

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CONCRETO LIVIANO DE ALTA RESISTENCIA EMPLEANDO NANOSÍLICE Y PUZOLANA NATURAL EN EL PERÚ

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO CIVIL**

AUTOR

RAMIREZ MORALES JHONATAN JEANPIERRE

ASESOR:

Ms. AYBAR ARRIOLA GUSTAVO ADOLFO

JURADO:

Dr. MALPARTIDA CANTA ROMMEL

Dr. PUMARICRA PADILLA RAÚL VALENTÍN

Ms. GARCÍA URRUTIA OLAVARRÍA ROQUE JESÚS LEONARDO

Lima – Perú

2018

DEDICATORIA

A mis grandiosos amados padres, Yaneth y Juan, por todas sus expresiones de amor, sus enseñanzas de vida y el apoyo constante a mis proyectos profesionales y personales.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Juan Ramirez Maldonado y Yaneth Morales Saenz, por el aliento y la confianza depositada para mis propósitos de vida, por todo el tiempo de constantes enseñanzas en el aprecio por la cultura y los valores sociales.

A la Facultad de Ingeniería Civil, por darme la oportunidad de realizar estudios profesionales en estos más de cinco años de aprendizajes, de amistades forjadas en aulas y anécdotas imborrables; destacando además que fue el lugar donde efectúe la investigación.

A Natanael Barrueto técnico del laboratorio de Materiales, por el apoyo en la efectuación de ensayos y por las veces que sobrepasó su horario laboral por este trabajo; a Fredy Villanueva técnico de los laboratorios de Suelos y Pavimentos por su asistencia y cooperación con los ensayos.

A las empresas ULMEN y BASF por las donaciones de las adiciones minerales Nanosílice y microsílice; por la confianza y los aportes empíricos que se ha tenido en cuenta.

A mi asesor de tesis, el Ing. Gustavo Aybar Arriola por todas sus recomendaciones, su entusiasmo con mi trabajo, y los aportes teóricos que han acompañado a bien el estudio.

A quienes estimo con el corazón, y me apoyaron con los trabajos físicamente más laboriosos: Ana Paula Rojas Bernaola, Aldair Villanueva y Josué Cuba Barraza por sus colaboraciones en momentos importantes y críticos. Asimismo, a mi amigo José Bravo por su mediación en la obtención y traslado de la puzolana natural desde la cantera Racchi, y por su apoyo en general.

Al Dr. Andrés Valencia Gutiérrez y al Ing. Omart Tello Malpartida; por sus gestiones y contemplación a la investigación, para así poder hacer uso de los laboratorios.

A mis honorables maestros, por ese tiempo de enseñanzas de calidad, por el ejemplo de vida y profesionalismo. A ellos espero retribuir sus esfuerzos con este pequeño aporte al mundo científico.

ÍNDICE

LISTA DE TABLAS.....	ix
LISTA DE GRÁFICOS	xi
LISTA DE FOTOGRAFÍAS.....	xii
LISTA DE ILUSTRACIONES	xiv
RESUMEN.....	15
ABSTRACT.....	16
INTRODUCCIÓN	17
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	20
1.1 Problema de Investigación	20
1.1.1 Enunciado del Problema	20
1.1.2 Formulación del Problema	22
1.1.2.1 Problema General.....	22
1.1.2.2 Problemas Específicos	22
1.2 Objetivos	23
1.2.1 Objetivo General	23
1.2.2 Objetivos Específicos.....	23
1.3 Justificación y Limitaciones de la Investigación	23
1.3.1 Justificación.....	23
1.3.2 Limitaciones de la investigación.....	24

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO	26
2.1 Antecedentes de la Investigación	26
2.2 Conceptos Generales	30
2.2.1 Concreto de Alta Resistencia	30
2.2.2 Concreto Liviano Estructural	31
2.2.3 Concreto Liviano de Alta Resistencia (CLAR)	34
2.3 Tecnología de los Materiales	36
2.3.1 Agregados	36
2.3.1.1 Puzolana natural	37
2.3.1.1.1 Puzolana como ceniza volcánica.....	38
2.3.1.1.2 Puzolana como roca volcánica	40
2.3.2 Agregado fino y grueso de peso ligero – puzolana natural	43
2.3.2.1 Propiedades físicas	45
2.3.2.1.1 Granulometría	45
2.3.2.1.1.1 Granulometría del agregado grueso de Puzolana Natural	45
2.3.2.1.1.2 Granulometría del agregado fino de Puzolana Natural	48
2.3.2.1.2 Modulo de Finura (MF)	51
2.3.2.1.3 Peso específico y la absorción.....	51
2.3.2.1.3 Contenido de humedad.....	54

2.3.2.1.4	Peso unitario suelto de la combinación de agregados ligeros	55
2.3.2.1.5	Peso unitario compactado de la combinación de agregados ligeros	55
2.3.3	Agregado grueso de peso normal	58
2.3.3.1	Propiedades físicas	59
2.3.3.1.1	Granulometría	59
2.3.3.1.2	Modulo de Finura (MF)	61
2.3.3.1.3	Peso específico y absorción	61
2.3.3.1.4	Contenido de humedad.....	61
2.3.3.1.5	Peso unitario suelto	62
2.3.3.1.6	Peso unitario compactado	63
2.3.4	Cemento	64
2.3.4.1	Características de cemento portland tipo I.....	66
2.3.4.2	Comparación de fichas técnicas de los cementos portland tipo I.....	66
2.3.5	Nanosílice.....	72
2.3.6	Microsílice.....	74
2.3.7	Agua	75
2.4	Hipótesis.....	77
2.4.1	Hipótesis General	77
2.4.2	Hipótesis Secundarias	77

2.5 Variables	77
2.5.1 Variables independientes:	77
2.5.2 Variable dependiente:.....	77
2.5.3 Variables extrañas:	77
2.5.4 Operacionalización de variables	78
2.6 Tipo y Diseño de Investigación.....	78
2.7 Matriz de Consistencia.....	79
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	81
3.1 Metodología de la investigación	81
3.2 Características de la Muestra	82
3.4 Diagrama de Procesos de Trabajos en el Laboratorio.....	83
3.5 Instrumentos de Investigación.....	84
3.6 Diseños preliminares de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR).....	84
3.7 Diseños optimizados de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)	92
3.8 Procedimiento de la mezcla de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)	94
CAPÍTULO 4 ENSAYOS Y RESULTADOS DE LABORATORIO.....	95
4.1 Ensayos de los Concretos en la Fase Fresca	95
4.1.1 Consistencia	95
4.1.2 Densidad Aparente (masa unitaria).....	97

