



Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros
de Caminos, Canales y Puerto

Departamento: Ingeniería Civil-Construcción

Diseño de mezclas de morteros cementicios de ultra altas prestaciones

Trabajo Fin de Máster

Noviembre 2018

Autor: Francesco Rogontino Bianco

Tutor:

D. Jaime Carlos Gálvez Ruiz

Dr. Ingeniero de Caminos,

Canales y Puertos

Tutor:

D. Marcos García Alberti

Dr. Ingeniero de Caminos,

Canales y Puertos

Agradecimientos

A Dios por siempre iluminar todos mis pasos y pensamientos a lo largo de toda esta experiencia tanto en la realización de este trabajo como en todo el máster.

A Luisana, por siempre estar a mi lado y apoyar cada una de las decisiones que he tomado y darme todo el amor y el cariño que he necesitado.

A mis padres, Giuseppe y María, porque ellos siempre han estado a mi lado apoyándome en cada una de las decisiones que he tomado en mi vida. Gracias a ellos he logrado llegar hasta donde estoy hoy.

A mi hermano, Alessandro, porque siempre supo que lograría todas mis metas.

A mis tutores Jaime Gálvez y Marcos García, por su tiempo y dedicación en la realización de este trabajo de fin de máster.

A Julio Paredes y todo el personal del Laboratorio de Materiales, sin su ayuda este trabajo no hubiese sido posible.

A todos mis compañeros de máster, por estar conmigo durante toda esta aventura.

Resumen

En estudios recientes se han desarrollado nuevos materiales que aumentan de forma significativa la resistencia a compresión del hormigón, con lo cual se han impulsado nuevas líneas de investigación para optimizar las proporciones de estos materiales y poder conseguir las mejores prestaciones.

El presente trabajo busca la optimización de una mezcla de mortero de ultra altas prestaciones.

Para alcanzar la mezcla buscada, se procederá a la variación de diversos parámetros tales como: el contenido de cemento (volumen de pasta con respecto al volumen de árido), relación agua-cemento, uso de adiciones (metakaolin, humo de sílice, nanosilice), velocidad y tiempo de mezclado. Se estimarán las resistencias a compresión con las diversas variaciones de los parámetros antes mencionados a una edad de 2, 7 y 28 días.

Se plantea estudiar la influencia de todos los parámetros mencionados en la resistencia a compresión, así como las posibles combinaciones que se puedan hacer con ellos. Además de estudiar la influencia del superplastificante en la resistencia a compresión. Para alcanzar el contenido óptimo de superplastificante, se procuró encontrar el mismo diámetro de torta.

Más allá de la resistencia, se quiere estudiar la microestructura de las muestras, en términos de porosidad e hidratación del cemento, entre otros. Se busca obtener las cantidades óptimas del contenido de cemento, relación agua-cemento, contenido y combinaciones de las adiciones, velocidades y tiempos de mezclado y el porcentaje de super plastificante para alcanzar la resistencia a compresión deseada.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	2
CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE	4
2.1 Definición	4
2.2 Empaquetamiento.....	9
2.3 Componentes	13
2.4 Morteros con adiciones de metakaolin, humo de sílice y nanosilice. Antecedentes	19
CAPÍTULO III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	21
3.1 Introducción	21
3.2 Materiales empleados.....	21
3.2.1 Cemento	21
3.2.2 Agua.....	21
3.2.3 Arena	22
3.2.4 Adiciones	22
3.3 Probetas	22
3.4 Procedimiento experimental.....	23
3.4.1 Ensayos en mortero	23
3.4.2 Ensayo de resistencia a compresión	23
CAPÍTULO IV. RESULTADOS	24
4 Resistencia a compresión.....	24
4.1 Valores obtenidos al variar el número de golpes por capa.....	26
4.2 Valores obtenidos al variar el contenido de cemento	27
4.3 Valores obtenidos al variar la relación a/c.....	28
4.4 Valores obtenidos al variar las proporciones de las adiciones (MK, SF y nS) utilizadas por separado	29
4.5 Valores obtenidos al combinar MK y SF con nS	30
4.6 Valores obtenidos al combinar entre sí todas las adiciones utilizadas.....	32
4.7 Valores obtenidos al variar el contenido de SP.....	34
4.8 Valores obtenidos al variar el orden y tiempo de mezclado.....	37
CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	38
5.1 Número de golpes por capa:	38
5.2 Contenido de cemento.....	39
5.3 Relación agua/cemento (a/c)	40
5.4 Utilización de adiciones: Metakaolin (MK), humo de sílice (SF) y nanosilice (nS)	42

5.5 Comparación con diferentes contenidos de SF.....	43
5.6 Comparación entre dos tipos diferentes de nS.....	44
5.7 Comparación con diferentes contenidos de MK y nS	46
5.8 Comparación con diferentes contenidos de SF y nS	47
5.9 Comparación con diferentes proporciones de SF y MK	49
5.10 Efecto del superplastificante en la resistencia a compresión	51
5.11 Orden y tiempo en mezclado de los componentes de la mezcla.....	53
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES.....	55
CAPÍTULO VII. DESARROLLOS FUTUROS.....	56
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Nomenclatura de las mezclas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.	25
Tabla 2 : Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el número de golpes por capa.....	26
Tabla 3: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de cemento. Fuente: Elaboración propia.	27
Tabla 4: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la relación a/c. Fuente: Elaboración propia.	28
Tabla 5: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK, SF y nS por separado. Fuente: Elaboración propia.	29
Tabla 6: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK, SF y nS por separado. Fuente: Elaboración propia.	29
Tabla 7: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK con nS y SF con nS. Fuente: Elaboración propia.	30
Tabla 8: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK con nS y SF con nS. Fuente: Elaboración propia.	31
Tabla 9: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK y SF. Fuente: Elaboración propia.	32
Tabla 10: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK, nS y SF. Fuente: Elaboración propia.	33
Tabla 11: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.	34
Tabla 12: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,20. Fuente: Elaboración propia.	35
Tabla 13: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,21. Fuente: Elaboración propia.	36
Tabla 14: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el orden y tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Resistencia a compresión promedio al variar el número de golpes por capa. Fuente: Elaboración propia.....	26
Figura 2: Resistencia a compresión promedio. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 3: Resistencia a compresión promedio al variar la relación a/c. Fuente: Elaboración propia.	28
Figura 4: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS por separado. Fuente: Elaboración propia.....	30
Figura 5: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK con nS y SF con nS. Fuente: Elaboración propia.	31
Figura 6: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK y SF. Fuente: Elaboración propia.	32
Figura 7: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, nS y SF. Fuente: Elaboración propia.	33
Figura 8: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.	34
Figura 9: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.	35
Figura 10: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,21. Fuente: Elaboración propia.	36
Figura 11: Resistencia a compresión promedio al variar el orden y tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.	37
Figura 12: Resistencia a compresión promedio al variar el número de golpes por capa. Fuente: Elaboración Propia.	38
Figura 13: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de cemento. Elaboración propia.	39
Figura 14: Resistencia a compresión promedio al variar la relación a/c. Fuente: Elaboración propia.	40
Figura 15: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK. Fuente: Elaboración propia.	42
Figura 16: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de SF. Fuente: Elaboración propia.	43
Figura 17: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de nS. Fuente: Elaboración propia.	44
Figura 18: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 19: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK y nS. Fuente: Elaboración propia.	46
Figura 20: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de SF y nS. Fuente: Elaboración propia.	47
Figura 21: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS. Fuente: Elaboración propia.	48
Figura 22: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK y SF. Fuente: Elaboración propia.	49

Figura 23: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 24: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.....	51
Figura 25: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,20. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 26: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una la relación a/c de 0,21. Fuente: Elaboración propia.....	52
Figura 27: Resistencia a compresión promedio al variar el orden y tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.....	54

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los avances tecnológicos en el ámbito de la ingeniería civil han sido muy notables, entre los cuales se encuentran el desarrollo de nuevos aditivos, adiciones, materiales de refuerzo, etc. Permite desarrollar elementos con mejores prestaciones a los utilizados en el pasado. Es cada vez más común en la sociedad moderna que todo avance tecnológico sea respetuoso con el medio ambiente, razón por la cual la alta durabilidad de los hormigones de ultra alta resistencia (UHPC) puede satisfacer esta necesidad.

Debido al alto contenido de finos y cemento, se puede reducir la cantidad de poros en las piezas de hormigón, impidiendo la entrada de agentes que puedan afectar con la vida útil de estos materiales. Esto permite fabricar elementos estructurales que alcanzan altas resistencias y durabilidad. Elementos más ligeros con lo cual se pueden llegar a construir estructuras singulares y más complicadas de hormigón armado. Además, se pueden alcanzar altas resistencias tempranas con lo cual se puede acelerar, de forma muy importante, la velocidad de construcción de las nuevas estructuras, sobre todo aquellas que utilizan elementos prefabricados.

Entre el uso más común dado a estos hormigones de alta resistencia se encuentra su utilización en la fabricación de puentes de uso peatonal, la cual presenta muchas ventajas a aquellos construidos de acero, entre las cuales se encuentra la durabilidad y el estado límite de servicio de vibraciones, al ser una estructura más rígida.

Las piezas de puentes prefabricadas también se encuentran dentro de sus usos más importantes, debido a que estas deben alcanzar altas resistencias iniciales para así poder acelerar su proceso constructivo. Las altas resistencias alcanzadas por estos materiales permiten utilizar elementos de menores dimensiones ante cargas importantes como es el caso de los puentes. Otra ventaja de este material cementoso es su alta durabilidad, característica fundamental en los puentes, ya que su vida útil suele ser elevada, alrededor de los 100 años. Su utilización sería ventajosa en ambientes sumamente agresivos, ya que presenta una alta durabilidad y resistencia contra agentes externos, tales como el ataque por cloruros, sulfatos y carbonatación.

El presente trabajo de fin de máster busca alcanzar un diseño de mezcla que permita alcanzar altas resistencias con métodos convencionales de dosificación y curado. Obtener resistencias de aproximadamente, 150 MPa, mediante un empaquetamiento óptimo de los áridos para alcanzar la durabilidad deseada y la resistencia deseada.

Es de suma importancia, en el estudio de materiales a base de cemento evaluar sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido. En cuanto al estado fresco se pueden evaluar las características reológicas del material y las propiedades más

significativas durante la puesta en obra, como lo son la fluidez y el escurrimiento o su resistencia a la segregación, debido a su alta influencia en el estado final del material.

El trabajo busca reducir el precio de realización de estos materiales (una de sus más importantes desventajas) al utilizar materiales y métodos de curado y dosificación convencionales, reduciendo así su precio.

Otra justificación importante del trabajo es diseñar una mezcla confiable que permita ser incluidas en los anejos de las normas actuales para darle confianza al resto de la comunidad de la utilización de este material. Además, de aportar una metodología de dosificación y curado estándar y fácil, que permita su fabricación industrializada.

El trabajo se encuentra estructurado de la siguiente forma: en el Capítulo I se presentará tanto la introducción como los objetivos. En el Capítulo II el marco teórico, en el Capítulo III se describe la campaña experimental, en el Capítulo IV los resultados obtenidos, en el Capítulo V el análisis de los resultados obtenidos y, por último, en los Capítulos VI y VII las conclusiones y las propuestas para trabajos futuros respectivamente.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general del trabajo es obtener la mezcla de mortero óptima para alcanzar las máximas resistencias a compresión, mediante la utilización de diversas adiciones tales como: humo de sílice (SF), metakaolin (MK) y nanosilice (nS). Además de variar la relación agua/cemento (a/c), contenido de cemento, superplastificante y tiempos de mezclado.

Será necesario la realización de ensayos para alcanzar el objetivo general mediante el análisis comparativo de las resistencias a 28 días obtenidas, por lo cual se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Encontrar el contenido óptimo de cemento, sin añadir adiciones y manteniendo la relación a/c constante.
- Buscar la relación a/c adecuada, partiendo con el contenido de cemento encontrado previamente.
- Utilizar las diferentes adiciones mencionadas, por separado y en diferentes proporciones con el fin de encontrar las mejores proporciones. Con el contenido de cemento y la relación a/c ya definidas.
- Combinar las mejores adiciones según el paso anterior manteniendo los demás parámetros fijos.
- Estudiar la influencia del número de golpes en el proceso de compactación con la resistencia a compresión final.

- Hallar la relación entre la resistencia a compresión de una mezcla con diversos contenido de superplastificantes, manteniendo los demás parámetros de la mezcla iguales.
- Determinar la influencia de la energía de mezclado en la resistencia a compresión de cada una de las muestras.

CAPÍTULO II. ESTADO DEL ARTE

2.1 Definición

Los morteros u hormigones de ultra altas prestaciones (UHPC) son definidos como un material con base de cemento que combina tres ventajas técnicas en un mortero: altas resistencias a compresión, posee un comportamiento dúctil debido a la presencia de fibras de acero, la especial selección de los áridos finos y áridos ultrafinos, trayendo como consecuencia un empaquetamiento muy denso de los materiales, alta durabilidad y fluidez [1].

El UHPC es un material de alto coste, por ello, puede ser considerado como una opción competitiva para aplicaciones estructurales, es necesario optimizar el diseño de estos. El UHPC trae consigo estructuras más livianas que minimizan las cantidades de hormigón y dan soluciones similares al acero [1].

Además, se ha comprobado que los elementos estructurales con resistencias a compresión del orden de 120 a 140 MPa proveen de óptimas soluciones entre la durabilidad, resistencia a la abrasión y coste. Este material innovador es caracterizado por el uso de componentes exclusivos y altos controles durante su producción [1].

Las primeras aplicaciones del UHPC fueron enfocadas al diseño y construcción de puentes peatonales prefabricados. Desde la construcción del puente peatonal de Sherbrooke en 1997 hasta la mayoría de los puentes peatonales y de carreteras construidos recientemente se han optimizado las propiedades del material, así como los métodos constructivos del mismo [1].

A pesar de que el número de aplicaciones va en aumento, el uso del UHPC es aún restringido para ciertas estructuras, principalmente en Francia, Alemania, Japón y Estados Unidos. Debido a las carencias de los códigos de diseño, el alto costo del material, cerca de diez veces más caro que el hormigón estructural, y la falta de conocimiento por parte de los ingenieros [1].

Para un uso extendido del UHPC es necesario el desarrollo de nuevos diseños que tomen completa ventaja de las propiedades mecánicas del UHPC para poder minimizar el volumen total de material además del costo. Para esto es necesario ajustar los diseños a sistemas estructurales y secciones transversales más eficientes. Esto solo es posible gracias a un profundo conocimiento del comportamiento mecánico, el cual debe ser reflejado en las guías de diseño y en los códigos [1].

Gran parte de las estructuras hechas con UHPC tienen métodos de producción patentados que fueron desarrollados por compañías o universidades. Sin embargo, esos productos son muy costosos o no están accesibles en el mercado [1].

Generalmente, la definición de altas prestaciones se usa para diferenciar los materiales estructurales de los convencionales, para poder optimizar una combinación de propiedades en términos de aplicaciones finales en la ingeniería civil. Las propiedades más interesantes son: resistencia, ductilidad, tenacidad, durabilidad, rigidez, resistencia térmica, además es necesario considerar el costo final del material y, sobre todo la producción de elementos estructurales [2]

El UHPC es aún un material internacionalmente no aceptado en las recomendaciones de diseño. Parcialmente, es debido a la poca información relacionada con el material. El uso de este material permite realizar elementos más esbeltos y vanos más grandes. Otros aspectos significantes en el diseño son el control de las fisuras y el uso de fibras como refuerzo de cortante. No es solo importante tener reglas de diseño para tales fenómenos sino tener reglas para hacerlos compatibles con los códigos actuales de hormigón estructural [2].

Es más ventajoso el desarrollo de estructuras híbridas basadas en la combinación del refuerzo tradicional, acero pretensado y fibras. Simplificaría mucho el trabajo de los ingenieros estructurales si se combinan las reglas de cálculo válidas para el hormigón convencional y el UHPC [2].

La administración federal de carreteras de los Estados Unidos ha investigado el uso de UHPC para la conexión de tableros en dovelas prefabricadas que están fuertemente pretensadas. Debidos a los altos costes del material es de suma importancia el desarrollo de métodos efectivos para reducir el efecto económico usando materiales y métodos de producción convencionales [3].

La obtención de dicho material se logra con la combinación de altos contenidos de cemento, baja relación agua/cemento, empleo de agentes modificadores de viscosidad, eliminado el árido grueso e incorporando altos volúmenes de fibras de acero. Sin embargo, los altos contenidos de cemento poseen muchos retos en términos de durabilidad y sostenibilidad. Esto ha llevado a usar una variedad de adiciones para sustituir el cemento tales como: cenizas volantes, humo de sílice, escorias de altos hornos y metakaolin. Contrariamente a los hormigones de altas prestaciones en los que limita el contenido de humo de sílice o metakaolin a un contenido menor que el 10 % de la masa de cemento, los UHPC pueden contener proporciones mucho mayores de tales materiales para alcanzar altas prestaciones mecánicas [3].

Tales incrementos de los materiales traen un aumento del coste final. La presencia de grandes cantidades de materiales finos induce la retracción, resultando en un incremento de las grietas a corta edad. El uso de materiales de rellenos inertes es una estrategia atractiva ya que la baja relación agua/cemento usadas en los UHPC resulta en que solo una porción del cemento es hidratado. Otros aditivos y adiciones menos comunes utilizadas son: nanosilice, nanometakaolin, cenizas de cáscaras de arroz y nanofibras de carbono [3].

El UHPC es un material cementoso compuesto con una granulometría con una gradación optimizada, relación agua-cemento menor que 0,25 y un alto porcentaje de

fibras colocadas aleatoriamente. Las propiedades mecánicas del UHPC incluyen resistencias a compresión mayores a 150 MPa y una resistencia residual mayor que 5 MPa. El UHPC tiene una distribución discontinua de poros que reduce el ingreso de líquidos, aumentando significativamente la durabilidad de estos hormigones comparados con los hormigones convencionales [4].

El UHPC está siendo considerado para ser usado en una gran variedad de aplicaciones en infraestructuras de carretera. Los altos valores de resistencia a tracción y a compresión permiten el rediseño y optimización de elementos estructurales. Entre otros de sus usos se encuentra en la aplicación a puentes de hormigón pretensado, por lo general permite eliminar la armadura de acero de tales elementos. Entre otros de sus usos se encuentra en losas nervadas de dos direcciones para conseguir aligerar el peso de éstas [4].

El UHPC está demostrando excepcionales rendimientos cuando se utiliza como elemento de unión entre piezas prefabricadas, sobre todo el empleo en tableros de puentes tanto las uniones horizontales como verticales [4].

Otras aplicaciones en las cuales se está estudiando estudiar el UHPC es en pilares de prefabricados, pilotes en zonas sísmicas, en reparaciones de tableros de puentes deteriorados [4].

Los UHPC son muy similares a los hormigones convencionales utilizados actualmente. Gran parte de las hormigoneras pueden ser capaces de fabricar UHPC. Sin embargo, debe ser reconocido que el material en estudio requiere mayor energía por lo cual debe ser aumentado el tiempo de mezclado. Tal incremento de energía, en combinación con la reducción o eliminación del árido grueso y el bajo contenido de agua, se requiere el uso procedimientos diferentes para asegurar que el UHPC no se sobrecaliente durante el mezclado. Una solución puede ser utilizar mezcladores de gran energía o por bajas temperaturas las cuales pueden conseguirse reemplazando total o parcialmente el agua por hielo. Estas consideraciones permiten realizar el procedimiento en mezcladoras convencionales, incluido los camiones de premezclado [4].

Una de las principales aplicaciones para desarrollar mezclas de UHPC, fue para poder producir elementos de hormigón prefabricado. Estas demuestran excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad. Los anclajes no metálicos deben ser usados como parte del sistema de postensado el cual no presenta problemas de corrosión. Algunas muestras de UHPC incorporan microfibras de carbono. La microestructura es fundamental para explicar cómo es posible que este material presente prestaciones tan elevadas comparadas con otros tipos de hormigones [5].

Se ha demostrado que en las zonas de transición entre el árido y la pasta de los UHPC tienen un pequeño espesor comparados con los hormigones convencionales. Las microfisuras en las proximidades de los áridos son muy pequeñas, estas suelen ser originadas al momento de preparación de la mezcla. La reducción en el ancho de la zona de transición puede indicar un buen desarrollo en el enlace del árido y la pasta [5].

Los UHPC utilizan relaciones agua/cemento muy bajas, aunado con las altas temperaturas de curado crean un ambiente favorable para las reacciones puzolánicas [5].

Al diseñar una mezcla de hormigón, una de las propiedades más importante a ser consideradas, además de las propiedades mecánicas es la durabilidad. Un hormigón durable debe ser capaz de resistir cualquier ataque químico, físico o biológico que intente dañar al hormigón a lo largo de su vida útil [6].

Existen muchos agentes y condiciones ambientales que pueden afectar la armadura de las estructuras de hormigones o de elementos prefabricados. Actualmente existen muchos problemas aún no resueltos relacionados con la durabilidad química o física del hormigón en especial cuando se aplican adiciones [6].

