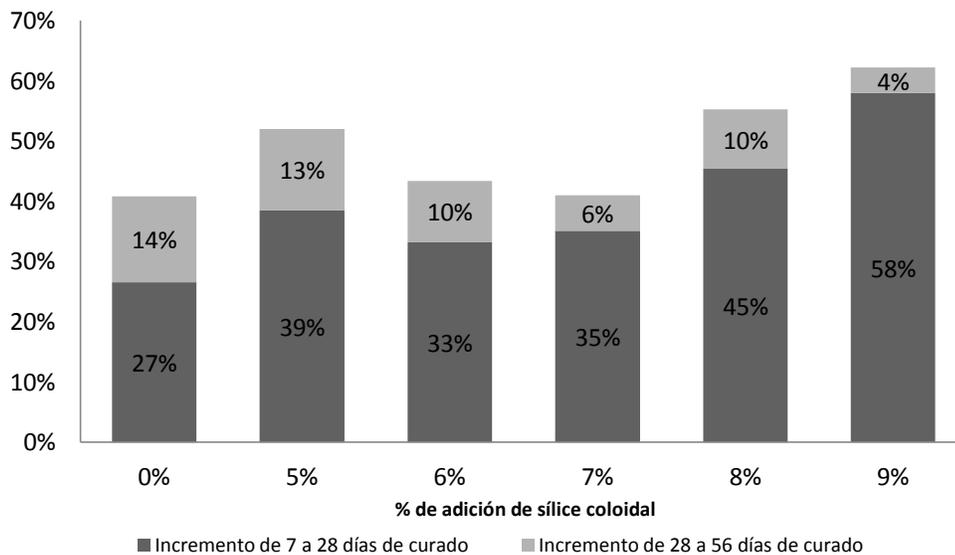


Figura 4. 10. Incremento de Resistencia para Morteros Normalizados con Cemento 1

De acuerdo con la figura 4.10, teniendo como referencia el uso del Cemento 1 debido a su mejor comportamiento, se evidencia que el incremento de resistencia de los morteros normalizados adicionados con sílice coloidal tienen un comportamiento similar al encontrado en mezclas sin adición, con lo cual se considera que la inclusión de sílice coloidal no repercute en el desarrollo de resistencias tempranas.

4.4 Evaluación del Desempeño de Concreto Equivalente a Mortero (CEM) Adicionados con Sílice Coloidal

A continuación se describen los resultados obtenidos respecto a la evaluación de las propiedades de manejabilidad y resistencia a compresión de los ensayos realizados a las mezclas de Morteros CEM.

4.4.1 Manejabilidad

Para las mezclas de mortero CEM con los tres cementos de estudio, se consiguió un rango de valores entre $110 \pm 5\%$ de manejabilidad para todos los porcentajes de adición, siendo necesaria la inclusión de un plastificante a base de policarboxilato con porcentajes de adición entre 0.1% y 0.8% con respecto al peso de material cementante, tal como se muestra en la tabla 4.5, en donde se puede observar que el cemento 1 requiere una mayor inclusión de plastificante en comparación con los otros dos cementos, lo que indica que la cohesividad adquirida debido a la inclusión de sílice coloidal y el uso del cemento 1 es mucho mayor que en los otros casos.

Tabla 4. 5. Porcentaje de inclusión de plastificante en mezclas de mortero CEM

% DE ADICIÓN DE SÍLICE COLOIDAL	% DE INCLUSIÓN DE PLASTIFICANTE EN MEZCLAS DE MORTERO CEM		
	Cemento 1	Cemento 2	Cemento 3
5%	0.40	0.13	0.32
6%	0.54	0.17	0.36
7%	0.66	0.25	0.42
8%	0.70	0.30	0.48
9%	0.80	0.32	0.54

4.4.2 Resistencia a la Compresión

En la figura 4.11, se observa que la resistencia a 7 días de las mezclas de morteros CEM con adición de sílice coloidal respecto a la muestra patrón tuvo el siguiente comportamiento: para el Cemento 1 se presentaron valores superiores entre 2.0 MPa y 10.2 MPa teniendo un máximo en 5% de adición, con un incremento de su resistencia en 15.2% con respecto a la muestra patrón; para el Cemento 2, se encuentran variaciones dado que las mezclas con el 7% y 8% muestran resultados

inferiores hasta en -3.3 MPa y solo la adición del 6% refleja un incremento de 0.2 MPa; y para el Cemento 3 se presentan variaciones con valores inferiores hasta en -5.2 MPa para adiciones del 6%, de -3.7 MPa para el 9% e incrementos en 3.2 MPa para el 7% de adición. Esto indica los resultados obtenidos a 7 días de curado de los morteros CEM cuentan con un mejor desempeño con el uso del Cemento 1.

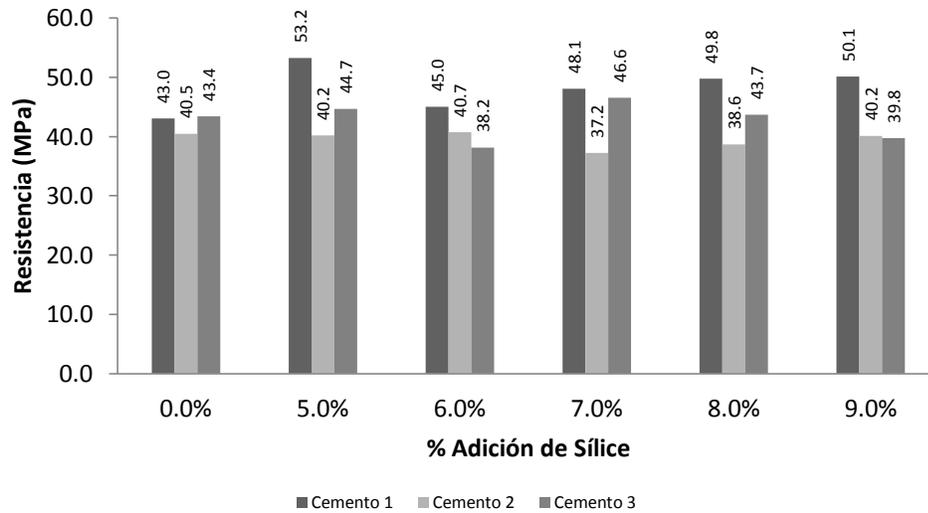


Figura 4. 11. Resistencias a 7 días de los Morteros CEM

Con referencia a la figura 4.12, se observa que la resistencia a 28 días de las mezclas de morteros CEM con adición de sílice coloidal respecto a la muestra patrón, presentó el siguiente comportamiento: para el Cemento 1, se presentaron valores superiores entre 5.2 MPa y 8.4 MPa cuyo máximo valor se da con el 5% de adición; para el Cemento 2, varía entre -5.8 MPa y 8.1 MPa para las adiciones de 7 y 9% respectivamente; y para el Cemento 3 varía entre -6.6 MPa y 3.3 MPa para las adiciones de 6 y 8% respectivamente.

