



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación experimental del uso de microsílíce para la
elaboración de concreto de alta resistencia**

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Civil

Eric Alexander Vega Castro

Asesor:
MSc. Christian Mario Varhen Garcia

Piura, noviembre de 2019



A mi familia, por su amor y por permitirme recorrer este largo camino.

A mis amigos, por su sincero apoyo.

A mis profesores, por compartir su tiempo y conocimientos.





Resumen Analítico-Informativo

Evaluación experimental del uso de microsílice para la elaboración de concreto de alta resistencia.

Eric Alexander Vega Castro

Asesor(es): MSC. Christian Mario Varhen García

Tesis.

Título de Ingeniero Civil

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura, Octubre de 2019

Palabras claves: concreto/ alta resistencia/ diseño de mezcla/ ACI 211.4R/ microsílice/ agregados de Piura/ superplastificante.

Introducción: La presente tesis buscó evaluar experimentalmente el uso de la microsílice como adición para conseguir un concreto de alta resistencia. Se empleó cemento tipo MS y diferentes porcentajes de reemplazo de microsílice. También, se utilizó agregados de la zona costera de la región Piura y superplastificante. Para el diseño planteado se siguió lo recomendado por el ACI 211.4R.

Metodología: Para la elaboración del concreto de alta resistencia se comenzó con la caracterización de agregados. Aplicando el ACI211.4R se elaboró una tanda patrón (0% microsílice), tres tandas de reemplazo de microsílice (10%,15% y 20%) y se ajustó la cantidad de superplastificante con dos mezclas de prueba. Para cada una de concretos evaluados, en estado fresco se midió la temperatura, peso unitario y trabajabilidad (slump), y en estado endurecido la resistencia a la compresión para posteriormente analizar los resultados.

Resultados: De los diseños elaborados en laboratorio se obtuvo en estado fresco un valor de asentamiento promedio de 10 cm y en el estado endurecido, los resultados promedio de la resistencia a la compresión para tanda de reemplazo de 10% de microsílice fue de 502 kg/cm². Además, se presentan los resultados de las demás propiedades y parámetros evaluados en el concreto como fueron la temperatura, peso unitario y trabajabilidad.

Conclusiones: Los resultados obtenidos proveen un estudio inicial sobre los diseños de mezcla para concretos de alta resistencia y su comportamiento experimental, en laboratorio, utilizando microsílice como adición mineral. Se concluye que el orden y el tiempo de mezclado de los materiales influye en el comportamiento del concreto en estado fresco. Además, los mejores resultados de resistencia a la compresión se lograron con un 10% de reemplazo de microsílice.

Fecha de elaboración del resumen: 24 de Setiembre de 2019

Analytical-Informative Summary

Experimental evaluation of the use of silica fume for the elaboration of high strength concrete

Eric Alexander Vega Castro

Advisor: Msc. Christian Mario Varhen García

Thesis

Title of Civil Engineer

Universidad de Piura. Facultad de Ingeniería.

Piura,

Keywords: concrete/ silica fume/ superplasticizer/ high strength concrete/ mixture proportioning/ aggregates of Piura.

Introduction: The present thesis sought to experimentally evaluate the use of microsilica as an addition to achieve a high strength concrete. Type MS cement and different percentages of microsilica replacement were used. Also, aggregates from the coastal zone of the Piura region and superplasticizer were used. For the proposed design, the recommendations of the ACI 211.4R were followed.

Methodology: For the preparation of high strength concrete, the characterization of aggregates began. Applying the ACI211.4R, a standard batch (0% microsilica), three microsilica replacement batches (10%, 15% and 20%) were prepared and the amount of superplasticizer was adjusted with two test mixtures. For each of the concrete evaluated, in the fresh state the temperature, unit weight and workability (slump) were measured, and in the hardened state the compressive strength to subsequently analyze the results.

Results: From the designs made in the laboratory, an average settling value of 10 cm was obtained in the fresh state and in the hardened state, the average compression resistance results for a 10% replacement batch of microsilica was 502 kg / cm². In addition, the results of the other properties and parameters evaluated in the concrete are presented, such as temperature, unit weight and workability.

Conclusions: The results obtained provide an initial study on mixing designs for high strength concretes and their experimental behavior, in the laboratory, using microsilica as a mineral addition. It is concluded that the order and mixing time of the materials influences the behavior of the concrete in the fresh state. In addition, the best compressive strength results were achieved with a 10% microsilica replacement.

Summary date: October, 2019

Prefacio

El crecimiento económico que ha venido experimentado el Perú en las últimas dos décadas ha permitido el desarrollo del sector construcción debido a una mayor demanda por parte del sector minero e industrial, la realización de proyectos de mediana escala y el aumento de la demanda habitacional. Es en este contexto en el que ha sido necesaria la optimización de procesos y la renovación de los materiales con el fin de adaptarse a nuevas necesidades. A todo esto, la industria concretera del país no ha sido ajena, pues en el mercado nacional se tiene presencia de una gran variedad de diseños de mezcla, muchos de los cuales han sido fabricados para resolver necesidades particulares en determinados proyectos.

Una de estas soluciones planteadas ha sido el concreto de alta resistencia (*HSC*, por sus siglas en inglés), el cual es un concreto de alta performance que se caracteriza por una resistencia a la compresión a 28 días mayor a 420 kg/cm^2 (6000 psi). En comparación con concretos normales diseñados con el ACI 211, HSC garantiza una mayor durabilidad pues se reduce la porosidad del concreto, generando una mayor vida útil y menores costos de mantenimiento, además son necesarios los diseños de mezcla optimizados con ello se logra emplear una menor cantidad de cemento y se incluye el uso de residuos industriales procesados como adiciones minerales. Toda esta sinergia permite disminuir su impacto ambiental.

La presente investigación busca explorar, experimentar y analizar la fabricación de concreto de alta resistencia usando reemplazos de microsílíce, superplastificante y agregados locales, para así ampliar el conocimiento que se tiene sobre este tipo de concreto y se considere su uso no sólo cuando se necesite lograr altas resistencias sino también enfocándolo desde su mayor durabilidad y menor impacto ambiental.

Para finalizar, quiero agradecer al Ingeniero Christian Varhen García, al personal técnico del Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (**LEMC**), al Sr. Luis León por la ayuda brindada a través de **Ferreterías Cottler SAC**, al Ingeniero Antonio Sánchez de **Química Suiza Industrial** y a mis compañeros tesisistas, Diego Cánova, Yelitza Ochoa y Renzo San Martín, que han contribuido a la realización de la parte experimental de este trabajo de investigación.



Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo 1 Marco teórico	3
1. Generalidades	3
2. Antecedentes históricos.....	3
3. Aplicaciones y ventajas	5
4. Microsílíce.....	8
4.1. Propiedades y reacciones en el concreto.	10
4.1.1. <i>Propiedades químicas.</i>	10
4.1.2. <i>Propiedades físicas.</i>	11
4.1.3. <i>Reacciones en el concreto.</i>	11
4.2. Ventajas.....	13
5. Superplastificante	14
5.1. Ventajas.....	15
6. Diseño de mezcla según ACI 211.4R.....	16
7. Ecoeficiencia del concreto	20
7.1. Índice de ligante.....	21
Capítulo 2 Programa experimental	23
1. Ensayos.....	23
1.1. Caracterización de agregados.....	24
1.1.1. <i>Granulometría de agregados.</i>	24
1.1.2. <i>Capacidad de absorción y peso específico.</i>	24
1.1.3. <i>Peso unitario de los agregados.</i>	24
1.1.4. <i>Humedad total.</i>	24
1.2. Concreto en estado fresco	24
1.2.1. <i>Trabajabilidad.</i>	24
1.2.2. <i>Peso unitario y temperatura.</i>	25
1.3. Concreto en estado endurecido	25
1.3.1. <i>Resistencia a la compresión.</i>	25
2. Materiales	25
2.1. Cemento.	25
2.2. Agua.	26
2.3. Agregados.....	26
2.3.1. <i>Agregado fino.</i>	26
2.3.1.1. <i>Granulometría.</i>	27

2.3.1.2.	<i>Módulo de finura.</i>	28
2.3.1.3.	<i>Parámetros físicos básicos.</i>	28
2.3.2.	<i>Agregado grueso.</i>	29
2.3.2.1.	<i>Granulometría.</i>	29
2.3.2.2.	<i>Módulo de finura.</i>	30
2.3.2.3.	<i>Parámetros físicos básicos.</i>	30
2.4.	Microsílice.	31
2.5.	Superplastificante.	31
3.	Diseño de mezcla ACI 211.4R	32
3.1.	Diseño del concreto patrón.	32
3.2.	Diseño del concreto con reemplazos de microsíllice.	32
4.	Mezclado	33
Capítulo 3 Resultados		35
1.	Concreto en estado fresco	35
1.1.	Temperatura.	35
1.2.	Peso unitario y rendimiento.	36
1.3.	Trabajabilidad.	37
2.	Concreto en estado endurecido	39
2.1.	Resistencia a la compresión.	39
2.2.	Patrones de falla de las probetas.	42
2.3.	Índice de ligante.	43
Conclusiones		45
Recomendaciones		47
Referencias bibliográficas.		49
Apéndices		53

Lista de tablas

Tabla 1. Comparación de los tamaños de las partículas de microsílíce con otros componentes del concreto	12
Tabla 2. Comparación de las características físicas y químicas del cemento portland, ceniza volante, cemento con escorias y microsílíce.	13
Tabla 3. Slump recomendado para concretos de alta resistencia con y sin superplastificante.	17
Tabla 4. Resistencia de diseño promedio	17
Tabla 5. Tamaño máximo del agregado grueso	17
Tabla 6. Volumen recomendado para el agregado grueso por unidad de volumen de concreto.	17
Tabla 7. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire del concreto basado en el uso de una arena con 35% de vacíos.	18
Tabla 8. Relación agua/materiales cementantes para concretos con superplastificante.....	19
Tabla 9. Relación agua/materiales cementantes para concretos sin superplastificante.....	19
Tabla 10. Composición química del cemento Portland Tipo MS usado en la presente investigación.....	26
Tabla 11. Granulometría del agregado fino (Cantera de Chulucanas).....	27
Tabla 12. Tabla resumen de la caracterización del agregado fino.	28
Tabla 13: Granulometría del agregado grueso (Cantera de Sojo).....	30
Tabla 14. Tabla resumen de la caracterización del agregado grueso.	30
Tabla 15. Datos técnicos microsílíce.....	31
Tabla 16. Composición química de EUCON MSA - Microsílíce.....	31
Tabla 17. Datos técnicos del superplastificante EUCO 537	32
Tabla 18. Resumen de los diseños de mezcla elaborados	32
Tabla 19. Peso unitario, rendimiento y contenido de cemento de la mezcla patrón y los reemplazos por microsílíce.....	36
Tabla 20. Resistencia a la compresión a 28 días y otros factores calculados.....	40
Tabla 21. Resistencia a la compresión mezcla MS-10.....	41
Tabla 22. Resumen de valores del índice de ligante en los diseños de mezcla elaborados	43



Lista de figuras

Figura 1. Trump International Hotel and Tower	6
Figura 2. Durmiente de concreto de alta resistencia	6
Figura 3. Esquema de la producción de microsílíce.....	9
Figura 4. Esquema del proceso de recolección de microsílíce. A: Horno de arco eléctrico. B: Chimenea. C: Pre colector. D: Ventilador. E: Filtro de bolsa de aire.	9
Figura 5. Comparación del tamaño de una partícula de microsílíce. Si una persona (1.80m) tuviera el tamaño de una partícula de microsílíce, entonces un grano de cemento sería aproximadamente del tamaño del monumento a Washington (169 m).....	12
Figura 6. Ensayo a la compresión en prensa hidráulica	25
Figura 7. Ubicación cantera Chulucanas.....	27
Figura 8. Agregado fino de la cantera de Chulucanas.....	27
Figura 9. Curva granulométrica del agregado fino, procedente de la cantera Chulucanas	28
Figura 10. Ubicación cantera Sojo.	29
Figura 11. Agregado grueso chancado de la cantera Sojo.	29
Figura 12. Curva granulométrica del agregado grueso, procedente de la cantera Sojo.	30
Figura 13: Segregación del agregado grueso e insuficiente pasta dentro de la mezcla de una tanda con microsílíce antes de llegar al orden de mezclado óptimo de los componentes.....	33
Figura 14. Resultado de temperatura para los diferentes reemplazos de microsílíce	35
Figura 15. Resultados de peso unitario real y teórico para los diferentes reemplazos de microsílíce.	36
Figura 16. Valores de slump para diferentes porcentajes de microsílíce.	38
Figura 17. Trabajabilidad de la primera tanda del diseño "MS-10" con 3.5 cm de slump.	38
Figura 18. Trabajabilidad de la segunda tanda del diseño "MS-10" con 10 cm de slump.....	38
Figura 19. Resistencia a la compresión a 28 días de tanda patrón y tandas de reemplazo.	40
Figura 20. Resistencia a la compresión mezcla MS-10.	41
Figura 21. Fractura diagonal sin grietas en la base.	42
Figura 22. Cono formado sobre una base y desplazamiento de grieta vertical a través de las capas	42
Figura 23. Índice de ligante a 28 días de los diseños de mezcla elaborados.....	43



Introducción

En la última década, el Perú destacó como una de las economías de mayor solidez en la región, con una tasa de crecimiento anual promedio de 5.9 por ciento en un entorno de baja inflación. Piura, ciudad al norte de Perú, es una de las regiones con mayor cantidad de recursos naturales, con una estratégica ubicación geográfica y una estructura productiva favorable, además de ser la segunda región más poblada del país, lo que cada vez genera mayores expectativas de grandes y medianas inversiones tanto del sector público y como privado (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2013) .

Históricamente la región ha tenido en la agricultura a su principal actividad económica, produciendo arroz, algodón, banano, mango y limón. Siendo necesario una adecuada captación, suministro y distribución de agua. Sin embargo, las principales represas, Poechos y San Lorenzo, han visto mermadas sus capacidades por problemas de sedimentación que requieren de una mejora en sus estructuras. La minería es otra actividad que ha propiciado este crecimiento siendo el petróleo de Talara, los fosfatos de Bayóvar y el cobre de Huancabamba los recursos principales, lo que genera una creciente demanda de infraestructura que permita su continuidad. Además, el crecimiento demográfico que esto genera conlleva con urgencia al mejoramiento y ampliación de los servicios que brindan sectores como educación, salud, saneamiento y transporte, por lo que atravesamos por una etapa en la que es necesario mejorar la calidad de los proyectos, optimizando procesos e implementando nuevos y más eficientes materiales.

El concreto de alta resistencia (HSC, High Strength Concrete, por sus siglas en inglés) es una alternativa a tener en cuenta y que cada vez va generalizando su uso. HSC es un concreto de alta performance que se caracteriza por una resistencia a la compresión a 28 días mayor a 420 kg/cm^2 (6000 psi). Si bien el “American Concrete Institute” lo califica en un rango mayor a 560 kg/cm^2 (8000 psi) dado que en Estados Unidos y Japón concretos con resistencias a la compresión menores a ese valor se utilizan de forma comercial. Este rango es variable de acuerdo a la zona en donde se produce.

Grandes proyectos que comprenden el mejoramiento y ampliación de carreteras departamentales, puertos y aeropuertos, construcción de mega estructuras para embarcaciones industriales y petroleras, ampliación y mantenimiento de reservorios están contemplados en el Plan de Desarrollo Regional Concertado (PDRC) (Gobierno Regional de Piura, 2017) los cuales servirían para poner a prueba este tipo de concreto, asegurando grandes resistencias, durabilidad y un menor impacto ambiental.

Es por lo mencionado hasta este momento que la siguiente investigación buscó probar un diseño de mezcla siguiendo la metodología planteada por el ACI 211.4R para concretos de alta resistencia, empleando agregados de canteras de la zona costera de la región Piura y buscando incorporar una adición mineral y un aditivo superplastificante. El objetivo fue evaluar experimental el uso de una adición como la microsílíce en diversas cantidades para conseguir un concreto de alta resistencia. Para ello se contactó con distribuidores locales de aditivos y se obtuvo una respuesta favorable por parte de la empresa Química Suiza, quién a través de su área de ventas accedió a donar la microsílíce y el superplastificante usados.

El presente trabajo desarrolla en el capítulo 1 el marco teórico concerniente al concreto de alta resistencia, la metodología para su diseño y las particularidades de todos los elementos usados en su fabricación; el capítulo 2 presenta los ensayos realizados tanto para los agregados como para el concreto elaborado y el capítulo 3 muestra los resultados obtenidos de toda la evaluación experimental.