Debido a la alta resistencia a compresión de los UHPC, se puede reducir las secciones de los elementos a un tercio o a la mitad de los hormigones convencionales, con lo cual se logra reducir el peso propio de los elementos para los mismos estados de carga. Esta reducción en el peso propio propicia la construcción de elementos estructurales más esbeltos, incrementando el espacio utilizable en edificios altas y reduce los costes totales de ejecución. Eliminando el acero de refuerzo se reducen los costes de ejecución proveyendo una gran libertad a los arquitectos, permitiendo una amplia variedad de formas en los elementos estructurales [7].

La elevada cantidad de materiales conglomerantes, cerca de 800-1000 Kg/m³, afecta no solo los costes de producción sino también aumenta el calor de hidratación causando problemas de retracción. El calor de hidratación de estos materiales los hace utilizables, sobre todo, en elementos prefabricados [7].

Durante las pasadas décadas se ha intentado desarrollar materiales a base de cemento de ultra altas prestaciones. Sin embargo, su proceso de fabricación es complicado y requiere de sumo cuidado, además que representa un alto costo [8].

Se han llegado a desarrollar componentes que incrementan la finura y la reactividad desarrollando polvo de hormigón por medio de tratamientos térmicos. Estos hormigones de altas prestaciones poseen alto contenido de partículas finas, bajas relaciones agua-cemento, uso de humo de sílice y superplastificante [8].

La producción de estos materiales, usualmente, utilizan curados térmicos a una temperatura de 90° o mayores, mezclado al vacío y altas presiones antes y durante del hormigonado. A pesar de que los procedimientos antes descritos contribuyan a mejorar las cualidades mecánicas, disminuye la eficiencia de producción y una alta energía consumida durante su elaboración [8].

Antes de la utilización masiva de los UHPC existen aún numerosos retos a superar, empezando por el retraso en la implementación de métodos de ensayo estándares, códigos de diseño para los ingenieros y por los métodos de control y manufacturación [8].

La estructura de poros juega un papel fundamental en la resistencia de los materiales a base de cemento. La distribución de los poros, la forma y la posición también son importantes, pero es difícil incluir todos estos parámetros. Muchos ensayos han confirmado que una predicción aceptable de la resistencia puede ser determinada usando la porosidad total [8].

Recientes trabajos acerca de la formulación y fabricación de los UHPC han sido llevados a cabo, demostrando las remarcables propiedades mecánicas y de durabilidad. Sin embargo, actualmente hay pocas aplicaciones de estos materiales y su implementación sigue siendo excepcional, debido, principalmente, a su elevado costo [16].

Debido a sus excepcionales características y propiedades el humo de sílice, inicialmente considerado como un desecho industrial, se ha convertido en un producto muy competente, cuya demanda está aumentando constantemente, como resultado de esto este producto es muy costoso. Sin embargo, hay disponibles en el mercado variedades de humo de sílice más económicos en la forma de polvo gris oscuro. Pero su uso se ve afectado cuando las condiciones estéticas requieren una tonalidad de acabado más claro [16].

Los UHPC fueron desarrollados a través de técnicas que mejoran la microestructura de los materiales cementosos. Comparados con materiales cementosos convencionales la mejora primordial de los UHPC es: homogeneidad entre los tamaños de las partículas, porosidad y microestructura [10].

Las propiedades mecánicas pueden alcanzar propiedades entre las cuales están incluidas: una resistencia a compresión entre 200 - 800 MPa, energía de fractura del orden de 1200 a 40000 J/m² y una deformación última a tracción de aproximadamente el 1%. Esto se alcanza, generalmente, con enfoque específico en la ingeniería microestructural, la eliminación de los áridos gruesos, reducción de la relación agua-cemento, introduciendo componentes silíceos e incorporando fibras de refuerzo [10].

El humo de sílice tiene gran efecto en la densificación de la matriz cementosa, gracias a un denso empaquetamiento denso de las partículas, así como la intensa reacción química debido a la reacción puzolánica y a la hidratación del silicato [10].

Se demostró en el estudio que la relación óptima entre el humo de sílice y el cemento es entre el 20% y 30% [10].

2.2 Empaquetamiento

Para la selección de los materiales brutos, es importante asegurar un adecuado empaquetamiento de las partículas para alcanzar una microestructura densa, lo cual es crucial para las características mecánicas y del material [3].

El empaquetamiento es función del tamaño de las partículas y su distribución. El tamaño y distribución de las partículas influyen en la reología [3].

Se asume la premisa que para bajas relaciones agua/cemento solo una fracción de las partículas de cemento serán hidratadas, mejorar el empaquetamiento a través del uso de adiciones y rellenos finos trae mejores resultados en términos de resistencia que el aumento del contenido de cemento. Con una mejor reología se consigue una mejor dispersión de los granos, consiguiéndose una mejor hidratación para bajos contenidos de agua y por consiguiente un aumento de las propiedades mecánicas [3].

Para determinar el volumen de poros y el diámetro crítico de estos se utiliza la porosimetría por intrusión de mercurio luego de 28 días de la hidratación. Pequeñas muestras cilíndricas, con un diámetro de 10 mm fueron pretratadas en un horno de 60°C por 2 horas. Esta metodología arrojó buenos resultados para muestras cementosas. El ensayo se realiza en dos pasos, un primer paso que evacua vapor a baja presión, se rellena la muestra con mercurio hasta alcanzar una presión de 345 kPa, y luego llegar hasta una presión, aún más alta de 414 MPa. La relación entre el diámetro de los poros y la presión de vapor es dada por la ecuación de Washburn, con la cual se calcula el diámetro de los poros. El valor crítico del tamaño de poros es definido como el tamaño en el cual, la máxima cantidad de mercurio penetra, dado por el pico máximo de la curva volumen introducido vs diámetro [3].

Una evaluación de la reología de suspensiones cementosas ayuda a entender las características de fluidez en pastas de cortas edades de evolución. Las pastas de cemento son fluidos con tensiones plásticas, donde la tensión plástica es consecuencia de las fuerzas de atracción de las partículas. Las fuerzas de atracción entre las partículas están influenciadas por el tamaño de ellas y por el empaquetamiento. La tensión plástica es definida como una tensión diferente de cero y cuya deformación es cero y depende del tiempo y de la historia de cortantes. La viscosidad plástica de las partículas en suspensión es influenciada por el rozamiento entre las partículas y la superficie de contacto. La fuerza de fricción decrece, incrementando el espaciamiento entre partículas (o disminuyendo la superficie de contacto) resultando en una reducción de la viscosidad plástica [3].

Para caracterizar de una forma sencilla la fluidez de suspensiones cementosas se mide el radio (o área) de escurrimiento en una muestra fresca. El radio de escurrimiento de la pasta ha sido relacionado con la tensión plástica usando el volumen de la muestra, una constante derivada de la energía de la interfase liquido-vapor y el ángulo del material mojado sobre la base de un plato horizontal [3].

La sustentabilidad y economía de los UHPC depende, entre otras cosas, de los parámetros óptimos de reología y de la densidad del empaquetamiento de la microestructura. El empaquetamiento influye en la reología y de las propiedades mecánicas y de durabilidad, y la reología contribuye con la trabajabilidad y la evolución de las características a cortas edades, lo cual influencia las propiedades de las edades posteriores [3].

El diámetro de poros críticos es determinante para la durabilidad del hormigón. El tamaño de los poros es resultado de la reactividad de los materiales que reemplazan al cemento. Las muestras que contienen escorias de altos hornos muestran menor porosimetría y tamaño de poros más pequeños comparados con aquellos que poseen cenizas volantes, debido a su capacidad de reaccionar primero [3].

A partir de este trabajo se puede comprobar que la cantidad de nanosilice y la demanda de superplastificantes son proporcionales. Sin embargo, el uso de aditivo superplastificante produce burbujas en el hormigón que son directamente proporcional al contenido de aditivo. Estas burbujas pueden estar distribuidas a lo largo de la masa de hormigón, y en estas zonas, las cuales son más débiles, tiende a haber una concentración de tensiones lo cual significa una disminución de las propiedades mecánicas [6].

El uso de nanosilice aumenta la resistencia a compresión de los UHPC y dicho incremento es mayor mientras de mayor es la calidad de la nanosilice [6].

Es posible aseverar que mayores resistencias a compresión son alcanzadas cuando la mezcla tenga una distribución uniforme, desde los tamaños más finos provenientes de las adiciones hasta llegar a los más gruesos debidos al árido. Una distribución adecuada en tamaño de los componentes del hormigón genera una mejora en la densidad de empaquetamiento, una disminución de la demanda de agua con relación a mezclas con la misma cantidad de adiciones, utilizando solo nanosilice [6].

En mezclas que contengan nanosilice, resultan hormigones con una mayor compacidad y por ende aumenta la durabilidad. Lo cual conlleva a una reducción de la posibilidad de carbonatación, ciclos hielos-deshielos y una pequeña capacidad de absorción capilar, lo cual puede prevenir la penetración de agentes agresivos, llegando a aumentar la vida útil del hormigón [6].

La mejora en las propiedades mecánicas y de durabilidad es alcanzada gracias al contenido de nanosilice, ya que este refina los poros debido a las reacciones puzolánicas y al empaquetamiento [6].

La reducción de los poros es proporcional al contenido de nanosilice. Además, la microestructura contiene una menor porosidad con el mismo contenido promedio del tamaño de poros con respecto a hormigones sin adiciones [6].

El UHPC es diseñado para una densidad de empaquetamiento muy alto y para el uso de materiales puzolánicos. Estos materiales tienen muy poca porosidad, especialmente la porosidad continua. Para un UHPC con una relación agua-cemento de

0.20, los poros capilares se tornan discontinuos cuando solo el 26% del cemento es hidratado, en vez del 54% para una relación agua-cemento de 0.33. El tamaño de los poros varía, básicamente, entre 2 y 3nm, el diámetro de poros más probable es de 2.0nm lo cual es una porosidad del 2.23%. El rango del tamaño de los poros disminuye entre 3.75nm y 100 μm cuando la temperatura del curado varía entre 150 y 200° [7].

Los UHPC están compuestos de áridos y una matriz compacta incluyendo los productos de hidratación, los compuestos deshidratados como el Clinker del cemento y las partículas de polvo. La interfaz reactiva está formada entre los productos de hidratación y los de hidratación incompleta. El núcleo juega un papel importante en el esqueleto de la matriz [7].

El uso de cenizas de cáscaras de arroz incrementa el porcentaje de cemento hidratado para edades tardías, lo cual es hasta 8 veces mayor a las muestras que contienen humo de sílice. Ambas adiciones (cenizas de cáscaras de arroz y humo de sílice) reducen en gran medida el contenido de hidróxido cálcico donde el efecto es mayor para las muestras que contienen humo de sílice que aquellas con cenizas de cáscaras de arroz a edades tardías [7].

Una de las características más importantes de estos hormigones es la trabajabilidad ya que es la clave para la consolidación del hormigón en estado fresco. Los UHPC deben ser preparados con cementos con una buena combinación de superficie específica de C_3A , contenido de SO_3 y cantidad de alcalinos. El efecto del humo de sílice en la trabajabilidad de los UHPC es relativamente complicado. Se ha demostrado que el humo de sílice puede aumentar la trabajabilidad de estos materiales y la cantidad óptima de humo de sílice está entre el 10 y el 20%. Sin embargo, el humo de sílice disminuye la trabajabilidad. Las conclusiones pueden diferir de las diferentes características de la materia prima. La adición de cáscaras de arroz, la cual tiene una forma angular y una estructura porosa, absorbe cierta cantidad de agua lo cual se traduce en una disminución de la trabajabilidad [7].

La combinación de humo de sílice con cenizas de cáscaras de arroz puede mejorar la trabajabilidad de las mezclas de UHPC. Reemplazar el cemento por un relleno de caliza, minimiza la incompatibilidad entre el cemento y el superplastificante, lo cual es problemático para mezclas de UHPC con una relación agua-cemento baja. La presencia de nanosilice disminuye la cantidad de agua disponible de agua para la lubricación de las partículas y aumenta las tensiones y la viscosidad plástica en el hormigón. Además, la nanosilice reduce la fluidez del UHPC en estado líquido [7].

La porosidad y la distribución del tamaño de poros puede ser mejorada mediante el uso de superplastificantes, incorporando materiales muy finos y aumentando el empaquetamiento de los materiales base, lo cual se refleja en un aumento de la resistencia y durabilidad del hormigón [8].

Es conocido que al disminuir la relación agua-cemento se consigue reducir la porosidad incrementado la resistencia de los materiales a base de cemento. El uso de

superplastificante puede reducir significativamente la relación agua-cemento dando trabajabilidad, lo cual reduce eficazmente la porosidad y aumenta la resistencia [8].

Los UHPC tienen una densa y uniforme microestructura debido, fundamentalmente, a las siguientes razones: (1) empaquetamiento óptimo de las partículas sólidas; (2) reacciones puzolánicas y de hidratación en la pasta de cemento; (3) una notable mejora en la interfaz entre los áridos y la pasta de cemento [8].

Bajas relaciones en la relación agua-cemento se traducen en una baja porosidad que restringe el espacio disponible para el crecimiento de los cristales de hidróxido cálcico [8].

La interfaz en la zona de transición entre los áridos y la pasta de cemento, así como el contenido de hidróxido cálcico, representan los puntos más débiles en los hormigones convencionales. A través de diversos ensayos se ha llegado a comprobar que la interfaz árido-pasta de cemento es muy porosa, sin embargo, gracias al bajo valor de la relación agua/cemento y a las reacciones puzolánicas entre el hidróxido cálcico y los minerales reactivos, lo cual consume la mayor cantidad de los cristales de hidróxido cálcico convirtiéndolo en C-S-H, siendo la interfaz más densa. La estructura homogénea es muy importante para un excelente comportamiento de los UHPC [8].

Los UHPC son utilizados en construcciones en las cuales los hormigones convencionales no puedan cumplir con las especificaciones técnicas o arquitectónicas. Al utilizar los UHPC se pueden crear una amplia variedad de piezas ligeras de diversas forma, las cuales reducen el coste y el tiempo de ejecución de la obra [29].

Cada vez mayor número de aplicaciones de los UHPC están siendo realizadas. Especialmente en puentes, red de fachadas o techos, los cuales están siendo apreciados por los arquitectos en los tiempo representes [29].

Desde el punto de vista de la sostenibilidad, los UHPC contienen tres veces más cemento por m³ que los hormigones convencionales, por lo tanto, usar tres veces más energía, produce tres veces más de emisiones de CO₂ [29].

En los UHPC la relación agua/cemento suele ser de entre 0,15-0,21 por lo tanto se ve en la necesidad de utilizar superplastificantes para aumentar la trabajabilidad. Un gran número de ensayos ha demostrado que los superplastificantes más eficientes son los policarboxilatos, para este tipo de hormigones [29].

2.3 Componentes

Materiales básicos utilizados en los UHPC:

Componentes cementosos: el contenido de cemento es, generalmente, entre 800-1100 Kg/m³. Los altos contenidos de cemento no solo afectan el costo de producción, sino también el calor de hidratación.

Cemento Portland: estos cementos tienen un bajos contenidos de álcalis, de bajo a media finura y poco contenido de hidróxido de cálcico, los cuales reducen el contenido de agua, la formación de ettringita y el calor de hidratación. Los cementos ASTM 52.5 tipo I o II son recomendados para ser usados en los UHPC.

Aditivos: son componentes de naturaleza orgánica (resinas) o inorgánica, la cual se incluye en las mezclas de hormigón con la finalidad de modificar las propiedades físicas de los materiales conglomerados en estado fresco. Su utilización no debe superar el 5% del peso del cemento.

Los aditivos suelen tener dos funciones principales, la primera se basa en modificar la característica relacionada al tipo de adición utilizada. Y la segunda, modificar otras de las características del material independientemente de la función principal [33].

Adiciones: suelen ser materiales inorgánicos, puzolánicos o con la capacidad hidráulica latente que se añaden al mortero para así poder mejorar algunas características físicas o químicas de estos o conferirles algunas especiales [33].

Las adiciones inactivas suelen ser aquellas que funcionan como fillers, es decir, no mejoran las propiedades del cemento, en cambio aumenta la resistencia de los morteros al ser materiales pequeños y rellenan los espacio vacíos del hormigón [33].

Las adiciones pueden ser puzolanas naturales, cenizas volantes, microsílíce o humo de sílice, escorias de altos hornos, etc. Actualmente se conoce como puzolana a cualquier material de carácter silíceo muy amorfo y en tamaños muy pequeños que reaccionan con la cal libre del cemento y el agua para formar silicatos cálcicos hidratados, con lo cual incrementan notablemente las propiedades mecánicas del cemento [33].

La propiedad puzolánica o puzolanicidad es la capacidad de reaccionar en presencia de humedad con hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos de propiedades cementantes. Las puzolanas por si solas pueden o no tener propiedades cementantes, es decir, que necesiten estar mezcladas para que reaccionen [33].

Humo de sílice: es un producto industrial proveniente de la producción del ferro-sílice y su diámetro típico es de 0.2 μm . Es parte fundamental de los UHPC. En 1993, Richard et [9] al, propusieron un contenido de humo de sílice de cerca del 25% en peso del cemento Portland. Chan [10], concluyó que, el contenido óptimo se encuentra entre 20-30%. Otros investigadores encontraron que el contenido adecuado es 30-35% del contenido de cemento para UHPC para resistencias de 200 MPa.

Sin embargo, el contenido óptimo de humo de sílice es altamente dependiente de la relación agua-cemento, por lo tanto, una baja relación agua-cemento requiere un contenido menor de humo de sílice.

El humo de sílice, sin embargo, tiene un inconveniente. El contenido de carbono puede disminuir la fluidez del UHPC. Altos contenidos de carbón sin quemar, en el humo de sílice pueden resultar en un color superficial oscuro en el hormigón, lo cual representa un problema estético.

Nanosilice: es una nanopartícula que se comercializa en estado líquido debido a su pequeño tamaño, el cual tiene un aspecto turbio y ligeramente viscoso, compuesto a base de sílice con partículas de tamaño nanométrico [33].

Esta formada por nanopartículas de entre 1-500 nm de SiO_2 amorfa. El tamaño, la distribución de tamaños y el área superficial específica son parámetros que se definen de acuerdo con el proceso de síntesis. Tiene la propiedad de aumentar las resistencias iniciales y finales de las mezclas, se utiliza en dosis variadas desde 0,3-7% del peso del cemento [33].

Tiene el efecto de producir gel de tobermorita (CSH), por lo cual se suele considerar una productora de nanocemento, también incrementa las cadenas de silicatos, rellenando los poros e incrementando las propiedades mecánicas de los morteros y hormigones [33].

Escorias de altos hornos granulares: ha sido utilizada como un suplemento en los materiales cementosos en el hormigón por varios años. Yazici [11], preparó hormigones con cemento Portland reemplazándolo con contenidos de 20%, 40% y 60% de este material. La resistencia a compresión en el hormigón con altos volúmenes de escorias de altos hornos, resultaron superiores a los 250 MPa, luego de un curado en autoclave. Cuando una presión externa es aplicada se pueden llegar a alcanzar resistencias de 400 MPa.

Cenizas volantes: es un producto del polvo de carbón y consiste en un producto esférico. Es usualmente combinado con escorias de altos hornos, humo de sílice, entre otros. Yazici et al. [12,13], encontraron que la resistencia a compresión de UHPC, con altos contenidos de cenizas volantes y escorias de altos hornos alcanzaron resistencias de alrededor de 200 MPa luego del curado en una cámara de curado estándar, 234 MPa luego de un curado de vapor y 250 MPa para un curado en autoclave. La combinación de escorias de altos hornos y cenizas volantes pueden incrementar la resistencia a flexión y mejorar la tenacidad del hormigón bajo cualquier método de curado.

Sin embargo, disminuye el módulo de elasticidad del hormigón, especialmente para sustituciones mayores al 30% del contenido de cemento.

Metakaolin: es fabricado calcinando la arcilla. Es un reactivo puzolánico y es principalmente controlado por las temperaturas de calcinación [14]. El uso de metakaolin pueden disminuir la retracción, refinar la estructura de poros y mejorar las resistencia tempranas y la durabilidad del hormigón. Zheng [14] y Ma [15] prepararon muestras de UHPC con contenidos de metakaolin. Encontraron que, la resistencia a compresión disminuye al aumentar la proporción de metakaolin. Tafraoui et al. [16] encontraron que la sustitución del humo de sílice por metakaolin condujo a un ligero aumento de la resistencia a flexión y a una pequeña reducción de la resistencia a compresión.

Polvo de caliza: es un mineral no puzolánico, su uso puede incrementar la fluidez del hormigón [17,18]. Wang et al. [19] encontraron que UHPC que contengan: cemento, humo de sílice, escorias de altos hornos y polvo de caliza demostraron excelente fluidez. Hormigones con contenidos del: 20% de polvo de caliza, 10% de humo de sílice y 20% de escorias de altos hornos tienen una mayor resistencia a compresión que los hormigones sin polvo de caliza, debido a la aceleración de hidratación del cemento y el humo de sílice, lo cual favorece la mejora en la estructura y en el desempeño del hormigón [20].