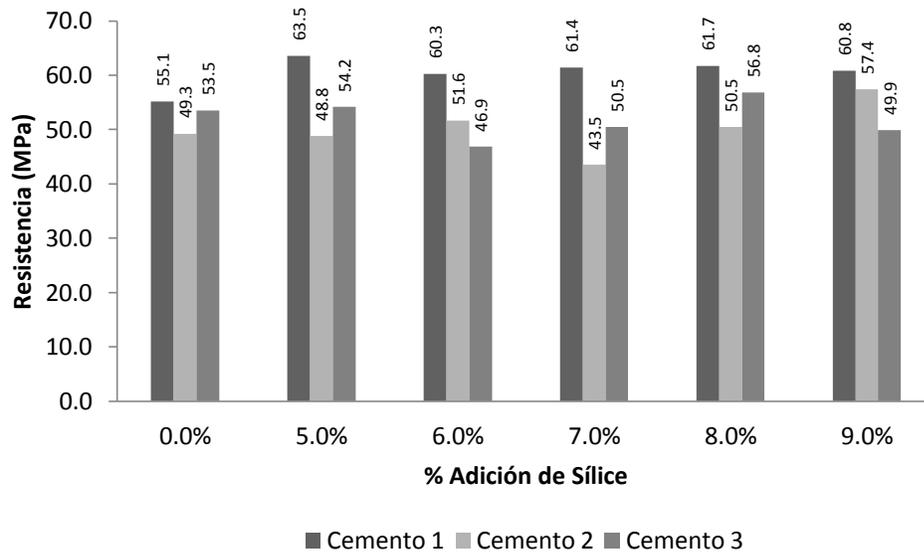


Figura 4. 12. Resistencias a 28 días de los Morteros CEM

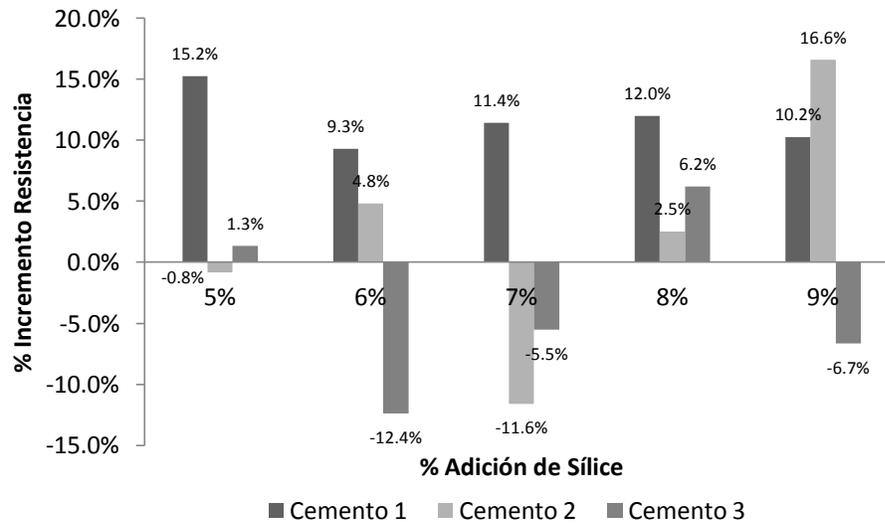


Figura 4. 13. Incremento de Resistencia a 28 días Morteros CEM

De igual manera, como se aprecia en la figura 4.13, se tiene que la resistencia a los 28 días de curado normal para morteros CEM con el uso del cemento 3 muestra un incremento del 16.6%, al igual que con el empleo del cemento 1 al presentarse incrementos en resistencia entre un 9.3% y 15.2%, resaltando el 5% y el 8% de adición, como de mejor desempeño en cuanto a incremento de resistencia con un 15.2% y 12% respectivamente. Es notable que con el uso del Cemento 1 se produce un incremento en el alcance de resistencia a compresión a los 28 días de curado con la

adición de sílice coloidal en los diferentes porcentajes, hecho que no se refleja en el comportamiento con el uso de los otros dos cementos.

Del mismo modo en la figura 4.14, se observa que la resistencia a 56 días de las mezclas de morteros CEM con adición de sílice coloidal respecto a la muestra patrón, presentó el siguiente comportamiento: para el Cemento 1, se obtuvo un valor superior de 8.7 MPa con el 8% de adición; para el Cemento 2, todos los valores encontrados fueron inferiores hasta en -11 MPa para la adición de 7%; para el Cemento 3, los valores encontrados se mantuvieron entre -7.16 MPa y 3.6 MPa para las adiciones de 6 y 9% respectivamente.

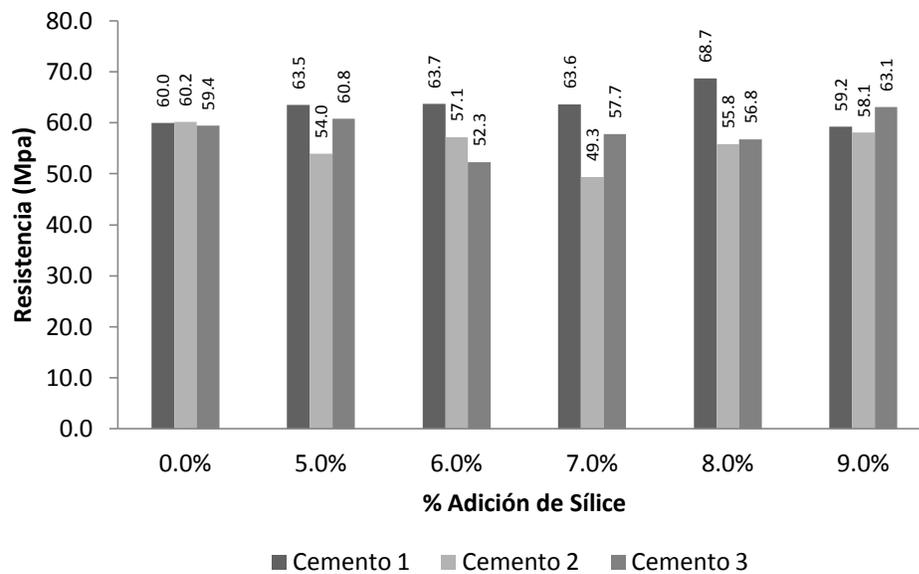


Figura 4. 14. Resistencias a 56 días de los Morteros CEM

Asimismo, según lo mostrado en la figura 4.15, al evaluar las resistencias a 56 días de curado normal en los morteros CEM, las mezclas realizadas con el cemento 1 contaron con un mejor desempeño, incrementando la resistencia hasta en un 14.4% con un porcentaje óptimo del 8% de adición de sílice coloidal en peso de material cementante.