Capítulo 1

Marco teórico

1. Generalidades

El concreto es un material que ha sido utilizado a lo largo de toda la historia moderna de la construcción, aunque no es hasta hace unas décadas atrás en donde los investigadores e ingenieros han empezado a optimizarlo, tanto para aumentar su resistencia a la compresión como para hacerlo durable a todo tipo de agentes externos. Es así como el desarrollo de concretos de alta resistencia ha sido gradual y su definición viene siendo cambiante a medida que nuevos materiales y técnicas se estudian y perfeccionan.

No existe un punto exacto de separación entre “resistencia normal” y “alta resistencia”. De acuerdo con el ACI (*American Concrete Institute*), los concretos de alta resistencia están definidos por una resistencia a la compresión superior a los 56 MPa (560 kg/cm²) aunque reconoce que esta definición puede cambiar debido al lugar en donde se fabrique y comercialice. Así, en la década de los 50, los concretos con una resistencia a la compresión de 350 kg/cm² a los 28 días eran considerados de alta resistencia mientras que actualmente el límite está muy por encima, llegando a obtener resistencias de hasta 1400 kg/cm² en países como Estados Unidos y Japón por lo que claramente se ve que la tendencia irá en aumento con el paso del tiempo. En el Perú debido a la investigación en la tecnología de materiales, especialmente de aditivos y adiciones se ha llegado a producir concretos de hasta 700 kg/cm² (Rivva, 2002).

El concreto de alta resistencia se presenta como una alternativa de solución no sólo en proyectos donde es importante tener elementos de poco peso o donde las consideraciones arquitectónicas requieren elementos de carga con secciones reducidas, sino también cuando se busca una mayor durabilidad de las estructuras, reducir al mínimo los costos generados por los encofrados, el mantenimiento y por consecuencia alargar la vida útil. Todas estas características traen consigo una reducción de la huella de carbono llevando la eficiencia del sector construcción a un nivel mayor (Portland Cement Association, 1994).

2. Antecedentes históricos

El desarrollo de la tecnología del concreto ha sido siempre continuo y el concreto de alta resistencia no ha sido la excepción. A principios de la década de 1970, investigadores estadounidenses predijeron que sería improbable que el límite práctico de resistencia a la compresión de un concreto llegaría a exceder los 11000 psi (700kg/cm²) siendo los rangos comerciales para la época menores a 300 kg/cm² lo que colocaba a esa cifra en un rango bastante difícil de superar. Actualmente solamente en la ciudad de Seattle, Washington, existen dos

edificios con concretos de 19000 psi (1300 kg/cm^2) lo que demuestra claramente que la constante investigación de nuevos materiales ha llevado a la tecnología del concreto a niveles superlativos (Portland Cement Association, 2016).

Teóricamente se tenía el conocimiento que mientras más se redujera la relación agua-cemento la resistencia a la compresión sería mayor. Sin embargo, era contraproducente a nivel práctico pues no se lograba la trabajabilidad adecuada, haciendo que los diseños buscaran relaciones en donde la cantidad de agua sea mayor para no comprometer la trabajabilidad de la mezcla.

Los primeros pasos en el desarrollo de HSC, a nivel del laboratorio, comenzaron con incrementos en la resistencia a la compresión debido al desarrollo de los primeros plastificantes en la década de 1960, pues el principal problema que presentaba usar relaciones agua-cemento muy bajas era la poca o nula trabajabilidad de la mezcla. No fue hasta la década de 1980 que el uso en el mercado estadounidense se generalizó llegando a tener bajas relaciones agua-cemento sin sacrificar la trabajabilidad (Rivva, 2002).

En la década de los 50 los humos de los altos hornos de la industria de las aleaciones del ferrosilicón, por disposición del Gobierno de Noruega en función a su acción negativa sobre el medio ambiente, empezaron a ser decantados y recolectados con el nombre de humos de sílice o de microsíllice como actualmente se les conoce. Más adelante, en la década de 1970, el mismo gobierno dictó medidas adicionales de protección contra los humos de la industria de las aleaciones. Ello obligó a los fabricantes a desarrollar nuevos procedimientos en la tecnología de los filtros de decantación lo que permitió en pocos años disponer de grandes cantidades de microsíllice y con ello a ampliar las investigaciones sobre el posible empleo de las mismas en el campo del concreto (Rivva, 2002).

Es así que a mediados de la década de 1990 ingenieros y expertos en la ciencia de los materiales se involucraron en la optimización de la resistencia a la compresión del concreto logrando que se utilicen los plastificantes de forma comercial en mayor medida. Por muchos años, concretos con resistencias mayores a 400 kg/cm^2 a 28 días sólo estaban disponibles en pocas localidades, pero con el tiempo la tendencia se ha ido revirtiendo, generalizando el uso de concretos cada vez más resistentes en muchos proyectos alrededor del mundo y en Perú se ha llegado a fabricar concretos en obra de alrededor de 700 kg/cm^2 .

El desarrollo de este tipo de concreto se debe a las condiciones físicas (materias primas y suelos) y a la demanda en el mercado local, pues en las grandes ciudades como Chicago, New

York, Tokyo o Dubai acogen una gran demanda por los edificios de gran altura y por ende registran resistencias mucho más altas en comparación a otros lugares. Sin embargo, este conocimiento que principalmente se generó para este tipo de edificaciones de gran altura ha ido adoptándose a niveles mucho más cercanos a nuestra realidad y extrapolándose a otro tipo de estructuras siendo la tendencia actual usarlo en torres residenciales, elementos prefabricados, presas y hasta en carreteras (Kopczynski, 2014).

Siddique (2011) recopila diferentes investigaciones respecto a la elaboración de concreto de alta resistencia empleando microsílíce. De los estudios revisados se infiere que, las propiedades mecánicas son afectadas debido a la mejora en la fase agregado-pasta y se muestra un aumento de la resistencia a la compresión entre los 7 días hasta los 90 días. Por el contrario, en edades tardías, 91 días hasta los 5 años, no se registra mayor aumento de resistencia en las mezclas con reemplazos de microsílíce en contraste con las mezcla de control (0% de microsílíce). Wong y Razak (2005) presentan que los efectos de mejora de las propiedades mecánicas no se dan antes de los 7 días y probablemente se deba a la dilución del efecto puzolánico. Sobolev (2004) observó que incrementar la dosificación del superplastificante de 8% a 18% llevó a pasar de relaciones a/cm 0.31 a 0.26 y que la máxima resistencia a la compresión, en su estudio, la logró con reemplazos de microsílíce del 15%. Lo que da cuenta que, el campo de investigación es muy amplio y aún con mucho conocimiento por conseguir.

3. Aplicaciones y ventajas

Los concretos de alta resistencia con microsílíce tienen una amplia aplicación en la construcción de edificios e infraestructura de concreto armado en el mundo. Edificios de 70 plantas han sido puestos en obra, con el debido cuidado que ameritan, sin presentar mayores complicaciones. Igualmente se ha empleado en el rediseño de columnas de 35Mpa (350 kg/cm²) a 70Mpa (700 kg/cm²) con el fin de tomar ventaja de la economía del empleo de los concretos con microsílíce. El rediseño permite obtener columnas de secciones menores por lo tanto mayor área disponible por piso y permite un ahorro en el acero de refuerzo contenido en cada columna (Silica Fume Association, 2005). En la **Figura 1** se muestra el edificio con núcleo de concreto armado más alto del mundo ubicado en Chicago, Estados Unidos y en la **Figura 2** se ven durmientes de concreto armado prefabricados diseñados para vías ferroviarias.



Figura 1. Trump International Hotel and Tower.

Fuente: <https://www.trumphotels.com/chicago>



Figura 2. Durmiente de concreto de alta resistencia.

Fuente: <http://www.cronicaferroviaria.blogspot.com>.

Utilizar concreto con microsílce en estructuras donde la baja permeabilidad es una prioridad ha dado buenos resultados. La fineza de las microsílces y su naturaleza puzolánica ayuda a densificar la estructura capilar de la pasta de mortero logrando aumentar la impermeabilidad y durabilidad del concreto. En el pasado, sellantes superficiales tales como concretos con látex han sido empleados en un intento de proteger el acero de refuerzo del ataque de cloruros lo cual representaba costos en el tiempo de construcción y en la repetición de la aplicación del sellante de mantenimiento. Las sobre capas con concreto con microsílces muestran niveles de penetración del cloruro que corresponden a sólo 1/5 del de los concretos convencionales a la misma edad. La alta densidad es la base de la superioridad de este tipo de concretos. Las finas partículas de microsílce se acomodan en los espacios que hay entre las densamente

acomodadas partículas de cemento y las normalmente bien acomodadas partículas de agregado fino y grueso (Silica Fume Association, 2005).

Otra ventaja que se aprovecha en la industria de la prefabricación, construcción y en procesos de mantenimiento, son las altas resistencias iniciales a fin de reutilizar los moldes rápidamente logrando un menor tiempo de paralización en aquellos proyectos que requieren suspensión de otras actividades durante la construcción y una puesta en servicio mucho más pronta. También se sabe que gran parte del costo de fabricación es aportado por los encofrados, elementos más pequeños reducen la cantidad de estos por lo que resulta en un ahorro adicional que se debe tomar en cuenta (Rivva, 2002).

Los concretos con microsílíce han sido empleados en la construcción de puentes, contemplando su utilización para obtener altas resistencias, baja permeabilidad, alta resistividad eléctrica, impedimento del paso de cloruros al acero de refuerzo, capas de cubierta de losas y control de la reacción álcali-agregado (Russell, 1999). En la actualidad su utilización se ha ampliado a los pilares masivos de puentes.

Otro escenario donde el concreto con microsílíce ha sido una alternativa de solución, es el diseño y reparación de pisos industriales, ya que presenta resistencia al desgaste y a productos químicos derivados de la producción industrial de alimentos. Mezclas en donde se ha adicionado 21% de microsílíce del peso del cemento han logrado un importante incremento de la resistencia a la compresión y una disminución en su permeabilidad (Rivva, 2002).

Además, la durabilidad es una propiedad que mejora considerablemente con el uso de materiales cementantes de mayor densidad como lo es la microsílíce, generando una mayor vida útil, menor impacto ambiental y disminución de los costos de mantenimiento (Russell, 1999). Al construir concretos que sean menos porosos y más resistentes, alarga la vida útil, disminuye la demanda total de volumen de concreto por proyecto y esto contribuye en la reducción de la huella de carbono, haciendo más sostenible la industria del concreto. Cabe mencionar que la industria de la construcción contribuye aproximadamente entre 5% a 10% del CO₂ generado por todas las actividades humanas y la mayor parte viene dado por los procesos de fabricación y construcción. Entonces, una mejora de estas etapas significaría una gran contribución en la reducción de los efectos de gas invernadero (Fidjestol & Terje Thorstensen, 2012).

En cuanto al ahorro en costos y rentabilidad es suficiente indicar que la compañía AT&T tiene proyectado un ahorro de un millón de dólares en un plazo de 20 años por el empleo de concreto con microsílíce en lugar de un sellante convencional (Rivva, 2002). Cabe mencionar también que el Departamento de Transportes del Estado de Tennessee ha minimizado el tiempo en que las líneas del puente Loudon estuvieron cerradas por reparación, ello gracias al empleo

de concretos a los cuales se había adicionado microsílíce en la sobre capa de 4" sometida a reparación. El concreto con microsílíce fue entregado en camiones mezcladores y se produjo concretos de 365kg/cm^2 a los tres días (Rivva, 2002). La alta resistencia de estos concretos significa un ahorro considerable en los proyectos, lo cual viene siendo tomado en cuenta por los ingenieros de presupuestos al momento de decidir la propuesta idónea.

Para la fabricación de concretos con microsílíce es indispensable una buena dosificación de los materiales, un mezclado correcto siguiendo prácticas de colocación, consolidación y curado convencionales para asegurar la calidad final del concreto en cuestión.

4. Microsílíce

El Instituto Americano del Concreto define a la microsílíce como “una muy fina no cristalizada sílice producida en hornos de arco eléctrico obtenida como subproducto de la fabricación de silicio elemental o aleaciones que contienen silicio” (Silica Fume Association, 2005).

La microsílíce es un material altamente reactivo que es usado en pequeñas cantidades para incrementar las propiedades del concreto. En la **Figura 3** se puede observar un esquema de la producción de la microsílíce. Materiales con componentes de silicio tienen muchas aplicaciones industriales que incluyen la producción de acero y aluminio, chips de computadoras y la fabricación de siliconas que son ampliamente usadas en lubricantes o selladores. Si bien estos son materiales muy valiosos, el subproducto que generan es de mayor importancia para la industria del concreto.

La Asociación de Microsílíce (*SFA* por sus siglas en inglés) reconoce que en el mercado se le consigue por otros nombres como son: “Humo de sílice, humo de sílice condensado o sílice volatilizada”. Todos estos guardan referencia al proceso de fabricación que atraviesa.

Las fundiciones antes de implementar los equipos para capturar microsílíce enviaban los gases a la atmósfera. Actualmente se atrapan en grandes filtros tipo bolsa, en inglés se les conoce como “*baghouse filter*”, para luego ser empleada como aditivo. En la **Figura 4** se muestra un esquema de este proceso. Según el Comité Europeo de Microsílíce la fabricación de este producto sigue la filosofía del “reducir, reutilizar, reparar y mejorar la eficiencia en el uso de recursos” todo ello amparado en normas como la European Standard EN 13263, parte 1 y 2 y la ASTM C1240, por lo que esta industria posee estándares de calidad muy altos lo que asegura el menor impacto al medio ambiente y un producto de gran nivel distribuido internacionalmente.

Se estima que anualmente se producen 15 millones de m³ por año de concretos usando microsílíce (European Silica Fume Committee, 2019). Y a nivel mundial, en 2018, el país con mayor producción de microsílíce fue China pues posee la industria más grande de fabricación de silicio y aluminio, seguido por Rusia y Estados Unidos (Sevilla, 2019).

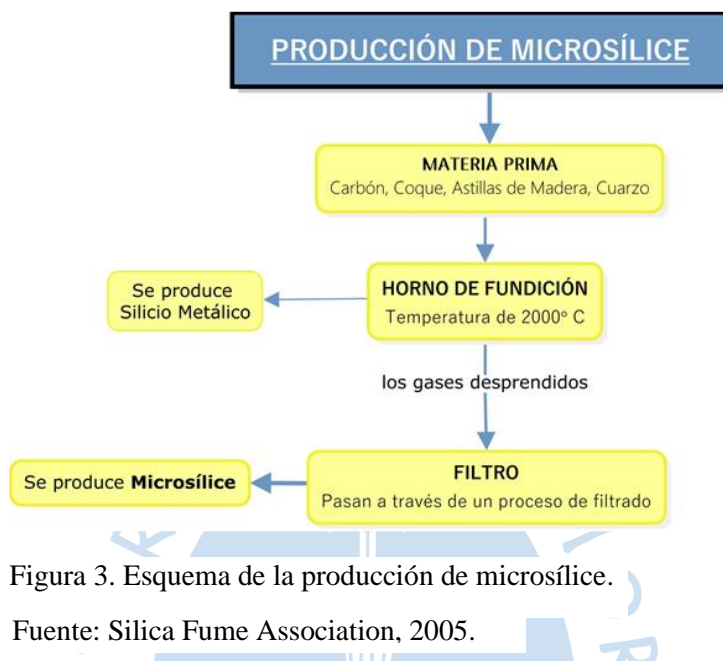


Figura 3. Esquema de la producción de microsílíce.

Fuente: Silica Fume Association, 2005.

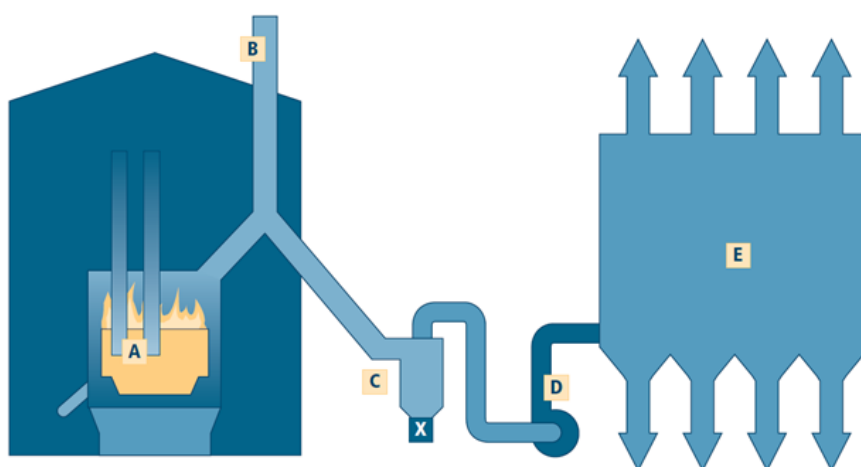


Figura 4. Esquema del proceso de recolección de microsílíce. A: Horno de arco eléctrico. B: Chimenea. C: Pre colector. D: Ventilador. E: Filtro de bolsa de aire.

Fuente: Silica Fume Association, 2005.