4.1.3 Temperatura	99
4.1.4 Contenido de Aire	100
4.2 Ensayos del concreto en la Fase Endurecida.....	103
4.2.1 Resistencia a la Compresión	103
4.2.2 Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral.....	106
4.2.3 Resistencia a la flexión.....	108
4.2.3 Densidad de equilibrio y seca	110
4.2.3.1 Densidad de equilibrio	111
4.2.3.2 Densidad seca.....	111
4.2.3.3 Densidad aproximada de equilibrio	112
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	115
5.1 Conclusiones	115
5.2 Conclusiones Adicionales	116
5.3 Recomendaciones.....	117
LISTA DE REFERENCIAS	118
ANEXO A: FICHAS TÉCNICAS	122
ANEXO B: PANEL FOTOGRÁFICO	129

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Granulometría propuesta para el agregado grueso de puzolana natural	46
Tabla 2 -Husos granulométricos para el agregado grueso de peso normal.....	47
Tabla 3 Granulometría propuesta para el agregado fino de puzolana natural	49
Tabla 4 Límites granulométricos para el agregado fino de peso ligero según ASTM C330.....	50
Tabla 5 Determinación del peso específico y absorción del agregado combinado de Puzolana natural	54
Tabla 6 Contenido de humedad de la combinación de agregados de puzolana natural.....	55
Tabla 7 Peso unitario suelto del agregado combinado de puzolana natural	56
Tabla 8 Peso unitario compactado del agregado combinado de puzolana natural empleado	57
Tabla 9 Pesos unitarios compactados de diferentes relaciones de agregado grueso/agregado fino de peso ligero	58
Tabla 10 Granulometría para el agregado grueso huso 89	60
Tabla 11 Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso de peso normal ..	63
Tabla 12 Contenido de humedad del agregado grueso de peso normal.....	64
Tabla 13 Peso unitario suelto del agregado grueso de piedra chancada	64
Tabla 14 Peso unitario compactado del agregado grueso de piedra chancada empleado	65
Tabla 15 Ficha Técnica del Cemento Quisqueya 2007	69
Tabla 16 Ficha técnica del Cemento Sol Portland Tipo I	71
Tabla 17 Límites permisibles para el agua de mezcla	77
Tabla 18 Operacionalización de Variables	79
Tabla 19 - Matriz de Consistencia	80

Tabla 20	Proceso de optimización de la mezcla – Semana 1	86
Tabla 21	Proceso de optimización de la mezcla – Semana 2	87
Tabla 22	Proceso de optimización de la mezcla – Semana 3	88
Tabla 23	Proceso de optimización de la mezcla – Semana 4	89
Tabla 24	Proceso de optimización de la mezcla – Semana 5	90
Tabla 25	Proceso de optimización de la mezcla – Semana 6	91
Tabla 26	Diseños optimizados de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)	93
Tabla 27	Consistencias de los concretos ligeros de alta resistencia	96
Tabla 28	Pesos Unitarios en estado fresco de los concretos ligeros de alta resistencia.....	97
Tabla 29	Temperatura en estado fresco de los concretos ligeros de alta resistencia	99
Tabla 30	Contenido de aire en estado fresco de los concretos ligeros de alta resistencia	101
Tabla 31	Resistencia a la compresión (kg/cm^2) de los concretos ligeros de alta resistencia.....	104
Tabla 32	Resistencias a la tracción por compresión diametral (T) de los concretos ligeros de alta resistencia.....	106
Tabla 33	Resistencias a la flexión (R) de los concretos ligeros de alta resistencia	105
Tabla 34	Densidades de los concretos ligeros de alta resistencia.....	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1. Curva granulométrica del agregado grueso de puzolana natural.....	48
Gráfico 2.2 Curva granulométrica del agregado fino de puzolana natural	51
Gráfico 2.3 Curva de Pesos unitarios compactados Vs relación de agregados	58
Gráfico2.4 Curva granulométrica del agregado grueso de peso normal.....	61
Gráfico 4.1 Consistencia. Flujo de asentamiento y asentamiento	96
Gráfico 4.2 Densidad Aparente del concreto fresco	98
Gráfico 4.3 Contenido de aire aparente atrapado – Olla Washington	101
Gráfico 4.4 Curva de resistencia a la compresión en el tiempo de todos los diseños.....	105
Gráfico 4.5 Resistencia a la tracción porcentaje respecto a f_c	107
Gráfico 4.6 Módulo de Rotura y porcentajes respecto a f_c	109
Gráfico 4.7 Densidades secas y de equilibrio	113

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1 San Francisco – Oakland Bay Bridge (Puente de la Bahía).....	31
Fotografía 2 Dispersión de una nube de ceniza volcánica tras una erupción..	41
Fotografía 3 Puzolana natural en la cantera Racchi – Cusco.....	43
Fotografía 4 Fragmentos de puzolana natural como roca volcánica o simplemente puzolana.....	43
Fotografía 5 Trituración de la roca..	44
Fotografía 6 La trituración se hizo de entre 3 a 4 personas...	44
Fotografía 7 Zarandeo de la puzolana con los tamices.....	45
Fotografía 8 Separación de la puzolana por el tamaño de sus granos.	45
Fotografía 9 Ensayo fallido de peso específico y absorción.....	54
Fotografía 10 El agregado compactado no cae completo..	54
Fotografía 11 Ensayo definitivo de absorción.	54
Fotografía 12 Condición de humedad: saturado superficialmente seco definida visualmente....	54
Fotografía 13 Puzolana natural en la intemperie, secado inicialmente por los rayos solares.....	55
Fotografía 14 Peso del material compactado y el recipiente.	57
Fotografía 15 Probetas de comparación entre ambos cementos.	73
Fotografía 16 Nanosílice (líquido blanco) y Microsílice (polvo gris/acero), .	75
Fotografía 17 Peso del concreto fresco y el recipiente	98
Fotografía 18 Medición de la temperatura con el termómetro.	100
Fotografía 19 Olla Washington para determinar el contenido de aire atrapado.	102

Fotografía 20	Probeta rota en la máquina de ensayo a compresión.....	104
Fotografía 21	Ensayo de resistencia a la tracción. Probeta rota en el eje longitudinal.....	107
Fotografía 22	Vigas rotas luego del ensayo de resistencia a la flexión.	110
Fotografía 174	Medición de la masa aparente del cilindro suspendido – sumergido; para determinar la densidad seca medida (Ds).	114

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 2.1 Proceso productivo del concreto en planta.....	36
Ilustración 2.2 Ficha técnica y presentación del cemento portland Quisqueya TI	70
Ilustración 2.3 Datos técnicos y presentación del cemento portland Sol TI.....	72
Ilustración 4.1 Disposición de los apoyos y las cargas para efectuar el ensayo ASTM C78	108

RESUMEN

El concreto liviano de alta resistencia, es una tecnología mejorada del concreto de alta resistencia y el concreto ligero estructural, y su empleo es más conveniente en la construcción de edificios, puentes de grandes luces y rascacielos, por las reducciones de los costos totales a nivel de proyecto y las ventajas técnicas que ofrece un material sumamente resistente y de baja densidad; no obstante, su desarrollo no ha tenido acogida en el país.