Polvo de escoria de acero: es un producto generado en los procesos de fabricación del acero. Ning [21] preparó un hormigón sustituyendo parte del contenido de cemento por polvo de escoria de acero, alcanzando resistencia en torno a los 197 MPa luego de un curado de autoclave. Al reemplazar parte del cemento con este material se encontraron hormigones más fluidos. Es importante resaltar que los regímenes de curado tienen un gran efecto en el desarrollo de la resistencia del hormigón con polvo de escoria de acero debido a que, las altas temperaturas estimulan la actividad del polvo de escoria.

Cenizas de cáscaras de arroz: es un desperdicio de la agricultura y se obtiene al quemar cáscaras de arroz. Cuando las cáscaras son incineradas a condiciones controladas, representan un contenido de 90-96% de sílice amorfo y puede ser considerado como un activo altamente puzolánico. Tuan et al. [22,23] encontraron que los UHPC que contengan cenizas de cáscaras de arroz de tamaños entre 3.6 y 9 μm , alcanzaban resistencias a compresión que superaban los 150 MPa luego de un régimen de curado convencional. Las muestras que contenían, principalmente, tamaños de partículas de 3.6 μm alcanzaron resistencias de 180 MPa y 210 MPa a 28 y 91 días, respectivamente.

Tuan [22,23] también indicaron que UHPC en combinación con cenizas de cáscaras de arroz y humo de sílice mostraron una mayor resistencia a compresión que aquellas combinaciones que no contenían cenizas de cáscaras de arroz. El autor atribuyó este resultado al relleno físico y a los efectos del agua sobre las cenizas de cáscaras de arroz debido al tamaño de partícula se encuentra entre las partículas de cemento y

aquellas de humo de sílice. Esta estructura porosa tiene cierta capacidad para absorber el agua de la hidratación del cemento.

Ha et al. [24] encontró que la combinación de cenizas de cáscaras de arroz con cenizas volantes mejoraba no solo la autocompactabilidad, sino también la resistencia a compresión. La mezcla contenía un 20% de cenizas volantes y un 10% de cenizas de cáscaras de arroz demostró una mayor autocompactabilidad y resistencia a compresión que aquellas muestras que contenían cenizas volantes o cenizas de cáscaras de arroz por separado.

An et al. [25] sugirieron que las cenizas de cáscaras de arroz cuyo tamaño principal de partículas fuese de 7.41 μm , es posible sustituir completamente el humo de sílice. Ellos encontraron que, un relleno ternario compuesto por 65% de cemento, 15% de cenizas de cáscaras de arroz y 20% de escorias de altos hornos alcanzaban la máxima resistencia a compresión.

Áridos: generalmente, son relativamente económicos, con relación al costo global del hormigón. Arenas refinadas con diámetros menores que 0.6 mm fueron inicialmente utilizadas en los UHPC para alcanzar un mayor rendimiento, pero su coste resultó ser alto. Para reducirlo, residuos de vidrio reciclados, arenas naturales y áridos artificiales fueron utilizados para reemplazar las arenas refinadas.

El uso de residuos de vidrio reciclado disminuía la resistencia a flexión, compresión y la energía de fractura aproximadamente en un 15%, mientras que en las arenas naturales tenían propiedades mecánicas y dúctiles semejantes a las arenas refinadas.

Zhao et al. [26] utilizaron virutas de minerales de hierro para reemplazar la arena natural en varios niveles. Cuando el contenido de relaves resultaba menor que el 40%, los UHPC demostraron propiedades mecánicas comparables a los especímenes de control luego de 90 días en una cámara de curado convencional.

Luego de dos días de curado al vapor, la resistencia a compresión disminuyó en un 11% mientras que la resistencia a flexión aumentó en un 8%.

Los virutas de minerales de hierro tienen el potencial de ser usados como áridos finos en los UHPC porque son relativamente inertes y el tamaño de partículas es significativamente mayor que aquellos de cemento.

Collepari et al. [27] usaron basalto triturado con diámetros menores que 8 mm para reemplazar parte de la arena refinada para producir los UHPC y obtuvieron resultados comparables de resistencia.

Monosi et al. [28] probaron con Clinker Portland con tamaños de partículas similares a la distribución del cuarzo natural fino (100-400 μm) y calizas de (0.1-8 mm) respectivamente como áridos. Ellos encontraron que la resistencia a compresión incrementaba cerca de 20 MPa cuando áridos en base al Clinker fueron utilizados en vez de áridos naturales.

Superplastificantes: generalmente la relación típica agua-cemento es de 0.14-0.20. Los policarboxilatos son los superplastificantes más efectivos para los UHPC. Se estudió que la longitud de la cadena influye principalmente en el tiempo de retardo de fraguado y la trabajabilidad es controlada por la densidad de la cadena.

Courtial [29] investigó el efecto de los policarboxilatos en un rango de dosificación de 0.5 -2.0% en la microestructura del UHPC y encontraron que el contenido en la fase de clínques disminuía significativamente cuando la dosificación de policarboxilatos variaba entre 1.8 a 1.2%.

El procedimiento de adición del superplastificante juega un papel fundamental en la trabajabilidad en los UHPC en estado fresco. Una adición paso a paso resalta en gran medida el efecto de dispersión del superplastificante, e incrementa la fluidez del UHPC, comparado con las mezclas que adicionan el superplastificante directamente.

La compatibilidad entre el superplastificante y los materiales cementosos suele ser un problema. Schröfl et al. [30] estudiaron la interacción entre varios tipos de superplastificantes y el cemento, así como con el humo de sílice en UHPC.

Los autores encontraron que los superplastificantes con base de metacrilato interactuaban fuertemente con el cemento, mientras que los superplastificantes con base a allylether eran más efectivos con humo de sílice.

La combinación de dos tipos de superplastificantes demostró una mejor dispersión en la matriz de cemento que, cuando se utilizaban por separado.

Los UHPC con calizas como microfillers demostraron una buena fluidez que aquellos con metakaolin, cenizas volantes y microfillers con base en sílice para el mismo contenido de superplastificante.

Cuando se reemplaza el cemento por humo de sílice, en proporciones de 30% a 40%, se vio en la necesidad de incrementar el contenido de superplastificante drásticamente en un 1.43% a 2.38% [8].

La sustitución del humo de sílice por otros polvos ultrafinos de menor coste, cuya disponibilidad no supone ningún problema, lo cual soporta el desarrollo más sostenible de los UHPC en la industria del hormigón.

Existen en el mercado diversos tipos de polvos ultrafinos, con muchas características y desempeños acordes con su origen.

La sustitución en peso de humo de sílice por metakaolin hace posible la producción de UHPC con desempeños mecánicos similares a los hormigones con o sin cuarzo triturado, fibras metálicas o tratamiento al calor. Sin embargo, el tiempo de mezclado debe ser sensiblemente incrementado.

El tratamiento al calor y la presencia de fibras son los mejores parámetros que permiten obtener altas resistencias tanto a compresión como a flexión. La mejora es aún más notable cuando se utiliza metakaolin, que cuando se utiliza humo de sílice.

El cuarzo triturado es un parámetro tan importante en la formulación de los UHPC, con lo que respecta a la resistencia a flexión, pero ayuda a aumentar la resistencia a compresión. No tiene una interacción significativa con el metakaolin.

La interacción de todos los componentes en los tratamientos de calor, son de suma importancia y no deben ser ignorados.

A pesar de que los resultados obtenidos haciendo uso del metakaolin son muy alentadores para la fabricación de los UHPC, sin embargo, debe ser estudiado y mejorar aún más los siguientes aspectos para poder definir a los UHPC como un material viable; la producción industrial ultrafina, su disponibilidad y su alto precio. Se puede considerar su color blanco como una ventaja estética, lo cual en el mundo actual va tomando día a día mayor importancia.

El estudio de la microestructura y la durabilidad debe ser el próximo paso que investigar para poder así desarrollar los conocimientos en relación con el comportamiento de estos hormigones que contienen metakaolin [16].

Los excelentes rendimientos de los UHPC en términos de durabilidad y resistencia se basan en la búsqueda de la mínima porosidad. Dos distintos puntos son combinados:

- Tamaño de los áridos. Richard y Cheyrery [9] demostraron que el tamaño de la fisura es proporcional al tamaño máximo del árido. Se puede considerar que el primer principio para diseñar UHPC es dividir el tamaño máximo del árido entre un factor igual a 100, resultando un tamaño de grano igual a 650 μm .
- Maximizar la densidad del empaquetamiento granular. En vez de utilizar los tres tamaños de granos convencionales: grava, arena y cemento. Los UHPC exhiben cuatro tamaños de granos: arena, cemento, cuarzo triturado y humo de sílice. El humo de sílice es añadido para rellenar el espacio vacío entre los granos más pequeños.

Para UHPC con resistencias a compresión entre 150-200 MPa, sin ningún tratamiento adicional, es resultado directo de la hidratación de los poros de la siguiente forma; debido a la baja relación agua-cemento, la capilaridad porosa desaparece en la zona de transición es rellena con C-S-H hidratado producido por la reacción puzolánica del humo de sílice.

Por encima de los 90°C ocurre la reacción puzolánica debido al cuarzo triturado, para temperaturas superiores a los 200°C se observa una disminución del espaciado de las capas de C-S-H.

Es aplicado un tratamiento a compresión realizado antes y durante del vertido, para poder eliminar las burbujas originas al momento de verter el hormigón, impidiendo la generación de fisuras debidas a la retracción.

Una importante propiedad de los UHPC es la capacidad de autocurado. El Clinker residual tiene la capacidad de reaccionar con el agua que escurre en las fisuras que aparecen durante la vida útil del material [29].

2.4 Morteros con adiciones de metakaolin, humo de sílice y nanosilice. Antecedentes

Los nuevos avances tecnológicos han permitido el desarrollo de nuevos materiales de tamaño nanométrico, con los cuales se ha conseguido sustituir parte del cemento, con la finalidad de alcanzar morteros con mejores propiedades tanto físicas como químicas. Por lo cual, en los últimos tiempos se han venido realizando ensayos utilizando estos nuevos materiales con la finalidad de obtener las proporciones óptimas para alcanzar las mejores prestaciones posibles.

Wang et al. [38] han encontrado que, al aumentar el contenido de cemento en una mezcla de mortero, la resistencia a compresión aumenta mientras más cantidad de este haya en la mezcla. De igual forma pudieron comprobar que al aumentar la relación a/c la resistencia de compresión disminuye a una edad de 28 días, sin embargo, para una relación del 0.16 y una edad de 90 días, aumenta la resistencia con respecto a aquella mezcla en la cual fue utilizado una relación de a/c del 0.14. Es importante destacar que, para una relación mayor de a/c (0.18), la resistencia a compresión a una edad de 90 días disminuye. Para todas las mezclas utilizadas han mantenido todos los demás parámetros de la mezclas constantes.

Autores como Zheng [14] y Ma [15] encontraron que la resistencia a compresión disminuye al aumentar la proporción de metakaolin. En concordancia con los resultados obtenidos por los autores antes mencionados Taфраoui et al. [16], también encontraron una disminución en la resistencia a compresión al sustituir humo de sílice con metakaolin.

Muhd Norhasri et al. [34] encontraron una mejoría en la resistencia de compresión en mezclas con diversos contenidos de MK comparadas con probetas sin ningún contenido de adiciones. Además, han realizado mezclas con diversas proporciones de MK, encontrándose una mejora en la resistencia a edades de 7 como de 28 días. En la cual las mezclas con 1% de adiciones han dado las resistencias más altas, tanto a los 7 como a los 28 días, en segundo lugar, se encuentra la mezcla con un 10% de MK.

El equipo de Richard et al. [9] han propuesto un contenido de humo de sílice de cerca el 25% en peso del cemento Portland. De igual forma Chan [10] concluyó que el contenido óptimo de humo de sílice se encuentra entre 20-30%, por último, otros investigadores determinaron que le contenido adecuado de humo de sílice se encuentra entre 30-30% del contenido de cemento.

Morejon [33] ha realizado ensayos con un contenido de 8% de SF con la cual obtuvo un aumento en la resistencia a los 28 días de curado, sin embargo, no sucede lo mismo a los 7 días debido a que la mezcla de referencia manifestó una resistencia mayor. El aumento en la resistencia a los 28 días resultó en un 9,3% con respecto a la mezcla de referencia.

Heche [35] ha encontrado que la utilización de nanosilice aumenta las resistencias iniciales y finales de los morteros que contienen este material, además de determinar que las dosis adecuadas varían de 0,3-7% del peso del cemento. Byung-Wan Jo y otros [36] concluyeron que la resistencia de probetas adicionadas con nS incrementa con el porcentaje de adición, sin embargo, para contenidos más elevados de porcentaje de adición la resistencia tiende a nivelarse.

Li, Xiao & Ou [37] obtuvieron incrementos en la resistencia de hasta un 26% para 28 días de fraguado con un nS como adición y con un contenido del 10%.

Los mejores resultados se obtienen con el 1% de adición de nS, donde la resistencia a compresión mejora un 12.31% [33].

Muchos autores han encontrado que, al incrementar el contenido de nanosilice se obtiene una mejora sustancial en el desarrollo de resistencias a compresión. Al ser comparado este comportamiento con el que presenta el humo de sílice se nota que la nS es mucho más reactiva, es decir, tienen mayor actividad puzolánica.

Se han encontrado valores más altos de resistencia comparados con mezclas sin adiciones en las cuales no poseen ninguna adición, dicho incremento de resistencia suele rondar un 40%. Sin embargo, para edades iniciales mezclas con contenidos de SF presentan resistencias por debajo a las obtenidas por las mezclas de referencia. A los 28 días de curado, se obtiene un aumento de la resistencia de un 125% y del 120% en comparación con la mezcla de referencia, con la utilización de nS y SF respectivamente [33].

CAPÍTULO III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

3.1 Introducción

La campaña experimental ha permitido realizar una caracterización de las mezclas variando diversos parámetros, tales como: contenido de cemento, relación agua-cemento (a/c), proporciones de diversas adiciones (metakaolin (MK), humo de sílice (SF) y nanosilice (nS)), cantidad de superplastificante (SP). Es importante destacar que, al utilizar las adiciones se ha sustituido, dependiendo del porcentaje utilizado, el cemento, hasta alcanzar el valor de cemento más adiciones requerido. Al variar el contenido de cemento y las proporciones de cada adición se mantuvo constante la relación a/c.

Se han realizado ensayos al mortero endurecido obteniendo su resistencia a compresión. También se ha determinado la resistencia a flexo-tracción, sin embargo, estos valores se han descartado debido a que no aportan datos significativos a la investigación.

El análisis de los resultados y las comparaciones entre las diversas mezclas realizadas, permiten la posibilidad de evaluar el comportamiento de las adiciones y parámetros estudiados con respecto a la muestra de referencia sin adiciones.

En este capítulo se describirán primeramente los materiales utilizados en la fabricación de las probetas, explicándose el proceso de elaboración de estas y la descripción de los ensayos realizados.

3.2 Materiales empleados

3.2.1 Cemento

El cemento empleado es del tipo EN 197-1 CEM I/52.5R/R5. Es un cemento utilizado para elaborar hormigones de ultra altas prestaciones. Además, es adecuado para la fabricación de elementos estructurales prefabricados que requieran la máxima resistencia y estén en contacto con terrenos o aguas que contengan sulfatos o tengan que ubicarse en ambientes marinos.

Se trata de un cemento de tipo I y de elevada resistencia mecánica 52,5 R, con bajo contenido de C_3A , lo cual le permite tener menor vulnerabilidad química ante agresiones de tipo salino o sulfatos, altas resistencias a edades tempranas y a largo plazo y rápido endurecimiento.

3.2.2 Agua

Para el fabricación de los morteros se ha utilizado agua potable del suministro del canal de Isabel II de Madrid.

3.2.3 Arena

Para la fabricación de las probetas de morteros se ha utilizado como árido fino, una arena normalizada CEN, la cual cumple con todos los requisitos impuestos por la normativa UNE EN 193-1, 2005 [39]. La normativa antes mencionada indica que: la arena debe ser natural, silíceo, de granos redondeados, cuyo contenido en sílice es al menos del 98%.

El contenido de humedad debe ser menor del 0,2%. Se puede suministrar en fracciones separadas o mezclada en bolsas, con un contenido de 1350 ±5 gramos.

3.2.4 Adiciones

Las adiciones utilizadas en las mezclas han sido humo de sílice (SF), metakaolin (MK) y nanosilice (nS), esta última fue suministrada en disolución acuosa marca Levasil 200/40%, y distribuida por Obermeier.

3.3 Probetas

Se ha seguido el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 196-1, 2005 [40] para la preparación de las probetas de mortero.

El proceso de confección de las probetas inicia con el pesaje de todos los materiales, mediante una báscula digital con un error de ±1g.

Luego de pesado los materiales el procedimiento de mezclado es el siguiente:

- a) Se vierte el agua y el cemento dentro del recipiente, teniendo cuidado para evitar pérdida de agua o de cemento al momento del vertido.
- b) Inmediatamente después de entrar en contacto el agua y el cemento, se pone en marcha la amasadora a velocidad lenta ($140 \pm 5 \text{ min}^{-1}$), iniciándose los tiempos de amasado durante 60s. Después de 30s de amasado, se añade regularmente la arena durante 30s siguientes. Se pone la amasadora a la velocidad rápida ($285 \pm 10 \text{ min}^{-1}$) y se continua el amasado durante otros 30s.
- c) Se para la amasadora durante 90s. En los cuales, y en todas las mezclas, se vierte el SP justo después de haber transcurridos 60s, recuperando, mediante el uso de una espátula todo el material perdido durante el previo amasado.
- d) Se continua el amasado a velocidad rápida durante 60s.

Inmediatamente después se comprobó el diámetro de dispersión y se verificó si el mismo ha alcanzado los 250 mm, en caso contrario se descarta la muestra y se debe realizar nuevamente variando la cantidad de SP. Si la mezcla, efectivamente alcanza el diámetro requerido se vierten rápidamente en los moldes, previamente tratados con desencofrante.

Se realizaron dos amasadas por cada muestra, para posteriormente proceder a la realización de los ensayos de resistencia a los 2, 7 y 28 días.

El llenado de los moldes se realiza en dos capas. Compactando cada capa aplicando 120 golpes con ayuda de una mesa compactadora, repitiendo el procedimiento antes descrito para la realización de la segunda capa. El exceso de material se retira con una espátula plana y se intenta dejar la superficie lo más lisa y homogénea posible.

Las probetas se dejan en los moldes durante 24 horas. Una vez transcurrido un día se desmoldan, se marcan para su identificación y se conserva en una cámara de humedad relativa mayor o igual al 95% y a una temperatura de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$.

3.4 Procedimiento experimental

3.4.1 Ensayos en mortero

Ensayos realizados en los morteros fabricados y las normativas utilizadas:

- Resistencia a compresión (UNE-EN 196-1) [40].

3.4.2 Ensayo de resistencia a compresión

Según lo expresa en el párrafo anterior, los ensayos de resistencia a compresión se realizaron según la norma UNE-EN 196-1 [40], a las edades de 2,7 y 28 días. Estos ensayos se ejecutaron posterior a la realización de los ensayos de flexo-tracción, debido a que se utilizaron las dos mitades resultantes a la rotura por flexión de la pieza completa. La resistencia a compresión fue calculado gracias a la siguiente expresión:

$$R_c = \frac{F_c}{A_p}$$

Donde:

$R_c =$ resistencia a compresión (MPa)

$F_c =$ carga aplicada de rotura (N)

$A_p =$ área de contacto de los platos o placas auxiliares (1600 mm^2)

Para poder realizar el ensayo se debe colocar cada semiprisma lateralmente con relación a los platos del dispositivo, cuidando que la carga se encuentre centrada. Posteriormente, se ensaya cargando las caras laterales a una velocidad uniforme de 2400 ± 200 hasta alcanzar la rotura.

La máquina empleada fue una prensa de accionamiento hidráulico de marca Ibertest con automatización de Servosis.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS

4 Resistencia a compresión

Las resistencias a compresión obtenidas, una vez realizados los ensayos se muestran a continuación. A las edades de 2, 7 y 28 días. Se han incluido también los valores de resistencia máximo y mínimos, así como la desviación estándar. Se han marcado en rojo los valores de desviación estándar mayores al 5%. Sin embargo, se aceptarán valores de desviación estándar de hasta un 10%. Además de los valores de resistencia a compresión obtenidos, se han realizado gráficas para que estos se puedan observar con mayor claridad.

El primer valor de cada nombre de las mezclas representa el contenido de cemento de cada una de ellas, el segundo valor la relación a/c. Aquellas mezclas que tengan una "X" se compactaron con 60 golpes por cada capa, las que no tengan la "X" representan a las mezclas compactadas con 120 golpes por capa. El valor que se encuentre al lado izquierdo de cada adición (MK, SF y nS), se utilizó dos tipos de nanosilice: nanosilice OX-50 y nanosilice AE-200 quiere decir el contenido de cemento que se ha sustituido por dicha adición. El valor encontrado al lado izquierdo de SP indica el porcentaje de superplastificante utilizado. Finalmente, la XT a aquellas mezclas en las cuales el método de mezclado cambia.