La *SFA* reporta que la microsílíce se comercializa de tres distintas formas: Sin densificar, en suspensión y densificada. De estas, la primera es usada en productos embolsados, previamente mezclados como grouts y morteros reparadores; no se suele usar en concretos pre-fabricado o pre-mezclados. La segunda presentación no está disponible en los Estados Unidos y la tercera es aquella que se comercializa para uso en mezclas de concreto.

La microsílíce densificada se produce a partir de la microsílíce no densificada mediante un proceso mecánico donde se carga la superficie de las partículas para que estas puedan aglomerarse, logrando reducir su volumen y así economizar los gastos de transporte. De esta manera se puede almacenar y comercializar como cualquier otro material cementicio en bolsas de 50 y 25 libras (Silica Fume Association, 2005).

4.1. Propiedades y reacciones en el concreto. Las propiedades y requerimientos a continuación han sido presentadas en la ASTM C1240-15 como un intento por estandarizar la calidad en la producción de microsílíce. Sin embargo, no se cierra la posibilidad para desarrollar nuevos ensayos que deriven en propiedades adicionales a las mencionadas a continuación (ASTM, 2015).

4.1.1. Propiedades químicas. Contenido de dióxido de silicio (SiO_2): El dióxido de silicio es el compuesto que debe conformar como mínimo el 85% de la composición química de la microsílíce, siendo el componente reactivo fundamental para lograr la mejora de las propiedades finales del concreto.

Amorfo: Propiedad química de aquellos materiales que no presentan una disposición interna ordenada (naturaleza no cristalina). La principal diferencia entre la naturaleza amorfa y cristalina es el orden de la estructura molecular del material. Mientras en el primero la estructura interna no es ordenada en el segundo sí, se tienen redes cristalinas dispuestas de manera regular y ordenada. Es por ello que la microsílíce, al tener naturaleza amorfa (no cristalina) reacciona diferente dentro del concreto en comparación con la arena. A pesar de ambas estar esencialmente constituidas por dióxido de silicio (SiO_2).

Elementos traza: Existen materiales adicionales a la microsílíce que pueden formar parte de ésta y se pueden ir añadiendo por la naturaleza del proceso de fabricación. Usualmente estas partículas no generan un impacto en la calidad final del concreto fabricado con microsílíce, pero se busca controlar sus proporciones dentro de la composición para así estandarizar este producto.

Actividad puzolánica acelerada: Establece la propiedad por la cual si la adición usada aumenta en al menos un 105% la actividad puzolánica de la mezcla de concreto puede ser considerada como microsílíce. Este control es necesario para asegurar la naturaleza reactiva de la microsílíce.

Pérdida por ignición: Este parámetro se refiere a la cantidad de material volátil que puede contener ciertos materiales inorgánicos. El requerimiento limita la pérdida por ignición máximo al 6% para asegurar su comercialización. Durante muchos años la ceniza volante tuvo este

requisito debido a la posibilidad de que se incluyan partículas de carbón parcialmente quemadas en las cenizas volantes. Estas partículas tienen un área superficial muy alta por lo que generan un aumento significativo en la demanda del contenido de aire en la mezcla, generando efectos no deseados en el concreto. No es claro si este tipo de partículas de carbón estén presentes en la microsílíce, pero se hace extensiva esta restricción pues cualquier partícula de carbón u otro material que pueda venir adicionado como producto del trabajo en hornos de arco eléctrico podría tener estas características.

4.1.2. Propiedades físicas. Tamaño máximo del material: Este requisito limita la cantidad de material que puede ser retenido por el tamiz N° 325 (45 μm) hasta un máximo del 10%. Existe un requisito adicional al mencionando que exige que la variación máxima del promedio no sea mayor al 5%. Este requisito tiene como objetivo minimizar la cantidad de material extraño en la microsílíce, el cual podría incluir partículas de materiales quemados del horno u óxido del sistema de recolección de microsílíce.

Superficie específica: Propiedad por la cual es necesario tener un mínimo valor de 15 m^2/g como área superficial específica para certificar un menor tamaño de las partículas que componen la microsílíce.

Contenido de humedad: Esta propiedad limita el contenido de humedad durante la fabricación de microsílíce a un máximo valor de 3%. Se busca ajustar dicho porcentaje por ser el que trae consigo la microsílíce durante su elaboración, permitiendo no tener que realizar reajustes posteriores al momento del diseño de mezcla.

4.1.3. Reacciones en el concreto. Una de las ventajas del uso de microsílíce se ve con el cambio de la microestructura del concreto fabricado. Esto es resultado de dos importantes procesos. El primero se debe al aspecto físico de la microsílíce y el segundo por su contribución a las reacciones químicas que genera al contacto con el cemento. Ambos aspectos producen cambios en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido, de las cuales se hará mención a continuación:

a) Contribuciones físicas de la microsílíce: Dosificar microsílíce a la mezcla significa añadir miles de partículas muy pequeñas al concreto fabricado, generando un efecto similar al que se produce cuando el agregado fino se acomoda y ocupa los espacios entre las partículas del agregado grueso pues la microsílíce llena los espacios entre las partículas de cemento en un proceso llamado, empaquetamiento de partículas. Incluso si la microsílíce no llegase a reaccionar químicamente con los productos del cemento, ésta ocuparía un espacio generando una mejora en la naturaleza del concreto. En la **Tabla 1** y la **Figura 5** se presenta una

comparación de los tamaños de las partículas de microsílíce con respecto a otros componentes del concreto para ayudar a entender cuan pequeñas son.

Tabla 1. Comparación de los tamaños de las partículas de microsílíce con otros componentes del concreto

Material	Tamaño nominal	Unidades (SI)
Partícula de microsílíce	N/A	0.5 μ m
Grano de cemento	Tamiz N° 325	45 μ m
Partícula de agregado fino	Tamiz N° 08	2.36 mm
Partícula de agregado grueso	Tamiz 3/4"	19.0 mm

Fuente: (Silica Fume Association, 2005)

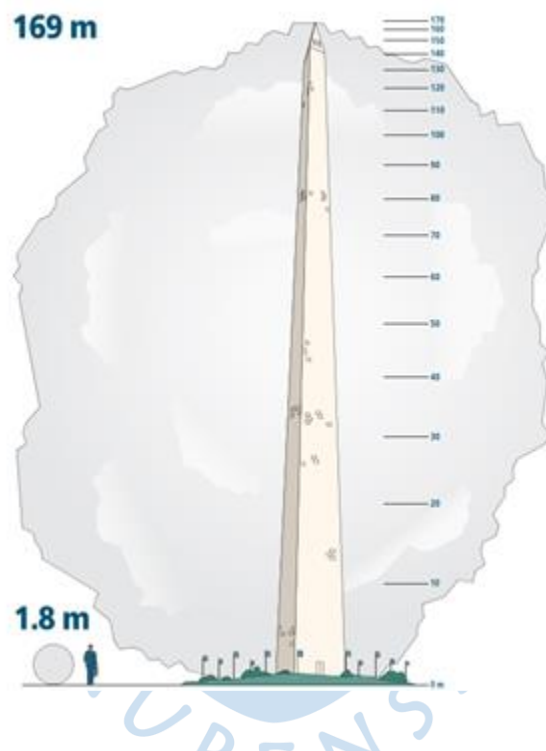


Figura 5. Comparación del tamaño de una partícula de microsílíce. Si una persona (1.80m) tuviera el tamaño de una partícula de microsílíce, entonces un grano de cemento sería aproximadamente del tamaño del monumento a Washington (169 m).

Fuente: Silica Fume Association, 2005.

b) Contribuciones químicas de la microsílíce: Debido al alto contenido amorfo del dióxido de sílice, la microsílíce es un material puzolánico muy reactivo en el concreto. Cuando el cemento portland comienza a reaccionar químicamente dentro del concreto genera hidróxido de calcio, el cual se combina con el dióxido de sílice generando un producto de hidratación llamado silicato cálcico hidratado (C-S-H). Es debido a este producto que se mejoran las propiedades del concreto en estado endurecido. En la **Tabla 2** se muestra una comparativa

entre otros materiales cementantes usados como adiciones al concreto. Se puede ver que la microsílíce tiene alto contenido de dióxido de silicio y muy pequeño tamaño de sus partículas.

Tabla 2. Comparación de las características físicas y químicas del cemento portland, ceniza volante, cemento con escorias y microsílíce.

Propiedades	Cemento Portland	Ceniza volante. clase F	Ceniza volante. clase C	Cemento con escoria	Microsílíce
SiO ₂ (%)	21	52	35	35	85 a 97
Al ₂ O ₃ (%)	5	23	18	12	
Fe ₂ O ₃ (%)	3	11	6	1	
CaO (%)	62	5	21	40	<1
Finura como superficie (m ² /kg)	370	420	420	400	15, 000 a 30,000
Gravedad específica	3.15	2.38	2.65	2.94	2.22
Uso en el concreto	Aglutinante primario	Reemplazo del cemento	Reemplazo del cemento	Reemplazo del cemento	Potenciador de propiedades

Fuente: (Silica Fume Association, 2005)

Según Mehta & Aïtcin (1990), la naturaleza puzolánica de un material al reaccionar con cemento Portland generará una gran cantidad de espacios para la ubicación de los productos de hidratación. Esto se reflejará en una pasta más homogénea y densa en cuanto a la distribución de los poros más finos, debido a las reacciones puzolánicas entre la sílice amorfa de la adición mineral y el hidróxido de calcio producido por las reacciones de hidratación del cemento. Además, el efecto físico de los granos más finos logra un empaquetamiento más denso, mejora la zona de transición entre la pasta y el agregado, optimizando su microestructura y las propiedades del concreto (Isaia, Gastaldini, & Moraes, 2001).

En comparación con las demás adiciones, la microsílíce posee un alto contenido de sílice, finura y naturaleza puzolánica. Es por ello que se consideró su uso en la elaboración de un concreto de alta resistencia.

4.2. Ventajas. El uso de EUCON MSA MICROSILICA aporta grandes ventajas al concreto tanto en estado plástico como en estado endurecido.

Concreto en estado fresco

- Mejora las características del acabado superficial.
- Aumenta la cohesión y compactación, facilitando la aplicación de concretos

bombeados.

- Mejora la estabilidad del concreto, evita segregación.
- Reduce el rebote de concretos o morteros lanzados, por lo que permite la aplicación de capas más gruesas.

Concreto en estado endurecido

- Otorga mayor resistencia química y mecánica al concreto.
- Aumenta la resistencia inicial como finales.
- Permite excelentes acabados.
- Reduce la permeabilidad del concreto por el aumento en la compacidad y densidad.
- Aumenta la durabilidad.
- No contiene cloruros.
- Los aceros de refuerzo tienen mayor protección a la corrosión ya que la capa pasivadora es formada en menos tiempo manteniéndose una mayor resistencia química

Aplicación y recomendaciones del fabricante

- Por su presentación en polvo se deben utilizar los elementos de seguridad necesarios como caretas y gafas adecuados al momento de su manipulación.
- Debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado, bajo techo y en un ambiente fresco y seco.
- Se recomienda usar dosificaciones entre el 3% al 10%.
- La demanda de agua se incrementa cuando se usa microsílíce por lo que las mezclas requieren el uso de un aditivo reductor de agua de alto poder para mantener la manejabilidad y la relación agua/cemento.

5. Superplastificante

Los aditivos reductores de agua y controladores de fraguado se agregan al concreto durante la mezcla para aumentar la trabajabilidad, mejorar la durabilidad, facilitar la colocación, controlar el tiempo de fraguado y producir un acabado más fácil con menos segregación de los agregados. Al mismo tiempo, permite una reducción del contenido total de agua y proporciona la capacidad de controlar el tiempo de transporte hasta el lugar de colocación.

El aumento de resistencia producto del uso de aditivos reductores de agua se debe a la reducción de la relación agua-material cementante y al aumento de la eficacia del cemento. Para un contenido de aire dado, la resistencia del concreto es inversamente proporcional a la relación agua-materiales cementosos y, por lo tanto, la reducción de agua necesaria para lograr el asentamiento deseado y la trabajabilidad cuando se usa un agente reductor de agua tendrá un aumento en la resistencia.

El uso adecuado de los aditivos debe comenzar mediante la recopilación de información disponible y la comparación de los diferentes tipos y marcas que están disponibles. Las mezclas

de prueba, con los aditivos considerados, deben realizarse para determinar su efecto sobre la resistencia, la capacidad de acabado y otros requisitos de la construcción, como la tasa de pérdida de asentamiento y el tiempo de fraguado (ACI Committee E-701, 2003).

5.1. Ventajas. El uso de superplastificante como aditivo para la fabricación de concreto se debe tener ciertas consideraciones, las cuales permitirán alcanzar los mejores resultados. La información que se presenta a continuación son datos extraídos de la Hoja Técnica provista por el fabricante.

Como superplastificante

- Proporciona a la mezcla del concreto un incremento en el asentamiento (slump) sin necesidad de agregar más agua, facilitando la colocación del mismo haciéndolo apto para el bombeo.
- Se puede re dosificar hasta 3 veces el aditivo en la mezcla. Adicionado en la planta, permite que el concreto sea transportado a largas distancias.
- Por el alto asentamiento (slump) que proporciona al concreto permite una buena colocación del mismo evitando la formación de cangrejeras.
- Incrementa la cohesividad del concreto fluido así también disminuye la segregación.

Como reductor de agua de alto rango

- Permite reducir hasta aproximadamente un 30% de agua logrando obtener un contenido de trabajabilidad, impermeabilidad y con altas resistencias en todas las edades (Resistencia a la Compresión)
- Reduce la permeabilidad del concreto
- Incrementa la resistencia a la compresión
- Mejora el acabo del concreto (textura)

Como ahorrador de cemento

- Al disminuir la cantidad de agua – Relación a/cm se consigue un incremento en las resistencias. Al reducir cemento manteniendo la relación a/cm inicial se consiguen iguales o superiores resistencias a las diseñadas según patrón reduciendo el costo por metro cúbico de concreto.

Aplicación y recomendaciones del fabricante

- Durante la manipulación usar las medidas de seguridad apropiadas. Evitar el contacto con la piel, ojos y vías respiratorias. En caso de contacto con la piel, lavar con abundante agua.
- Debe almacenarse en su envase original, herméticamente cerrado, bajo techo y en un ambiente fresco y seco. No permitir que se congele.
- La dosificación recomendada como superplastificante es: 0.5% - 1.0% del peso del cemento y como reductor de agua de alto rango es: 0.75% - 2% del peso del cemento.
- Se agrega a la mezcla independiente de otros aditivos.
- No dosificarlo directamente sobre el cemento seco.

6. Diseño de mezcla según ACI 211.4R

La siguiente guía propuesta por el Instituto Americano del Concreto (ACI, por sus siglas en inglés) plantea una serie de recomendaciones previas para poder llegar a las proporciones básicas que responden a un requerimiento de resistencia y trabajabilidad por parte del diseñador. El método propuesto abarca a los concretos en un rango de resistencia a la compresión que va desde los 500 kg/cm² hasta los 850 kg/cm² aplicable para concretos usando materiales y técnicas de fabricación convencionales que una vez efectuado nos permite llegar a unas proporciones básicas y su optimización a través de tandas de prueba.

A continuación, se desarrollará el procedimiento de diseño planteado por el ACI 211.4R como una secuencia de pasos, apoyados por la información presentada desde la **Tabla 3** a la **Tabla 9**.

Paso1) Selección de slump y resistencia requerida:

Los valores recomendados de slump se muestran en la **Tabla 3**. Cabe mencionar, que hay concretos de alta resistencia que han sido producidos exitosamente sin una medida inicial, pero con el uso de superplastificantes de alto rango. Sin embargo, se recomienda tener un valor inicial de entre 1" a 2" antes de añadir el superplastificante. Esto asegurará una adecuada cantidad de agua para la mezcla y permitirá que el superplastificante sea efectivo. También se recomienda tener valores de al menos 2" de slump luego de incorporado el superplastificante porque valores menores pueden generar problemas de consolidación de la mezcla.

La dosificación del Superplastificante deberá ser la adecuada teniendo en cuenta su contribución con la resistencia a la compresión y una adecuada trabajabilidad. Esta última deberá ser la suficiente para garantizar la correcta colocación y consolidación, pero no tanta

como para generar segregación porque esta medida de slump es inducida químicamente mas no añadiendo agua a la mezcla, por lo que los límites tradicionales de slump no se aplican.

Tabla 3. Slump recomendado para concretos de alta resistencia con y sin superplastificante.

Slump con SP	Slump sin SP
1" – 2"	2" – 4"

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Para el cálculo de la resistencia de diseño promedio se deberá conocer la desviación estándar (DS), caso contrario el ACI considera que el cálculo será según la **Tabla 4**.