Debido a la inexistencia de antecedentes científicos que aborden sobre el uso de la puzolana natural como agregado en la producción de concretos, en esta investigación de tipo experimental y de alcance exploratorio – descriptivo, se ha trabajado una propuesta técnica de concreto, que satisface las denominaciones de liviandad del ACI 211.2-98 y de alta resistencia del ACI 363.2R, con un material abundante en el Perú, la puzolana natural como roca volcánica; asimismo, se ha recurrido al empleo de un producto de nanotecnología, la nanosílice o nano SiO_2 .

Luego de una serie de procesos de planteamientos y optimizaciones preliminares trabajadas en el laboratorio, se han estudiado las propiedades de cinco diseños seleccionados. Se ha conseguido, que, a los 56 días de edad, con una densidad de equilibrio de 1827 kg/m^3 y una densidad seca de 1776 kg/m^3 , una resistencia a la compresión de 891 kg/cm^2 para uno de los diseños propuestos. Cuatro de ellos han alcanzado la denominación de alta resistencia y peso ligero a los 3 días de edad. Las reducciones en peso obtenidas, equivalen a más de media tonelada de diferencia por metro cúbico para el diseño más pesado y para el más liviano una reducción de hasta 680 kg/m^3 respecto a la densidad del concreto convencional de 2400 kg/m^3 .

Asimismo, se efectuaron ensayos complementarios en el laboratorio para tener un mayor conocimiento de los concretos planteados.

Palabras clave: concreto, liviano, nanosílice, puzolana natural, baja densidad y alta resistencia.

ABSTRACT

Lightweight high strength concrete is an improved technology of high strength concrete and lightweight structural concrete, and its use is more convenient, in the construction of buildings, bridges of big lights and skyscrapers, by the reductions of the total costs at the project level and the technical advantages offered by an extremely resistant and low density material; however, its development has not been welcomed in the country.

Due to the lack of scientific background that addresses the use of natural pozzolan as aggregate in the production of concrete, in this research of experimental type and exploratory - descriptive scope, a concrete technical proposal has been worked on, which satisfies the denominations of lightness of the ACI 211.2-98 and of high resistance of the ACI 363.2R, with an abundant material in Peru, the natural pozzolana as volcanic rock; likewise, the use of a nanotechnology product, nanosilica or nano SiO₂, has been resorted to.

After a series of preliminary processes and optimizations worked on in the laboratory, the properties of five selected designs have been studied. It has been achieved that, at 56 days of age, with an equilibrium density of 1827 kg/m³ and a dry density of 1776 kg/m³, a compressive strength of 891 kg/cm² for one of the proposed designs. Four of them have reached the denomination of high strength and light weight at 3 days of age. The reductions in weight obtained, are equivalent to more than half a ton of difference per cubic meter for the heavier design and for the lighter one a reduction of up to 680 kg/m³ with respect to the density of conventional concrete of 2400 kg/m³.

Likewise, complementary tests were carried out in the laboratory to have a better knowledge of the concrete proposed.

Key words: concrete, light, nanosilica, natural pozzolan, low density and high strength.

INTRODUCCIÓN

La tecnología del hormigón o concreto ha prosperado en toda la historia por investigadores que han ideado formas novedosas de fabricar y mejorar uno de los materiales más empleados e importantes que ha podido inventar el hombre como puente al progreso de la humanidad, el concreto o piedra artificial.

Concretos de diferentes características se han ido desarrollando hasta llegar a nuestros tiempos donde el más comúnmente empleado se hace con cemento Portland y agregados convencionales; sin embargo, también se han desarrollado particulares formas y métodos de hacer concretos especiales, dirigidos a elevar las propiedades de calidad, productividad, seguridad, aspectos ecológicos y los costos totales de las obras construidas, y de esta manera representan los nuevos avances de la tecnología del concreto. Estos aportes han hecho posible las grandes mega-obras de la ingeniería actual, mientras que otros concretos especiales han dado soluciones prácticas y estéticas en aspectos no estructurales u obras menores.

Apoyándose en las significativas ventajas técnicas y económicas que el concreto ofrece, los investigadores de todos los tiempos, han querido optimizar dos particulares características: la resistencia a compresión y la densidad o peso volumétrico. La primera, por la necesidad de incrementar su capacidad de resistencia a cargas axiales y en flexo-compresión cada vez mayores por cada unidad de área ocupada; un requerimiento primordial, desde la antigüedad. La segunda, por la necesidad de aminorar el peso total de una estructura, aspecto muy relevante tanto para el diseño como para la construcción de la obra. Se encontró a bien que una manera de reducir el peso total es disminuyendo el peso por cada unidad de volumen del concreto, teniendo en cuenta que los concretos de alta resistencia varían en una densidad de equilibrio de entre los 2300 a 2400 kg/cm², partiendo de que una disminución de la densidad sin disminuir la resistencia traería

ventajas en todos los sentidos de la construcción, pero primordialmente la productividad (haciendo más fácil su transporte y colocación) y la disminución de los costos totales del proyecto.

De estos avances se han obtenido resultados que se han reflejado en menores gastos de la construcción de las cimentaciones de las estructura y han hecho posible escalar cada vez más alto, ejemplo de esto son las construcciones de los primeros rascacielos y la razón por la que en cierto momento de la historia se reemplazó el concreto por estructuras solamente de acero (perfiles), ya que efectivamente permitieron un mayor número de pisos y menores gastos en la construcción de cimentaciones, pero ello hasta el descubrimiento del concreto armado y posteriormente los concretos de alta resistencia, que en conjunto a otras tecnologías garantizarían menores costos en cuanto a la compra de terrenos, gastos en materiales, mano de obra para la construcción, y mejoras en cuanto a las características técnicas del concreto; importantes avances que se han logrado en las ciudades de mayor desarrollo económico.

Hoy en día la modernidad y la visión de futuro se concentran en los avances de la ciencia en cuanto a la nanotecnología y la importancia de desarrollar cualquier aspecto tecnológico desde principios moleculares donde se cree que se podrían alcanzar mejores y destacados avances que desde los fragmentos más grandes de la materia. La nanosílice o nano-SiO₂ es una adición mineral en estado líquido producto de los avances nanotecnológicos y su uso tiene alrededor de un par de décadas y propone reemplazar a la microsílice que por muchos años ha sido el material más empleado como adición mineral para la obtención de los concretos más resistentes empleados en las mega-obras conocidas de la actualidad, sin embargo, esta última es menos ecológica y altamente nociva para la salud de los que operan directamente con el material. La presente investigación se concentrara en desarrollar un Concreto Ligero de Alta Resistencia o CLAR con este nanomaterial para ganar destacadas resistencias y por otro lado a la puzolana natural (roca

volcánica) como agregado ligero que disminuya la densidad de equilibrio sin perjudicar a la resistencia, se prevé que en una dosificación adecuada de ambos componentes, y los otros que se sumarán al diseño del concreto, puedan optimizarse hasta llegar a satisfacer los requisitos técnicos establecidas para ser considerado como tal según las normas ACI.