Es importante destacar que, solo en aquellas mezclas donde se varió el contenido de SP se realizaron pruebas de compresión a las edades de 7 y 28 días ya que solo se querían tener de referencia.

En la Tabla 1, se muestra un listado con todas las mezclas realizadas y su respectiva nomenclatura.

1100-0,20-X	Contenido de cemento-a/c-60 golpes		
1100-0,20	Contenido de cemento-a/c-120 golpes		
1100-0,20-X	Contenido de cemento-a/c-60 golpes		
1150-0,20-X	Contenido de cemento-a/c-60 golpes		
1200-0,20-X	Contenido de cemento-a/c-60 golpes		
1100-0,20	Contenido de cemento-a/c		
1100-0,19	Contenido de cemento-a/c		
1100-0,18	Contenido de cemento-a/c		
1100-0,21	Contenido de cemento-a/c		
1100-0,20-5MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK		
1100-0,20-8MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK		
1100-0,20-10MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK		
1100-0,20-5SF	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF		
1100-0,20-8SF	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF		
1100-0,20-10SF	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF		
1100-0,20-15SF	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF		
1100-0,20-2nS-50	Contenido de cemento-a/c-contenido de nS OX 50		
1100-0,20-2nS-200	Contenido de cemento-a/c-contenido de nS AE 200		
1100-0,20-5MK-2nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK-contenido de nS OX 50		
1100-0,20-8MK-2nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK-contenido de nS OX 50		
1100-0,20-10MK-2nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK-contenido de nS OX 50		
1100-0,20-5MK-2nS200	Contenido de cemento-a/c-contenido de MK-contenido de nS AE 200		
1100-0,20-5SF-2nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido de nS OX 50		
1100-0,20-8SF-2nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido de nS OX 50		
1100-0,20-3SF-3MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK		
1100-0,20-4SF-4MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK		
1100-0,20-5SF-5MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK		
1150-0,20-4SF-4MK	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK		
1100-0,20-3SF-3MK-2nS50	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-nS OX 50		
1100-0,20-4SF-4MK-2nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-nS OX 50		
1100-0,20-4SF-4MK-1,5nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-nS OX 50		
1100-0,20-4SF-4MK-1+1nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-nS OX 50-nS AE 200		
1100-0,20-4SF-4MK-1,5/0,5nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-nS OX 50-nS AE 200		
1100-0,20-4SF-4MK-0,5+1,5nS	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-nS OX 50-nS AE 200		
1100-0,19-2,1SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,19-3,1SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,20-1,6SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,20-2,3SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,20-3,1SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,21-1,1SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,21-2,3SP	Contenido de cemento-a/c-contenido de SP		
1100-0,20-4MK-4SF	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK		
1100-0,20-4MK-4SF-XT	Contenido de cemento-a/c-contenido de SF-contenido deMK-método de mezclado		

Tabla 1: Nomenclatura de las mezclas utilizadas. Fuente: Elaboración propia.

4.1 Valores obtenidos al variar el número de golpes por capa

En la Tabla 1 figuran los resultados de resistencia a compresión obtenidos a las edades de 2, 7 y 28 días, en donde los valores en rojo representan a aquellas mezclas con solo 60 golpes por capa y los azules corresponden a las mezclas con 120 golpes por capa. Es importante resaltar que, solo para la mezcla con 60 golpes por capa y 2 días de edad se encontró una desviación estándar mayor al 5%, siendo esta igual a 5,3%.

A su vez en la Figura 1, se observa que, para cada edad de curado la resistencia a compresión alcanzada por la mezcla azul resultó mayor y, los valores obtenidos fueron 102, 112 y 125 MPa, respectivamente.

	1100-0,20-X	1100-0,20
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	96	102
	(5,3%)	(2,9%)
Max. value	103	105
Min. value	91	99
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	104	112
	(1,7%)	(1,1%)
Max. value	106	113
Min. value	103	110
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	114	125
	(0,7%)	(4,6%)
Max. value	115	132
Min. value	113	117

Tabla 2 : Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el número de golpes por capa.
Fuente: Elaboración propia.

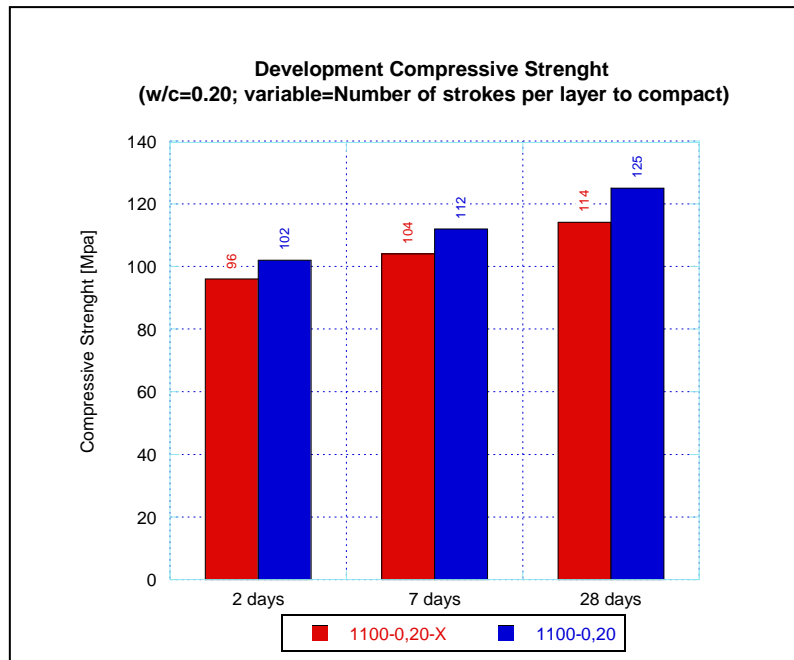


Figura 1: Resistencia a compresión promedio al variar el número de golpes por capa. Fuente: Elaboración propia.

4.2 Valores obtenidos al variar el contenido de cemento

En la Tabla 2 pueden verse reflejados los valores a compresión obtenidos a los 2, 7 y 28 días de curado. Cada una de las mezclas analizadas en este apartado fueron compactadas con 60 golpes por capa. En este caso la mezcla con un contenido de cemento de 1100 a los 2 días de edad y la mezcla con 1200 de contenido de cemento a los 7 días presentan una desviación estándar mayor al 5%, siendo estas iguales a 5,3% y 5,6% respectivamente.

De igual forma en la Figura 2 se observa que, para una edad de 2 días la máxima resistencia a compresión fue alcanzada por la mezcla con contenido de cemento igual a 1100, siendo este valor igual a 96 MPa. A los 7 días de curado la mezcla de 1150 y 1200 alcanzaron la máxima resistencia, siendo esta igual a 107 MPa. Por último, a la edad de 28 días la mezcla que alcanzó una mayor resistencia fue aquella con un contenido de cemento de 1150 y la resistencia alcanzada fue de 116 MPa.

	1100-0,20-X	1150-0,20-X	1200-0,20-X
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	96 (5,3%)	95 (3,5%)	94 (2,5%)
Max. value	103	98	98
Min. value	91	90	92
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	104 (1,7%)	107 (4,4%)	107 (5,6%)
Max. value	106	114	114
Min. value	103	102	101
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	114 (0,7%)	116 (3,3%)	112 (3,6%)
Max. value	115	120	118
Min. value	113	110	107

Tabla 3: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de cemento. Fuente: Elaboración propia.

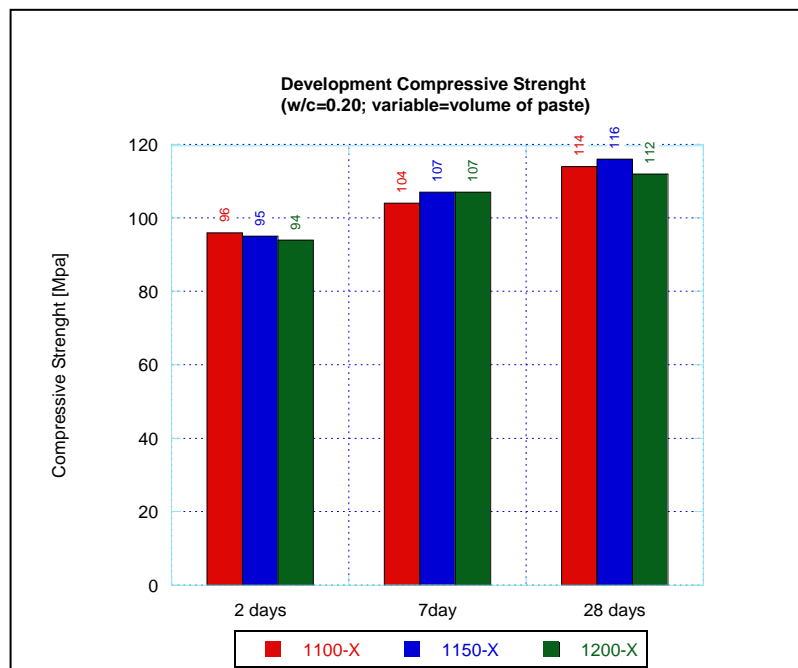


Figura 2: Resistencia a compresión promedio. Fuente: Elaboración propia.

4.3 Valores obtenidos al variar la relación a/c

En este apartado se muestran los valores de compresión alcanzados variando la relación a/c de cada mezcla y con un número de golpes igual a 120 por cada capa compactada. Según los valores observados en la Tabla 3, las mezclas que sobrepasaron el 5% de desviación estándar fueron, para una relación de a/c de 0,18 para cada una de las edades ensayadas (2,7 y 28 días), siendo estos valores obtenidos iguales a: 6,9%, 5,8% y 5,7%, respectivamente.

En cuanto a las resistencias a compresión obtenidas resultan más intuitivas extraerlas de la Figura 3, en la cual se puede observar que, a una edad de 2 días la mayor resistencia alcanzada fue 103 MPa, correspondiente a la mezcla de 0,18 de relación a/c. De igual forma a una edad de 7 días la mayor resistencia fue 112 MPa correspondientes a las mezclas con 0,20 y 0,21 de relación a/c. A su vez, a los 28 días, la máxima resistencia alcanzada fue 125 MPa por la mezcla con una relación a/c de 0,20.

	1100-0,20	1100-0,19	1100-0,18	1100-0,21
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	102 (2,9%)	103 (1%)	96 (6,9%)	98 (3,9%)
Max. value	105	104	103	102
Min. value	99	102	90	94
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	112 (1,1%)	111 (2,8%)	109 (5,8%)	112 (1,4%)
Max. value	113	114	115	114
Min. value	110	107	102	110
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	125 (4,6%)	118 (3,4%)	118 (5,7%)	118 (2,8%)
Max. value	132	123	124	123
Min. value	117	112	109	114

Tabla 4: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la relación a/c. Fuente: Elaboración propia.

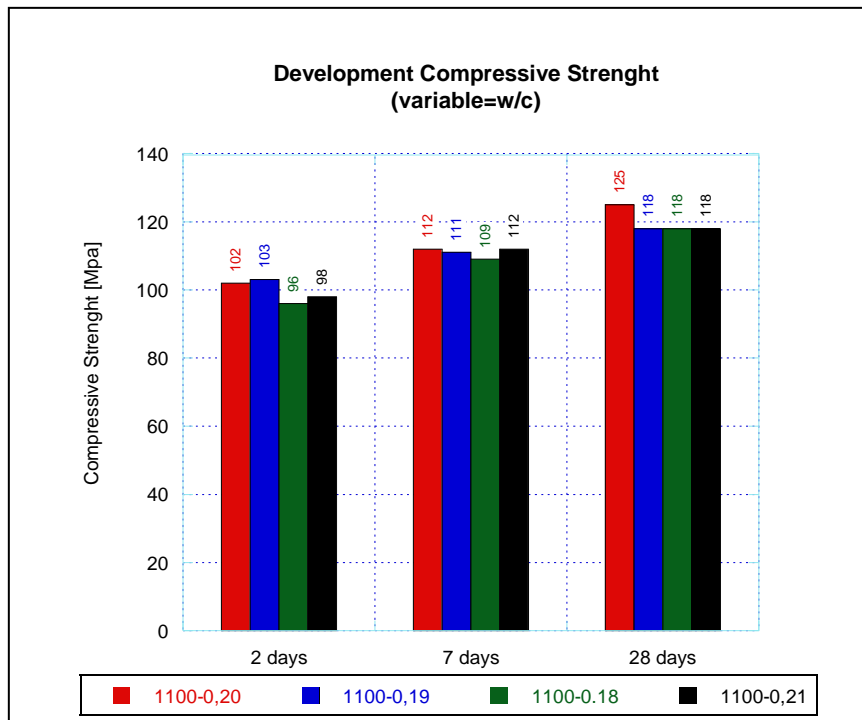


Figura 3: Resistencia a compresión promedio al variar la relación a/c. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Valores obtenidos al variar las proporciones de las adiciones (MK, SF y nS) utilizadas por separado

En este apartado y según la Tabla 5, se puede apreciar que la mezcla 1100-0,20-2nS-50 superó, a una edad de 2 y 7 días, la desviación estándar del 5%, siendo los valores obtenidos iguales a 5,8% y 5% respectivamente. Es importante destacar que todas las mezclas fueron compactadas con 120 golpes por capa.

La máxima resistencia encontrada a los 2 días, según la Figura 5, fue de 104 MPa alcanzada por la mezcla: 1100-0,20-2nS-50. A su vez a los 7 días, la máxima resistencia corresponde a 119 MPa y corresponde a la mezcla: 1100-0,20-8SF. Por último, a los 28 días la máxima resistencia es: 139 MPa y pertenece a la mezcla: 1100-0,20-8SF.

	1100-0,20-5MK	1100-0,20-8MK	1100-0,20-10MK	1100-0,20-5SF	1100-0,20-8SF
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	98 (1,5%)	103 (0,5%)	96 (2,5%)	99 (2,0%)	101 (4,9%)
Max. value	99	104	99	101	106
Min. value	96	103	93	97	96
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	117 (3,3%)	117 (0,1%)	113 (2,1%)	117 (4,2%)	119 (0,6%)
Max. value	121	117	115	122	120
Min. value	113	117	111	112	118
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	134 (4,9%)	138 (3,8%)	137 (1,0%)	133 (1,4%)	139 (1,8%)
Max. value	141	145	138	136	143
Min. value	125	130	135	131	136

Tabla 5: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK, SF y nS por separado.
Fuente: Elaboración propia.

	1100-0,20-10SF	1100-0,20-15SF	1100-0,20-2nS-50	1100-0,20-2nS-200
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	95 (1,1%)	86 (1,3%)	104 (5,8%)	96 (1,8%)
Max. value	96	87	110	98
Min. value	94	85	98	94
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	111 (2,0%)	105 (0,4%)	113 (5,0%)	111 (3,6%)
Max. value	113	106	119	115
Min. value	109	105	108	107
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	133 (3,4%)	125 (2,5%)	128 (1,1%)	117 (1,5%)
Max. value	140	130	130	119
Min. value	128	121	125	114

Tabla 6: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK, SF y nS por separado.
Fuente: Elaboración propia.

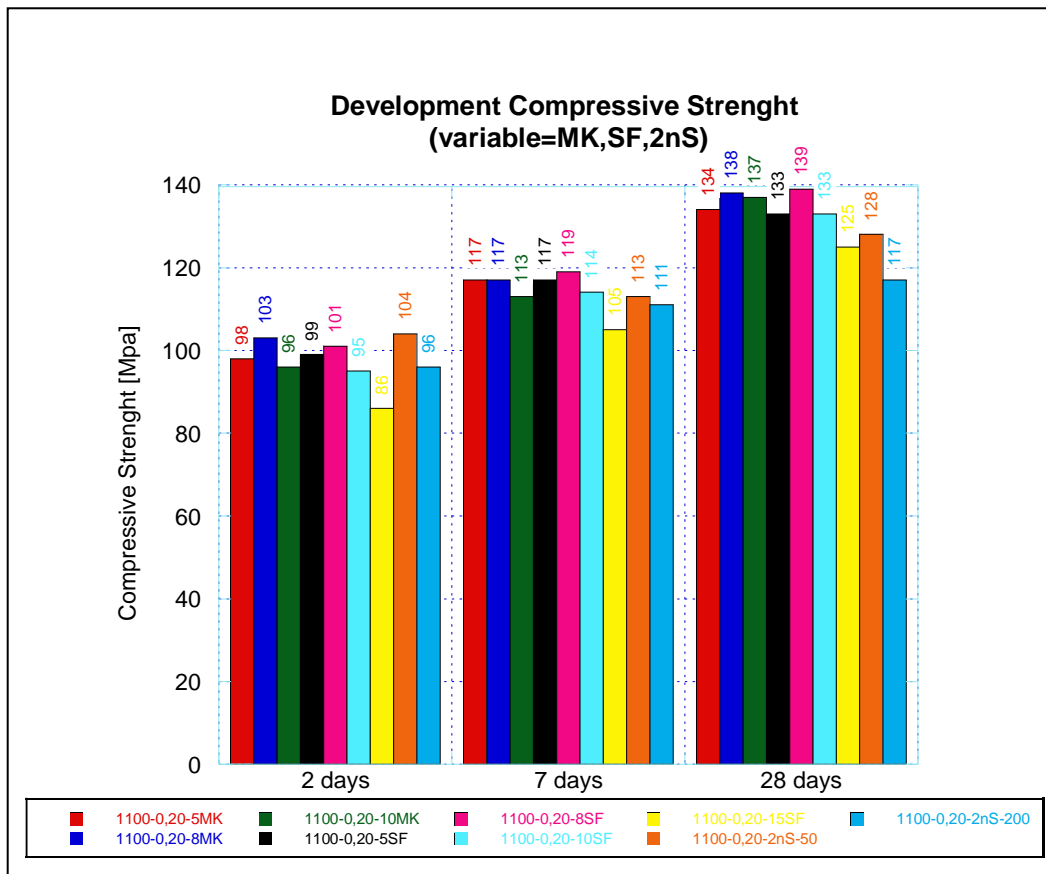


Figura 4: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS por separado. Fuente: Elaboración propia.

4.5 Valores obtenidos al combinar MK y SF con nS

De la Tabla 7 puede extraerse que la única mezcla en superar el 5% de desviación estándar fue la siguiente: 1100-0,20-8SF-2nS, con una desviación del 5%. Todas las mezclas expuestas tanto en la Tabla 6 como la Tabla 7, fueron compactadas con 120 golpes por capa.

De la Figura 5 puede observarse que a los 2 días de curado la máxima resistencia obtenida fue de 105 MPa y pertenece a la mezcla: 1100-0,20-5SF-2nS-50. A los 7 días la máxima resistencia alcanzada fue 118 MPa correspondiente a la mezcla: 1100-0,20-10MK-2nS. Finalmente, a los 28 días, las mezclas cuyas mejores resistencias fueron: 1100-0,20-5SF-2nS-50 y 1100-0,20-8SF-2nS-50 con una resistencia igual a 136 MPa.

	1100-0,20-5MK-2nS	1100-0,20-8MK-2nS	1100-0,20-10MK-2nS
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	101 (0,9%)	100 (2,2%)	98 (1,9%)
Max. value	102	102	100
Min. value	100	97	96
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	114 (0,2%)	115 (2,2%)	118 (3,0%)
Max. value	114	117	121
Min. value	114	112	114
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	131 (5,3%)	134 (3,9%)	135 (2,2%)
Max. value	141	142	138
Min. value	123	127	130

Tabla 7: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK con nS y SF con nS. Fuente: Elaboración propia.

	1100-0,20-5MK-2nS200	1100-0,20-5SF-2nS	1100-0,20-8SF-2nS
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	94 (2,7%)	105 (1,3%)	94 (1,3%)
Max. value	96	107	96
Min. value	91	104	93
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	106 (1,6%)	115 (2,2%)	111 (5,0%)
Max. value	108	117	117
Min. value	104	112	106
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	126 (3,5%)	136 (1,4%)	136 (2,1%)
Max. value	133	138	140
Min. value	121	133	133

Tabla 8: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK con nS y SF con nS. Fuente: Elaboración propia.