Tabla 4. Resistencia de diseño promedio

f'_c especificado	f'_c requerida para el diseño
< 210 kg/cm ²	$f'_c + 70$
210 – 350 kg/cm ²	$f'_c + 84$
> 350 kg/cm ²	$f'_c + 90$

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Paso 2) Verificación y selección del tamaño máximo del agregado:

Basado en los requerimientos de resistencia, el tamaño máximo del agregado viene dado por la **Tabla 5**. También se puede tomar en cuenta lo recomendado por el ACI 318 donde se establece que el tamaño máximo de un agregado no deberá exceder una quinta parte de la menor dimensión entre los lados de un elemento, una tercera parte de la profundidad de la losa, o tres cuartas partes del mínimo espacio entre barras de refuerzo.

Tabla 5. Tamaño máximo del agregado grueso

Resistencia requerida del concreto (Kg/cm ²)	Tamaño máximo del agregado
< 630	$\frac{3}{4}$ " – 1"
> 630	$\frac{3}{8}$ " – $\frac{1}{2}$ "

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Paso 3) Selección del contenido óptimo del agregado grueso:

El contenido óptimo de agregado grueso se obtiene como una fracción de su peso unitario varillado en estado seco ($P_{U.A.G(OD)}$). Este valor depende del tamaño máximo nominal del agregado seleccionado como se muestra en la **Tabla 6**. El cálculo del peso de agregado grueso en estado seco ($W_{A.G(OD)}$) se realiza mediante la **Ec. 1**.

$$W_{A.G(OD)} = (\text{Fracción Volumétrica } P_{sag})(\text{Peso Unitario Varillado } P_{U.A.G(OD)}) \quad \text{EC. 1}$$

Tabla 6. Volumen recomendado para el agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (Para ag. fino con módulo de finura entre 2.5 – 3.2)				
Tamaño máximo nominal	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{4}$	1"
Fracción volumétrica	0.65	0.68	0.72	0.75

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Paso 4) Estimación del agua de mezclado y contenido de aire:

La cantidad de agua por unidad de volumen requerida para producir un determinado valor de slump depende de varios factores, entre los cuales se incluyen el tamaño máximo nominal, la forma de la partícula, la gradación de los agregados y la cantidad de cemento y microsílíce. Por lo tanto, determinar de la manera más efectiva la correcta cantidad de agua de mezclado requiere realizar una serie de mezclas de prueba, las cuales permitirán ver el comportamiento del concreto dependiendo de la cantidad de agua en cuestión.

Una primera aproximación se puede obtener en la **Tabla 7** para concretos elaborados con un agregado bien gradado, angular y limpio que cumple con los límites de la norma ASTM C 33. Dado que la forma de las partículas y la textura superficial del agregado fino pueden influenciar significativamente su contenido de vacíos, el requerimiento de agua de mezclado puede ser diferente a los valores dados. Dichos valores son aplicables cuando el agregado fino usado tiene un contenido de vacíos, “*void content*”(V%), igual al 35%. Para ellos se realiza el cálculo con la **Ec. 2**.

$$V\% = \left(1 - \frac{\text{Peso Unitario Compactado}}{\text{Peso Específico}}\right) \times 100 \quad \text{EC.2}$$

Cuando el contenido de vacíos del agregado fino es diferente al 35%, se debe realizar un ajuste al contenido de agua recomendado. Este ajuste (A), cantidad que puede ser agregada o reducida, será calculada usando la **Ec. 3**.

$$A \text{ (kg/m}^3\text{)} = 4.72 \times (V - 35) \quad \text{EC. 3}$$

Tabla 7. Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire del concreto basado en el uso de una arena con 35% de vacíos.

Slump	Agua de mezclado en kg/m ³ para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
	3/8	1/2	3/4	1"
1" – 2"	183	174	168	165
2" – 3"	189	183	174	171
3" – 4"	195	189	180	177

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Paso 5) Selección de la relación agua/material cementicios (a/cm):

En la **Tabla 8** se presentan los valores máximos de relación agua/material cementante (a/cm)¹ en función del tamaño máximo del agregado para alcanzar diferentes resistencias a la

¹ El término “material cementante” hace referencia a la totalidad de material aglutinante presente en el diseño de mezcla. Al elaborar concretos de alta resistencia el cemento no suele ser el único material cementante. Es por eso que se deja de usar la relación “agua/cemento (a/c)” y se prefiere emplear la relación “agua/material cementante (a/cm)”.

compresión a 28 o 56 días. Los valores mostrados hacen referencia a mezclas fabricadas con superplastificante lo cual es recomendado por el ACI por las siguientes razones:

Los valores de resistencia a la compresión que se pueden lograr son más altos con el uso de Superplastificante y la resistencia se alcanza en un periodo más corto de tiempo.

Los valores de resistencia a la compresión se alcanzan con un uso menor de materiales cementicios a comparación de las mezclas que no usan superplastificante.

El ACI también contempla realizar diseños de concretos de alta resistencia sin el uso de superplastificante por lo que en la **Tabla 9** se puede ver los valores de a/cm.

Tabla 8. Relación agua/materiales cementantes para concretos con superplastificante.

Resistencia promedio f'_{cr} *	Edad (días)	Relación a/cm para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
		$\frac{3}{8}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{4}$ "	1"
500	28	0.49	0.47	0.45	0.42
	56	0.54	0.51	0.47	0.45
550	28	0.44	0.42	0.40	0.39
	56	0.49	0.46	0.43	0.41
600	28	0.40	0.38	0.36	0.35
	56	0.44	0.41	0.39	0.37
650	28	0.36	0.35	0.33	0.32
	56	0.40	0.38	0.36	0.34
700	28	0.33	0.32	0.31	0.30
	56	0.37	0.35	0.33	0.32
750	28	0.31	0.30	0.28	0.28
	56	0.34	0.32	0.30	0.30
800	28	0.29	0.28	0.26	0.26
	56	0.32	0.30	0.28	0.28
850	28	0.27	0.26	0.25	0.25
	56	0.30	0.28	0.27	0.26

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Tabla 9. Relación agua/materiales cementantes para concretos sin superplastificante.

Resistencia promedio f'_{cr} *	Edad (días)	Relación a/cm para los tamaños máximos de agregados gruesos indicados			
		$\frac{3}{8}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{4}$ "	1"
500	28	0.41	0.40	0.39	0.38
	56	0.44	0.43	0.42	0.42
550	28	0.36	0.35	0.34	0.34
	56	0.39	0.38	0.37	0.36
600	28	0.32	0.31	0.31	0.30
	56	0.35	0.34	0.33	0.32
650	28	0.29	0.28	0.28	0.27
	56	0.32	0.31	0.30	0.29
700	28	0.26	0.26	0.25	0.25
	56	0.29	0.28	0.27	0.26

Fuente: (ACI COMMITTEE 211, 2008)

Paso 6) Cálculo del contenido de materiales cementicios:

El peso del material cementicio requerido por m^3 de concreto puede ser determinado por la división de la cantidad de agua de mezclado (Paso 4) y la relación a/cm seleccionada (Paso 5). Si las especificaciones incluyen un mínimo o un máximo de material cementicio por m^3 de concreto se tomará en cuenta. Sin embargo, se tiene que respetar el valor calculado.

Paso 7) Proporcionamiento usando microsílíce:

Este método incluye el uso de microsílíce como reemplazos de fracciones en peso del cemento calculado en el paso 6. Esto permitirá evaluar diferentes proporciones, 10%, 15% y 20%, apreciando el comportamiento que experimenta el concreto fabricado con microsílíce. Teóricamente se tiene que al ser un material con una gran área superficial generará una mayor demanda de agua. Sin embargo, una cantidad considerable de éste dentro de la mezcla logrará densificarla por lo que se ensayará con diferentes cantidades de reemplazo buscando un equilibrio entre las dos características antes mencionadas.

Paso 8) Corrección por humedad y absorción:

El contenido de agua añadida para formar la pasta será afectado por el contenido de humedad de los agregados y la capacidad de absorción. Si ellos están secos al aire absorberán agua y disminuirán la relación a/cm y la trabajabilidad. Por otro lado, si ellos tienen humedad libre en su superficie (agregados mojados) aportarán algo de esta agua a la pasta aumentando la relación a/cm , la trabajabilidad y disminuyendo la resistencia a la compresión. Por lo tanto, estos efectos deben ser estimados y la mezcla debe ser ajustada tomándolos en cuenta.

7. Ecoeficiencia del concreto

La construcción enfrenta desafíos en su constante interacción con la naturaleza y no podría ser ajena al fenómeno del calentamiento global que viene ocurriendo en nuestro planeta desde hace ya varias décadas, por lo que siendo una actividad económica que genera gran cantidad de emisiones antropogénicas es vital buscar maneras de contrarrestar dicho efecto. Por ello la industria del concreto de manera particular busca asistir y proponer soluciones. Damirelli et al. (2010) luego de analizar varias datas de diseños de mezcla concluyen que se debería dar un uso más eficiente a los materiales cementantes dentro de las mezclas, por lo que plantean indicadores basados en la eficiencia de los materiales para desarrollar la resistencia mecánica y el impacto que generan en el medio ambiente.

7.1. Índice de ligante. Relación que plantea medir la cantidad de material cementante necesario para aumentar una unidad de resistencia mecánica. Esto permite medir la eficiencia del uso de los materiales cementantes (cemento y microsílíce) al momento de conseguir resistencias mecánicas y poder compararlo con diferentes diseños.

$$b_i = \frac{b}{p} \quad \text{EC. 4}$$

En la **Ec. 4** “*b*” es el total de material cementante dentro de la mezcla en kg/m³ y “*p*” es la resistencia mecánica a comparar, para la presente investigación será la resistencia a la compresión.





Capítulo 2

Programa experimental

En el presente capítulo se presentarán y desarrollarán las principales propiedades y características de los materiales y procedimientos que fueron usados en la etapa experimental para la elaboración de concreto de alta resistencia. Dichos materiales y ensayos han sido elegidos debido a la gran demanda y necesidad que tienen dentro del mercado local habiendo logrado un uso generalizado en la actualidad, agregados y cemento, lo cual facilita la puesta en práctica del conocimiento inferido por este trabajo de investigación.

El desarrollo del programa experimental comenzó con un diseño de mezcla patrón sin aditivos ni adiciones. Para esto se eligió una relación agua- material cementante (a/cm) correspondiente a un concreto de alta resistencia. A pesar de las consideraciones de diseño planteadas, al realizar las pruebas en el laboratorio se tuvo que incluir el uso del superplastificante al 1% del peso del cemento desde el diseño patrón, **SP1-36**. Seguidamente se procedió con dos tandas, siempre bajo el enfoque de lograr valores más altos de resistencia a la compresión y asegurando una buena trabajabilidad de la mezcla, para ello se escogió relaciones a/cm menores y para el superplastificante una dosificación del 1.5%; obteniendo las mezclas **SP1.5-30** y **SP1.5-25**. Sin embargo, los resultados en estado endurecido dieron cuenta que era necesario emplear adiciones minerales para lograr resistencias a la compresión mayores. Por lo que, acorde con lo descrito en el marco teórico del presente trabajo, se procedió a utilizar la microsílíce.

A continuación, se procedió a diseñar la mezcla patrón, pero con tres reemplazos porcentuales en peso del cemento por microsílíce del 10%, 15% y 20%, manteniendo constante la relación agua – material cementante y una dosificación del superplastificante del 1.5%, para así evaluar el cambio en las propiedades tanto en estado fresco como endurecido de estos diseños con reemplazos respecto al patrón. Los diseños resultantes se denominaron **MS-10**, **MS-15** y **MS-20**. Todos los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ensayos de Materiales de Construcción (**LEMC**).

1. Ensayos

Los métodos de ensayos presentados a continuación se realizaron durante tres etapas diferentes de la experimentación. El primero referido a la caracterización de agregados, luego los ensayos realizados al concreto en estado fresco y por último al estado endurecido, todo esto para evaluar los componentes, la consistencia y resistencia a la compresión del concreto.

1.1. Caracterización de agregados

1.1.1. Granulometría de agregados. Para determinar la distribución por tamaño de partículas del agregado fino y grueso por tamizado se utilizó la norma técnica NTP 400.012:2013 “AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global” (INACAL, 2013). En esta norma técnica se detallan los equipos y tamices a usar los cuales van progresivamente de una abertura mayor a una menor para así determinar la distribución del tamaño de las partículas. Para encontrar el uso granulométrico y el tamaño máximo de los agregados se empleó la norma técnica NTP 400.037:2002 “AGREGADOS. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto” (INACAL, 2002).

1.1.2. Capacidad de absorción y peso específico. Para obtener el peso específico y la capacidad de absorción del agregado grueso y agregado fino se siguió los procedimientos, fórmulas y equipos planteados en la norma técnica NTP 400.021:2013 “AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso” (INACAL, 2013) y NTP 400.022:2013 “AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino” (INACAL, 2013) respectivamente.

1.1.3. Peso unitario de los agregados. Se obtuvo el peso unitario suelto y varillado del agregado fino y grueso siguiendo los procedimientos descritos y usando los aparatos que plantea la norma técnica NTP 400.017:2011 “AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados” (INACAL, 2011).

1.1.4. Humedad total. El último parámetro determinado fue el contenido de humedad tanto para el agregado fino como grueso y para ello se usó la norma técnica NTP 339.185:2013 “AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado” (INACAL, 2013).

1.2. Concreto en estado fresco

1.2.1. Trabajabilidad. Todos los diseños de mezcla elaborados en el laboratorio fueron evaluados siguiendo los procedimientos planteados en la norma técnica NTP 339.035:2015 “CONCRETO. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland. 4a. Edición”, todos los equipos usados se encontraron en LEMC.

1.2.2. Peso unitario y temperatura. Una vez realizada cada mezcla de concreto se procedió a tomar la temperatura y calcular el peso unitario de cada diseño siguiendo los procedimientos descritos en la norma técnica NTP 339.046:2008 “HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón (concreto)” (INACAL, 2013) y NTP 339.184:2013 (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto.

1.3. Concreto en estado endurecido

1.3.1. Resistencia a la compresión. Por cada diseño de mezcla ensayado se elaboraron 09 unidades cilíndricas de 10x20 cm (diámetro x altura) con excepción de las mezclas de la tanda patrón donde se fabricaron solamente 06 unidades, las cuales fueron sumergidas en una poza de curado durante 28 días para luego ser refrentadas y ensayadas en una prensa hidráulica con capacidad de carga de 100 toneladas perteneciente al LEMC.



Figura 6. Ensayo a la compresión en prensa hidráulica.

Fuente: Elaboración propia.

2. Materiales

2.1. Cemento. El cemento utilizado en el presente trabajo de investigación fue “Antisalitre con Fortimax 3” fabricado por “Cementos Pacasmayo”, de resistencia moderada a los sulfatos (componente MS), moderado calor de hidratación (componente MH) y resistente a los agregados álcali-reactivos (componente R). Cumple con los requisitos de las normas técnicas NTP 334.082 y ASTM C 1157 y cuyo nombre técnico es cemento Portland Tipo MS (CEMENTOS PACASMAYO, 2018).

Se fabrica mediante la molienda conjunta de clinker y adiciones minerales. Su composición química se indica en la **Tabla 10**. Utilizarlo genera estructuras menos permeables y con mayor resistencia química, que forman una protección contra el salitre y los cloruros. Su uso se

recomienda en concretos con exposición moderada a los sulfatos, estructuras en contacto con ambientes y suelos húmedos-salinosos, estructuras en ambiente marino, obras portuarias, concretos colocados en clima cálido, estructuras de concreto masivo, concreto compactado con rodillo, obra con presencia de agregados reactivos, pavimentos y losas (Cementos Pacasmayo, 2015).

Tabla 10. Composición química del cemento Portland Tipo MS usado en la presente investigación.

Material	Simbología	Cantidad
Otros	-	6%
Oxido de magnesio	MgO	10%
Oxido de aluminio	Al ₂ O ₃	11%
Oxido de calcio	CaO	36%
Dióxido de silicio	SiO ₂	37%

Fuente: Cemento y sus aplicaciones, (Cementos Pacasmayo, 2012)

2.2. Agua. Es un componente fundamental en la elaboración de concreto tanto en estado fresco y como endurecido. Generalmente se hace referencia a la cantidad necesaria para proveer una relación agua /cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero es evidente, que no solamente la cantidad usada en la preparación de la mezcla o durante el curado es importante, sino también su calidad química y física. (ASOCRETO, 2010). Para la presente investigación se hizo uso de agua potable.

2.3. Agregados. Los agregados, también llamados áridos, según la NTP 400.037-2002 son “el conjunto de partículas, de origen natural o artificial, que pueden ser tratadas o elaboradas y cuyas dimensiones están comprendidas entre los límites fijados en dicha norma”. Estos límites se presentan más adelante junto con las propiedades de los agregados usados en la presente investigación.