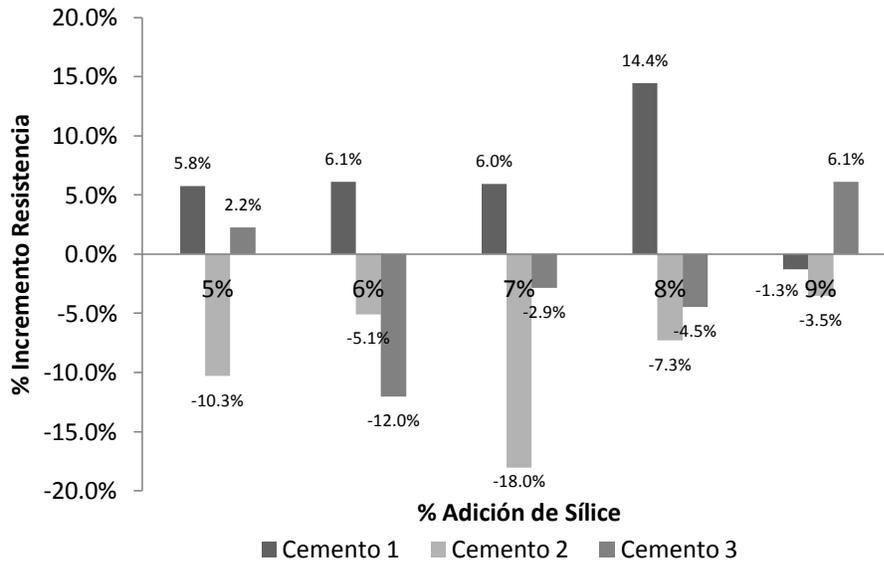


Figura 4. 15. Incremento de Resistencia a 56 días Morteros CEM

4.4.3 Permeabilidad

Como se muestra en la Tabla 4.6, en los morteros CEM realizados con los tres tipos de cemento con inclusión de la sílice coloidal de 0 y 8%, la permeabilidad disminuye de alta a media con las adiciones de 0 y 8% respectivamente según la norma NTC 4483-98.

Tabla 4. 6. Permeabilidad en Morteros CEM

CEMENTO	% Adición	Permeabilidad (m/s)	Clasificación
1	0.0%	2.100E-05	Alta
	8.0%	1.615E-11	Media
2	0.0%	7.369E-06	Alta
	8.0%	6.876E-12	Media
3	0.0%	4.999E-05	Alta
	8.0%	4.149E-12	Media

4.5 Determinación del Porcentaje Óptimo de Sílice

Así pues, con la información obtenida de las resistencias en los morteros normalizados y los morteros CEM, se deduce que las mezclas que muestran mejor desempeño en resistencia a la compresión fueron las realizadas con el cemento 1, como se muestra en la figura 4.16; para los morteros normalizados se obtienen incrementos de resistencias a los 28 días de curado de 11.7% y 12.8% para las adiciones de 8 y 9% respectivamente; para la edad de 56 días de curado mostraron un incremento de resistencias de 7.2% y 4.1% para las adiciones de 8 y 9% respectivamente. Así mismo en los morteros CEM las resistencias a los 28 días de curado presentaron incrementos en 15.2% y 12% para las adiciones de 5 y 8% respectivamente; para la edad de 56 días de curado se mostraron incrementos de resistencia de 6.1% y 14.4% para los porcentajes de inclusión de 6 y 8% respectivamente. Por último se montó una columna con el promedio (Prom.) de los valores de incrementos de resistencia para cada uno de los porcentajes de adición y muestra el 8% de adición de sílice coloidal como óptimo ya que mostro un mejor desempeño.

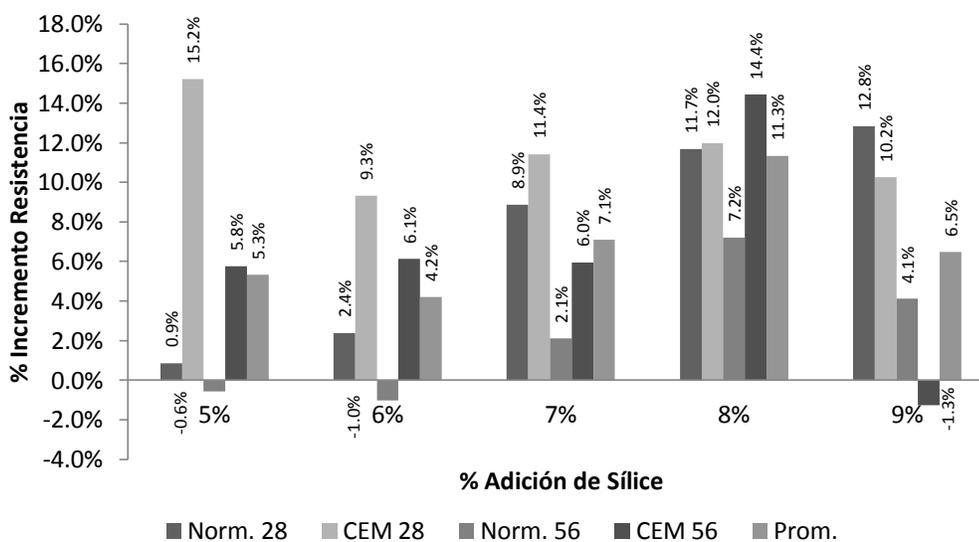


Figura 4. 16. Determinación del Porcentaje Óptimo de Sílice

Con el porcentaje óptimo de adición de sílice coloidal se realiza el ajuste al diseño de la mezcla de concreto como se muestra en la Tabla 4.7, para evaluar la inclusión de sílice en las mezclas de concreto.