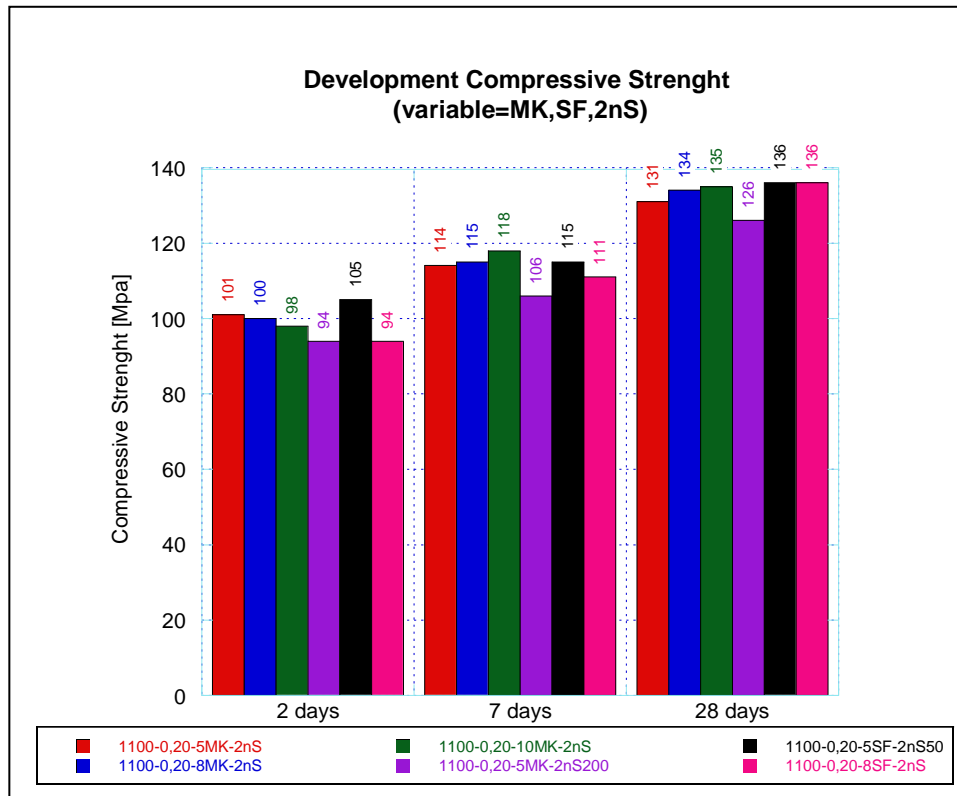


Figura 5: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK con nS y SF con nS. Fuente: Elaboración propia.

4.6 Valores obtenidos al combinar entre sí todas las adiciones utilizadas

Según la Tabla 8, cuyas mezclas fueron compactadas con 120 golpes por capa, se obtuvo que para una edad de 7 días y para las siguientes mezclas: 1100-0,20-3SF-3MK, 1100-0,20-4SF-4MK y 1100-0,20-5SF-5MK una desviación estándar iguales a: 8,8%, 7,6% y 8,1% respectivamente.

En la Figura 6 puede apreciarse que, a los 2 días, la máxima resistencia a compresión fue de 106 MPa de la mezcla: 1100-0,20-3SF-3MK. A una edad de 7 días, la mayor resistencia fue 122 MPa correspondientes a las mezclas: 1100-0,20-4SF-4MK y 1150-0,20-4SF-4MK. A los 28 días de curado, las mezclas: 1100-0,20-4SF-4MK y 1100-0,20-5SF-5MK alcanzaron una resistencia igual a: 137 MPa.

	1100-0,20-3SF-3MK	1100-0,20-4SF-4MK	1100-0,20-5SF-5MK	1150-0,20-4SF-4MK
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	103 (4,8%)	106 (0,4%)	101 (2,0%)	103 (2,6%)
Max. value	108	106	103	106
Min. value	98	105	99	100
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	116 (8,8%)	122 (7,6%)	117 (8,1%)	122 (1,1%)
Max. value	126	131	127	124
Min. value	106	113	108	121
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	129 (1,6%)	137 (5,4%)	137 (5,8%)	135 (1,5%)
Max. value	133	149	147	138
Min. value	127	131	124	133

Tabla 9: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK y SF. Fuente: Elaboración propia.

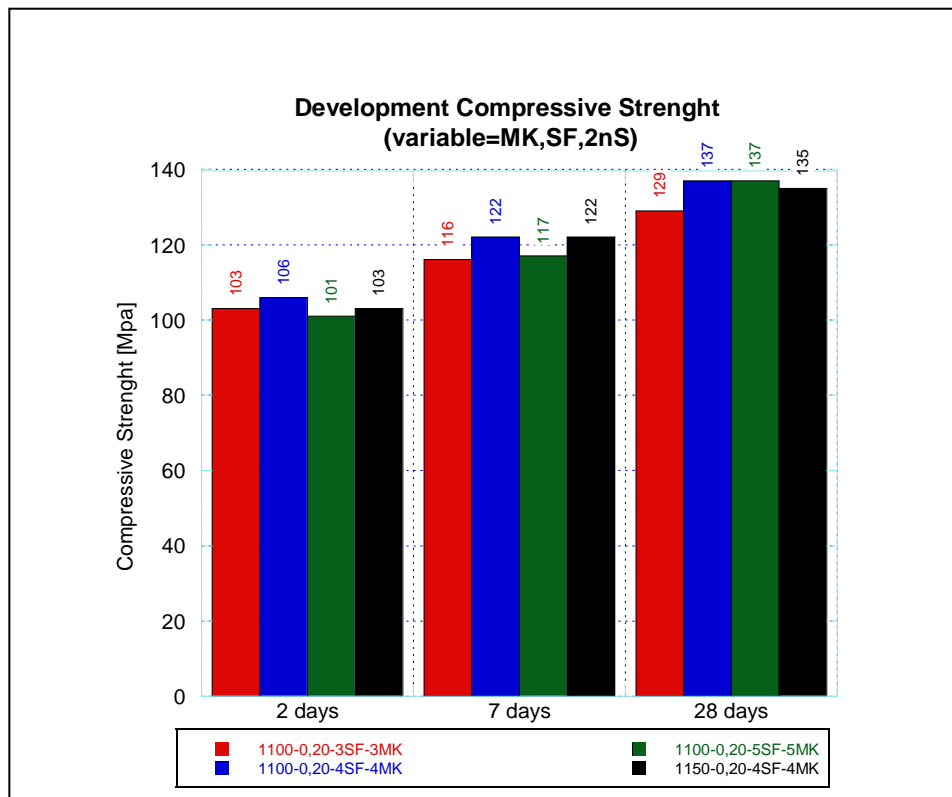


Figura 6: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK y SF. Fuente: Elaboración propia.

Según los datos representados en la Tabla 9, solo la mezcla: 1100-0,20-4SF-4MK-2nS se encontró una desviación estándar mayor al 5%, siendo esta igual a 6,7%. Al igual que en todos los casos anteriores, se utilizó 120 golpes por capa al momento de compactar las mezclas.

La Figura 7 indica que, a una edad de 2 días la resistencia más representativa fue 105 MPa correspondientes a las siguientes mezclas: 1100-0,20-4SF-4MK-1,5nS y 1100-0,20-4SF-4MK-1,5/0,5 nS. A su vez a los 7 días la mayor resistencia encontrada fue 126 MPa cuya mezcla fue: 1100-0,20-4SF-4MK-1,5/0,5 nS. A los 28 días, la mezcla: 1100-0,20-4SF-4MK-1,5nS obtuvo una resistencia de 143 MPa.

	1100-0,20-3SF-3MK-2nS50	1100-0,20-4SF-4MK-2nS	1100-0,20-4SF-4MK-1,5nS
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	101 (0,4%)	101 (4,6%)	105 (2,6%)
Max. value	101	105	108
Min. value	100	96	102
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	114 (0,8%)	116 (6,7%)	120 (0,7%)
Max. value	115	123	121
Min. value	113	108	119
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	132 (2,8%)	140 (3,9%)	143 (4,2%)
Max. value	136	146	152
Min. value	126	131	135

Tabla 10: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar la proporción de MK, nS y SF. Fuente: Elaboración propia.

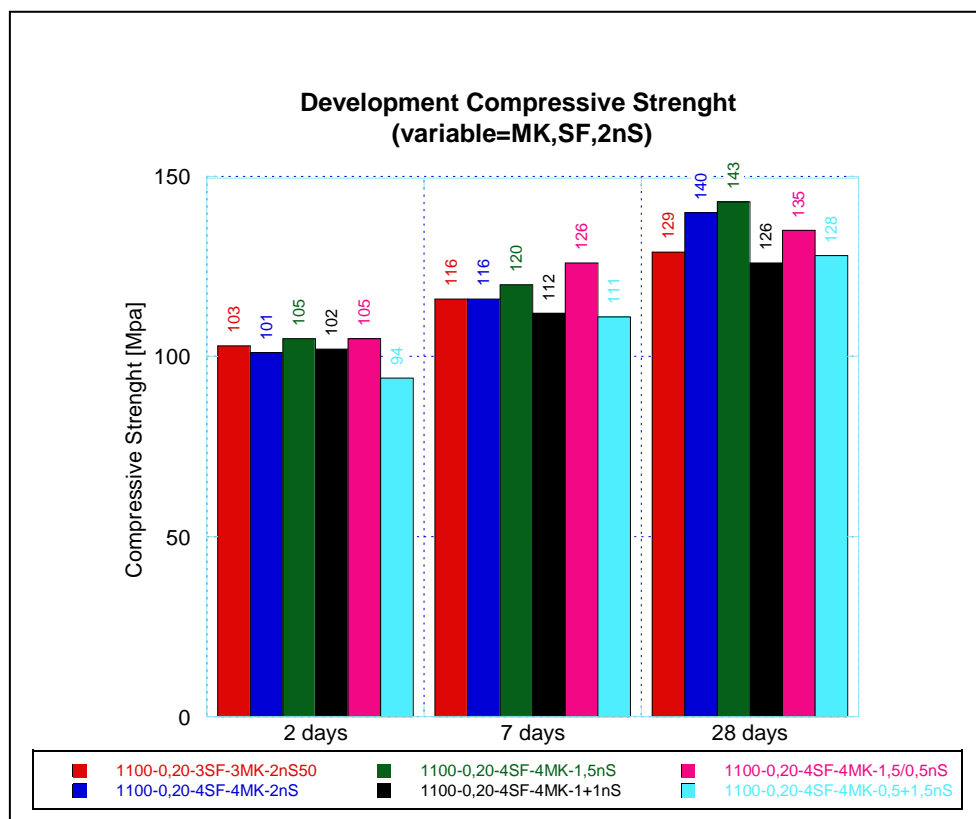


Figura 7: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, nS y SF. Fuente: Elaboración propia.

4.7 Valores obtenidos al variar el contenido de SP

En el siguiente apartado se mantuvo todos los parámetros fijos y se varió solo el contenido de SP, y de igual forma se utilizaron 120 golpes por capa para compactarlas. En la Tabla 10 la mezcla: 1100-0,19-3,1SP a una edad de 2 días superó la desviación estándar definida anteriormente, siendo esta igual a: 6,7%.

En cuanto a la resistencia a compresión se procederá a utilizar las figuras que se encuentran a continuación: en la Figura 8, las máximas resistencia son alcanzadas por la mezcla: 1100-0,19-2,1SP tanto para una edad de 7 como de 28 días y esta fue igual a 111 MPa y 118 MPa respectivamente.

	1100-0,19-2,1SP	1100-0,19-3,1SP
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	111 (2,8%)	103 (6,7%)
Max. value	114	110
Min. value	107	96
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	118 (3,4%)	112 (1,7%)
Max. value	123	114
Min. value	112	110

Tabla 11: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.

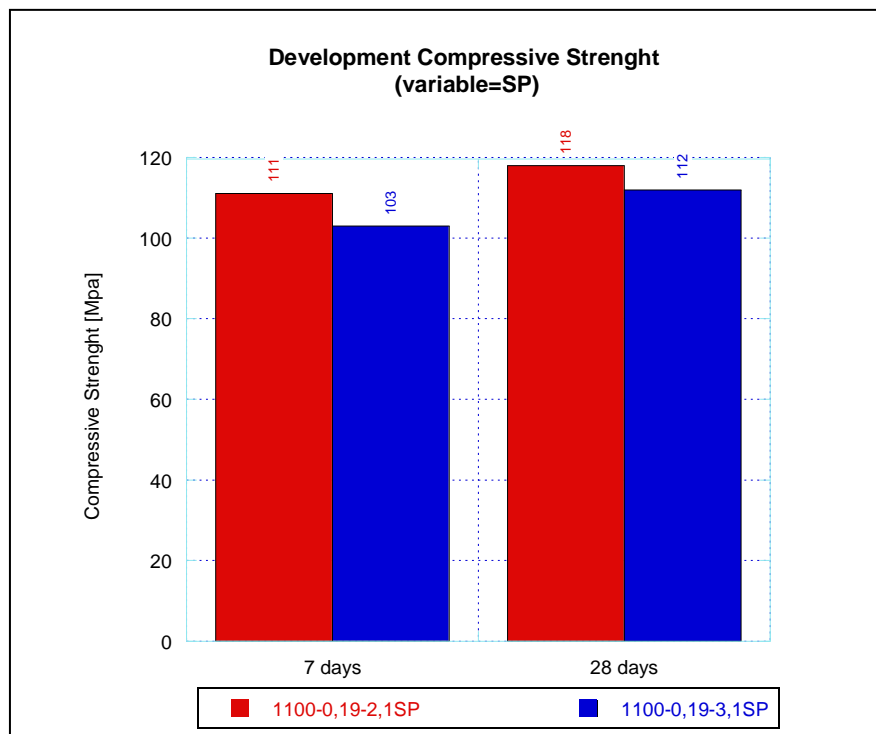


Figura 8: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 11, a una edad de 2 días en la mezcla 1100-0,20-2,3SP se encontró una desviación estándar de 6,2%.

De igual forma en la Figura 9 puede observarse que, para cada una de las edades de curado estudiadas (7 y 28 días), las mayores resistencias pertenecen a la mezcla: 1100-0,20-1,6SP y las resistencias obtenidas fueron iguales a: 112 MPa y 125 MPa respectivamente.

	1100-0,20-1,6SP	1100-0,20-2,3SP	1100-0,20-3,1SP
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	112 (1,1%)	108 (6,2%)	106 (0,6%)
Max. value	113	115	107
Min. value	110	102	105
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	125 (4,6%)	114 (3,0%)	112 (1,0%)
Max. value	132	117	113
Min. value	117	111	111

Tabla 12: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,20. Fuente: Elaboración propia.

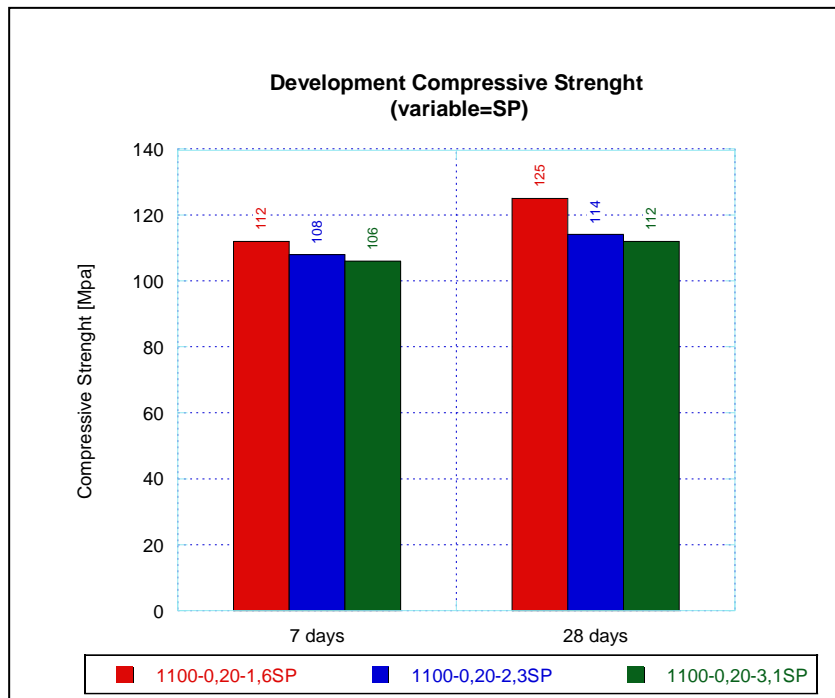


Figura 9: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la Tabla 12 se observa que ninguna mezcla tiene una desviación estándar mayor que el 5%.

En la Figura 10 se evidencia que la mezcla: 1100-0,21-1,1SP obtuvo una resistencia mayor a los 7 días, siendo la misma igual a 112 MPa. Sin embargo, a una edad de 28 días la mayor resistencia fue igual a: 121 MPa perteneciente a la mezcla: 1100-0,21-2,3SP.

	1100-0,21-1,1SP	1100-0,21-2,3SP
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	112 (1,4%)	102 (0,6%)
Max. value	114	103
Min. value	110	101
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	118 (2,8%)	121 (2,6%)
Max. value	123	124
Min. value	114	118

Tabla 13: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,21. Fuente: Elaboración propia.

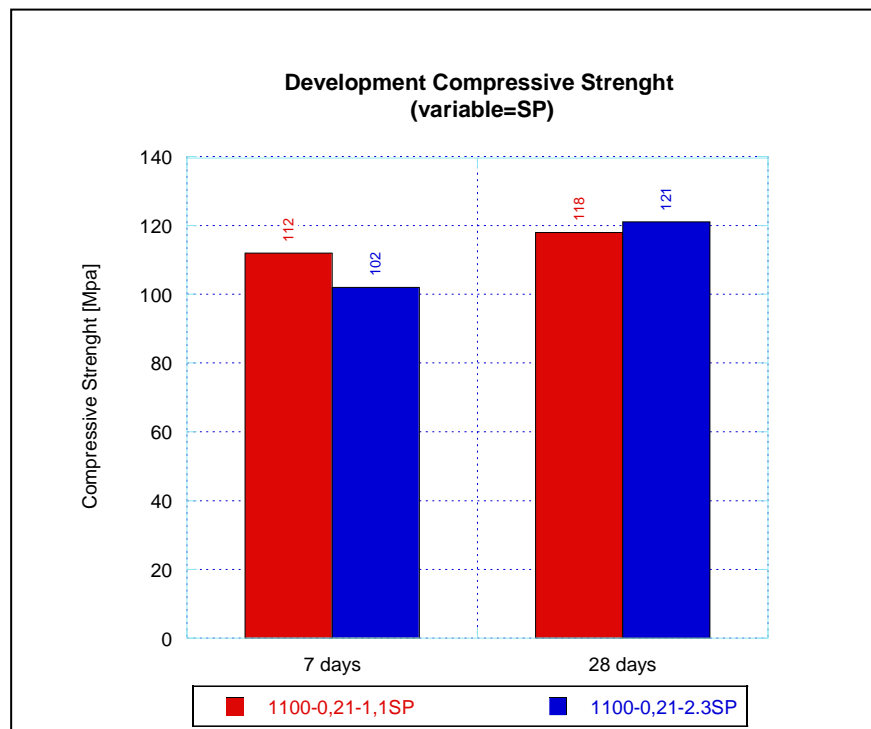


Figura 10: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,21. Fuente: Elaboración propia.

4.8 Valores obtenidos al variar el orden y tiempo de mezclado

En la Tabla 13 se aprecia que, solo a una edad de 7 días y para la mezcla: 1100-0,20-4MK-4SF se ve supera la desviación estándar de 5%, siendo esta igual a 7,6%. Ambas mezclas fueron compactadas con 120 golpes por capa.

Como es de notarse en la Figura 11, ambas mezclas alcanzaron el mismo valor de resistencia a compresión para cada una de las edades (2,7 y 28 días), siendo estas resistencias las siguientes: 104MPa, 121 MPa y 138 MPa respectivamente.

	1100-0,20-4MK-4SF	1100-0,20-4MK-4SF-XT
Compressive Strength 02d [MPa] (c.v.)	106 (0,4%)	104 (1,4%)
Max. value	106	106
Min. value	105	103
Compressive Strength 07d [MPa] (c.v.)	122 (7,6%)	121 (2,1%)
Max. value	131	123
Min. value	113	118
Compressive Strength 28d [MPa] (c.v.)	137 (5,4%)	138 (1,8%)
Max. value	149	142
Min. value	131	135

Tabla 14: Resistencia a compresión promedio, máxima y mínima al variar el orden y tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.

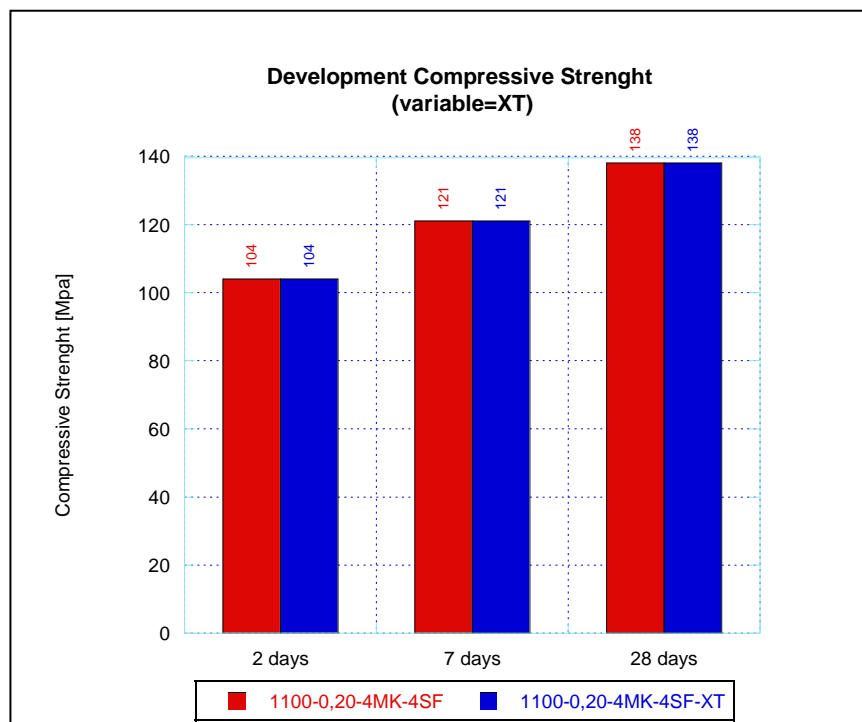


Figura 11: Resistencia a compresión promedio al variar el orden y tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La utilización de las adiciones en la realización de mezclas de morteros es parte fundamental, estas, al sustituir el cemento aumentan notablemente la resistencia a compresión. Entre las adiciones más conocidas se encuentran las utilizadas para la realización del presente trabajo: metakaolin, humo de sílice y nanosilice. Por lo cual dentro de los resultados se ha encontrado el comportamiento esperado, una marcada diferencia entre las resistencias a compresión entre las mezclas sin adiciones y aquellas que si las llevan. Por lo cual en este capítulo se analizarán todos los resultados obtenidos e intentar justificar y explicar los mismos.