Durante el desarrollo de la etapa experimental el agregado fino que se utilizó proviene de la cantera Chulucanas y el agregado grueso proviene de la cantera Sojo en Sullana cumpliendo con lo establecido en la NTP 400.037.

2.3.1. Agregado fino. El agregado fino usado en la presente investigación procede de la "Cantera de Chulucanas" ubicada a 1km de la ciudad del mismo nombre, la cual está a 61km de la ciudad de Piura. En la Figura 7 se presenta la ubicación de la cantera de Chulucanas y en la Figura 8 se presenta una muestra del agregado fino.



Figura 7. Ubicación cantera Chulucanas.

Fuente: Google Earth.



Figura 8. Agregado fino de la cantera de Chulucanas.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.1. *Granulometría*. Los valores hallados se presentan gráficamente en un sistema coordinado semi-logarítmico que permite apreciar la distribución acumulada (Pasquel, 1998). Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 11** junto con la curva granulométrica en la **Figura 9**.

Tabla 11. Granulometría del agregado fino (Cantera de Chulucanas)

Tamiz	Contenido (g)	Retenido parcial (%)	Retenido total (%)	Pasa (%)
Tamiz N°4	5	1.07	1.07	98.93
Tamiz N°8	43.6	9.35	10.42	89.58
Tamiz N° 16	113.6	24.35	34.77	65.23
Tamiz N° 30	152.4	32.67	67.44	32.56
Tamiz N° 50	99	21.22	88.66	11.34
Tamiz N° 100	30.1	6.45	95.12	4.88
Tamiz N° 200	5.9	1.26	96.38	3.62
Fondo	13.9	2.98	99.36	0.64
Total tamizado	463.5			
Total seco	466.48			
Pérdida	2.98			

Fuente: Elaboración propia

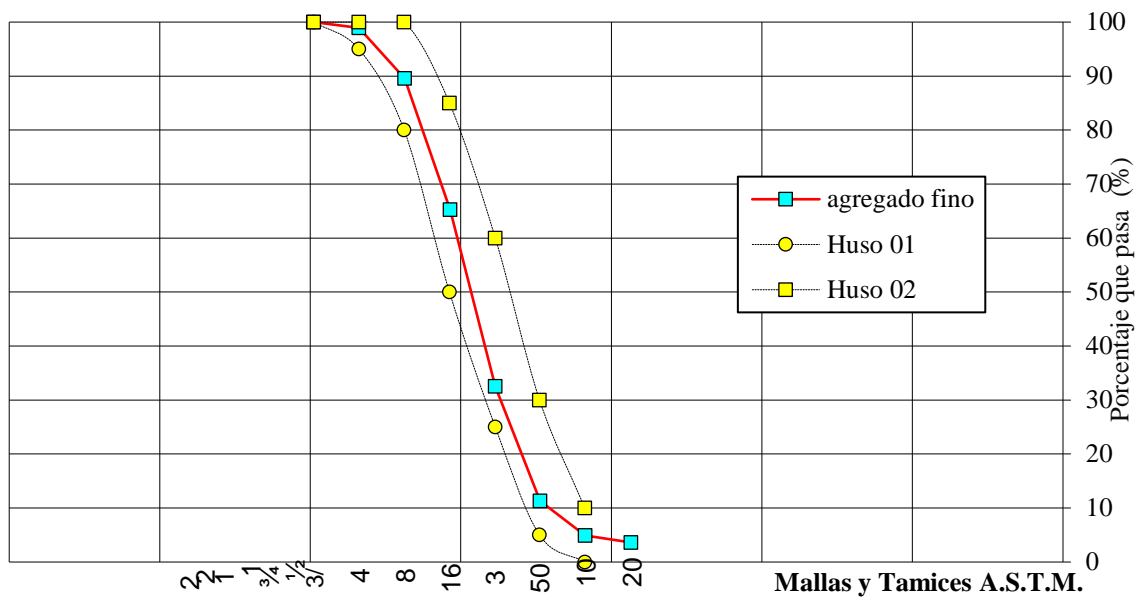


Figura 9. Curva granulométrica del agregado fino, procedente de la cantera Chulucanas.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1.2. *Módulo de finura.* El módulo de finura se determinó luego de haber realizado la granulometría. El valor se calculó para ambos tipos de agregados siguiendo lo que estipula la NTP 400.012. El valor para el agregado fino de Chulucanas fue de 2.96, cumpliendo con los valores que especifica la NTP 400.037.

2.3.1.3. *Parámetros físicos básicos.* Los parámetros físicos básicos del agregado fino se realizaron en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de Construcción (LEMC) de la Universidad de Piura y se obtuvieron los datos presentado en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Tabla resumen de la caracterización del agregado fino.

Descripción	A. fino	Unidades
Cantera	Chulucanas	-
Módulo de finura	2.96	-
Peso específico (SSD)	2.59	-
Peso unitario varillado (Stock)	1662	Kg/m ³
Peso unitario varillado (OD)	1655	Kg/m ³
Humedad	0.66	%
Absorción	1.12	%

Fuente: Elaboración propia

2.3.2. Agregado grueso. El agregado grueso es una grava natural de canto rodado procedente de la “Cantera de Sojo”, ubicada en el km 15 + 163 de la carretera Sullana-Paita. El acceso a la cantera se ubica a 2km de la margen izquierda de la vía, pertenece a la Municipalidad Distrital Miguel Checa y posee una capacidad aproximada de 35, 000 m³. En la Figura 10 y Figura 11 se presentan la ubicación de la cantera de Sojo y la respectiva muestra de agregado grueso.



Figura 10. Ubicación cantera Sojo.

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Agregado grueso chancado de la cantera Sojo.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.1. Granulometría. Los límites granulométricos que recomienda la NTP 400.037 para el agregado grueso han sido respetados en el presente trabajo y los resultados obtenidos para la muestra seleccionada se presentan en la **Tabla 13** junto con su curva granulométrica en la **Figura 12**.

Tabla 13: Granulometría del agregado grueso (Cantera de Sojo)

Tamiz	Contenido (g)	Retenido parcial	Retenido total	%Pasa
1"	0.00	0.00	0.00	100.00
3/4"	143.0	2.39	2.39	97.61
1/2"	3966.0	66.32	68.71	31.29
3/8"	1223.0	20.45	89.16	10.84
Tamiz N° 4	628.0	10.50	99.67	0.33
Fondo	20.0	0.33	100.00	0.00
Total tamizado	5980.0			
Total seco	6000.0			
Pérdida	0.33%			

Fuente: Elaboración propia.

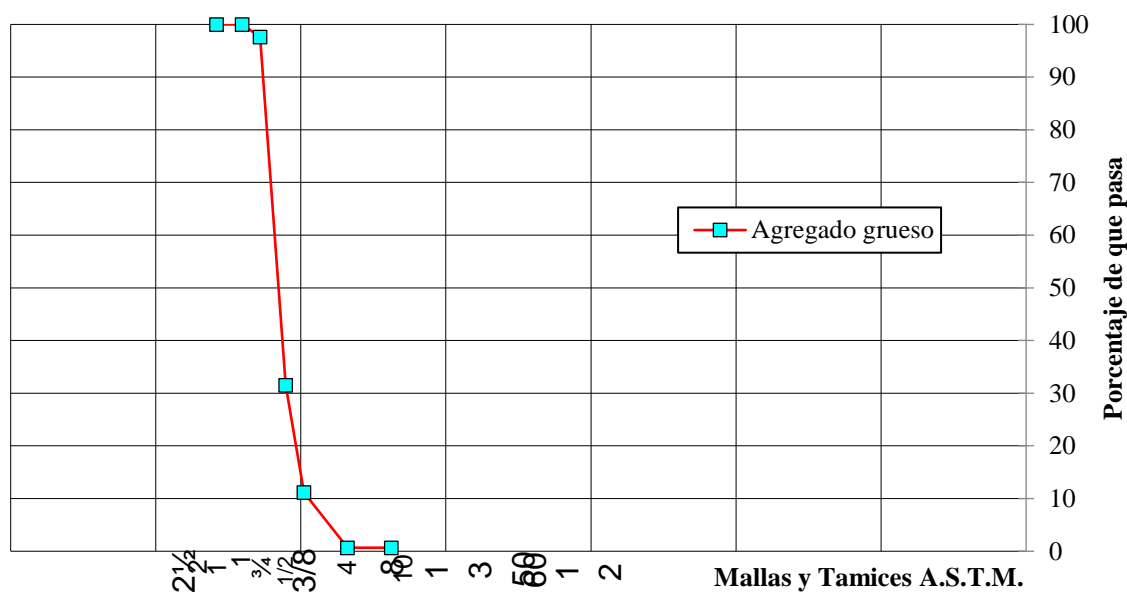


Figura 12. Curva granulométrica del agregado grueso, procedente de la cantera Sojo.

Fuente: Elaboración propia.

2.3.2.2. *Módulo de finura.* El módulo de finura se determinó luego de haber realizado la granulometría en el LEMC de la Universidad de Piura y el valor obtenido fue 6.91, cumpliendo con los valores que especifica la NTP 400,037.

2.3.2.3. *Parámetros físicos básicos.* Se procedió a realizar la caracterización de la grava en condición triturada, el resumen de los valores se presenta en la **Tabla 14**.

Tabla 14. Tabla resumen de la caracterización del agregado grueso.

Descripción	A. grueso	Unidades
Cantera	Sojo	-
Tamaño máximo	1	pulgada
Tamaño máximo nominal	3/4	pulgada
Peso específico (SSD)	2.81	-
Peso unitario varillado (Stock)	1545	Kg/m ³
Peso unitario varillado (OD)	1538	Kg/m ³
Humedad	0.60	%
Absorción	1.06	%

Fuente: Elaboración propia

2.4. Microsílice. Es una adición en polvo, de color gris que adicionado al concreto le otorga características de alta resistencia mecánica y química. El usado en la presente investigación fue **EUCON MSA – Microsilica** fabricada por **EUCLID CHEMICAL**, empresa americana con base en Cleveland, USA, que posee más de 100 años de experiencia en la industria de la construcción a nivel mundial y certificación ISO 9001. En Perú tiene como distribuidor a la empresa **Química Suiza**.

Información técnica

EUCON MSA - MICROSILICA cumple con los requerimientos de ASTM C-1240. En la **Tabla 15** se muestra las propiedades generales y en la **Tabla 16** se muestra el análisis químico proporcionado por el fabricante.

Tabla 15. Datos técnicos microsíllice

Propiedad	Cantidad
Peso específico	2.2 – 2.3
% Retención malla 325	Máximo 10%
Color	Gris claro u oscuro
Superficie específica	15 m ² /g – 30 m ² /g
Contenido de SiO ₂	Mínimo 85%

Fuente: The Euclid Chemical Company

Tabla 16. Composición química de EUCON MSA - Microsílice

Compuestos	Contenido en porcentaje
Sílice pirógena	60 – 100%
Óxido de calcio	0.5 – 1.5%
Óxido de hierro	0.5 – 1.5%
Óxido de magnesio	0.5 – 1.5%
Óxido de potasio	0.5 – 1.5%
Óxido de aluminio	0.5 – 1.5%
Sílice cristalina (Cuarzo)/ Arena de sílice	0.1 – 1%
Hidróxido de sodio	0.1 – 1%

Fuente: EUCLID GROUP TOXEMENT

2.5. Superplastificante. EUCO 537 es un aditivo líquido que se puede utilizar como superplastificante, reductor de agua de alto rango y ahorrador de cemento. Proporciona un ligero retardo a la mezcla del concreto permitiendo que éste pueda ser colocado a altas temperaturas sin ningún problema. No contiene cloruros.

Información técnica

EUCO 537 no contiene cloruros y cumple con la norma ASTM C494, siendo clasificado como un Tipo *G. En la **Tabla 17** se resumen los principales datos técnicos.

Tabla 17. Datos técnicos del superplastificante EUCO 537

Propiedad	Cantidad
Apariencia	Líquida
Densidad	1.20 kg/l
Color	Marrón oscuro
Ph	7.8 – 9.8
Solubilidad	Soluble en agua
Resistencia al congelamiento/deshielo	98.7%

Fuente: The Euclid Chemical Company.

3. Diseño de mezcla ACI 211.4R

3.1. Diseño del concreto patrón. Para el diseño del concreto patrón (SP1-36) se usó una relación agua/material cementante igual a 0.36 y se aplicó una dosis del 1% en peso del cemento para el aditivo superplastificante (EUCO 537). Todo ello buscó obtener un valor de resistencia a la compresión de 500 kg/cm².

Luego se realizaron 02 diseños (SP1.5-30 y SP1.5-25) en donde se buscó ajustar la cantidad de superplastificante, aumentando la dosis del superplastificante al 1.5% en peso del cemento.

3.2. Diseño del concreto con reemplazos de microsílíce. Para evaluar los efectos de la microsílíce en el concreto, se planteó tres diseños de mezcla con reemplazos de microsílíce en diferentes porcentajes (MS10, MS15, MS20). Para ello se mantuvo la misma relación agua/material cementante, 0.36, se aplicó la dosis del 1.5% en peso del cemento para el aditivo superplastificante y se hicieron reemplazos en peso del 10%, 15% y 20% del cemento por microsílíce. El resumen de las proporciones de todos los diseños se presenta en la **Tabla 18** y para mayor detalle del proceso de diseño de mezcla se puede revisar el **Apéndice A**. El análisis de resultados entre estos tres diseños y la mezcla patrón se muestran en el capítulo 3.

Tabla 18. Resumen de los diseños de mezcla elaborados

Mezcla	a/cm	Cemento	Microsílíce	Agua	Agregado grueso	Agregado fino	Superplastificante
SP1-36	0.36	481.08	-	181.24	1112.19	692.90	4.81
SP1.5-30	0.30	577.30	-	181.11	1112.19	613.05	8.66
SP1.5-25	0.25	692.76	-	181.07	1113.01	516.27	10.39
MS-10	0.36	432.97	48.11	185.30	1111.68	673.63	7.22
MS-15	0.36	416.97	73.58	192.72	1111.68	642.66	7.36
MS-20	0.36	392.44	98.11	192.62	1111.68	634.88	7.36

Fuente: Elaboración Propia.

*Materiales en Stock.

**Unidades: kilogramos/ metro cúbico.

4. Mezclado

Seguir un orden y un tiempo de mezclado óptimo al momento de combinar los materiales para elaborar un concreto de alta resistencia con microsílice es importante. Al realizar la experimentación en laboratorio se evidenció que el estado fresco del concreto es el más afectado cuando no se combinan de la mejor manera los materiales ligantes con los de relleno. Al agregar la microsílice y el superplastificante en el concreto se comprobó los efectos de no seguir un orden que permita el correcto empaquetado de los agregados, pues se obtuvieron mezclas con poca o nula trabajabilidad, segregación de los agregados y poca pasta dentro de la mezcla. Se puede apreciar en la **Figura 13**, como la poca pasta generada dentro de la mezcla ha recubierto el agregado grueso segregado.



Figura 13: Segregación del agregado grueso e insuficiente pasta dentro de la mezcla de una tanda con microsílice antes de llegar al orden de mezclado óptimo de los componentes.

Fuente: Elaboración propia.

La mejor acción del superplastificante se obtuvo agregándolo directamente a la mezcla y no diluyéndolo previamente en agua. Durante el desarrollo experimental se probó añadirlo en diferentes momentos del mezclado sin embargo se obtuvo mejores resultados cuando se adicionó luego del cemento y antes de la microsílice.

Respetar el tiempo de mezclado después de añadido el superplastificante asegura una mejor acción en la mezcla, alrededor de los 3 minutos fue el tiempo necesario para hacer evidente su efecto en las mezclas con microsílice. Esto se verificó experimental con el diseño MS-10, del cual se realizaron dos tandas que siguieron el mismo orden de mezclado. Sin embargo, en la segunda se dió un mayor tiempo de mezclado luego de añadido el superplastificante resultando

en un mejor comportamiento en estado fresco². De esta manera es como se llegó a obtener el orden y el tiempo de mezclado que mostró mejores resultados en estado fresco para todos los diseños planteados.



² Los resultados de los ensayos en estado fresco (trabajabilidad) se presentan en el Capítulo 3.

Capítulo 3

Resultados

Este capítulo presenta los resultados de los ensayos realizados tanto en estado fresco como endurecido de la tanda patrón y de los diseños de mezcla con reemplazos por microsílíce planteados durante la parte experimental. Con ello se podrá observar el comportamiento que se genera al fabricar concreto alta resistencia.

1. Concreto en estado fresco

1.1. Temperatura. Los resultados obtenidos al evaluar esta propiedad siguieron las recomendaciones descritas en la NTP 339.184. Estos se encontraron en un rango aceptado como normal para la colocación de este tipo de concreto con temperaturas de mezcla menores a los 30°C.