Tabla 4. 7. Mezcla de Concreto con Porcentaje Óptimo de Sílice

Material	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m ³)	Volumen (m ³)
Cemento	356.4	3 120.0	0.114
Sílice Coloidal (8%)	29.7	1 400.0	0.021
Agua	164.1	1 000.0	0.164
Plastificante (0.50%)	1.9	1 060.0	0.002
Aire	0.0	0.0	0.020
Grueso	841.3	2 460.0	0.342
Agregado fino	833.9	2 460.0	0.339

4.6 Evaluación de la Sílice Coloidal en las Mezclas de Concreto

De acuerdo con los resultados obtenidos en los ensayos de asentamiento, calor de hidratación, permeabilidad y resistencias a compresión y flexión, para las mezclas en concreto, se presentan a continuación los resultados obtenidos.

4.6.1 Asentamiento

El asentamiento objetivo en el diseño de la mezcla de concreto se estimó de 10 centímetros, para llegar a este en las mezclas con 0 y 8% de adición de sílice, se adicionó de 0.15 y 0.50% respectivamente de plastificante a base de policarboxilato en peso del material cementante, los resultados del asentamiento para las mezclas se muestran en la Figura 4.17.

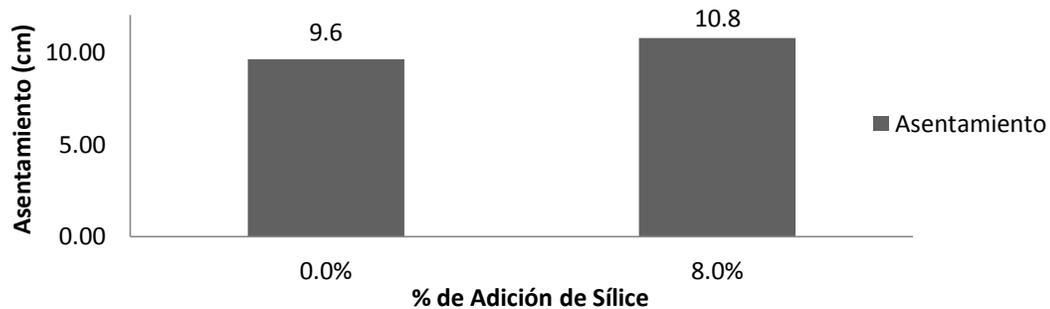


Figura 4. 17. Asentamiento en Concretos

4.6.2 Temperatura de Hidratación

Como se aprecia en la figura 4.18, la temperatura de hidratación para la muestra con el 0% de adición alcanzó un valor máximo de 40 °C a las 10.5 horas y la muestra con el 8% de adición lo obtuvo con 39 °C a las 10.5 horas; con lo cual se establece que la temperatura de hidratación de la mezcla con adición es ligeramente inferior a la mezcla sin adición y no modifica la hora en la cual se presenta la temperatura máxima, razón por la cual no se evidencia una reacción relevante de la inclusión de la sílice coloidal que incida en las condiciones de fraguado de las mezclas.

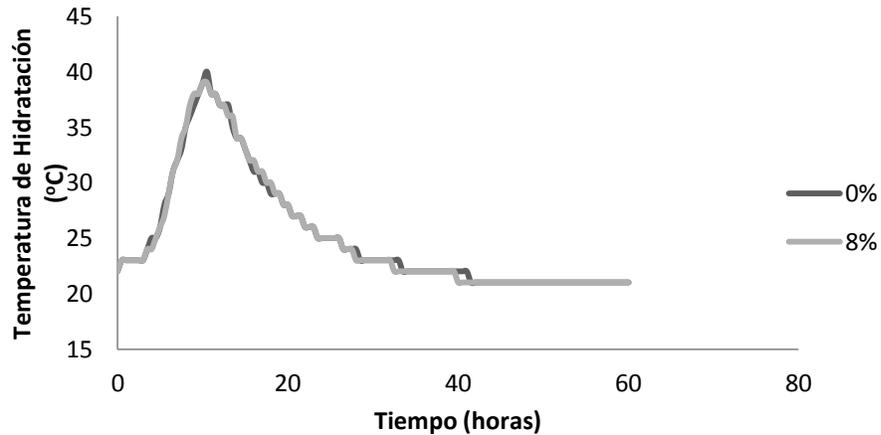


Figura 4. 18. Temperatura de Hidratación en Concretos

4.6.3 Resistencia a la Compresión y Flexión

Las resistencias a la compresión en los concretos con el 8% de adición, mostraron un incremento en las edades de 7, 28 y 56 días de curado de 8.5 MPa, 11.4 MPa y 9.5 MPa respectivamente como se muestra en la figura 4.19.

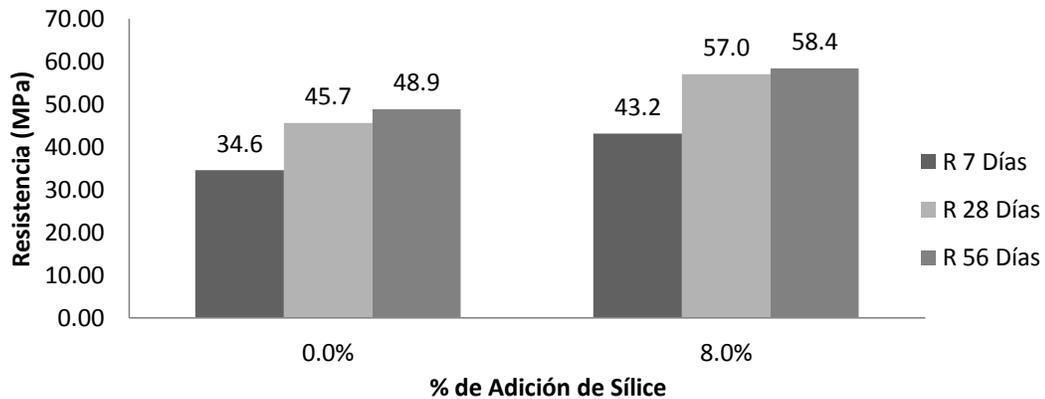


Figura 4. 19. Resistencia a la Compresión en Concretos

De igual forma como se muestra en la figura 4.20, los incrementos en resistencia a la compresión obtenidos en los concretos a las edades de 7, 28 y 56 días de curado, fueron del 24.7%, 24.9% y 19.5 % respectivamente en comparación con la muestra patrón sin adición, lo cual demuestra la mejora en la resistencia por la inclusión de las nanopartículas de sílice, en este caso en estado coloidal.