Por último, se puede afirmar que el concreto liviano de alta resistencia, es una tecnología potenciada del concreto ligero estructural y el concreto de alta resistencia, su empleo ha sido conveniente en la construcción de edificios diversos, rascacielos y puentes de grandes luces con resistencias de altos valores que sobrepasan la condición mínima de 40 MPa (408 kg/cm² o 6000psi). Se ha confirmado su eficiencia en obras apreciándose reducciones considerables de volumen utilizado y la disminución de cantidades de acero a nivel de proyecto, lo que ha significado ahorros considerables en los costos totales del proyecto y una mejora en los otros aspectos relacionados al trabajo con este material.

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 Problema de Investigación

1.1.1 Enunciado del Problema

En la construcción de rascacielos y puentes de grandes luces, por más cercanos que hayan estado en el tiempo de su ejecución, los concretos utilizados han tenido dosificaciones y componentes diferenciados, además del proceso constructivo, siendo unos más innovadores que otros. Influenciados por los costos de acceso a los recursos materiales determinados por la ubicación geográfica y por las características técnicas requeridas determinadas por las propiedades climatológicas y geológicas del lugar. Un indicador que sugiere que cada región o país debería trabajar sus propias tecnologías en función a sus recursos disponibles.

No se cuenta con una normativa para poder producir concretos ligeros de alta resistencia como tal, salvo recomendaciones o guías que sugieren que los concretos de alta resistencia, pueden ser producidos con materiales innovadores y procedimientos nuevos, dándole cabida a los nuevos avances para su evolución (Committee ACI 363, 1998). Existen recomendaciones técnicas del ACI y ASTM de parámetros y conceptos para poder realizar la elección de los agregados ligeros y sobre todo los ensayos de control de la calidad de los concretos livianos estructurales; sin embargo, sus estudios se han efectuado con un número un tanto limitado de agregados, por ejemplo, la puzolana natural como agregado ligero no conforma sus textos.

Carrera (1980) indica que para hacer concretos usando agregados livianos, se han utilizado agregados como escoria espumosa, concreciones de ceniza de combustible pulverizado, arcilla o pizarra expandida, pómez, vermiculita exfoliada, perlita expandida y aserrín; con finalidades principales como obtener menores densidades, aislamientos térmicos elevados, y una mayor

resistencia al fuego, quien investigo al concreto liviano no estructural con vidrio volcánico como agregado, y las resistencias al calor a 700°C fueron mayores que para concretos normales, característica favorable ante un siniestro.

Gestión, el diario de Economía y Negocios (2016) afirma que el Ministerio de Energía y minas anunció que la extracción de minerales no metálicos anotó un acrecentamiento de 79% desde el 2011, según estadísticas del Anuario Minero 2015. Al término de este año, se produjo una masa de extracción de 56'499'800 toneladas métricas (TM) de recursos minerales no metálico, en el año 2011 la cifra fue de 31'543'882 TM.

Según estadísticas de fines de 2017 en el Anuario Minero del MEM, de los más de 30 tipos de minerales de la clase no metálicos que se extraen en Perú, al año 2010 la puzolana (natural) ocupó el 5to lugar con una producción de 700'514 TM; pasó a 8vo lugar en el 2015 con una producción de 1'420'152 toneladas, y al término del 2017 en el 9no puesto, con una producción de 1'046'833 TM (Ministerio de Energía y Minas, 2018). Estos datos reflejan la abundancia de puzolana natural en los suelos de la nación.

La nanotecnología también ha llegado a la industria constructiva, sobre todo con el concreto en forma de adición mineral: la nanosílice; una versión mejorada de la muy empleada microsílice, y de otras adiciones minerales usadas en la producción de concretos de alto desempeño; este nuevo material no solo ha impactado con la fabricación de altas resistencias sino también mejora otras particularidades mecánicas del concreto incluyendo reducciones en el costo unitario de la piedra y en la salud de todo trabajador directo del concreto. La nano SiO₂ se puede conseguir mediante importaciones con las empresas de aditivos en el país; siendo la materia prima la sílice (SiO₂).

La producción de sílice pasó de ocupar el 8vo lugar en el 2010 con una producción de 283'098 TM a ocupar el puesto 12 en el 2017 de mineral no metálico de mayor producción, siendo esta de

374,246 TM (Ministerio de Energía y Minas, 2018). Cifras que podrían motivar a las empresas interesadas en producir nanosílice en el Perú.

Contando con materias primas disponibles, que potencialmente puedan adquirir una alta demanda e industrialización de la producción y venta a nivel nacional en la dirección del desarrollo económico de nuestro país, nos podemos adelantar a maniobrar y observar que tan posible es realizar un material muy fuerte y liviano que aporte en el alto desarrollo anhelado por todos los peruanos.

1.1.2 Formulación del Problema

1.1.2.1 Problema General

- ¿De qué manera la dosificación de materiales influye en el concreto liviano de alta resistencia bajo recomendaciones técnicas para la producción de concretos?

1.1.2.2 Problemas Específicos

- ¿La nanosílice como adición mineral tendrá una influencia favorable en el concreto en su fase endurecida contribuyendo a ganar niveles de alta resistencia y sin perjudicar el peso liviano del concreto?
- ¿Existen dosificaciones de la puzolana natural a ser empleada como agregado grueso y/o fino para producir un concreto liviano y de alta resistencia al mismo tiempo?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- Determinar la dosificación de los materiales a fin de obtener concretos livianos de alta resistencia (que satisfagan la denominación de liviandad del ACI 211.2-98 y de alta resistencia del ACI 363.2R), a través de las recomendaciones técnicas ACI, ASTM y/o procesos nuevos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar la dosificación de nanosílice como adición mineral a fin de obtener concretos livianos de alta resistencia.
- Determinar la dosificación de puzolana natural como agregado fino y grueso de peso ligero a fin de obtener concretos livianos de alta resistencia.

1.3 Justificación y Limitaciones de la Investigación

1.3.1 Justificación

Esta investigación tiene el propósito de convertirse en un aporte en las últimas innovaciones de la tecnología del concreto, los diseños podrían ser utilizados tal cual se plantean en este estudio para determinados casos u obras y ser el punto de partida para nuevas investigaciones en la línea de los concretos de alta resistencia y al mismo tiempo de un peso liviano, más aún en nuestro país donde no hay muchos estudios en esta rama de la ingeniería civil.

Los ingenieros y arquitectos pueden trabajar a partir de este aporte en obtener características específicas requeridas en distintas obras y así enriquecer las ventajas de la utilización del material propuesto.