Como se puede ver en el **Figura 14** la temperatura decrece a medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo. La explicación para esta variación de temperatura podría deberse a que a mayor porcentaje de reemplazo por microsílíce se tiene menor cantidad cemento en la mezcla y al ser este material el que aporta mayor liberación de calor se obtienen temperaturas menores. Estos resultados aseguran que no se tendrá dificultades por altas temperaturas, no se necesitará un aumento de la demanda de agua, se previene el agrietamiento y se evita una posible disminución de la resistencia. Las dos tandas de prueba de proporción del superplastificante, posteriores a la tanda patrón (SP1.5-30 y SP1.5-25), obtuvieron resultados similares 29.5°C y 28.5°C. Cabe aclarar que la temperatura ambiente al momento de realizado los ensayos estuvo alrededor de los 28°C.

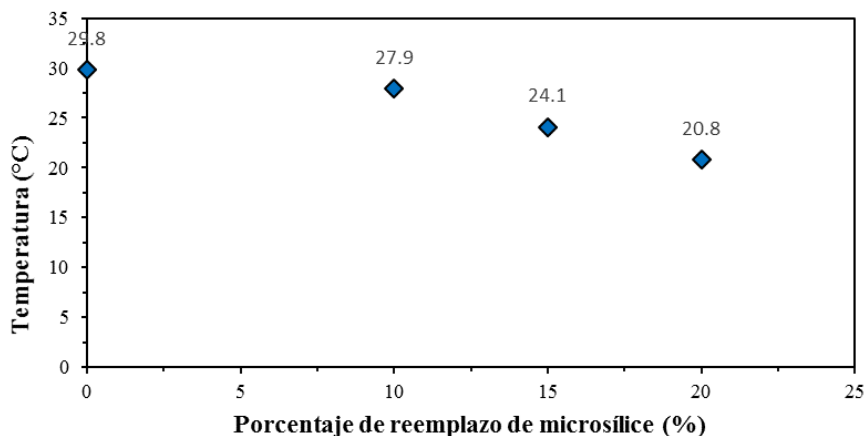


Figura 14. Resultado de temperatura para los diferentes reemplazos de microsílíce.

Fuente: Elaboración propia.

1.2. Peso unitario y rendimiento. Siguiendo los procedimientos planteados en la NTP 339.046 se realizó el ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de cemento, los cuales se presentan en la **Tabla 19**. Los resultados muestran valores de peso unitario muy cercano al rango considerado para concretos convencionales, entre 2200 hasta 2400 kg/m³ (Portland Cement Association, 2004).

Tabla 19. Peso unitario, rendimiento y contenido de cemento de la mezcla patrón y los reemplazos por microsílíce.

Mezcla	SP 1 -36	MS-10	MS-15	MS-20
Cemento (kg/m ³)	481.08	432.97	416.97	392.44
P.U real (kg/m ³)	2314	2382	2403	2425
P.U teórico (kg/m ³)	2472	2458	2445	2437
Factor rendimiento real	93.60%	96.90%	98.28%	99.50%

Fuente: Elaboración Propia

En el **Figura 15** se puede ver como a mayor reemplazo de microsílíce las mezclas se van densificando. Esto se debe a que al tener muchas partículas de un menor tamaño (mayor área superficial) dentro de la mezcla éstas pasan a ocupar los espacios libres entre los compuestos generados por la reacción del cemento, logrando una estructura mucho más compacta. Cabe mencionar que, cuanto mayor fue el porcentaje de reemplazo, el rendimiento de la mezcla incrementó. Esto se puede ver reflejado en la **Figura 15** donde se muestra que los valores de peso unitario obtenidos en los ensayos son cada vez más cercanos a los valores teóricos.

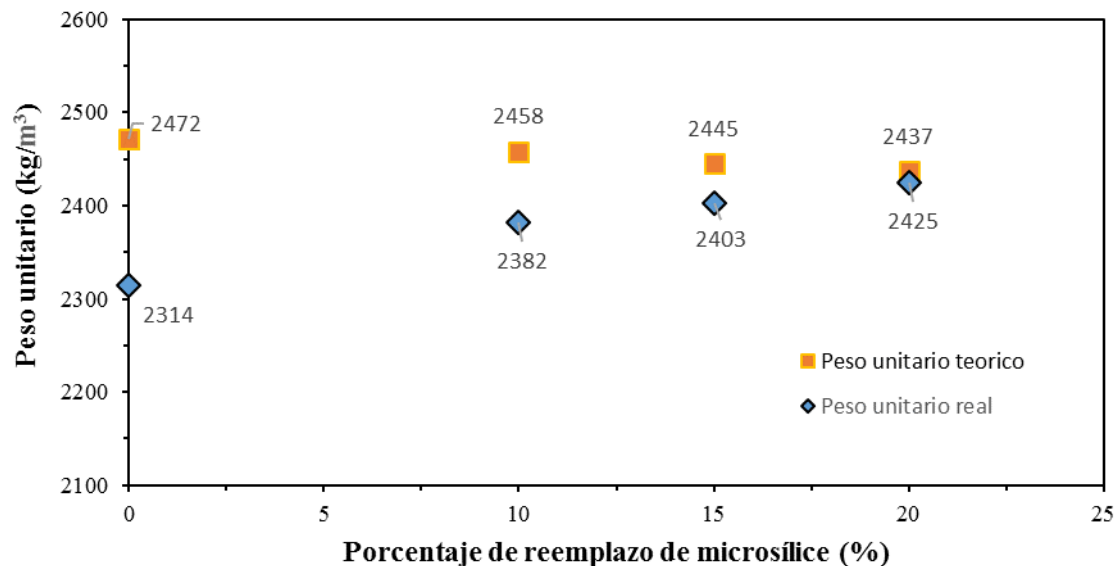


Figura 15. Resultados de peso unitario real y teórico para los diferentes reemplazos de microsílíce.

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de la experimentación muestran que el uso de microsílíce genera mezclas mucho más cohesivas, con menos segregación y más eficientes en el uso del material.

1.3. Trabajabilidad. Se realizó el ensayo siguiendo los procedimientos establecidos en la NTP 339.035 a todos los diseños de mezcla. Evaluar esta propiedad fue muy importante, pues al usar una relación agua-material cementante baja, 0.36, se podría prever un comportamiento inadecuado de la mezcla.

El porcentaje de superplastificante usado inicialmente fue 1.00% del peso del cemento en la mezcla patrón. A continuación, en las dos tandas de prueba de proporción del superplastificante, posteriores a la tanda patrón (SP1.5-30 y SP1.5-25), se incrementó la dosificación a 1.50% del peso del cemento y en las tandas de reemplazo de microsílíce (MS-10, MS-15 y MS-20) se mantuvo al 1.50 %. El orden de mezcla óptimo que se siguió fue: agregado grueso, agua, agregado fino, cemento, agua, superplastificante, microsílíce y agua. Cabe aclarar que el agua se va agregando parcialmente hasta completar la cantidad total de diseño, es por esto que aparece varias veces repetida en la anterior secuencia.

Se puede observar en la **Figura 16** que la trabajabilidad mantiene un valor constante a pesar del incremento del material cementante dentro de las mezclas de reemplazo. Esto se explica por la mayor cantidad de parte fina que aporta la microsílíce. Cabe aclarar que en la mencionada figura se muestra el resultado de la primera tanda evaluada con el diseño de mezcla “MS-10”, esto debido a que el tiempo de combinación óptimo de los componentes no se había logrado hasta el momento de ensayo de la primera tanda como se detalla en el apartado **4.Mezclado**. Sin embargo, al volver a probar este diseño, en una segunda tanda y con el tiempo de mezclado óptimo del superplastificante, se obtuvo un valor de trabajabilidad de 10 cm; no se ensayaron probetas de esta segunda tanda por un tema de presupuesto.

Es debido a esto que el valor presentado en la **Figura 16** se refiere a la primera tanda, de la cual se realizaron los ensayos al concreto en estado fresco y endurecido, y no se decidió combinar los resultados de ambas tandas a pesar de ser del mismo diseño de mezcla. De lo ocurrido se pudo comprobar que el tiempo de combinación al momento del mezclado es relevante. Porque si no se sigue, a pesar de ensayar un mismo diseño, se llega a obtener resultados diferentes en el comportamiento del estado fresco como se puede apreciar en la **Figura 17** y **Figura 18**, en donde la trabajabilidad pasó de 3.5 cm a 10 cm.

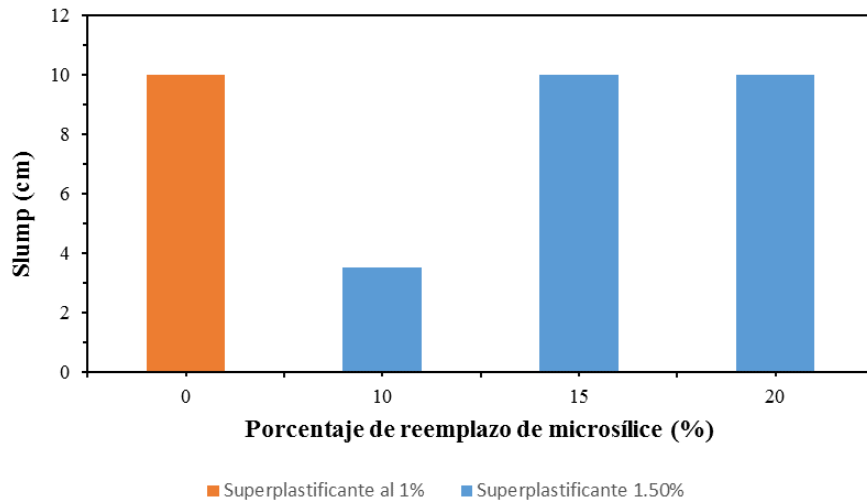


Figura 16. Valores de slump para diferentes porcentajes de microsilíce.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 17. Trabajabilidad de la primera tanda del diseño "MS-10" con 3.5 cm de slump.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 18. Trabajabilidad de la segunda tanda del diseño "MS-10" con 10 cm de slump.

Fuente: Elaboración propia.

Se observó que en las mezclas donde se añadió microsílíce se generó un mayor volumen de pasta pues la masa ensayada al ser la misma cantidad y al agregar un material con un menor valor de gravedad específica (2.20 g/cm^3 en comparación al 3.15 g/cm^3 del cemento) produjo un aumento en el volumen deviniendo en una mayor cantidad de pasta, lo que se reflejó en que los valores de slump no decrezcan a pesar de agregar mayor cantidad de finos dentro de la mezcla.

Por lo anterior se puede decir que, a mayor reemplazo de microsílíce, se genera un incremento de la cantidad de partículas de material cementante dentro de la mezcla, ello no disminuye la trabajabilidad pues a mayores valores de reemplazo generan un mayor volumen de pasta que, sumada al efecto del superplastificante permite que no disminuya el valor de slump.

2. Concreto en estado endurecido

El siguiente apartado presenta los resultados obtenidos al realizar el ensayo de compresión a 28 días de las diferentes mezclas preparadas en laboratorio.

2.1. Resistencia a la compresión. El ensayo fue realizado siguiendo la norma NTP 339.034 que contempla en su apartado 5.3 que el ensayo a compresión sirve para “el control de la evaluación de la efectividad de los aditivos” como es el caso de la presente investigación. Se buscó comparar los porcentajes de reemplazo y definir un óptimo para las condiciones planteadas. Las proporciones usadas se detallan en el apartado 2.3.2. Los resultados obtenidos se muestran en la **Tabla 20** y **Figura 19**.

En los resultados de las tandas realizadas sin reemplazo de microsílíce, SP1-36, SP1.5-30, SP1.5-25, se pudo comprobar de manera práctica que buscar incrementar la resistencia a la compresión reduciendo la relación agua cemento y aumentando la cantidad de superplastificante no es el planteamiento óptimo para mejorar el diseño. Además de no lograr la resistencia deseada, no se da un uso eficiente al material cementante, por lo que emplear este enfoque lleva a producir mezclas poco amigables con el medio ambiente. Es por ello que, para lograr resistencias mayores se aplicó el reemplazo por microsílíce. Como se puede inferir de la mezcla MS-10, MS-15 y MS-20 la resistencia a la compresión aumentó en un 32% en promedio respecto de la tanda patrón. Por ello, la microsílíce puede considerarse como una componente indispensable en la fabricación de concretos de alta resistencia.

Tabla 20. Resistencia a la compresión a 28 días y otros factores calculados.

Descripción	Tanda patrón	Tandas de prueba de proporciones		Tandas de reemplazo de microsílíce		
	SP 1 -36	SP1.5 -30	SP1.5 - 25	MS-10	MS-15	MS-20
$f'c$ (Diseño) (kg/cm ²)	500	620	750	500	500	500
$f'c$ (Real) (kg/cm ²)	358	388	395	502	475	442
a/cm	0.36	0.30	0.25	0.36	0.36	0.36
Porcentaje respecto a la resistencia diseño (%)	71.6	77.6	79.0	100.4	95.2	88.4
Índice de ligante	13.43	14.86	17.54	9.58	10.31	11.10
Desviación estándar (σ)	53.42	66.16	44.37	19.27	22.44	21.17

Fuente: Elaboración propia

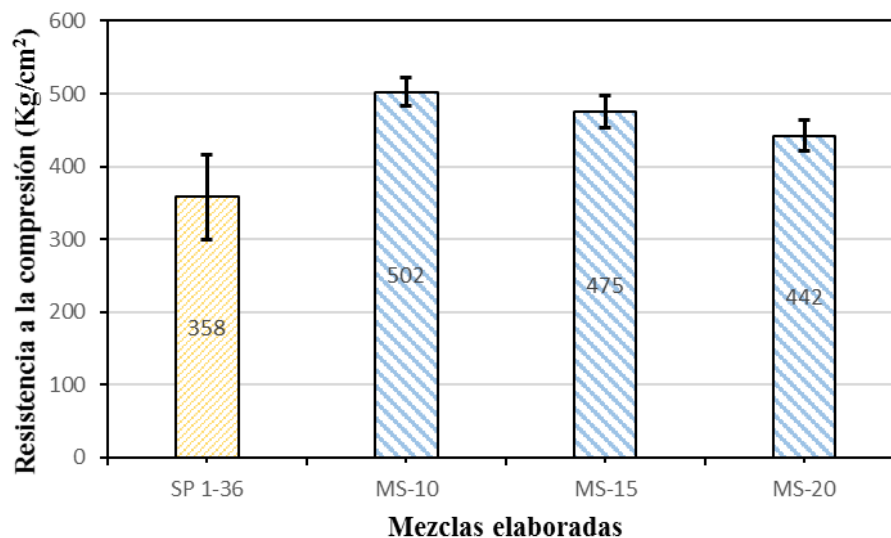


Figura 19. Resistencia a la compresión a 28 días de tanda patrón y tandas de reemplazo.

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, es conveniente mencionar que los resultados de resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazos por microsílíce muestran un comportamiento más homogéneo respecto al diseño patrón, con menores valores de desviación estándar. En la **Figura 19**, se ve como la barra de error disminuye de la tanda patrón a las demás por lo se infiere que, el promedio de cada diseño evaluado expresa resultados más confiables.

En la **Figura 19** se observa una disminución en la resistencia a la compresión a mayor porcentaje de reemplazo. Esto se explica al analizar la relación agua-cemento dentro de cada mezcla, pues al retirar cada vez más cemento se está teniendo mezclas con una mayor cantidad de agua efectiva, lo que produce una caída en los valores de resistencia. Esta disminución afectó la resistencia a la compresión en un 5% y 12% respecto a la resistencia de diseño.

Como muestran los resultados y para las condiciones del presente trabajo de investigación, se observa que se llegó a obtener la resistencia a la compresión de diseño con la mezcla “MS-10”, cuyo porcentaje de reemplazo por microsílice fue del 10% del peso del cemento. En la **Tabla 21** y la **Figura 20** se muestran los resultados de las unidades cilíndricas ensayadas a compresión y las medidas de dispersión conseguidas del análisis de estos resultados. Para mayor detalle se presenta en **Apéndice B** la resistencia a la compresión de todos los diseños ensayados.