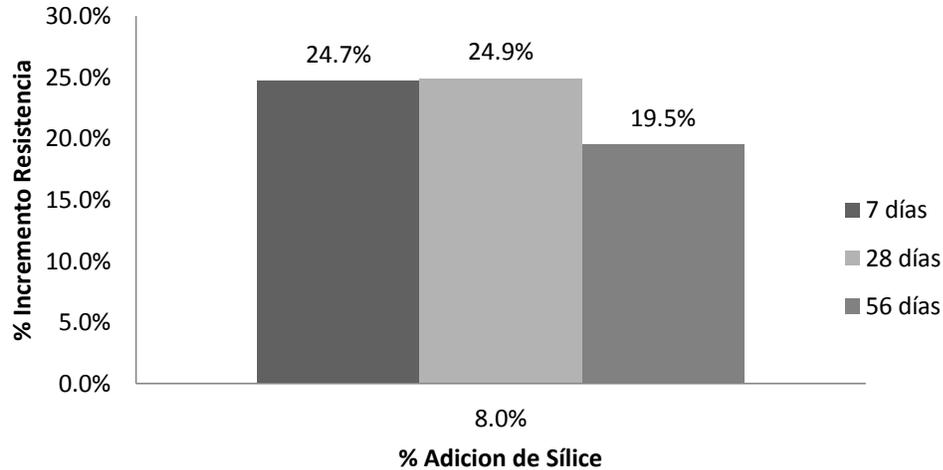


Figura 4. 20. Incremento de la Resistencia a Compresión en Concretos.

La resistencia a la flexión en los concretos con el 8% de adición de sílice con respecto a la muestra patrón mostró valores a los 7, 28 y 56 días de curado de 0.0 MPa, 0.2 MPa y -0.1MPa respectivamente, como se muestra en la figura 4.21.

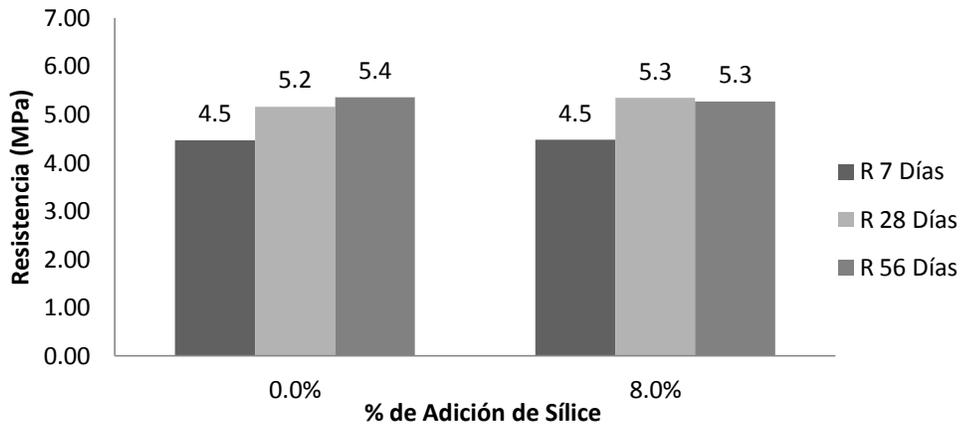


Figura 4. 21. Resistencia a la Flexión en Concretos

De igual forma, la resistencia a la flexión en los concretos solo mostró un incremento a la edad de 28 días en un porcentaje de 3.6% y se muestra una reducción cercana al -1.8% en esta propiedad a los 56 días, como se muestra en la figura 4.22, con lo cual se puede establecer que la sílice no mejora las propiedades de las resistencia a la flexión en los concretos.

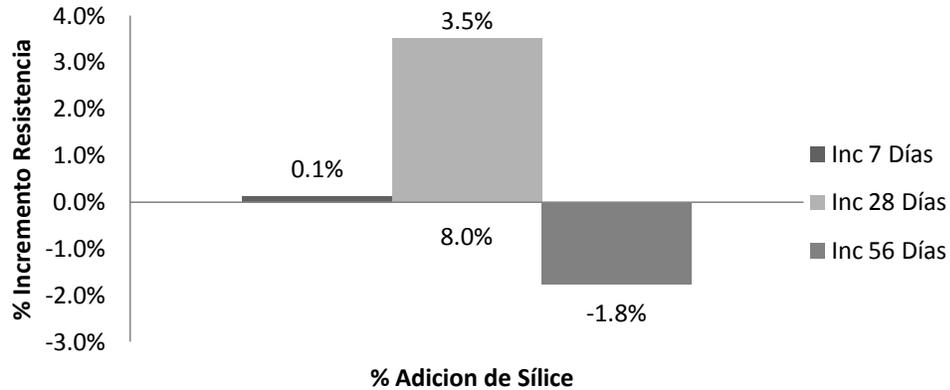


Figura 4. 22. Incremento de la Resistencia a Flexión en Concretos

4.6.4 Permeabilidad

Como se muestra en la Tabla 4.8, la permeabilidad en los concretos por la inclusión de la sílice coloidal disminuye en $1.14E-05$, lo cual hace que cambie de clasificación del concreto al pasar de Permeabilidad Alta a Permeabilidad Media con las adiciones del 0 y 8% respectivamente según la norma NTC 4483-98.

Tabla 4. 8. Permeabilidad en Concretos

% Adición	Permeabilidad (m/s)	Clasificación
0.0%	$1.147E-05$	Alta
8.0%	$6.649E-12$	Media

5. DISCUSIÓN

Dado que en las mezclas de morteros se pierde manejabilidad del orden de 3% por cada 1% de incremento de adición de sílice coloidal, este resultado concuerda con los estudios realizados por Harsh 2011 en donde se establece el aumento en el requerimiento de agua para una consistencia normal entre el 23% y 49%.

Respecto al desarrollo de la temperatura de hidratación en las mezclas, no se evidencia un cambio significativo en el aumento de la temperatura en la reacción, tampoco en cuanto al tiempo requerido para el fraguado. Por ende, estos resultados difieren respecto a los cambios en estos factores para mezclas con la inclusión de nanosílice respecto a muestras patrón sin adición encontrados por Li 2004, del mismo modo es notable la diferencia en el calor máximo alcanzado ($>60^{\circ}\text{C}$) en comparación con los encontrados en este estudio en donde son cercanos a 40°C , característica sujeta a la composición de los materiales de estudio.

De acuerdo con los resultados obtenidos utilizando los diferentes cementos, las mezclas de mortero realizadas con el cemento 1 arrojaron un incremento del 14.4% en resistencia a compresión, reflejando las mejoras evidenciadas por Harsh 2011 y Tobón 2011 en sus investigaciones con el uso de nanosílice en proporciones del 5% y 10% para morteros a 28 días de curado, aunque sin alcanzar la magnitud de dichos resultados de 24% y 86.9% respectivamente.