1.3.2 Limitaciones de la investigación

- Sobre la accesibilidad a determinados recursos:
 - Obtener la puzolana natural de la cantera Racchi en el departamento de Cusco.
 - Dificultad en la adquisición de la adición mineral nanosílice en cantidades menores, que se obtendrá mediante donación.
 - El chancado de la puzolana en estado natural hasta obtener una granulometría de huso 9, asimismo en fragmentos más pequeños que satisfagan la granulometría del agregado fino propuesta en la investigación; lo trabajoso que es y el tiempo requerido. Acción que se resolvería con una chancadora mecánica y el control constante del tamaño de los granos para evitar pérdidas importantes.

- Sobre la información:
 - Nula información en libros, tesis y artículos científicos sobre concretos (hormigones) livianos de alta resistencia utilizando puzolana natural como agregado fino o grueso.
 - No existe una normativa para el control de calidad de los concretos ligeros de alta resistencia, el ACI 363.2R es una guía para el control de calidad de concretos de alta resistencia y será utilizada en esta investigación como referente.
 - No se contó con información accesible sobre diseños o dosificaciones de obtención de concretos (hormigones) ligeros de alta resistencia en español.

- Las normas, guías o recomendaciones del ACI y ASTM para los agregados ligeros en el concreto, no han planteado a la puzolana natural como agregado ligero lo que incrementa el nivel de dificultad en satisfacer los objetivos.
 - Muy reducida información en libros, tesis y artículos científicos en español sobre conceptos teóricos de los hormigones ligeros de alta resistencia.
- Sobre los ensayos realizados:
- No se cuenta en los laboratorios de la facultad con todas las máquinas, herramientas o recurso para llevar a cabo todos los ensayos posibles a los concretos, sin embargo, si se pueden realizar los más importantes que satisfacen la finalidad de la investigación.
 - No se pueden realizar todos los ensayos de la misma manera que a un concreto convencional, debido a que no se cuenta con normas o recomendaciones técnicas NTP, ACI o ASTM disponibles sobre el empleo de puzolana natural como agregado grueso y/ o fino.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de la Investigación

Según Chandra & Berntsson (2002) el uso de hormigón con agregado ligero se remonta a 3000 a.C, cuando las famosas ciudades de Mohenjo-Daro y Harappa se construyeron durante la civilización del Valle del Indo.

Fueron los romanos quienes utilizaron los primeros hormigones livianos de una manera más sofisticada para construir edificaciones. Según el Committee ACI 213 (2003) en el año 273 a.C construyeron el Puerto de Cosa con un concreto ligero con materiales volcánicos naturales, estos constructores aprendieron que los agregados expandidos eran más adecuados para las instalaciones marinas que la arena y la grava de las playas locales. Los hombres del mediterráneo desarrollaron mezclas de argamasas romanas con puzolanas pulverizadas, y otros materiales cementantes a partir de limos quemados, y como agregado de baja densidad se usó la piedra pómez. Entre sus principales obras realizadas con este concreto sobresalen: La cúpula del Panteón de Agripa en el 25 a.C (Arce, 1997) y los arcos del coliseo Romano, con luces mayores de 25 metros, construida en el 70d.C (Gali, 2007).

Luego de más de 18 siglos de no registrarse destacados avances en el uso de hormigones livianos, y con el uso expandido del cemento Portland (de distintas características al cemento puzolánico romano), en la ciudad de Kansas – USA, se construyó el primer edificio registrado con concreto liviano estructural en 1922 tras la Primera Guerra Mundial, donde se ejecutó la ampliación del gimnasio de la escuela de deportes acuáticos de la ciudad y la razón principal que

condujo a incursionar en el desarrollo de este tipo especial de concreto fue la baja capacidad portante que tenía el suelo donde se cimentó (Expanded Shale, Clay and Slate Institute, 1971).

La empresa de teléfono Southwestern Bell en la ciudad de Kansas, Missouri – USA en el año 1928 requería un estudio para determinar cuántos pisos más se podían construir sobre sus 14 pisos, se realizaron estudios de las cimentaciones y estos determinaron que era posible incrementar hasta en 8 pisos adicionales empleando hormigón convencional, lo sorprendente fue que el edificio se pudo doblar hasta los 28 pisos (14 adicionales) utilizando hormigón liviano a base de arcillas expandidas (Pérez L. , 2016).

En cuanto a costos de producción, una importante revelación sobre las grandes ventajas que ha aportado el ‘concreto ligero estructural’ en tiempos más recientes de aplicación y estudios es la que afirma Ghio (1994):

A pesar que el costo de los materiales de los concretos ligeros es superior al de los concretos convencionales, el uso de concretos ligeros deberá generar una reducción en el costo total de la estructura. Por ejemplo, la utilización de concretos ligeros genera una reducción importante en el peso total de la estructura, y, por ende, una reducción en el costo de cimentaciones, acero de refuerzo, así como en el costo de la construcción en general. Un ejemplo de esto es la construcción del puente que une San Francisco con Oakland (construido en 1936), cuyo resultado fue un ahorro de 3 millones de dólares en costos de acero. A partir de esta experiencia, diversos puentes en todo el mundo se han construido total o parcialmente con concretos ligeros para reducir el peso de la estructura en edificios. Este principio fue utilizado en el edificio Lake Point Tower en Chicago. Todas las losas, a partir del segundo piso hasta el piso setenta, fueron construidas con concreto con una densidad de 1730 Kg/m³, con una resistencia a la compresión de 20-22 MPa a 7 días. El Australian Square, Sidney, Australia, construido en 1967 es una torre

circular de 50 pisos (184m de altura). Un ahorro de 13% del coto fue obtenido a través del uso de 31 000 m³ de concreto ligero en vigas, columnas, y losas a partir del séptimo piso de la estructura. El concreto tiene una resistencia a la compresión promedio de 34.4 MPa y una densidad promedio de 1792 Kg/m³.

Quizás, la mayor aplicación de los concretos ligeros es en estructuras pretensadas y elementos prefabricados, en donde los productos de concreto ligero son ideales para reducir los costos de manipuleo, transporte y comunicación. En esta área, se está trabajando actualmente en la Pontificia Universidad Católica de Chile de modo de utilizar concretos ligeros para facilitar la industrialización de la construcción en determinadas áreas de interés en Chile. Actualmente se ha desarrollado la construcción industrializada de viviendas modulares para sectores bajos de sectores económicos. El concreto que se está utilizando tiene una densidad de 100 Kg/m³ para los paneles interiores y 1400 Kg/m³ para los elementos estructurales. Las resistencias son en promedio de 17 y 22 MPa respectivamente. Se espera obtener mediante el uso de este material una substancial reducción en los costos de producción de las 6000 viviendas anuales que construye la empresa constructora que financió la investigación en la universidad (pp. 12,13).