Tabla 21. Resistencia a la compresión mezcla MS-10

N° de Muestra	Resistencia (kg/cm ²)	Promedio (kg/cm ²)	Desviación estándar	Límite máximo	Límite mínimo
1	515.69	501.86	19.27	521.13	482.59
2	457.32	501.86	19.27	521.13	482.59
3	507.49	501.86	19.27	521.13	482.59
4	496.98	501.86	19.27	521.13	482.59
5	493.82	501.86	19.27	521.13	482.59
6	521.79	501.86	19.27	521.13	482.59
7	503.31	501.86	19.27	521.13	482.59
8	518.46	501.86	19.27	521.13	482.59

Fuente: Elaboración propia

*Unidades: kg/cm²

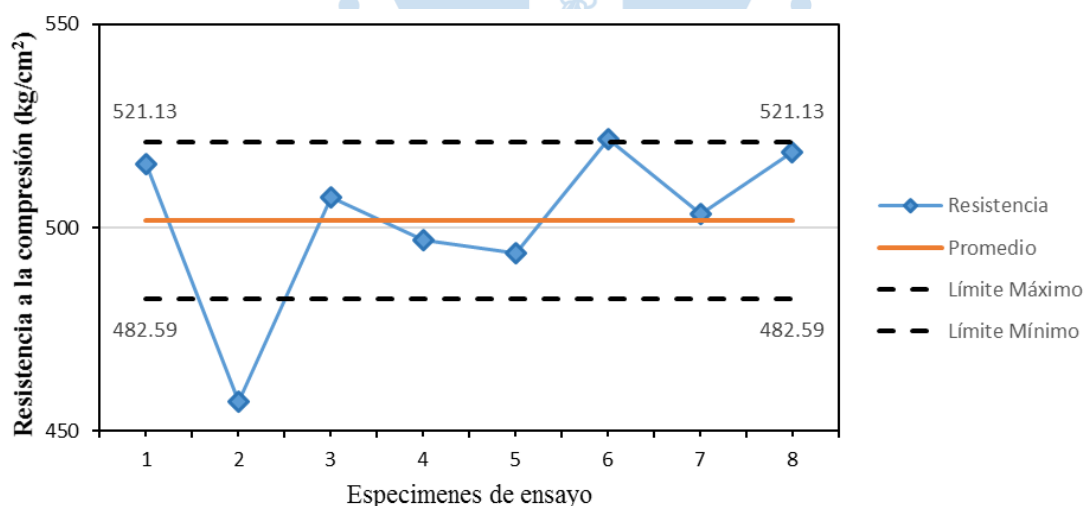


Figura 20. Resistencia a la compresión mezcla MS-10.

Fuente: Elaboración propia.

2.2. Patrones de falla de las probetas. Una vez realizado el ensayo de compresión a los cilindros según lo especificado por la NTP 339.034 se procedió a identificar el tipo de fractura generada. En la norma se enumeran 5 tipos de fracturas, de las cuales el Tipo 2, 3 y 4 fueron las que gobernaron los resultados de todos los diseños ensayados. A continuación, en la **Figura 21** y **Figura 22**, se muestra en imágenes los patrones de fallada obtenidos.



Figura 21. Fractura diagonal sin grietas en la base.

Fuente: Elaboración propia.

De todas las probetas ensayadas el patrón de fractura predominante fue el Tipo 4, denominada como “fractura diagonal sin grietas en la base” y la siguiente más frecuente fue el Tipo 2 llamada “cono bien formado sobre una base con desplazamiento de grietas verticales a través de las capas y cono no bien definido en la otra base”. Vale aclarar que la norma no define un patrón como adecuado o no, pero se puede afirmar que los diseños ensayados con microsílíce presentan fracturas típicas por lo que se prevé un comportamiento normal de este tipo de concreto durante su vida útil.



Figura 22. Cono formado sobre una base y desplazamiento de grieta vertical a través de las capas.

Fuente: Elaboración propia

2.3. Índice de ligante. Para los diseños ensayados se calculó el Índice de ligante encontrándose los resultados planteados en la **Tabla 22** y la **Figura 23**. La mezcla con reemplazo del 10% de microsilíce fue aquella que más eficientemente ha usado los materiales cementantes, cemento y microsilíce para desarrollar la resistencia a la compresión. Por el contrario, el diseño de la tanda patrón presenta el valor más alto y por ende menos eficiente de todos pues, el cemento como único material cementante no es el más eficiente.

Con el resto de reemplazos se presentan también resultados mejores a la tanda patrón, pero con una tendencia en aumento. En este sentido se puede inferir que no por tener mayores reemplazos de microsilíce se obtienen mezclas más ecoeficientes.

Tabla 22. Resumen de valores del índice de ligante en los diseños de mezcla elaborados

% de reemplazo	Material cementicio (kg/m ³)	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Resistencia a la compresión (MPa)	Índice de ligante (kg.m ⁻³ .MPa ⁻¹)
0	481.09	358	35	13.43
10	481.09	502	49	9.58
15	490.55	476	47	10.31
20	490.55	442	43	11.10

Fuente: Elaboración propia.

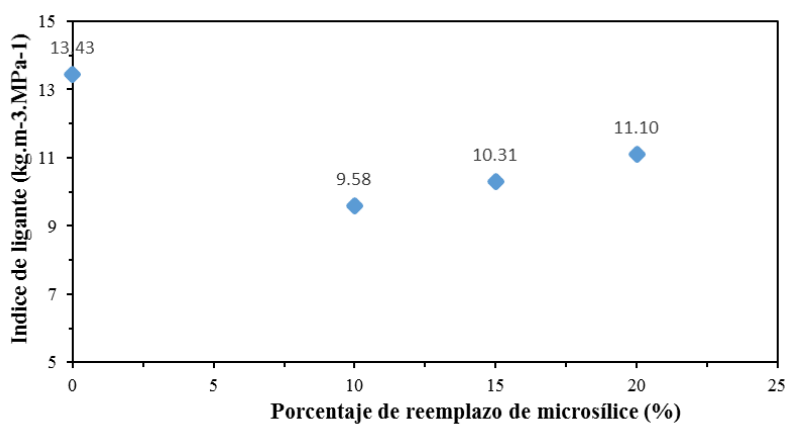


Figura 23. Índice de ligante a 28 días de los diseños de mezcla elaborados.

Fuente: Elaboración propia



Conclusiones

1. Con base en los resultados obtenidos se puede concluir que sí es posible fabricar concretos de alta resistencia con los agregados locales, siempre y cuando se use superplastificante y microsílíce en su composición y se sigan las consideraciones para la secuencia de mezclado planteadas en el presente trabajo.
2. Si se desea obtener el mejor comportamiento e interacción de los componentes dentro de la mezcla es importante respetar el orden seguido al realizar la combinación de los mismos, esto se debe al uso de microsílíce y superplastificante. En la presente investigación se verificó como óptimo el siguiente: **agregado grueso, agua, agregado fino, cemento, agua, superplastificante, microsílíce y agua**. El agua se agregó parcialmente hasta completar la cantidad total del diseño. El superplastificante se adicionó directo a la mezcla, no se diluyó previamente en agua. Una vez añadido el cemento y el superplastificante a la mezcla se tiene que combinar por un periodo de tiempo, alrededor de los 3 minutos, para asegurar generar la suficiente pasta y productos de hidratación pues de esta manera, al incorporar la microsílíce, la mayor cantidad de esta reaccionará químicamente y no sólo rellenará espacios dentro de la mezcla.
3. El uso de superplastificante fue necesario para asegurar un comportamiento correcto en estado fresco de este tipo de mezclas. Aunque inicialmente se intentó evitar su uso, no fue posible debido a las bajas relaciones agua/material cementante pues la cantidad de agua de diseño no logró asegurar la completa reacción de gran parte del material cementante. Se comprobó experimentalmente que el planteamiento de aumentar la dosificación de superplastificante y reducir la relación agua/material cementante no es óptimo como criterio de diseño si se busca obtener mayores resistencias a la compresión.
4. Para los diferentes porcentajes de reemplazo usados (10%, 15% y 20%) los valores de slump se mantuvieron constantes (04 pulgadas) pues el uso de microsílíce generó en la mezcla una mayor cantidad de pasta, gracias a su menor gravedad específica respecto al cemento. Tal incremento superó la mayor cantidad de área superficial presente y favoreció el recubrimiento de todos los componentes involucrados en la mezcla. Es por esta característica que se podría considerar su uso para fabricar concretos de alta resistencia que además necesiten ser fluidos.

5. Se observó que, a mayor reemplazo de microsílíce los valores del peso unitario aumentaron. Sin embargo, el incremento de la masa por metro cúbico dentro de la mezcla no generó mayores valores de resistencia a la compresión. Por lo que se podría afirmar que para estos concretos de alta resistencia, densificar una mezcla no garantiza mayores valores de resistencia a la compresión.
6. Para las condiciones planteadas en la presente investigación el aumento del porcentaje de reemplazo de microsílíce, fue inversamente proporcional a la mejora de la resistencia a la compresión. Por lo que se infiere que hay un porcentaje óptimo y está cercano al reemplazo del 10%. Lo enunciado se demuestra con los resultados del diseño “MS-10” dónde el valor de resistencia a la compresión promedio llegó a ser **502 kg/cm²**
7. El uso de microsílíce no sólo debería plantearse cuando se busca obtener mayores valores de resistencia a la compresión, sino también para reducir el impacto ambiental en la industria de la construcción. Reducir el uso del cemento dentro de las mezclas planteadas generó mejores resultados del índice de ligante, el cual muestra su mejor resultado en porcentajes alrededor del 10% de reemplazo de microsílíce. Esto permite obtener mejor eficacia en el uso de los materiales cementantes y por ende una mejora en el impacto al medio ambiente.

Recomendaciones

1. La presente investigación desarrolló porcentajes de reemplazo por encima del 10% del peso del cemento. Se recomienda evaluar con porcentajes por debajo del 10%.
2. Se recomienda evaluar el cambio del tipo de agregado grueso usado, de triturado por redondeado.
3. Se llegó a usar relación agua – material cementante, igual a 0.36 por lo que se recomienda utilizar valores menores para así verificar si se puede obtener resultados más eficientes del índice de ligante y cómo influye el uso del superplastificante.
4. Es conveniente recalcar que la fabricación de este tipo de concreto requiere de un gran cuidado por parte de la mano de obra. Experimentalmente se pudo verificar que, si los materiales son bien dosificados y si se sigue el orden correcto se obtendrán buenos resultados, pero siempre apoyado en la experiencia del personal a cargo. Por mi experiencia en el mercado local lograr esto último es el factor decisivo para asegurar el éxito de su elaboración en obra. Si bien las empresas piuranas cada vez mejoran sus procesos y la capacitación de su personal, aún no se ha llegado a un nivel óptimo generalizado. Debido a esto, se debería reservar la fabricación de diseños con microsílíce a plantas concreteras donde sí se puede dosificar correctamente y tener un mejor control del producto.
5. Al momento de manipular la microsílíce y el superplastificante se recomienda leer previamente las hojas técnicas para evitar un manejo incorrecto y prever cualquier tipo de daño a la salud.



Referencias bibliográficas

1. ACI COMMITTEE 211. (2008). *Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials*. Farmington Hills: ACI.
2. ACI Committee E-701. (2003). *Chemical Admixtures for Concrete*. USA: ACI Education Bulletin.
3. ASOCRETO. (2010). *Colección del Concreto - Tecnología del Concreto - Tomo 1*. Colombia: ASOCRETO.
4. ASOCRETO. (2010). *COLECCIÓN DEL CONCRETO - TÉCNOLOGÍA DEL CONCRETO - TOMO 1 MATERIALES, PROPIEDADES Y DISEÑO DE MEZCLAS*. BOGOTÁ, COLOMBIA: NOMOS IMPRESORES.
5. ASTM. (2015). *ESPECIFICACIÓN NORMALIZADA PARA HUMO DE SÍLICE UTILIZADO EN MEZCLAS CEMENTICIAS*. USA: ASTM INTERNATIONAL.
6. Cementos Pacasmayo. (2012). *Cemento y sus Aplicaciones*. Perú: Cementos Pacasmayo.
7. Cementos Pacasmayo. (1 de Diciembre de 2015). *Cementos Pacasmayo*. Obtenido de Cementos Pacasmayo: <http://www.cementospacasmayo.com.pe/productos-y-servicios/cementos/adicionado/antisalitre-ms/>
8. CEMENTOS PACASMAYO. (15 de Abril de 2018). *CEMENTOS PACASMAYO*. Obtenido de PACASMAYO: <http://www.cementospacasmayo.com.pe/productos-y-servicios/cementos/adicionado/antisalitre-ms/>
9. Damineli, B., Kemeid, F., Aguiar, P., & Vanderley M., J. (2010). *Cement & Concrete Composites*. Sao Paulo: Elsevier Science.
10. European Silica Fume Committee. (2019). *About Silica Fume*. UNIÓN EUROPEA: ESFC.
11. Fidjestol, P., & Terje Thorstensen, R. (2012). Improving sustainability of concrete construction - The role of High Strength and high performance concrete. *Our World in Concrete and Structures* (pág. 11). Singapore: CI-PREMIER PTE LTD.
12. Gobierno Regional de Piura. (2017). *Plan de Desarrollo Regional Concertado (PDRC) 2016 - 2021*. PIURA: Gobierno Regional Piura.
13. INACAL. (2002). *AGREGADOS. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto*. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
14. INACAL. (2011). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados*. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
15. INACAL. (2013). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*. LIMA: INSTITUTO NACIONAL DE LA CALIDAD .

16. INACAL. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado*. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
17. INACAL. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino*. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
18. INACAL. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso*. LIMA: Instituto Nacional de Calidad.
19. Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1 de JUNIO de 2013). *INEI*. Obtenido de INEI:
https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1095/libro.pdf
20. Isaia, G., Gastaldini, A., & Moraes, R. (2001). Physical and pozzolanic action of mineral additions on the mechanical strength of high-performance concrete. *Elsevier Science*, 8.
21. Kopczynski, C. (2014). High-Strength Concrete Comes of Age. *Building Blocks*, 15-16.
22. Mehta, P., & Aïtcin, P. (1990). Principles underlying production of highperformance. *ASTM*, 70-78.
23. Pasquel, E. (1998). *Tópicos de Tecnología del Concreto en el Perú*. Lima: Colegio de Ingenieros del Perú.
24. Portland Cement Association. (1994). High Strength Concrete. *Concrete Technology Today*, 8.
25. Portland Cement Association. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Illinois: PCA.
26. Portland Cement Association. (19 de Enero de 2016). *PCA American's Cement Manufactures*. Obtenido de PCA American's Cement Manufactures:
<http://www.cement.org/cement-concrete-basics/products/high-strength-concrete>
27. Rivva, L. E. (2002). *Concretos de Alta Resistencia*. Lima: ICG.
28. Russell, H. G. (1999). Why use high-performance concrete? *Concrete Products*, 121-122.
29. Saavedra Gonzaga, J. (2016). *Interacción de la concha de abanico triturada con los agregados triturados y redondeados en mezclas de concreto*. Piura: Universidad de Piura.
30. Sevilla, B. (25 de Marzo de 2019). *Ranking de los principales países productores de silicio a nivel mundial en 2018 (en miles de toneladas métricas)*. Obtenido de STATISTA:
<https://es.statista.com/estadisticas/600220/paises-lideres-en-la-produccion-de-silicio-a-nivel-mundial/>
31. Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Elsevier Science*, 923-932.