5.1 Número de golpes por capa:

Para una misma mezcla se varió la cantidad de golpes por capa al momento de ser compactada, siendo el primer valor utilizado de 60 golpes por capa y el segundo de 120 golpes por cada. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 12.

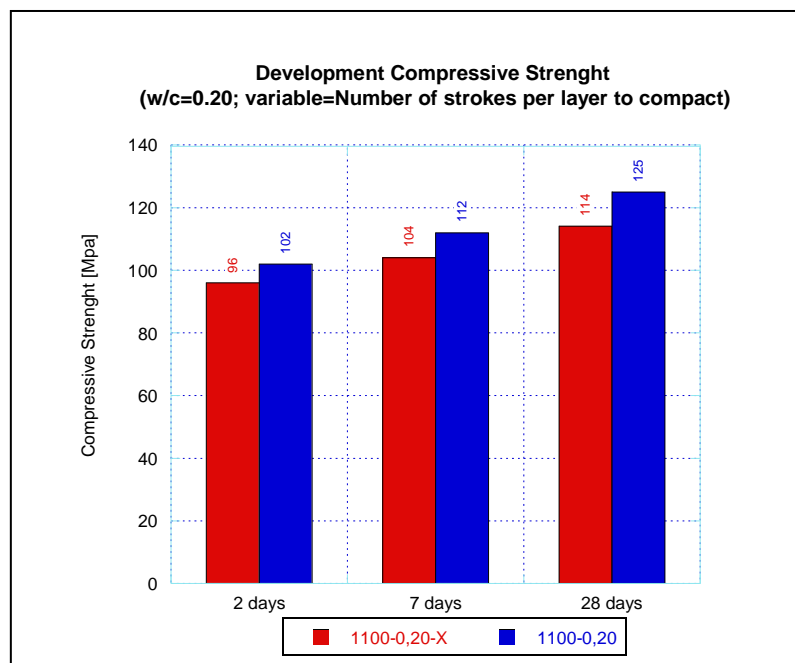


Figura 12: Resistencia a compresión promedio al variar el número de golpes por capa. Fuente: Elaboración Propia.

Tal como era de esperar, aquella mezcla que se compactó con el mayor número de golpes desarrolló las mayores resistencias para cada una de las edades de curado (2, 7 y 28). La razón por la cual aumenta la resistencia fue, al aumentar la energía de compactación se obtiene una mejor organización de los componentes de la mezcla y disminuyen los espacios vacíos en esta, disminuyendo los puntos frágiles, trayendo como consecuencia un aumento de la resistencia a compresión.

Por las razones explicadas en el párrafo anterior, todas las mezclas a analizar en los apartados siguientes tienen un total de 120 golpes por capa.

5.2 Contenido de cemento

En primer lugar, se realizó un análisis comparativo entre mezclas de morteros con igual relación a/c, sin ninguna adición, pero variando el contenido de cemento. Al variar el contenido de cemento, se debe adecuar la dosificación de la arena para mantener la misma proporción de la mezcla. En la Figura 13 se muestra la relación entre la resistencia alcanzado por cada mezcla a los 2, 7 y 28 días de curado para cada uno de los contenidos de cemento.

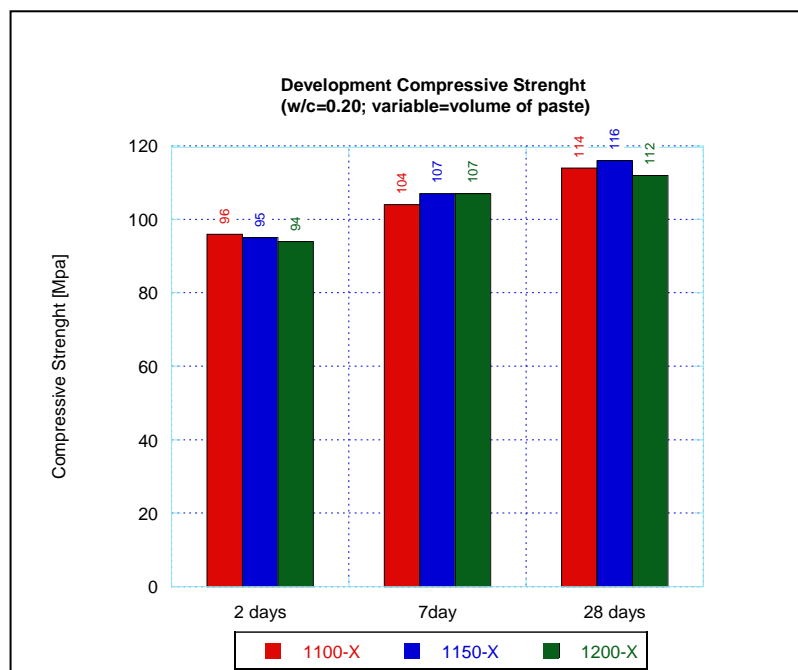


Figura 13: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de cemento. Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 13, las resistencias máximas para cada edad a estudiar presentaron resistencias a compresión similares. Los resultados a los 2 días pareciesen indicar que, a medida que se aumenta el contenido de cemento baja la resistencia, sin embargo, a los 7 días los contenidos de 1150 y 1200 de cemento sobrepasan la resistencia alcanzada por las probetas realizadas con una dosificación de 1100 de cemento. Los resultados a los 28 días, los cuales son los valores más representativos, indican que la resistencia aumenta hasta alcanzar un valor de 116 MPa para el contenido correspondiente al 1150 para luego disminuir en la mezcla de 1200.

Se decidió seleccionar la mezcla de 1100 en contenido de cemento como referencia para la realización de los demás ensayos debido a que, tanto su resistencia promedio como la máxima resultan muy similares a los de 1150, y su contenido de cemento es menor, lo cual resulta en mezclas más económicas.

Los resultados obtenidos una vez realizado los ensayos difieren de aquellos encontrados por Wang et al. [38], debido a que ellos obtuvieron que la resistencia a compresión aumentaba a medida que la mezcla contuviera más cemento, sin embargo, los resultados obtenidos en esta investigación han indicado que la resistencia aumenta hasta alcanzar cierto valor de contenido de cemento (1150) para luego disminuir con un valor aún más alto de cemento.

Estos resultados pueden ser explicados debido a que los contenidos de cemento utilizados en este trabajo fueron mayores, además que el contenido de SP utilizado por Wang et al. [38] fue constante a lo largo de todo el trabajo, en cambio los utilizados en esta investigación fue variando de mezcla en mezcla, con el fin de obtener en todas y cada una de ellas un diámetro de dispersión de 250 mm.

5.3 Relación agua/cemento (a/c)

Según lo indicado en el apartado anterior, se escogió un contenido de cemento de 1100 como base para las demás mezclas. En este apartado, se comentarán los resultados derivados de variar la relación de agua-cemento para contenidos de cemento constante. Ilustrando los resultados obtenidos en la Figura 14.

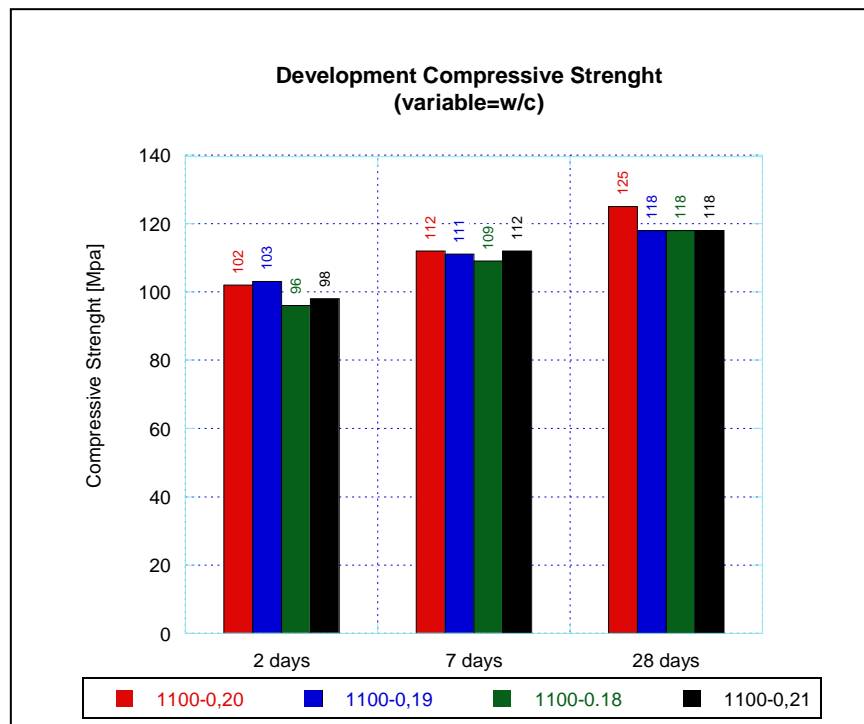


Figura 14: Resistencia a compresión promedio al variar la relación a/c. Fuente: Elaboración propia.

Para una edad de curado de 2 días se obtuvo una resistencia máxima de 103 MPa, para la mezcla con una relación de a/c de 0,19. A los 7 días las mayores resistencia encontradas correspondieron a 0,20 y 0,21 de relación a/c y siendo dicha resistencia de 112 MPa. Sin embargo, a los 28 días se encuentra que la mayor resistencia y, por una

diferencia marcada es la obtenida por la mezcla de 0,20 de relación agua-cemento y una resistencia de 125 MPa, por lo cual se decidió continuar las mezclas con una relación agua-cemento de 0,20 por ser aquella en la cual que arrojará una mayor resistencia.

De forma similar a los resultados obtenidos por Wang et al. [38] la resistencia a compresión fue aumentando a medida que la relación a/c fue mayor hasta alcanzar un valor óptimo de ella (0,20) para luego disminuir esta para un valor aún más alto de relación a/c (0,21), de forma similar a los resultados obtenidos por los autores antes citados. La menor resistencia a compresión de las mezclas con una baja relación a/c puede ser explicada a que, al ser el contenido de cemento muy grande con respecto al del agua, todo el cemento utilizado es capaz de hidratarse por lo cual la resistencia a compresión disminuye.

Es importante destacar que a lo largo de todas las edades de curado no se mantiene un comportamiento constante, sin embargo, la máxima resistencia a compresión fue alcanzada para casi todas las edades de curado por aquella con una relación de a/c de 0,20, a excepción de a los 2 días de curado donde la mezcla con 0,19 a/c alcanzó la máxima resistencia, 103 MPa con respecto a los 102 MPa de la mezcla de 0,20. Además, a los 7 días la resistencia a compresión de la mezcla con 0,21 de relación a/c alcanzó una mayor resistencia en comparación con aquella de 0,19, para finalmente igualarse todas las resistencias a compresión a los 28 días y con un valor de 118 MPa, a excepción, naturalmente de la mezcla de 0,20 que fue la que alcanzó una mayor resistencia.

5.4 Utilización de adiciones: Metakaolin (MK), humo de sílice (SF) y nanosilice (nS)

Las mezclas realizadas utilizando las adiciones antes mencionadas, tuvieron un contenido de cemento de 1100 y una relación a/c de 0,20 debido a que se obtuvieron las mayores resistencias a los 28 días.

Comparación con diferentes contenidos de MK

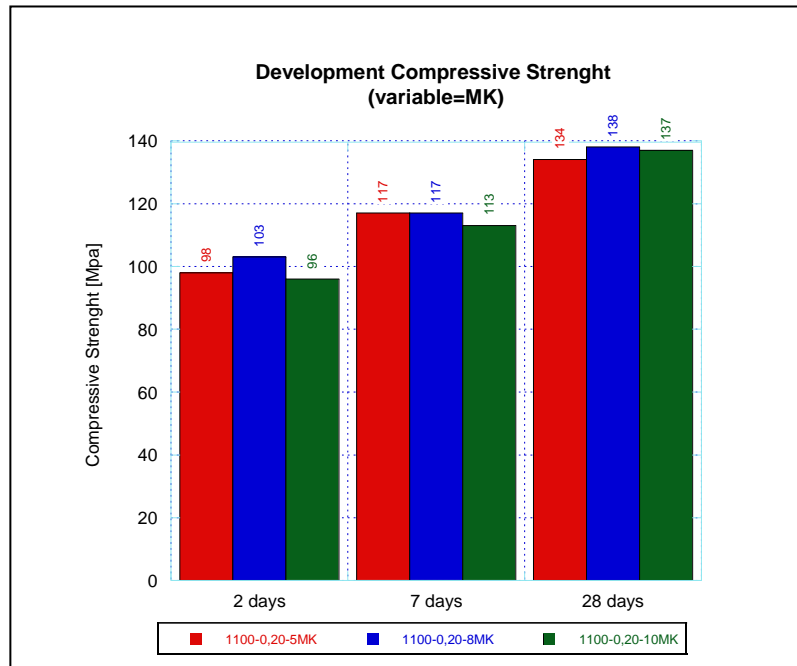


Figura 15: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se observa en la Figura 15, las resistencias a los 2 días de edad indicaron que, con un contenido de 8% en peso de cemento de MK se obtuvo la mayor resistencia (103 MPa). A los 7 días el contenido de 5% MK empareja la resistencia obtenida por la mezcla de 8% MK de 117 MPa. Sin embargo, a los 28 días la mayor resistencia es obtenida por la mezcla de 8% MK (138 MPa). Es importante resaltar que la resistencia aumenta hasta alcanzar los 138 MPa para luego disminuir para un mayor contenido de MK. Dicho descenso es debido a que, no todo el MK no es capaz de reaccionar con el resto de la mezcla por lo cual no toda la cantidad es aprovechada.

Contrariamente a los resultados obtenidos por Zheng [14] y Ma [15], la resistencia a compresión aumenta con el uso del MK en vez de disminuir. Sin embargo, en línea con lo obtenido por Muhd et al. [34], la resistencia a compresión sí que aumentó, aunque no con las mismas proporciones debido a que dichos autores encontraron la máxima resistencia con un contenido de 1% de MK y en el presente trabajo la mayor resistencia encontrada fue aquella con 8% de MK.

5.5 Comparación con diferentes contenidos de SF

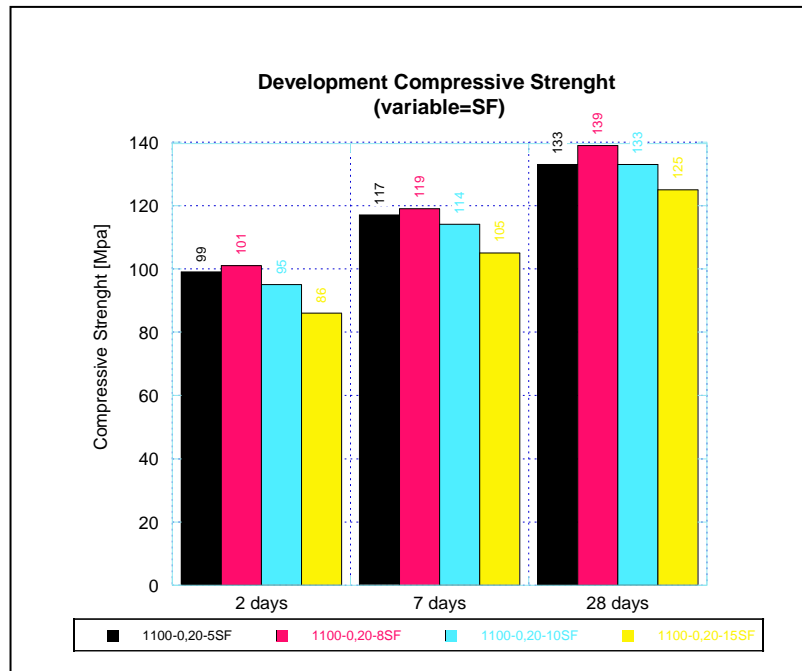


Figura 16: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de SF. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 16 se observa un comportamiento similar al desarrollado por las mezclas con MK. A los 2 días de edad las mezclas con un contenido de 5% y 8% de SF presentaron resistencias similares, de 99 y 101 MPa, respectivamente. El desarrollo de las resistencia obtenidas a los 7 días siguen un patrón de comportamiento similar al observado a los 2 días. A los 28 días, aumentó la resistencia a medida que se aumentaba el porcentaje de adición, hasta que se alcanza el máximo de la resistencia para un contenido de 8%, disminuyendo la resistencia para mayores contenidos de SF. Lo dicho anteriormente fue debido a que la mezcla con altos contenidos de SF, no fue capaz de reaccionar con toda la mezcla por lo tanto su resistencia en vez de aumentar disminuye.

En cuanto a las mezclas preparadas con SF, se ha encontrado que el contenido óptimo de esta adiciones fue del 8% y no del 25% propuesto por Richard es al [9] ni del 20-30% obtenido por Chan [10]. Los resultados obtenidos coinciden con los encontrados por Morejon [33], en el cual con un contenido del 8% de SF se supera la resistencia encontrada por la mezcla de referencia, es decir, la mezcla que no contiene ninguna adición.

5.6 Comparación entre dos tipos diferentes de nS

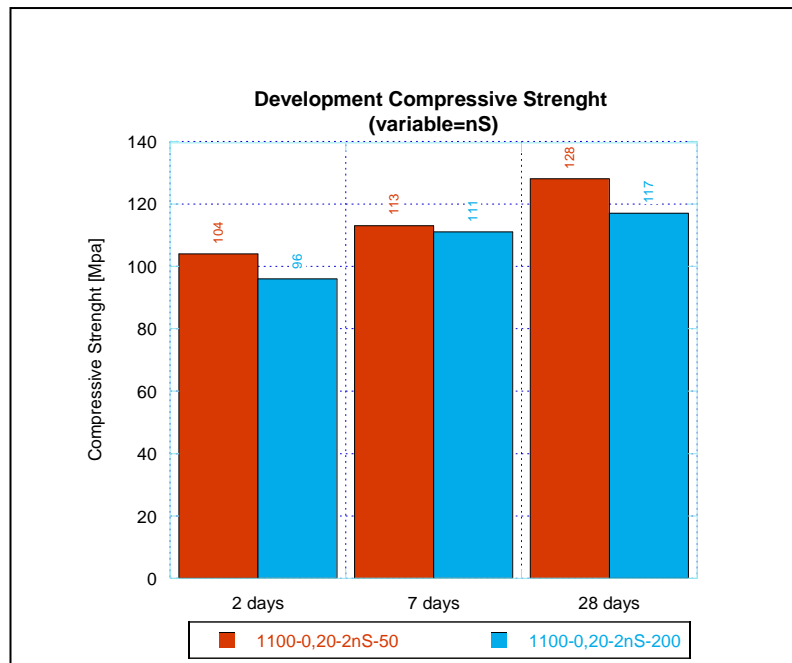


Figura 17: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de nS. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 17 se muestran los resultados obtenidos al utilizar los tipos de nanosilices disponibles para realizar las mezclas, por un lado, la OX-50 y por el otro la AE-200. Luego de realizar los ensayos y obtener la resistencia a compresión a los 2, 7 y 28 días, se observó que, para cada una de las edades la OX-50 posee un mayor rendimiento que la AE-200, manteniendo los demás parámetros de la mezcla sin modificar. La marcada diferencia entre las resistencias obtenidas, puede ser debido a que el nanosilice AE-200 posee un tiempo de reacción más lento que el OX-50, por lo tanto, este aún no ha reaccionado totalmente y las resistencias obtenidas a los 28 días sea menor, sin embargo, las resistencias pueden cambiar drásticamente para tiempos de curado superiores, tales como 90 días ya que el nanosilice AE-200 tendrá el tiempo suficiente de reaccionar totalmente. Es importante destacar que, no en todas las mezclas se alcanzó el diámetro de dispersión de 250 nm. Debido a la superficie específica de estas adiciones sumado a sus características químicas requieren de mayores cantidades de SP.

En concordancia con los resultados obtenidos por Heche [33], se comprueba que el nS sí aumenta la resistencia a compresión en comparación con aquellas que no se utiliza ninguna adición, además que la cantidad de nS utilizada se encuentra dentro del rango recomendado por este autor (entre el 0,3 y el 7%). En línea con lo también encontrado por Byung-Wan Jo et al. [36], aumenta la resistencia en comparación con la mezcla de referencia, sin embargo, no se pudo comprobar si esta mejora se nivela para contenidos más altos de nS ya que no se varió el porcentaje utilizado. En cuanto a los resultados obtenidos por Morejon [33] al utilizar un 1% de adición encontró que la

mejora en la resistencia a compresión fue del 12,31%, sin embargo, en este trabajo se utilizó un 2% de adición, encontrándose que la mejora de la resistencia se ubicó en un 2,3% con respecto a la mezcla de referencia.