En el Perú, Carrera (1980) trabajó con agregado de vidrio volcánico, llegando a la densidad seca de 1400 Kg/m³ y resistencia de 155 Kg/cm², donde rescató principalmente los beneficios de su elevado aislamiento térmico, baja densidad, y una mayor resistencia al calor respecto al concreto convencional, muy ventajoso ante siniestros, y además que este tipo de concreto se podría utilizar estructuralmente en algunas edificaciones menores.

En cuanto a concretos de alta resistencia (no liviano) se puede mencionar la investigación experimental de Huincho (2011) quien empleó aditivo superplastificante, microsílíce y agregados convencionales. Según sus resultados, pudo llegar a una resistencia de 1208 kg/cm² a 28 días y a

1423 kg/cm² en 90 días, pero no registró los pesos específicos en la fase endurecida de las muestras.

Bung-Wan, Chang-Hyun, Ghi-Ho, & Jong-Bin (2005) realizaron una investigación sobre morteros con nanosílice (Nano-SiO₂) y observaron que la diferencia en el desarrollo de resistencia de los morteros se puede atribuir a las reacciones puzolánicas, ellos suponen que las nanopartículas son más efectivas en reacciones puzolánicas que el humo de sílice. La nano-SiO₂ llenaría los poros para aumentar la resistencia del mortero, de manera parecida a lo que ocurre con el humo de sílice. Confirmaron que la adición de nano-SiO₂ para cementar morteros mejora sus características de resistencia. Además, demostraron que con una quinta parte de nanosílice con respecto a microsílice se logran mismos resultados, además de las ventajas físicas y químicas que caracterizan al material, concluyen demostrando que el uso de las nanopartículas le otorga resistencias superiores al concreto.

Las puzolanas naturales se encuentran en dos formas físicas distintas, esto es propiedades diferenciadas, que sin embargo bajo ciertos procesos se podrían asemejar; en la actualidad se han desarrollado investigaciones que abordan el tema y como consecuencia las empresas cementeras han incentivado mayor extracción de puzolana natural. Por ejemplo, Guerrero (2017) nos habla del tipo de puzolana natural que empleaban los romanos, indicando que ellos mezclaban ceniza volcánica, cal y agua y este es el cemento puzolánico del vasto imperio romano conocido en la actualidad y cuyas obras siguen en pie tras 2000 años, y son motivo de investigación para muchos profesionales por sus diferencias con el cemento Portland.

No se encuentran investigaciones al día de hoy con la utilización de puzolana natural como agregado fino, grueso o la combinación de ambos en reemplazo de los agregados convencionales

para obtener concretos livianos, en los repositorios virtuales de las universidades o libros en la web, sin descartar la posibilidad de que exista de manera más restringida.

Fotografía 1

San Francisco – Oakland Bay Bridge (Puente de la Bahía).



Fuente: <https://www.tylin.com/>

2.2 Conceptos Generales

2.2.1 Concreto de Alta Resistencia

En el año 1950, se consideraba de alta resistencia a los concretos de 360 kg/cm^2 , y en los años de 1960 se usaban comercialmente resistencias a compresión de hasta 510 kg/cm^2 . En tiempos más cercanos se ha podido llegar a los 1430 kg/cm^2 utilizados en edificios colados in situ.

Según el comité ACI 363.2R (1998) debido a que las definiciones del concreto de alta resistencia han ido cambiando a través de los años, el Comité ha definido un rango de resistencias del concreto para sus actividades. Y define que el concreto de alta resistencia tiene una resistencia a compresión especificada mínima de 40 MPa (408 kg/cm^2 o 6000 psi).

Las columnas de hormigón de alta resistencia pueden soportar más peso y, por lo tanto, ser más delgadas que las columnas de hormigón de resistencia normal, lo que permite un mayor espacio utilizable, especialmente en los pisos inferiores de los edificios. Asimismo, se pueden construir la superestructura de puentes de grandes luces y a la vez la mejora en la durabilidad de sus elementos.

Aunque 40 MPa es la línea divisoria actual entre un concreto de resistencia normal y un concreto de alta resistencia, este nivel de resistencia a la compresión no está asociado con cambios drásticos en las propiedades de los materiales, las técnicas de producción e inspección, o de los métodos de prueba.

En realidad, los cambios ocurren continuamente, desde concretos de resistencias más baja a resistencias más alta. Sin embargo, la experiencia demuestra que, en la mayoría de los casos, las medidas especiales recomendadas deberían aplicarse para concretos de 55 MPa en adelante.

Los avances en cuanto a las tecnologías relacionadas a este tipo de concreto le están proporcionando al mundo moderno una poderosa arma de deslumbrantes resultados; y sigue siendo una de las tendencias científicas más importantes de los últimos tiempos en el área de la ingeniería de la construcción, y que es mérito las naciones de alto desarrollo.

2.2.2 Concreto Liviano Estructural

Según el ACI 211.2-98 el ‘concreto ligero estructural’ o ‘Concreto estructural de agregado ligero’, es aquel cuya resistencia a la compresión mínima a 28 días es de 2500 psi (176 Kg/cm²) de acuerdo a los métodos indicados en ASTM C330 y tiene una densidad de equilibrio que no excede 115 lb/ft³ (1842 kg/m³) de acuerdo a ASTM C567. Este concreto está compuesto completamente por agregados livianos o una combinación de agregado liviano y agregado de densidad normal.

Esta definición no es una especificación, los requerimientos de los proyectos varían. Mientras que el concreto liviano con una densidad de equilibrio de 70 a 105 lb/ft³ (1120 a 1680 kg/m³) se usa con poca frecuencia, la mayoría del concreto liviano tiene una densidad de equilibrio de 105 a 120 lb/ft³ (1680 a 1920 kg/m³). Debido a que el concreto liviano a menudo es específico para un proyecto, se debe contactar al proveedor del agregado antes de recomendar el diseño del proyecto para garantizar una mezcla económica y establecer el rango disponible de densidad y resistencia.

El concreto de agregado ligero se remonta a 3000 AC, cuando las famosas ciudades de Mohenjo-Daro y Harappa se construyeron durante la civilización del valle del Indo. El uso más remoto en Europa y a su vez mejor desarrollado, sucedió hace unos dos mil años cuando los romanos construyeron el Puerto de Cosa (273 a.C); el Panteón (25 a.C), los acueductos y los arcos del Coliseo en Roma (70.d.c) de hasta 25m de luces. (Committee 211, 1998)

La piedra Pómez aún se sigue empleando en Italia, Alemania, Islandia y Japón y existen obras donde se las ha empleado como agregado para concreto estructural. En otros países, como Malasia, las cáscaras de aceite de palma se utilizan para hacer concreto agregado liviano.