32. Silica Fume Association. (2005). *Silica Fume User's Manual*. Lovettsville: Silica Fume Association.





Apéndices





Apéndice N° 1

Diseños de mezcla

DISEÑO DE MEZCLA - CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DISEÑO DE MEZCLA: SP1 -36

DATOS: DISEÑO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
Fc	500	kg/cm2
S. Plastificante	Si	
P.Esf Cemento	3.15	g/cm3
P.Esf Agua	1000	kg/m3
P. Esf Microsilice	2.20	g/cm3
P. Esf Superplastificante	1.20	kg/lts

DATOS: CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Cantera	A. Fino	
	Chulucanas	Sojo
Tamaño máximo nominal		3/4
Módulo de fineza	3.00	
Peso específico (SSD)	2.59	2.81
P.U. varillado (STOCK)	1.662	1.545
P.U. varillado (OD)	1.655	1.538
C. Humedad (%)	0.95%	0.44%
Absorción (%)	1.12%	1.06%

LEYENDA
INGRESAR DATOS
RESULTADOS

TABLAS DE DISEÑO SEGÚN ACI 211-4R

DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
<i>Fórmula</i> Resistencia requerida (F _{cr})	664.44	kg/cm2
Tabla 3.1 Slump con superplastificante	1-2	in
Tabla 3.2 Tamaño máximo sugerido	3/8 - 1/2	3/4
Tabla 3.3 Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen (P _{ag})	0.72	% Vol.
Tabla 3.4 Agua de mezclada estimada (A)	168	kg/m3
Tabla 3.4 Contenido de aire	1.5	%
<i>Fórmula</i> Contenido de arena	36.10	%
<i>Fórmula</i> Ajuste de agua de mezclado	5.19	kg/m3
f _{cr} *0.90	598.00	kg/cm2
Tabla 3.50 a/c	0.36	

CALCULO DE PROPORCIONES DE LOS MATERIALES - ACI 211-4R

VOLUMEN PARA CÁLCULO	1.00	m3
----------------------	------	----

	Peso		Volumen	
Agregado grueso	1,107.36	kg	0.394	m3
Agua	173.19	kg	0.173	m3
Cemento	481.08	kg	0.153	m3
Aire	0.015	kg	0.015	m3
			0.735	
Agregado fino	686.37	kg	0.265	m3

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m3) (OD)

	Peso (kg)	Volumen (m3)
Cemento	481.08	0.153
Agua	173.19	0.173
A. Grueso	1,107.36	0.394
A. Fino	686.37	0.265
Aire	0.015	0.015

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m3) (STOCK)

	Peso (kg)	Vol (m3)
Cemento	481.08	0.153
Agua	181.22	0.181
A. Grueso	1,112.23	0.396
A. Fino	692.89	0.268
Aire	0.015	0.015
Superplastificante (1%)	4.81	0.004
P.U teórico	2,472.23	

CANTIDADES DE LA MEZCLA (20 l, 30 l y PASTA) (STOCK)

	20 l	
	Peso (kg)	Vol (m3)
Cemento	9.622	0.0031
Agua	3.624	0.0036
A. Grueso	22.245	0.0079
A. Fino	13.858	0.0054
Aire	0.0003	0.0003
Superplastificante (1%)*	96.216	

*Unidad: g

30 l
Peso (kg)
14.43
5.44
33.37
20.79

PASTA
Peso (kg)
1.44
0.54
3.34
2.08

DISEÑO DE MEZCLA - CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DISEÑO DE MEZCLA: SP1.5 -30

DATOS: DISEÑO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
f'c	620	kg/cm ²
S. Plastificante	Si	
P.Esf Cemento	3.15	g/cm ³
P.Esf Agua	1000	kg/m ³
P. Esf Microsilice	2.20	g/cm ³
P. Esf Superplastificante	1.20	kg/lts

DATOS: CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Cantera	A. Fino		A. Grueso
	Chulucanas	Sojo	
Tamaño máximo nominal			3/4
Módulo de fineza	3.00		
Peso específico (SSD)	2.59		2.81
P.U. varillado (STOCK)	1.662		1.545
P.U. varillado (OD)	1.655		1.538
C. Humedad (%)	0.95%		0.44%
Absorción (%)	1.12%		1.06%

LEYENDA
INGRESAR DATOS
RESULTADOS

TABLAS DE DISEÑO SEGÚN ACI 211-4R

	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
Fórmula	Resistencia requerida (f'cr)	797.78	kg/cm ²
Tabla 3.1	Slump con superplastificante	1-2	in
Tabla 3.2	Tamaño máximo sugerido	3/8 - 1/2	3/4
Tabla 3.3	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen (P _{sag})	0.72	% Vol.
Tabla 3.4	Agua de mezclado estimada (A)	168	kg/m ³
Tabla 3.4	Contenido de aire	1.5	%
Fórmula	Contenido de arena	36.10	%
Fórmula	Ajuste de agua de mezclado	5.19	kg/m ³
	f'cr*0.90	718.00	kg/cm ²
Tabla 3.5b	a/c	0.3	

CALCULO DE PROPORCIONES DE LOS MATERIALES - ACI 211-4R

VOLUMEN PARA CÁLCULO	1.00	m ³
----------------------	------	----------------

	Peso		Volumen	
Agregado grueso	1,107.36	kg	0.394	m ³
Agua	173.19	kg	0.173	m ³
Cemento	577.30	kg	0.183	m ³
Aire	0.015	kg	0.015	m ³
			0.766	
Agregado fino	607.26	kg	0.234	m ³

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m³) (OD)

	Peso (kg)	Volumen (m ³)
Cemento	577.30	0.183
Agua	173.19	0.173
A. Grueso	1,107.36	0.394
A. Fino	607.26	0.234
Aire	0.015	0.015

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m³) (STOCK)

	Peso (kg)	Vol (m ³)
Cemento	577.30	0.183
Agua	181.11	0.181
A. Grueso	1,112.19	0.396
A. Fino	613.05	0.237
Aire	0.015	0.015
Superplastificante (1.5%)	8.66	0.007
P.U teórico	2,492.31	

CANTIDADES DE LA MEZCLA (20 l, 30 l y PASTA) (STOCK)

	20 l		30 l	PASTA
	Peso (kg)	Vol (m ³)		
Cemento	11.546	0.0037	17.32	1.73
Agua	3.622	0.0036	5.43	0.54
A. Grueso	22.244	0.0079	33.37	3.34
A. Fino	12.261	0.0047	18.39	1.84
Aire	0.0003	0.0003		
Superplastificante (1.5%)*	173.190			

*Unidad: g

DISEÑO DE MEZCLA - CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DISEÑO DE MEZCLA: SP1.5 -25

DATOS: DISEÑO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
f'c	750	kg/cm2
S. Plastificante	SI	
P.Esf Cemento	3.15	g/cm3
P.Esf Agua	1000	kg/m3
P. Esf Microsilice	2.20	g/cm3
P. Esf Superplastificante	1.20	kg/lts

DATOS: CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Cantera	A. Fino		A. Grueso	
	Chulucanas	Sojo		
Tamaño máximo nominal				3/4
Módulo de fineza	3.00			
Peso específico (SSD)	2.59		2.81	
P.U. varillado (STOCK)	1662		1545	
P.U. varillado (OD)	1655		1538	
C. Humedad (%)	0.77%		0.51%	
Absorción (%)	1.12%		1.06%	

LEYENDA
INGRESAR DATOS
RESULTADOS

TABLAS DE DISEÑO SEGÚN ACI 211-4R

	DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
Fórmula	Resistencia requerida (f'cr)	942.22	kg/cm2
Tabla 3.1	Slump con superplastificante	1-2	in
Tabla 3.2	Tamaño máximo sugerido	3/8 - 1/2	3/4
Tabla 3.3	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen (P _{sag})	0.72	% Vol.
Tabla 3.4	Agua de mezclado estimada (A)	168	kg/m3
Tabla 3.4	Contenido de aire	1.5	%
Fórmula	Contenido de arena	36.10	%
Fórmula	Ajuste de agua de mezclado	5.19	kg/m3
	f'cr*0.90	848.00	kg/cm2
Tabla 3.5b	a/c	0.25	

CÁLCULO DE PROPORCIONES DE LOS MATERIALES - ACI 211-4R

VOLUMEN PARA CÁLCULO	1.00	m3
----------------------	------	----

	Peso		Volumen	
Agregado grueso	1,107.36	kg	0.394	m3
Agua	173.19	kg	0.173	m3
Cemento	692.76	kg	0.220	m3
Aire	0.015	kg	0.015	m3
			0.802	
Agregado fino	512.32	kg	0.198	m3

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m3) (OD)

	Peso (kg)	Volumen (m3)
Cemento	692.76	0.220
Agua	173.19	0.173
A. Grueso	1107.36	0.394
A. Fino	512.32	0.198
Aire	0.015	0.015

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m3) (STOCK)

	Peso (kg)	Vol (m3)
Cemento	692.76	0.220
Agua	181.07	0.181
A. Grueso	1113.01	0.396
A. Fino	516.27	0.199
Aire	0.015	0.015
Superplastificante (1.5%)	6.93	0.006
P.U teórico	2,510.04	

CANTIDADES DE LA MEZCLA (20 l, 30 l y PASTA) (STOCK)

	20 l		30 l	PASTA
	Peso (kg)	Vol (m3)		
Cemento	13.855	0.0044	20.78	2.08
Agua	3.621	0.0036	5.43	0.54
A. Grueso	22.260	0.0079	33.39	3.34
A. Fino	10.325	0.0040	15.49	1.55
Aire	0.0003	0.0003		
Superplastificante (1.5%)*	138.552			

*Unidad: g

DISEÑO DE MEZCLA - CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DISEÑO DE MEZCLA: MS-20

DATOS: DISEÑO DE CONCRETO DE ALTA RESISTENCIA

DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
F _c	500	kg/cm ²
S. Plastificante	si	
P.Esf Cemento	3.15	g/cm ³
P.Esf Agua	1000	kg/m ³
P. Esf Microsilice	2.20	g/cm ³
P. Esf Superplastificante	1.20	kg/lts

DATOS: CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

Cantera	A. Fino-2		A. Grueso
	Chulucanas	Sojo	
Tamaño máximo nominal			3/4
Módulo de finieza	2.90		
Peso específico (SSD)	2.58	2.81	
P.U. varillado (STOCK)	1.531	1.545	
P.U. varillado (OD)	1.630	1.538	
C. Humedad (%)	0.44%	0.39%	
Absorción (%)	1.80%	1.06%	

LEYENDA
INGRESAR DATOS
RESULTADOS

TABLAS DE DISEÑO SEGÚN ACI 211-4R

DESCRIPCIÓN	CANT.	UNID
<i>Fórmula</i> Resistencia requerida (F _{cr})	664.44	kg/cm ²
Tabla 3.1 Slump con superplastificante	1-2	in
Tabla 3.2 Tamaño máximo sugerido	3/8 - 1/2	3/4
Tabla 3.3 Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen (P _{seg})	0.72	% Vol.
Tabla 3.4 Agua de mezclado estimada (A)	168	kg/m ³
Tabla 3.4 Contenido de aire	1.5	%
<i>Fórmula</i> Contenido de arena (V %)	36.82	%
<i>Fórmula</i> Ajuste de agua de mezclado	8.60	kg/m ³
f _{cr} *0.90	598.00	kg/cm ²
Tabla 3.5b a/c	0.36	

1.- CALCULO DE PROPORCIONES DE LOS MATERIALES - ACI 211-4R

VOLUMEN PARA CALCULO	1.00	m ³
Agregado grueso	1,107.36	kg
Agua	176.60	kg
Cemento	490.56	kg
Aire	0.015	kg
Agregado fino	665.64	kg

2.- CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m³) (OD)

	Peso (kg)	Volumen (m ³)
Cemento	490.56	0.156
Agua	176.60	0.177
A. Grueso	1,107.36	0.394
A. Fino	665.64	0.258
Aire	0.015	0.015

CANTIDADES DE LA MEZCLA (1 m³) (STOCK)

	20%	
	Peso (kg)	Vol (m ³)
Cemento	392.44	0.125
Microsilice	98.11	44.595
Agua	192.62	0.193
A. Grueso	1,111.68	0.396
A. Fino	634.88	0.246
Aire	0.015	0.015
Superplastificante (1.5%)	7.36	0.006
P.U teorico	2,437.09	

3.- CALCULO DE PROPORCIONES CON REEMPLAZOS PORCENTUALES DE MICROSIŁICE (1m³) (OD)

Mezcla de Prueba	Microsilice (%)	Cemento (kg)	Microsilice (%)
1	10%	441.5	49.06
2	15%	416.97	73.58
3	20%	392.44	98.11

Mezcla de Prueba	Cemento (m ³)	Microsilice (m ³)	A. Grueso (m ³)	Agua (m ³)	Aire (m ³)	Subtotal (m ³)
1	0.140	0.022	0.394	0.177	0.015	0.749
2	0.132	0.033	0.394	0.177	0.015	0.752
3	0.125	0.045	0.394	0.177	0.015	0.755

Mezcla de Prueba	Subtotal (m ³)	A. Fino (m ³)	A. Fino (kg)
1	0.749	0.251	647.58
2	0.752	0.248	639.84
3	0.755	0.245	632.10

Mezcla de Prueba	Cemento (kg)	Microsilice (kg)	A. Grueso (kg)	A. Fino (kg)	Agua (kg)
1	441.500	49.060	1107.36	647.58	176.60
2	416.970	73.580	1107.36	639.84	176.60
3	392.440	98.110	1107.36	632.10	176.60

CANTIDADES DE LA MEZCLA (20 l, 30 l y PASTA) (STOCK)

	20 l	
	Peso (kg)	Vol (m ³)
Cemento	7.849	0.0025
Microsilice	1.962	0.0009
Agua	3.852	0.0039
A. Grueso	22.234	0.0079
A. Fino	12.698	0.0049
Aire	0.0003	0.0003
Superplastificante (1.5%)	147.166	

30 l	Peso (kg)
	11.77
	2.94
	5.78
	33.35
	19.05

PASTA	Peso (kg)
	1.18
	-
	0.58
	3.34
	1.90

*Unidad: g

Apéndice N°2

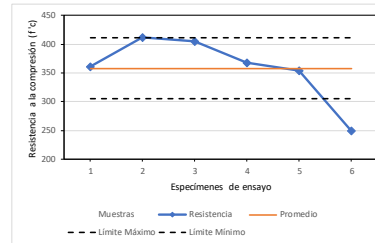
Resultados de resistencia a la compresión

RESISTENCIA A LA COMPRESION

SPI-36

Muestras	Resistencia	Promedio	Límite Máximo	Límite Mínimo
1	360.75	358.18	411.61	304.76
2	411.73	358.18	411.61	304.76
3	405.79	358.18	411.61	304.76
4	367.87	358.18	411.61	304.76
5	353.73	358.18	411.61	304.76
6	249.23	358.18	411.61	304.76

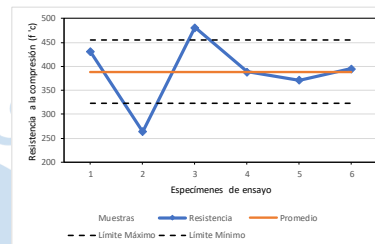
Promedio	358.18
Dev. Est	53.42
Límite Máximo	411.61
Límite Mínimo	304.76



SPI.5-30

Muestras	Resistencia	Promedio	Límite Máximo	Límite Mínimo
1	430.55	388.42	454.58	322.26
2	263.66	388.42	454.58	322.26
3	481.14	388.42	454.58	322.26
4	388.41	388.42	454.58	322.26
5	371.64	388.42	454.58	322.26
6	395.12	388.42	454.58	322.26

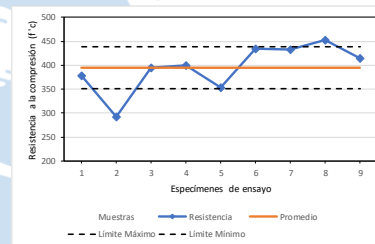
Promedio	388.42
Dev. Est	66.16
Límite Máximo	454.58
Límite Mínimo	322.26



SPI.5-25

Muestras	Resistencia	Promedio	Límite Máximo	Límite Mínimo
1	379.02	395.05	439.42	350.69
2	292.46	395.05	439.42	350.69
3	395.50	395.05	439.42	350.69
4	400.54	395.05	439.42	350.69
5	353.72	395.05	439.42	350.69
6	433.82	395.05	439.42	350.69
7	433.46	395.05	439.42	350.69
8	452.06	395.05	439.42	350.69
9	414.91	395.05	439.42	350.69

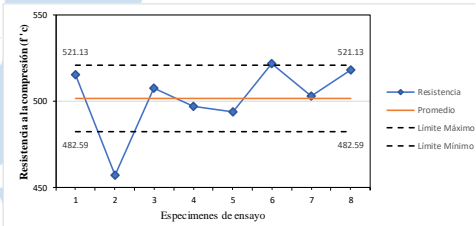
Promedio	395.05
Dev. Est	44.37
Límite Máximo	439.42
Límite Mínimo	350.69



MS 10

Muestras	Resistencia	Promedio	Límite Máximo	Límite Mínimo
1	515.69	501.86	521.13	482.59
2	457.32	501.86	521.13	482.59
3	507.49	501.86	521.13	482.59
4	496.98	501.86	521.13	482.59
5	493.82	501.86	521.13	482.59
6	521.79	501.86	521.13	482.59
7	503.31	501.86	521.13	482.59
8	518.46	501.86	521.13	482.59

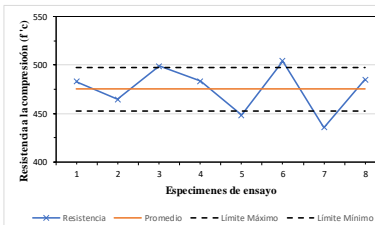
Promedio	501.86
Dev. Est	19.27
Límite Máximo	521.13
Límite Mínimo	482.59



MS 15

Muestras	Resistencia	Promedio	Límite Máximo	Límite Mínimo
1	482.82	475.4	497.85	452.96
2	464.49	475.4	497.85	452.96
3	498.75	475.4	497.85	452.96
4	483.55	475.4	497.85	452.96
5	448.52	475.4	497.85	452.96
6	504.43	475.4	497.85	452.96
7	435.58	475.4	497.85	452.96
8	485.08	475.4	497.85	452.96

Promedio	475.40
Dev. Est	22.44
Límite Máximo	497.85
Límite Mínimo	452.96



MS -20

Muestras	Resistencia	Promedio	Límite Máximo	Límite Mínimo
1	480.83	442.08	463.25	420.91
2	466.60	442.08	463.25	420.91
3	413.58	442.08	463.25	420.91
4	437.54	442.08	463.25	420.91
5	445.12	442.08	463.25	420.91
6	420.59	442.08	463.25	420.91
7	428.83	442.08	463.25	420.91
8	443.54	442.08	463.25	420.91

Promedio	442.08
Dev. Est	21.17
Límite Máximo	463.25
Límite Mínimo	420.91