A continuación, se hará un análisis comparativo entre las tres adiciones utilizadas; MK, SF y nS. La cual se muestra en la Figura 18:

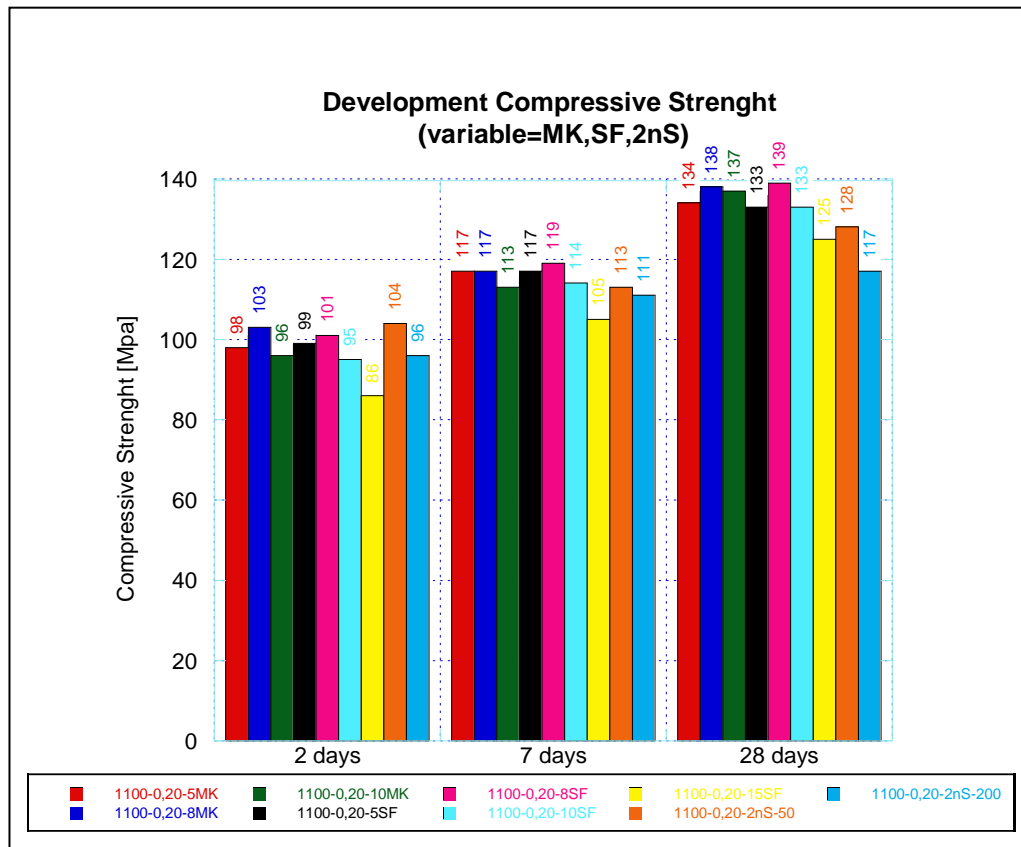


Figura 18: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS. Fuente: Elaboración propia.

En concordancia con los resultados explicados anteriormente, las mayores resistencias a compresión son obtenidas con un porcentaje de adiciones del 5% y 8%, tanto de MK como de SF, debido a las razones expuestas en párrafos anteriores. Además, es importante resaltar que la adición que mejor resultado se encontró fue el MK para cada uno de los diferentes porcentajes de adición, sin embargo, el máximo valor obtenido (139 MPa) se dio con 8% de SF como adición. De igual forma, puede observarse que, a priori, los peores resultados son obtenidos al utilizar ambos tipos de nanosilice.

5.7 Comparación con diferentes contenidos de MK y nS

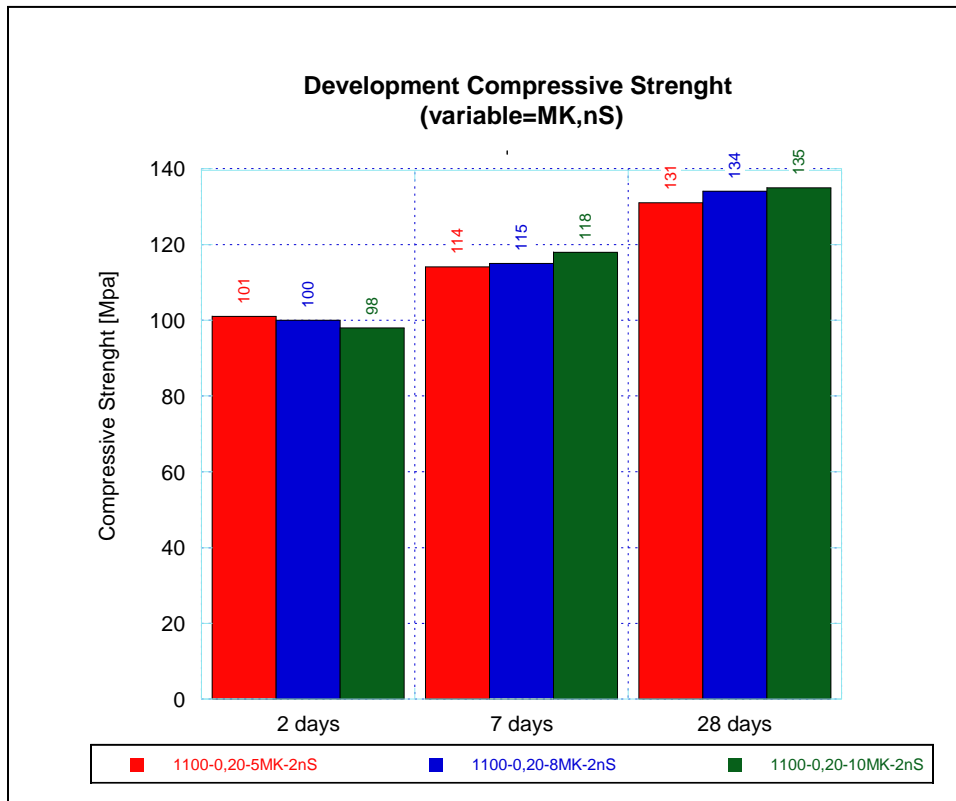


Figura 19: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK y nS. Fuente: Elaboración propia.

En primer lugar, se decidió utilizar las mismas proporciones de MK, pero esta vez se le agregó un 2% de nanosilice OX-50. Para las edades de 7 y 28 días, según la Figura 19, se observó el mismo comportamiento, en el cual las mezclas con 10% de MK y 2% de nS dieron las mayores resistencias, a diferente que el caso anterior, cuando solo se uso MK como adición, en la cual las mezclas con 8% de MK arrojaron los valores de resistencia más altos. En términos de resistencia, esta disminuyó en cada una de las mezclas ensayadas, siendo de 138 MPa para 8% de MK y 135 MPa para 10% MK y 2% nS.

5.8 Comparación con diferentes contenidos de SF y nS

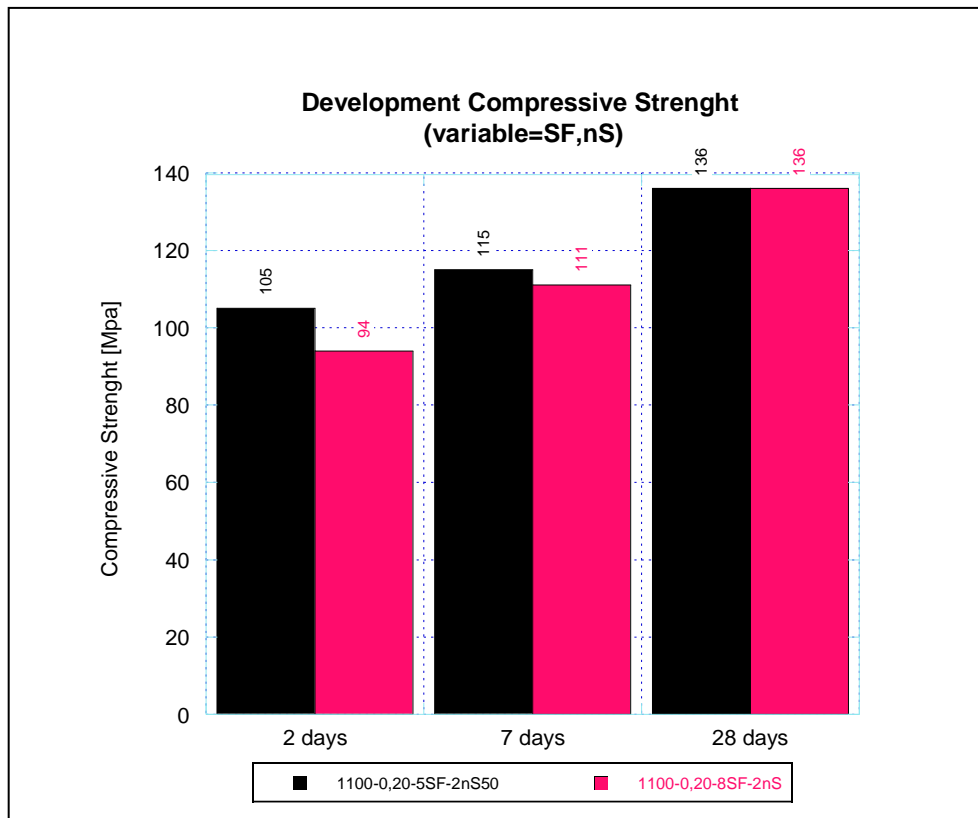


Figura 20: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de SF y nS. Fuente: Elaboración propia.

En los expuesto en la Figura 20, los resultados obtenidos combinando SF y nS difieren de aquellos en los cuales se ha utilizado MK y nS, a los 28 días las resistencia a compresión obtenidas resultaron iguales, tanto para 5% como para 8% de contenido de SF. Comparando los resultados con aquellas muestras en las que solo se ha utilizado SF se ha observado que la resistencia a compresión disminuye con la utilización de nS, para la mezcla en la que se encontró una mayor resistencia con solo la utilización de SF (139 MPa) ha resultado mayor a la encontrada con la utilización de ambas adiciones (136 MPa).

Una vez analizadas las adiciones por separado, en la gráfica expuesta a continuación se han graficado todos los resultados obtenidos juntos.

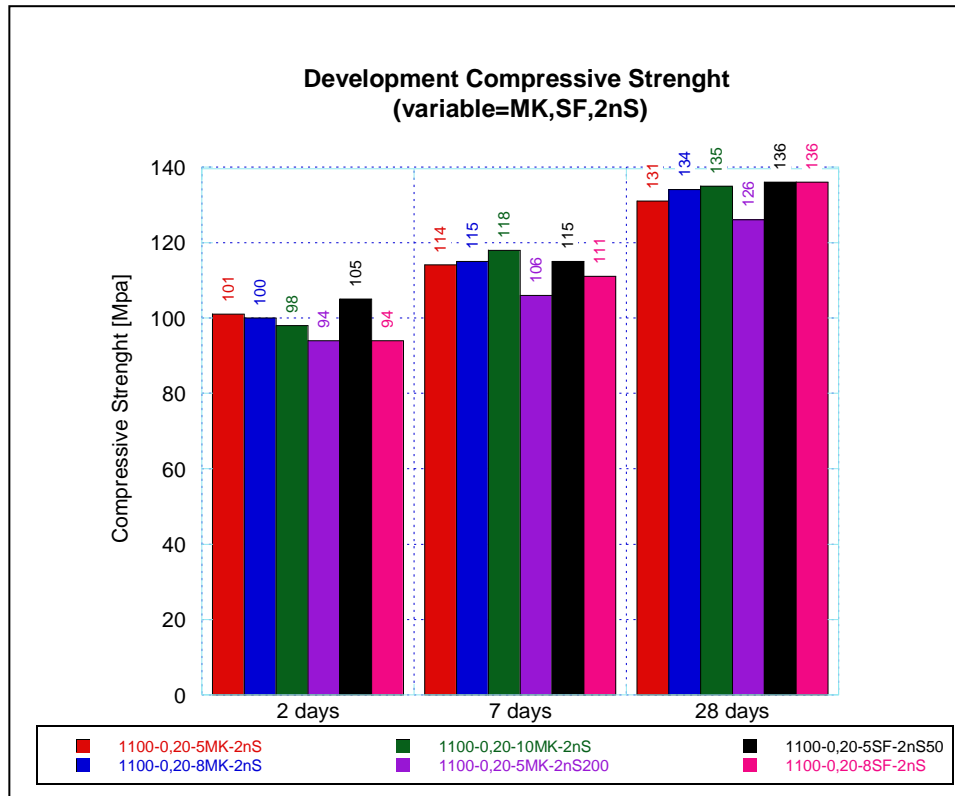


Figura 21: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 21 se evidencia que, a la edad de 7 días la mayor resistencia obtenida ha sido de 118 MPa de la mezcla de 10% MK y 2% de nS. Sin embargo, a los 28 días la mezcla que ha arrojado un mayor valor de resistencia ha sido la mezcla de 8% de SF y 2% de nS, cuyo valor ha sido 138 MPa. Una vez analizados los datos se ha obtenido que, cuando se han combinado las dos adiciones de SF tanto de 5% como la de 8% han desarrollado valores más elevados de resistencia. Tomando en cuenta los resultados obtenidos en las mezclas en las que solo se ha utilizado una adición, el SF tanto solo como combinado con nS ha arrojado valores, levemente mayores de resistencia a aquellas en las que se ha utilizado MK como adición, tanto sola como mezclada con nS.

5.9 Comparación con diferentes proporciones de SF y MK

Posteriormente se ha procedido al estudio de mezclas en las cuales se combinan SF y MK a diferentes proporciones para estudiar las resistencias desarrolladas por estas mezclas. Los resultados de dichos ensayos se muestran en la figura 22.

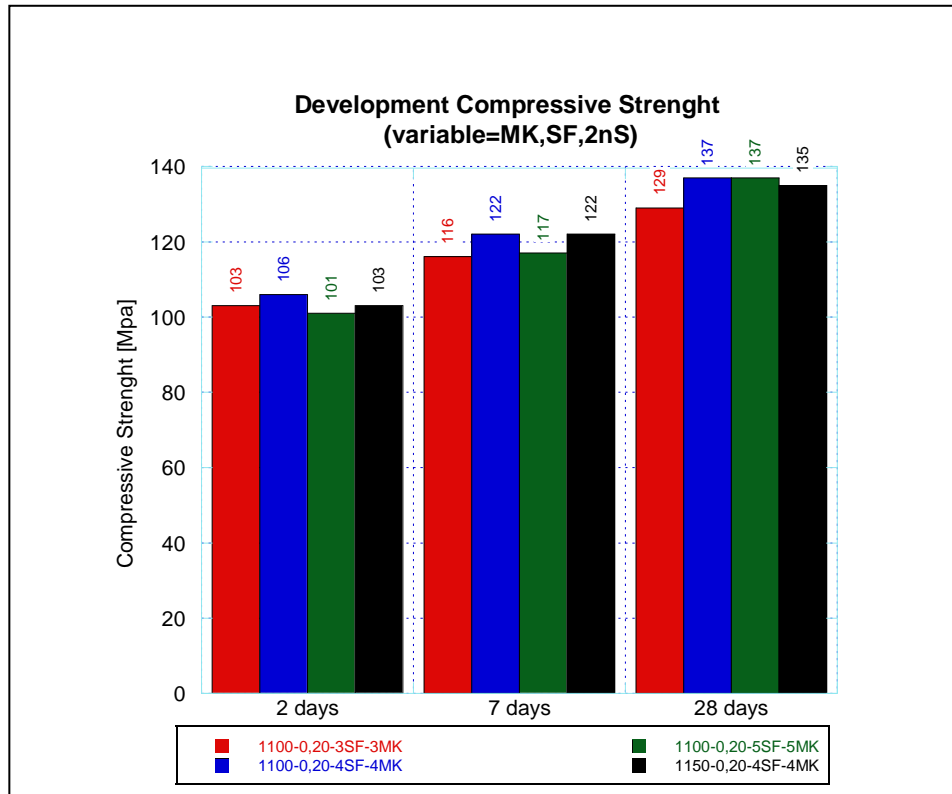


Figura 22: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK y SF. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 22 se aprecia que se partirá de una misma proporción de cada una de las adiciones, del mismo modo se han ido aumentando las cantidades de ambas adiciones proporcionalmente. Para edades iniciales se puede apreciar como aumentó la resistencia a medida que se aumentaron las cantidades de las adiciones utilizadas, hasta llegar a un valor pico (4% SF y 4% de MK) para luego disminuir en la última mezcla (5% SF y 5% MK). Sin embargo, para una edad de 28 días, las resistencias de 4% SF y 4% MK se igualaron a la de 5% SF y 5% MK cuya resistencia obtenido ha sido 137 MPa, siendo ambas resistencias mayores a la las de 3% SF y 3% MK. Adicionalmente en la Figura 22, también se presenta una mezcla de 4% SF y 4% MK, pero con un contenido de cemento de 1150, sin embargo, los resultados de resistencia obtenidos para cada una de las edades han sido inferior a aquellas mezclas en las que se ha utilizado 1100 de contenido de cemento.

Por último, se han combinado todas las adiciones, tomando como base tanto 3% SF y MK y 4% de SF y 4% MK, pero modificando el contenido de nS y en ciertos casos utilizando ambos tipos de nanosilice (OX-50 y AE-200). Los resultados obtenidos han sido plasmados en la Figura 23:

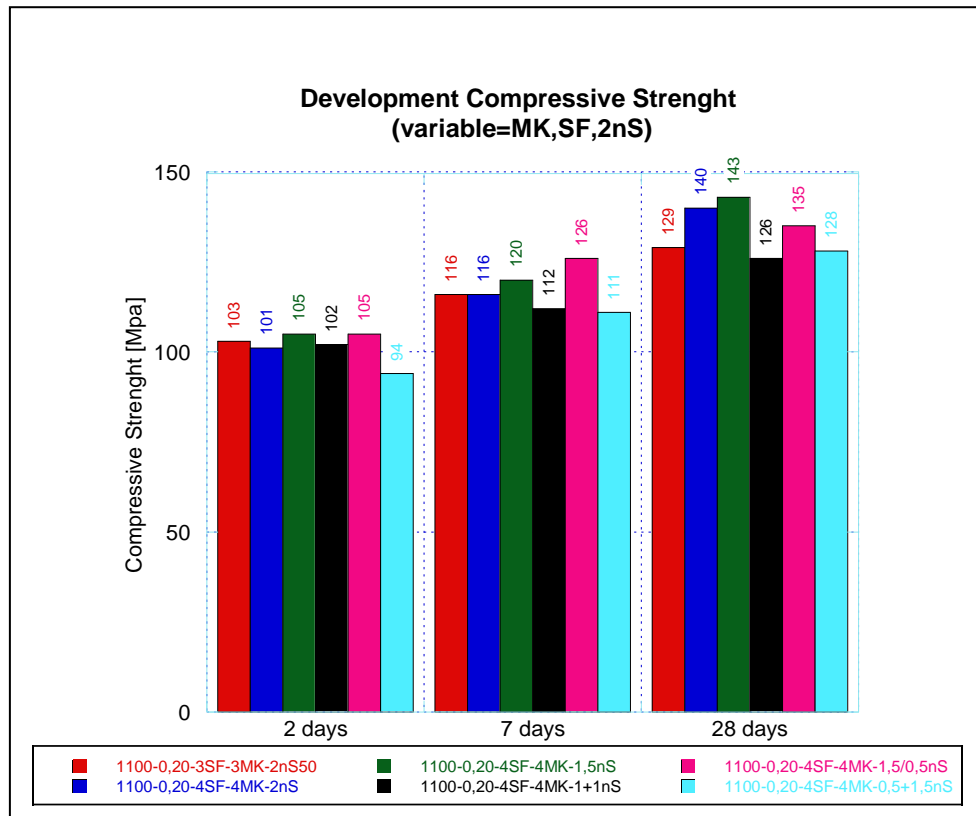


Figura 23: Resistencia a compresión promedio al variar la proporción de MK, SF y nS. Fuente: Elaboración propia.

Según la Figura 23, es de resaltar que, en cada una de las edades la mezcla que mayor resistencia desarrolló fue aquella en la que se utilizó un 4% de SF y MK con 1.5% de nS (OX-50). Las mezclas en las cuales han sido utilizadas ambos tipos de nS, el incremento de resistencia no ha sido tan importante, excepto en la mezcla con un contenido de 4% de SF y MK con 1,5% OX-50 y 0,5 AE-200 con una resistencia máxima de 135 MPa a los 28 días. La mezcla azul, correspondiente a 4% SF y MK con 2% nS (OX-50) ha sido la segunda mezcla de mayor resistencia con 140 MPa. Las demás mezclas estudiadas en este apartado han desarrollado resistencias a compresión menores con respecto a aquellas mencionadas anteriormente. La resistencia desarrollada por la mezcla cuyo contenido ha sido 4% SF y MK con 1,5% nS (OX-50) ha sido aquella que mayor resistencia se ha obtenido a través de toda la campaña experimental, siendo esta de 143 MPa.