Luego de aproximadamente 2000 años se han retomado los conceptos y se ha reinventado la estrategia de aligerar el peso de las estructuras; con la creciente demanda y la no disponibilidad de agregados ligeros naturales en todo el mundo, las técnicas se han desarrollado para producirlos en fábricas. Estos se producen a partir de materias primas naturales como arcilla expandida, pizarra, etc., así como de subproductos industriales tales como cenizas volantes, ceniza de cama, escoria de alto horno, etc. Las propiedades de los agregados dependen de los materiales y el proceso utilizado para producirlos.

Respecto a las ventajas e importancia del desarrollo de concretos ligeros estructurales Chandra & Berntsson (2002) aseguran que:

Un ahorro en el peso de la superestructura permite reducir el tamaño de los cimientos, ahorrar tiempo y gastos en el montaje y manejo de los componentes, de modo que se pueden emplear equipos de elevación más pequeños o se pueden manipular unidades prefabricadas más grandes. La baja densidad da como resultado un alto aislamiento térmico de las construcciones y, en algunos casos, se puede reducir el espesor de los techos y las paredes. Donde hay reducción de peso, se logrará un mayor grado de aislamiento térmico. Casi todos los concretos de agregado ligero son inherentemente resistentes al fuego. Además, dependiendo de la densidad y la resistencia, el concreto puede cortarse, clavarse, taladrarse, y tallarse con herramientas ordinarias para trabajar la madera.

El primer marco de construcción de concreto ligero estructural reforzado en Gran Bretaña era un bloque de oficinas de tres pisos en Bentford, cerca de Londres, construido en 1958. Desde entonces, muchas estructuras se han construido de concreto agregado prefabricado, pretensado in situ o ligero reforzado.

Los problemas ecológicos y ambientales se resuelven en cierta medida. El agregado liviano es costoso, pero el costo se calcula no solo sobre la base de agregados, también se toman en cuenta otros costos involucrados, como el costo de trabajo, el costo de refuerzo, el costo del transporte, etc. Al ser livianos, es fácil de manejar para los trabajadores y se quejan menos de dolores de espalda. La mayor ventaja, que generalmente no se aumenta, es el enorme gasto que implica la asistencia médica a los trabajadores. En consecuencia, el contratista debe encontrar trabajadores sustitutos para evitar retrasos en los proyectos. Otra ventaja es en el costo de demolición. Se necesita menos energía para demoler LWAC en

comparación con el concreto normal, ya que se pueden usar equipos más pequeños. Además de esto, dado que contiene aire, la cantidad de desperdicio será menor que cuando se usa concreto normal (p.1).

2.2.3 Concreto Liviano de Alta Resistencia (CLAR)

El nombre de este tipo de concretos hace alusión a dos características mecánicas que son su base conceptual. Decir que pesa mucho menos y resiste mucho más que los concretos comunes, es limitarse a una generalidad, la cual podría considerarse dentro de los ideales más anhelados por ingenieros y arquitectos de diferentes tiempos; ello entendiendo que el concreto también es un tipo de piedra o piedra artificial, material fundamental para la construcción de los imperios más destacados que han existido en la Tierra.

Committee ACI 213 (2003) lo define como aquel **concreto estructural liviano** con una resistencia a la compresión de 28 días de 6000 psi (40 MPa) o superior.

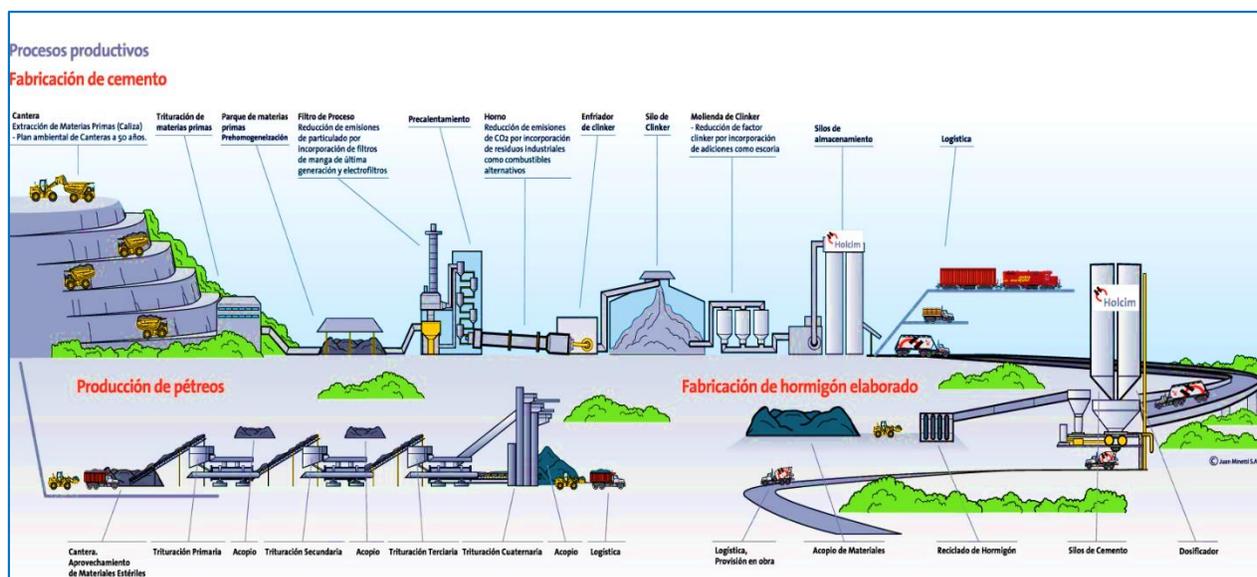
En Barcelona, España, Páez (1986) indica que en los ochentas se estudiaba sobre los beneficios de disminuir el peso propio de estructuras de considerables dimensiones, a travez de un sistema de reduccion de los espesores de las secciones mediante correlativos incrementos de la resistencia mecánica del material empleado. Por otro lado no era coherente recurrir a un hormigón ligero que siendo mas liviano por unidad de volumen, implique mayores espesores en las secciones de los elementos debido a su disminuida resitencia. El concepto estaba dado: en un marco de limites razonables, a más resistencia del material, menor la cantidad a utilizar, para distribuir los esfuerzos que se desarrollan en el interior, y como consecuencia, más ligero el elemento estructural. En ese mismo sentido de ideas los concretos ligeros estructurales tienen que ser lo más resitente posible sin dejar su livianidad.

En los Estados Unidos de America, Chandra & Berntsson (2002) en épocas más cercanas abordaron sobre los concretos de agregado ligero y afirman que:

Con el desarrollo de hormigones estructurales de alta resistencia con agregados ligeros la demanda de la calidad de los agregados ha aumentado. Se está llevando a cabo una investigación intensiva sobre el desarrollo de agregados de alta resistencia, a la vez de baja densidad, con baja absorción de agua y mejores propiedades térmicas. Los agregados livianos de ceniza volante y escoria se producen usando diferentes procesos de sinterización. Estos son duros y tienen baja absorción de agua. Estos producirán concretos de agregado ligero de alta resistencia y de alta durabilidad (p. 62).