Referente al aporte de resistencia a flexión de la sílice coloidal en el concreto hidráulico, no se presenta el incremento obtenido en las investigaciones realizadas por Tadayon 2010, contando con que en los resultados obtenidos en este proyecto, no se presenta mejoría en cuanto a resistencia a flexión, más aún se ve reducida posiblemente por el aumento en la rigidez de los elementos debido a la densificación del material.

6. CONCLUSIONES

La manejabilidad para los tres cementos en las mezclas de morteros presenta un comportamiento similar, ya que esta se reduce a medida que se incrementa el porcentaje de adición de sílice coloidal, la manejabilidad se reduce para el cemento 1 entre un 11 y 19%, para el cemento 2, se reduce entre un 8 y 21% y para el cemento 3, se reduce entre un 10 y 23% con las adiciones de sílice coloidal entre un 5 y 9% respectivamente.

La manejabilidad en los concretos presenta una disminución con la adición de sílice coloidal, la cual fue controlada con el plastificante, ya que para alcanzar el asentamiento objetivo de 10 centímetros en la muestra patrón se incluyó 0.15% de plastificante y para este mismo asentamiento en la mezcla con 8% de adición de sílice se incluyó 0.5% de plastificante.

Para las mezclas en concreto en estudio con el cemento 1, se evidencia que no existe una variación significativa en cuanto a la temperatura máxima presentada, como tampoco algún cambio en el tiempo de fraguado para las mezclas con adición óptima de sílice coloidal (8%) en contraste con las muestras patrón sin adición.

El desarrollo de las resistencias a la compresión en morteros para las edades de 7, 28 y 56 días de curado, presentan un comportamiento similar entre los morteros sin adición y los morteros con los diferentes porcentajes de adición, con lo cual se establece que la inclusión de sílice coloidal no genera incrementos significativos en la resistencia a edades antes mencionadas.

Del mismo modo, se detecta que el concreto para las edades de 7, 28 y 56 días de curado incremento en la resistencia se da de manera similar a las mezclas con 0 y 8% de adición de sílice. Debido a esto, se establece que la inclusión de sílice coloidal en el concreto no influye apreciablemente en el encuentro de mayores resistencias a compresión a las edades en estudio.

Respecto al alcance de resistencia a la compresión de los morteros realizados con los tres cementos colombianos en estudio, se evidenció que el cemento 1 es el que presenta mejor desempeño con la adición de sílice coloidal, ya que se alcanzaron incrementos de resistencias hasta del 15.2%.

El alcance de resistencia del cemento 1 en concretos con el 8% de adición de sílice, se incremento hasta un 24.4% a la edad de 28 días de curado, lo que evidencia que el comportamiento de la sílice coloidal es diferente en morteros y concretos.

Con relación a la ganancia de resistencia a la flexión en concretos realizados con la adición óptima de sílice coloidal (8% en peso de cemento), se evidencia una reducción hasta de un 9% respecto a las muestras patrón sin adición. Esta condición permite afirmar que bajo las mismas consideraciones de densificación del concreto adicionado con sílice coloidal, el material aumenta su rigidez y se produzca la falla frágil del concreto sometido a la aplicación de una menor carga.

En los morteros y concretos con adiciones de sílice coloidal de 0 y 8% la permeabilidad presenta una disminución de alta a media respectivamente, con lo cual se demuestra que la sílice coloidal densifica reduciendo los vacíos en las mezclas.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar una prueba piloto la cual permita establecer el rango de porcentaje de adiciones a trabajar y las edades de curado en las cuales se obtendrán las resistencias.

Del mismo modo, es indispensable realizar ensayos con el cono de Marsh para verificar la compatibilidad química entre la nanosílice empleada, el plastificante y el cemento.

Se aconseja realizar una investigación encaminada al estudio del comportamiento químico de las mezclas de mortero y concreto hidráulico con adiciones de nanosílice para enriquecer el conocimiento aportado con el análisis de las propiedades físicas encontradas en este estudio.

Se recomienda realizar una investigación similar con cementos tipo III, para evaluar el comportamiento en las propiedades de los concretos debido a la inclusión de nanosílice.

Se recomienda realizar estudios para evaluar el comportamiento del módulo elástico del concreto debido a la inclusión de nanosílice.

Para futuras investigaciones se recomienda el uso de la metodología de los morteros CEM, permitiendo reducir costos y tiempo en la elaboración de estudios con bases experimentales, siempre y cuando sean confrontados con la realización de mezclas de concreto para su verificación.

8. BIBLIOGRAFÍA

- Collepari, M., Collepari, S., Skarp, U., & Troli, R. (2002). Optimization of Silica Fume, Fly Ash and Amorphous Nano-Silica in Superplasticized High-Performance Concretes. *Proceedings of 8 th CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete* (pp. 495–506).
- Collepari, M., OLAGOT, O., SKARP, J., & Troli, R. (2002). Influence of amorphous colloidal silica on the properties of self-compacting concretes. *Proceedings of the International Conference in Concrete Constructions*.
- Erdem TK, Khayat KH, & Yahia A. (2009). Correlating Rheology of Self-Consolidating Concrete to Corresponding Concrete-Equivalent Mortar.
- Harsh et al. (2011). Investigations on Nanosilica Blended Cements. *Evaluation*, 1–7.
- Jo, B. W., Kim, C. H., Tae, G., & Park, J. B. (2007). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. *Construction and Building materials*, 21(6), 1351–1355.
- Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, 34(6), 1043–1049.
- Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites part B: engineering*, 35(2), 185–189.
- Raki, L., Beaudoin, J., Alizadeh, R., Makar, J., & Sato, T. (2010). Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology. *Materials*, 3(2), 918–942.
- Tadayon, M. K. ., Sepehri, H., & Sepehri, M. (2010). Influence of Nano-Silica Particles on Mechanical Properties and Permeability of Concrete.
- Tobon Ji, Restrepo OJ, Borrachero MV, & Payá J. (2011). Evaluation of compressive strength and durability on portland cement blended with nanosilica.
- Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., Panas, I. (2004). Accelerating Effects of Colloidal Nano-silica for Beneficial Calcium-silicate-hydrate Formation in Cement. *Chemical Physics Letters*, Vol. 392, Issues 1-3, 242-248.
- Belkowitz, J., Armentrout D. (2010). An Investigation of Nano-silica in the Cement Hydration Process. *Concrete Sustainability Conference. National Ready Mixed Concrete Association*.
- Shih, J., Chang T., Hsiao T. (2006). Effect of Nanosilica on Characterization of Portland Cement Composite. *Materials Science And Engineering: A*, Vol. 424, Issues 1-2, 266-274.

Sobolev, K., Flores, I., Hermosillo, R., Torres-Martínez, L. (2006). *Nanomaterials and Nanotechnology for High-Performance cement Composites. ACI Session on "Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives"*.