5.10 Efecto del superplastificante en la resistencia a compresión

Durante la campaña experimental también se ha querido comprobar el efecto del superplastificante en la resistencia a compresión de los morteros, por tal razón se ha variado la cantidad de SP dejando todos los parámetros iguales. Los primeros valores en cada una de las gráficas representan el contenido de SP de cada una de las diversas mezclas para alcanzar un diámetro de dispersión de 250 mm, para las demás mezclas realizadas, se ha contemplado no darle mayor importancia a el diámetro alcanzado, no obstante, se ha procurado medirlo al momento de realizar la mezcla correspondiente. Los resultados obtenidos para cada relación agua-cemento diferente se expresan en las Figuras 24, 25 y 26.

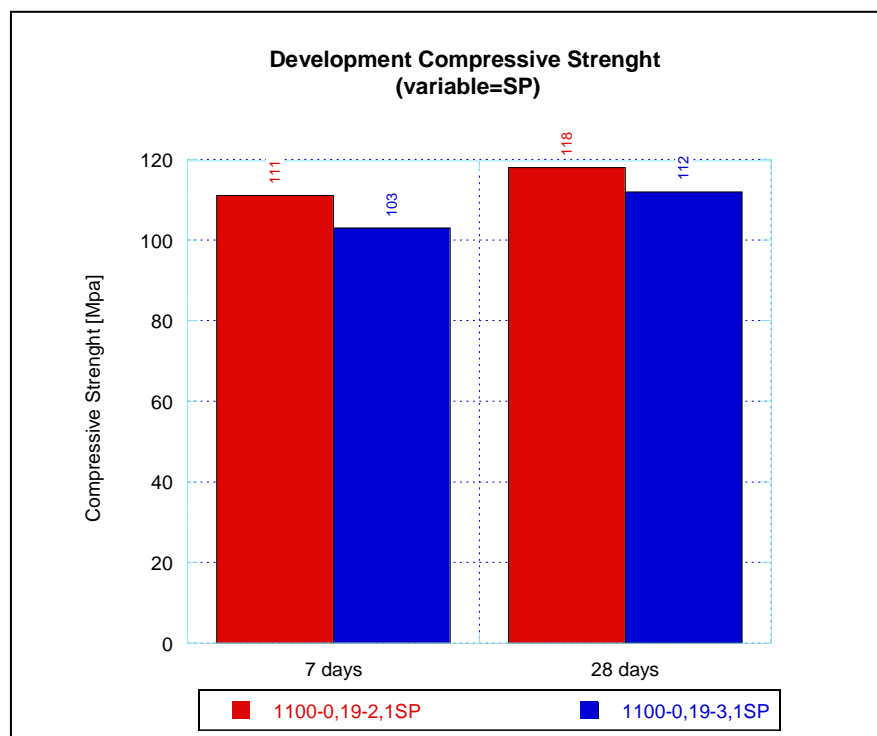


Figura 24: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,19.
Fuente: Elaboración propia.

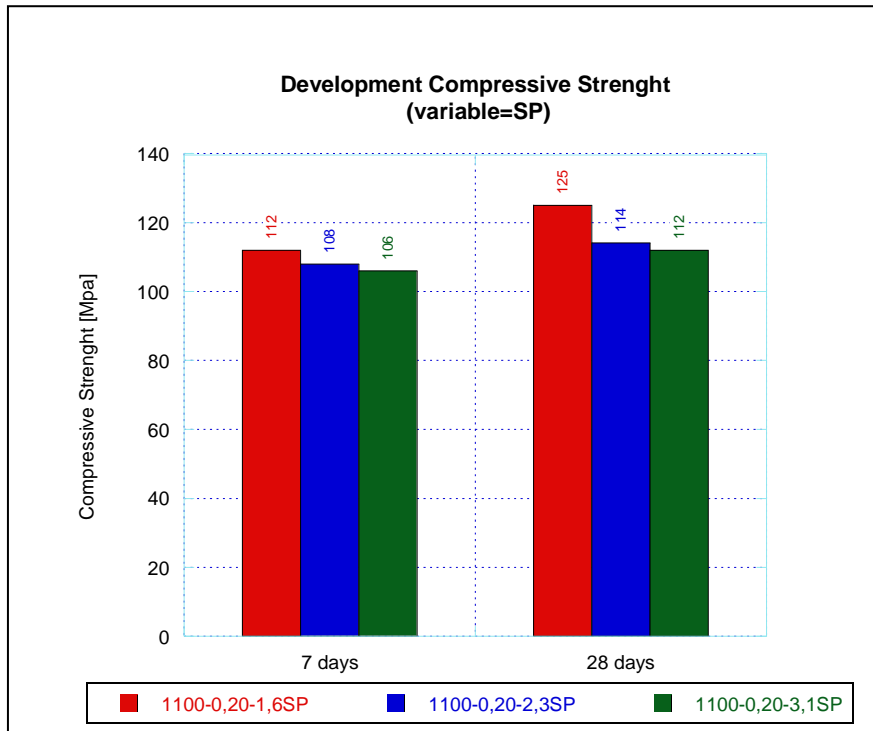


Figura 25: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una relación a/c de 0,20.
Fuente: Elaboración propia.

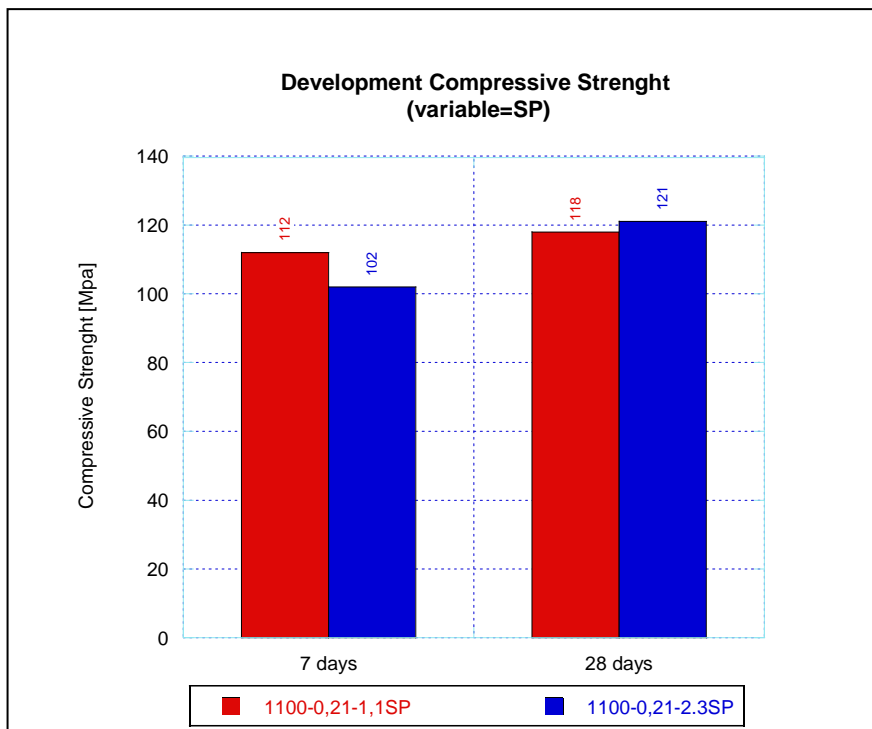


Figura 26: Resistencia a compresión promedio al variar el contenido de SP con una la relación a/c de 0,21.
Fuente: Elaboración propia.

Según las Figuras 24, 25 y 26, se observa que a medida que se aumenta la cantidad de SP la resistencia disminuye significativamente. Al momento de aumentar el contenido de SP, se ha observado que las mezclas resultante arrojaban diámetros mayores en comparación con menores cantidades de SP, lo cual pudo haber influido a la hora de compactar la mezcla consiguiéndose menores valores de resistencia debido que no hubo un posicionamiento proporcional de los elemento que conforman cada mezcla. Se puede intuir que el contenido de SP óptimo es aquel donde la mezcla tiene un diámetro de dispersión de 250 mm al mezclarse y compactarse todos los materiales correctamente.

5.11 Orden y tiempo en mezclado de los componentes de la mezcla

En último lugar se ha modificado la forma en la cual se mezcla cada uno de los elementos de la mezcla para estudiar si las condiciones de mezclado tienen algún efecto en las resistencias obtenidas. El segundo procedimiento utilizado a la hora de mezclar los componentes del mortero fue concebido con la finalidad de, procurar perder la menor cantidad posible de material además de aumentar la energía de amasado. La primera mezcla ensayada (la mezcla de color rojo), ha sido mezclado según el orden y los tiempos indicados en la norma UNE EN 196-01 [40] y la segunda mezcla (la mezcla de color azul), según el procedimiento indicado a continuación:

1. Se mezcla la arena, el cemento y el agua durante 30s a velocidad lenta.
2. Luego, se añade el 75% de agua y se mezcla a velocidad lenta durante 90s.
3. Se deja reposar la mezcla durante 90s.
4. Finalmente se vierte el 25% de agua restante y el SP. Se mezcla todo durante 180s a velocidad lenta y 120s a velocidad alta.

Seguidamente se procederá a calcular la energía de amasado utilizando la siguiente fórmula:

$$EA = \sum \text{Revoluciones} * \text{Tiempo}$$

Mezcla Roja:

$$EA = 140 * 1 + 285 * 0.5 + 285 * 1$$

$$EA = 567.5$$

Mezcla Azul:

$$EA = 140 * 0.5 + 140 * 1.5 + 140 * 3 + 285 * 2$$

$$EA = 1270$$

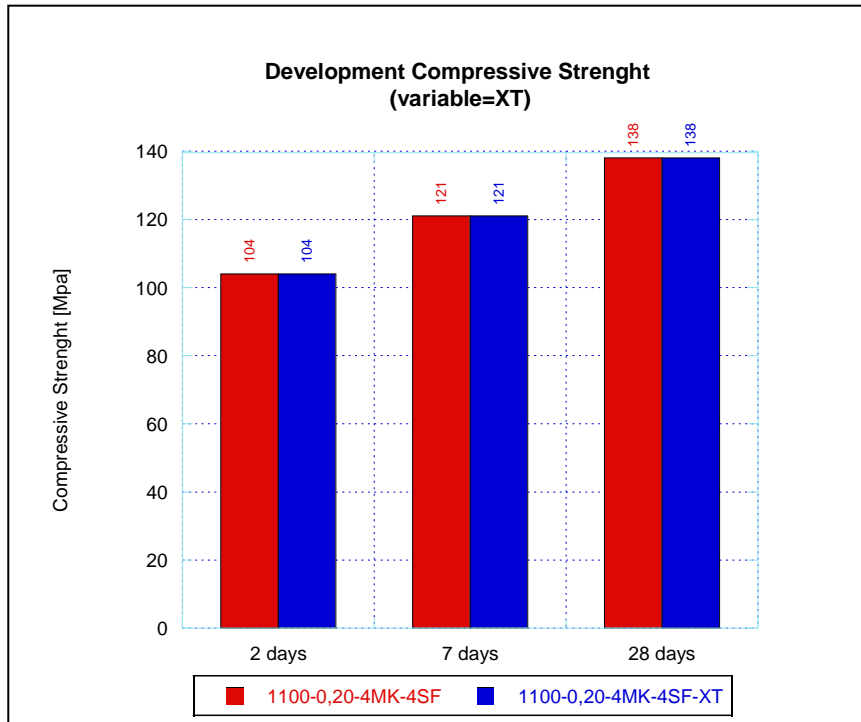


Figura 27: Resistencia a compresión promedio al variar el orden y tiempo de mezclado. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 27, los resultados obtenidos son sumamente similares con ambos métodos de mezclado, a pesar de que la energía de amasado de la mezcla azul es más que el doble que la mezcla roja, 1270 y 567.5 respectivamente. Resultado que no pareciera coherente ya que a mayor energía de amasado la resistencia a compresión debiera aumentar. Además, se puede comprobar que el material perdido durante la mezcla roja no es importante y no afecta la resistencia a compresión en comparación con la mezcla azul, en la cual la pérdida de material es menor.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo ha sido estudiar la influencia de diversas adiciones (MK, SF y nS), contenido de cemento, relación agua/cemento, el contenido de superplastificante y diversos métodos de mezclado en la resistencia a compresión de morteros de ultra altas prestaciones.

Para evaluar este efecto se ha llevado a cabo una campaña experimental y luego un análisis de resultados que conducen a las siguientes conclusiones:

1. La utilización de ambos tipos de nanosilices no aumentó la resistencia a compresión con respecto a las mezclas en las cuales no se utilizó ninguna adición, de hecho, esta adición disminuyó la resistencia encontrada al utilizar humo de sílice.
2. La resistencia a compresión aumentó al aumentar la relación agua/cemento, hasta alcanzar un pico en el cual, a partir de él la resistencia disminuyó, dicho pico se alcanzó con una relación a/c igual a 0,20. Lo cual puede ser consecuencia que, al no ser tan bajo el contenido de agua, el cemento pudo ser hidratado.
3. A igualdad de condiciones, entre todas las adiciones utilizadas, el humo de sílice (SF) permitió obtener los valores más altos de resistencia a compresión.
4. La mezcla en la cual se utilizó todas las adiciones fue la que alcanzó la mayor resistencia a compresión luego de toda la campaña experimental.
5. El contenido óptimo de superplastificante varió para cada una de las mezclas realizadas, siendo éste en el cual se encontró la trabajabilidad adecuada para cada mezcla.
6. El aumentar la energía de mezclado, pareciera, no aumentar la resistencia a compresión. En comparación con aquella mezcla en la cual se utilizó el método estandarizado de mezclado.

Como conclusión general, se puede plantear que, al evaluar las resistencias a compresión de todas las muestras, el mortero que arrojó el mejor comportamiento ha sido aquel en el cual se han utilizado todas las adiciones, siendo el de mejor composición: 1100-0,20-4SF-4MK-1,5 nS OX-50.

Además, se ha observado que todas las adiciones aportan mejoras notables en cuanto a la resistencia a compresión, a excepción de los dos tipos de nanosilices utilizados de forma individual.

CAPÍTULO VII. DESARROLLOS FUTUROS

El autor propone las siguientes líneas de investigaciones futuras para poder profundizar en los fenómenos que ocurren al utilizar adiciones en morteros de altas prestaciones y poder perfeccionar la dosificación de estas mezclas, para alcanzar resistencias más elevadas.

- Se propone realizar ensayos complementarios como pueden ser la porosimetría por intrusión de mercurio, análisis térmico diferencial y la microscopía electrónica de barrido, con la finalidad estudiar la microestructuras del hormigón, para determinar parámetros de suma importancia tales como: el empaquetamiento de las partículas, la hidratación del cemento, entre otros.
- Realizar un mayor número de mezclas en las cuales se varíen el contenido de superplastificante con la finalidad de encontrar curvas de contenidos óptimos de este.
- Realizar un mayor número de muestras las cuales permitan un mejor tratamiento estadístico de los resultados.
- Ejecutar ensayos de compresión a edades más avanzadas 60 o 90 días para tener una idea más precisa en cómo actúan las diversas adiciones a mayores edades de curado.
- Estudiar un mayor número de muestras para determinar la influencia del tiempo de amasado y la energía de compactación. Hasta el momento se ha seguido la normativa propuesta para morteros convenciones y solo un método de amasado diferente.
- Utilizar métodos de curado diferentes al convencional para determinar las variaciones en las resistencias ocasionados por estos.
- Realizar ensayos de las mezclas en estado fresco, para poder estudiar la influencias de los procesos reológicos en los resultados del estado endurecido.

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- [1] Juan Angel Lopez, Civil Eng., Pedro Serna, D., Esteban Camacho, D., Hugo Coll, C.E. & Juan Navarro-Gregori, D. 2014, *First Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete Footbridge in Spain: Design and Construction*.
- [2] Walraven, J.C. 11, *High performance fiber reinforced concrete: progress in knowledge and design codes, Materials and Structures*, vol. 42, no. 9, pp. 1247-1260.
- [3] Arora, A., Aguayo, M., Hansen, H., Castro, C., Federspiel, E., Mobasher, B. & Neithalath, N. 2018, *Microstructural packing- and rheology-based binder selection and characterization for Ultra-high Performance Concrete (UHPC)*.
- [4] Graybeal, B. 2011, *Ultra-high performance concrete*.
- [5] Reda, M.M., Shrive, N.G. & Gillott, J.E. 1999, *Microstructural investigation of innovative UHPC*.
- [6] Massana, J., Reyes, E., Bernal, J., León, N. & Sánchez-Espinosa, E. 2018, *Influence of nano- and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete*.
- [7] Wang, D., Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Huang, Z. & Fang, Z. 2015, *A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties*.
- [8] Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Dehui Wang, Zhengyu Huang, Zhi Fang 15/10/2015, *A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design*.
- [9] Richard, P. & Cheyrezy, M. 1995, *Composition of reactive powder concretes*.
- [10] Chan, Y. & Chu, S. 2004, *Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete*.
- [11] Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Yiğiter, H., Aydın, S. & Türkel, S. 2010, *Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag*.
- [12] Yazıcı, H., Yiğiter, H., Karabulut, A.Ş. & Baradan, B. 2008, *Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete*.
- [13] H. Yazici, M.Y. Yardimci, S. Aydin, A.S. Karabulut, *Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes, Constr. Build. Mater.* 23 (3) (2009) 1223-1231.

- [14] J. Zheng China, 2007., " *The experimental research on metakaolin reaction power concrete (Ph.D. thesis), Central South University*".
- [15] A. Ma 2008, " *Experimental study on reactive powder concrete with environmentprotecting and energy-saving properties (Ph.D. thesis), Beijing Jiaotong University*".
- [16] Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S. & Vidal, T. 2009, *Metakaolin in the formulation of UHPC*.
- [17] Shi, Y., Matsui, I. & Feng, N. 2002, *Effect of compound mineral powders on workability and rheological property of HPC*.
- [18] Zhu, W. & Gibbs, J.C. 2005, *Use of different limestone and chalk powders in self-compacting concrete*.
- [19] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. & Pu, X. 2012, *Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials*.
- [20] Svermova, L., Sonebi, M. & Bartos, P.J.M. 2003, *Influence of mix proportions on rheology of cement grouts containing limestone powder*.
- [21] X. Ning, *Study on reactive powder concrete with steel-slag powder (Ph.D. thesis), Beijing University of Technology, China, 2007.*"
- [22] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, et al. *The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete, Constr. Build. Mater. 25 (4) (2011) 2030-2035*.
- [23] Van Tuan, N., Ye, G., van Breugel, K. & Copuroglu, O. 2011, *Hydration and microstructure of ultra high performance concrete incorporating rice husk ash*.
- [24] L.T. Ha, K. Siewert, H.M. Ludwig, *Synergistic effect of rice husk ash and fly ash on properties of self-compacting high performance concrete, in: Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials. Kassel, Germany, 2012.*"
- [25] V.T.A. Van, H.M.L. Kassel, Germany, 2012, *Proportioning optimization of UHPC containing rice husk ash and ground granulated blast-furnace slag, no. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials*.
- [26] Zhao, S., Fan, J. & Sun, W. 2014, *Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete*.
- [27] S. Collepardi, L. Coppola, R. Troli, et al. *Mechanical properties of modified reactive powder concrete, ACI Spec. Pub. (1997) 173*.

- [28] S. Monosi, G. Pignoloni, S. Collepardi, et al. *Modified reactive powder concrete with artificial aggregates*, *ACI Spec. Pub.* (2000) 195.
- [29] M. Courtial, M.N. de Noirfontaine, F. Dunstetter, et al. *Effect of polycarboxylate and crushed quartz in UHPC: microstructural investigation*, *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 699-705.
- [30] C. Schröfl, M. Gruber, J. Plank, *Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)*, *Cem. Concr. Res.* 42 (11) (2012) 1401–1408.
- [31] H. Yazici, *The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures*, *Build. Environ.* 42 (5) (2007) 2083-2089.
- [32] L. Massidda, U. Sanna, E. Cocco, P. Meloni, *High pressure steam curing of reactive-powder mortars*, *ACI Mater. J. SP200-27* (2001) 447–464.
- [33] Morejón, L. 2015, "*Morteros de cemento con adiciones de humo de sílice y nanosílice*".
- [34] Muhd Norhasri, M.S., Hamidah, M.S., Mohd Fadzil, A. & Megawati, O. 2016, *Inclusion of nano metakaolin as additive in ultra high performance concrete (UHPC)*.
- [35] Heche, C. 2011, "*Análisis de la adición de nano-partículas en la microestructura de materiales a base de cemento*".
- [36] Jo, B., Kim, C., Tae, G. & Park, J. 2007, *Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles*.
- [37] Li, H., Xiao, H., Yuan, J. & Ou, J. 2004, *Microstructure of cement mortar with nano-particles*.
- [38] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C. & Pu, X. 2012, *Preparation of Ultra-High Performance Concrete with common technology and materials*.
- [39] UNE EN 193-1. (2005).
- [40] UNE EN 196-1. (2005). *Métodos de ensayos de cementos*.