Duda, Walter(1977), *Manual Tecnológico del Cemento*, Editores Técnicos Asociados S.A.

NTC 112-95 Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica.

NTC 220-98 Cementos. Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50 mm ó 50.8 mm de lado.

NTC 5784-10 Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico.

NTC 4483-98 Concreto. Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua.

ACI 211.1-91 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass Concrete

ASTM C642 - 06 Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete

ASTM C1365 - 06 Standard test method for determination of the proportion of phases in portland cement and portland-cement clinker using x-ray powder diffraction analysis

ASTM C494 - 11 Tipo A Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto

NTC 294-05 Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico utilizando el tamiz de 45 µm (no.325)

NTC 221-99 Cementos. Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico

NTC 2871-04 Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión (utilizando una viga simple con carga en los tercios medios)

NTC 396-92 Método de ensayo para determinar el asentamiento del concreto.

NTC 673-10 Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto

INV E – 211 Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznable en los agregados

INV E – 213 Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

INV E – 217 Densidad bulk (peso unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos

INV E – 222 Gravedad específica y absorción de agregados finos

INV E – 223 Gravedad específica y absorción de agregados gruesos

ANEXO A. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO SEGÚN NORMA ACI 211.1-91

Como para la resistencia de diseño objetivo no se tienen datos relacionados, se debe tomar el caso 3 de la norma, en el cual se establece que la f'_{cr} adoptada es de 5214 psi, como se muestra en la Tabla A.1.

Tabla A.1. Resistencia de Diseño

f_{cr} =	5500 psi
f'_{cr} =	0 psi
f'_{cr} =	0 psi
f'_{cr} =	6900 psi
f'_{cr} =	6900 psi

Tabla A.2. Relación Agua - Cemento

RELACIÓN AGUA CEMENTO	0.48
Por Resistencia	0.48
Durabilidad en condiciones de exposición ambiental	0.50
Basado en ensayos de laboratorio	NO HAY

Tabla A.3. Requerimientos de Manejabilidad

Asentamiento Mínimo "	1
Asentamiento Máximo "	2
Asentamiento Objetivo "	2

Tabla A.4. Requerimientos de Agua

Tamaño máximo del agregado	3/4"
Asentamiento objetivo	2
Inclusores de aire NO = 2%	2%
Agua de mezcla (peso por volumen de mezcla)	315 lb/Yarda³

Tabla A.5. Requerimientos del Agregado Grueso

Tamaño Máximo Permitido	3/4"	
Modulo de finura (Agregado Fino)	2.94	
Volumen de Agregado Grueso (por unidad de volumen de la mezcla)	0.52	Yd3
Volumen de Agregado Grueso Ajustado por Manejabilidad	N.A.	
El peso seco del agregado grueso ajustado para la manejabilidad (por unidad de volumen de mezcla)	1592.8	Kg/m3

Tabla A.6. Requerimientos del Contenido de Aire

Tamaño máximo del agregado	0.75
Incluros de aire NO = 2%	2%
Condiciones de exposición	Pequeño
Contenido de aire objetivo	2.00%

Tabla A.7. Requerimientos de Cemento

Relación agua - Cemento	0.48	
Agua de mezcla (peso por volumen de mezcla)	315	lb/Yarda3
Cemento	656	lb/Yarda3
Requerimiento mínimo de cemento para condiciones de exposición	564	lb/Yarda3
Requerimiento mínimo de cemento para trabajo plano	N.A.	
Contenido de cemento a usar	656	lb/Yarda3

Tabla A.8. Requerimientos del Agregado Fino

DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL	PESO	UN	DENSIDAD (Kg/m3)	VOLUMEN (m3)
Volumen total de la Mezcla	1	m3		
Cemento	389	Kg/m3	3120	0.125
Agua	187	L/m3	1000	0.187
Aire	20	Kg/m3	1000	0.020
Grueso	828	Kg/m3	2460	0.337
Agregado fino	814	Kg/m3	2460	0.331
Peso Total Mezclas	2238	Kg/m3		
Peso Recomendado ACI	2350	Kg/m3		
Diferencia	112	Kg/m3		
% de Agregados Fino	49.57%	56.0		
% de Agregados Grueso	50.43%	56.0		

Tabla A.9. Peso de los Materiales Corregidos

Material	Peso (Kg)	Densidad (Kg/m3)	Volumen (m3)
Cemento	371.3	3 120.0	0.119
Agua	179.0	1 000.0	0.179
Aire	0.0	0.0	0.020
Grueso	843.8	2 460.0	0.343
Agregado fino	833.9	2 460.0	0.339

ANEXO B. CONCRETO EQUIVALENTE A MORTERO

CONCRETO EQUIVALENTE A MORTERO (CEM)

Este método busca evaluar los parámetros reológicos del concreto equivalente a mortero CEM, en donde la dosificación de la mezcla CEM se deriva en correspondencia con la mezclas de concreto mediante la eliminación de la fracción de agregado grueso y su sustitución por un cierto peso de arena con la misma superficie específica.

El paso inicial como se muestra en las Tablas B.1 y B.2, consiste en realizar la matriz de cálculo de la superficie específica equivalente de arena por medio del análisis granulométrico de los agregados gruesos y finos utilizados para el diseño de mezcla de concreto.

Tabla B.1. Matriz de Calculo de Superficie Equivalente de Arena

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Tamaño de tamiz (mm)	Porcentaje pasa Acumulado	Porcentaje pasa en el tamiz	Columna C X Cantidad material (Kg)	Volumen (cm3): (Columna D / Densidad sss) X 1000	Diametro Di (cm) Promedio entre tamicez	Volumen de una partícula (cm3) (πD_i^3)/6	N° Partículas Columna E /Columna G	area de superficie de una partícula (cm2) πD_i^2	Area de superficie (cm2) Columna H X Columna I
Arena Gruesa									
0.075	2.23	2.2	19.40	7886.6	0.0038	2.76117E-08	2.85625E+11	4.41786E-05	12 618 536.59
0.15	6.82	4.6	39.93	16232.9	0.0113	7.45515E-07	21774121472	0.000397608	8 657 560.98
0.3	28.16	21.3	185.66	75470.7	0.0225	5.96412E-06	12654132685	0.001590431	20 125 528.46
0.6	47.37	19.2	167.13	67937.8	0.0450	4.77129E-05	1423886416	0.006361725	9 058 373.98
1.18	57.67	10.3	89.61	36426.8	0.0890	0.000369121	98685359.6	0.024884555	2 455 741.30
2.36	71.35	13.7	119.02	48380.5	0.1770	0.002903477	16662947.33	0.098422956	1 640 016.54
4.75	94.22	22.9	198.97	80881.7	0.3555	0.023524339	3438213.748	0.397035265	1 365 092.11
9.5	100	5.8	50.29	20441.5	0.7125	0.189388336	107934.1201	1.594849146	172 138.64
Totales		100.0	870.0	353658.5					56 092 988.58
Gravilla									
0.075	0.00	0.0	0	0.0	0.0038	2.76117E-08	0	4.41786E-05	0.00
0.15	0.00	0.0	0	0.0	0.0113	7.45515E-07	0	0.000397608	0.00
0.3	0.00	0.0	0	0.0	0.0225	5.96412E-06	0	0.001590431	0.00
0.6	0.00	0.0	0	0.0	0.0450	4.77129E-05	0	0.006361725	0.00
1.18	0.00	0.0	0	0.0	0.0890	0.000369121	0	0.024884555	0.00
2.36	0.00	0.0	0	0.0	0.1770	0.002903477	0	0.098422956	0.00
4.75	0.37	0.4	3.268597034	1328.7	0.3555	0.023524339	56481.84018	0.397035265	22 425.28
9.5	23.46	23.1	204.1492513	82987.5	0.7125	0.189388336	438186.9668	1.594849146	698 842.11
12.5	51.98	28.5	252.1140693	102485.4	1.1000	0.69690997	147056.863	3.801327111	559 011.24
19	86.10	34.1	301.5858129	122595.9	1.5750	2.045692235	59928.78928	7.793113276	467 031.84
25	99.34	13.2	117.054481	47583.1	2.2000	5.575279763	8534.660928	15.20530844	129 772.15
37.5	100	0.7	5.827788524	2369.0	3.1250	15.97896654	148.2586323	30.67961576	4 548.52
Totales		100.0	884.0	359349.6					1 881 631.15

Tabla B.2. Superficie Especifica del Agregado Fino para Mortero CEM a partir del Diseño de Concreto

Materiales	(K) Cantidad (Kg)	(L) Densidad (g/cm3)	%adsorción de arena	(M) Volumen (m3) (K/(L X 1000))	(N) Sumatoria de Sup. Equivalente (cm2) Tabla 1.
Cemento	389	3.06		0.127	
Agua	187	1		0.187	
Arena Gruesa	870	2.46	1.63	0.354	56 092 988.58
Gravilla	884	2.46		0.359	1 881 631.15
Totales	2330			1.027	57 974 619.73
CA/A	0.38				

Posteriormente, debe realizarse la corrección de las cantidades de los materiales llevados de concreto a mortero CEM como se muestra en las Tablas B.3.

Tablas B.3. Corrección de Cantidades para Mortero CEM

Volumen agregado (m3)	0.713
(O) Equivalente de Arena (K*N)	64474.7
(P) Factor De Correccion (1 /Sum. M)	1.403

Mortero Equivalente de concreto (Para 1 m3)		
Material	Cantidad Mortero Eq (Kg) (Q)	Cantidades a Dosificar (Kg) (Q X P)
Cemento	389	545.6
Agua	187	262.3
Arena equivalente (Sum. N/O)	899.2	1261.1
Total		2069.0

Diseño de Concreto	
Material	Cantidades (Kg/m3)
Cemento	389
Agua	187
Arena Gruesa	870
Gravilla	884
Total	2330

Para Pruebas de Laboratorio con correccion de Humedad	
% Adsorción Arena 1	1.630
% Humedad de la Arena 1	0
Cantidad a realizar (Litros)	1.700

CANTIDAD MORTERO CEM EN GRAMOS		
Material	Cant. (Kg)	Und.
Cemento	927.5	Gramos
Arena 1	2109.5	Gramos
Agua	480.2	Gramos

**ANEXO C. ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD DE ADITIVOS EN PASTAS DE CEMENTO
CONO DE MARSH**

ANÁLISIS DE COMPATIBILIDAD DE ADITIVOS EN PASTAS DE CEMENTO																									
CONO DE MARSH																									
CEMENTO 1																									
NANOSILICE + NAFTALENO																									
a/c = 0.50																									
Activo (%)	Microsilica activa (g)	Microsilica total (g)	Activo (%)	Plasticante activo (g)	Plasticante total (g)	Agua corregida (g)	T _s (seg)						T ₆₀ (seg)						COMPATIBLE						
0.45	1452	1452	0.15	2.18	7.29	714.4	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	23.4
NANOSILICE + POLICARBOXILATO																									
a/c = 0.50																									
Activo (%)	Microsilica activa (g)	Microsilica total (g)	Activo (%)	Plasticante activo (g)	Plasticante total (g)	Agua corregida (g)	T _s (seg)						T ₆₀ (seg)						COMPATIBLE						
0.45	1452	1452	0.09	1.31	4.38	718.4	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	22.5
CEMENTO 2																									
NANOSILICE + NAFTALENO																									
a/c = 0.50																									
Activo (%)	Microsilica activa (g)	Microsilica total (g)	Activo (%)	Plasticante activo (g)	Plasticante total (g)	Agua corregida (g)	T _s (seg)						T ₆₀ (seg)						COMPATIBLE						
0.45	1449	1449	0.15	2.17	7.28	712.9	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	22.5
NANOSILICE + POLICARBOXILATO																									
a/c = 0.50																									
Activo (%)	Microsilica activa (g)	Microsilica total (g)	Activo (%)	Plasticante activo (g)	Plasticante total (g)	Agua corregida (g)	T _s (seg)						T ₆₀ (seg)						COMPATIBLE						
0.45	1449	1449	0.09	1.30	4.37	714.9	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	23.8
CEMENTO 3																									
NANOSILICE + NAFTALENO																									
a/c = 0.50																									
Activo (%)	Microsilica activa (g)	Microsilica total (g)	Activo (%)	Plasticante activo (g)	Plasticante total (g)	Agua corregida (g)	T _s (seg)						T ₆₀ (seg)						COMPATIBLE						
0.45	1422	1422	0.15	2.13	7.14	698.6	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	24.2
NANOSILICE + POLICARBOXILATO																									
a/c = 0.50																									
Activo (%)	Microsilica activa (g)	Microsilica total (g)	Activo (%)	Plasticante activo (g)	Plasticante total (g)	Agua corregida (g)	T _s (seg)						T ₆₀ (seg)						COMPATIBLE						
0.45	1422	1422	0.09	1.28	4.28	701.6	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	23.8

*Cemento (g) \ Valor calculado para realizar 1200 ml de pasta de cemento