Ilustración 2.1

Proceso productivo del concreto en planta. La producción de pétreos es la misma para los concretos livianos y CLAR.



Fuente: <https://www.holcim.com.ar/>

2.3 Tecnología de los Materiales

2.3.1 Agregados

Los agregados, están compuestos por fragmentos granulares no metálicos, como arena, gravas o las diversas variedades de piedras triturada aptas para construir que, en adición al agua y los materiales cementicios conforman al concreto.

Los agregados deben ser fragmentos que no presenten contaminación orgánica o química en un rango aceptable, tampoco mezclados con excesos de arcillas o limos que perjudiquen el producto final. A su vez, deben tener una considerable dureza que asegure las resistencias requeridas del producto final.

También representan un valor importante en los costos de la fabricación, por ser un recurso de origen natural siempre en cuando su extracción no sea un problema que demande mayores inversiones, además interfieren positivamente a controlar las contracciones de volumen en el tiempo de fraguado del concreto.

La llegada de los métodos de voladura modernos ha permitido el desarrollo de canteras, que ahora se utilizan en todo el mundo, dondequiera que existan los depósitos de roca madre competentes y de calidad. En muchos lugares, no existen buenos depósitos de piedra caliza, granito, mármol u otros depósitos de roca de piedra de calidad. En estas áreas, la arena natural y la grava se extraen para usar como agregado. Cuando no se dispone de piedra, arena y grava, la demanda de construcción generalmente se satisface enviando en conjunto por ferrocarril, barcaza o camión. Además, la demanda de agregados se puede satisfacer parcialmente mediante el uso de escoria y hasta concretos reciclados. Sin embargo, los tonelajes disponibles y la menor calidad de estos materiales evitan que sean un reemplazo viable para los agregados minados a gran escala. El Perú es un país aventajado en lo extenso de su territorio. Dentro de los minerales no metálicos que

más produce nuestro país el primer puesto esta la piedra caliza y en tercero el hormigón (Ministerio de Energía y Minas, 2018).

La forma de como estén distribuidas las partículas de los agregados y los distintos tamaños que ocupan dentro del concreto (por su granulometría), de tal manera que entre los espacios vacíos de los fragmentos grandes hayan fragmentos medianos y pequeños que conformen una estructura interna densificada; y en medio, entre una partícula y otra, coexista la pasta de cemento a manera de conglomerante, garantizando concretos de mayor calidad en cuanto a resistencia. Los agregados con esquinas o angulosos son más ideales frente a los redondeados por su capacidad de adherencia a la pasta. La resistencia mecánica que tengan los fragmentos es otro factor importante para obtener mayores valores de resistencia a esfuerzos. Todos estos argumentos tuvieron una importante reflexión antes de decidir cuáles serían los agregados a emplear y de cómo debería ser su granulometría para lograr los objetivos de esta investigación.

Los agregados por su tamaño se dividen en dos categorías distintas en agregados finos y agregados gruesos.

Los agregados por su peso específico se pueden dividir en agregados de peso normal (convencionales) y agregados de peso ligero o liviano.

2.3.1.1 Puzolana natural

La puzolana se define en ACI 116R como "un material silíceo o silíceo-aluminoso, que en sí mismo posee poco o ningún valor cementoso pero que, en forma finamente dividida y en presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas normales hasta forman compuestos que poseen propiedades cementosas.

Sobre su formación la Asociación de Puzolana Natural (NPA) (s.f.) revela:

En el corazón ardiente de un volcán, el agua se mezcla con la piedra fundida líquida, la presión aumenta hasta la erupción. El magma es lanzado violentamente a la atmósfera, el agua forma vapor, espumas de magma y estalla en nubes que oscurecen el sol de fragmentos de piedra o tefra que se enfrían rápidamente, eventualmente volviendo a la tierra, como material puzolánico totalmente calcinado. Estas piedras y cenizas livianas, amorfas y espumosas son derivadas, reunidas y empaquetadas por milenios de viento y agua en enormes depósitos de tobas, pómez, pumicitos y otros materiales riolíticos. (p.1)

En esta investigación nos referiremos a dos tipos de puzolanas naturales, la primera, la puzolana de ceniza volcánica, por lo importante de su utilización en la historia y de cómo su forma pulverizada ha incidido en lo que hoy se produce para elaborar los cementos puzolánicos, y como en la actualidad se fabrican a partir de la transformación del segundo tipo, la puzolana de roca volcánica, material fundamental en esta investigación, que será trabajado para usarlo como agregado fino y grueso, en un proceso de trituración en partículas más pequeñas, con una granulometría que es también materia de análisis en esta investigación.

2.3.1.1.1 Puzolana como ceniza volcánica

Este material recibe el nombre de puzolana por el lugar donde fue descubierto por los romanos, en el Monte Vesubio de la localidad de Puzzuoli en la bahía de Nápoles. Los griegos habían hecho trabajos con este material, pero fueron los romanos quienes le sacaron mayor ventaja, y descubrieron, y no por casualidad, que al añadirle cal y agua (de mar) a esta ceniza se podía fabricar una muy dura piedra artificial, a esto hoy se le conoce como reacción puzolánica.

Como afirma Marie Jackson "Es uno de los materiales de construcción más duraderos del planeta, y eso no fue un accidente. El envío fue la cuerda de salvamento de la estabilidad política,

económica y militar para el Imperio Romano, por lo que la construcción de puertos que durarían fue fundamental” (Yang, 2013).

Los romanos le podían añadir a esta mezcla trozos de rocas volcánicas, rocas ígneas volcánicas conocidos como tufos volcánicos o tobas volcánicas (Guerrero, 2017). De esta manera se obtuvieron los primeros concretos ligeros registrados por la historia.

Lo sorprendente de este material es que al día de hoy existen afirmaciones por parte de investigadores que indican que el concreto u hormigón fabricado por los romanos es mejor que el actual, principalmente debido a que la resistencia que hoy en día registran los viejos concretos del imperio, son mayores de cuando fueron puestos en marcha (Yang, 2013). Además, singulares afirmaciones donde tienen en cuenta que los concretos actuales elaborados con cemento portland están concebidas para durar un siglo y medio mientras el concreto con cemento puzolánico de los romanos tienen en promedio 2000 años de antigüedad.

Según Pérez D. (2013):

Ya lo decía, hace casi dos milenios atrás, en el año 79, Plinio el Viejo. En su obra *Naturalis Historia*, el científico y escritor romano aseguró que “las estructuras de hormigón construidas en los puertos y expuesto al continuo azote de las olas del mar se convertían en una única masa de piedra, invulnerable a las olas y cada día más fuerte”. (p.1)

El hormigón romano hecho a base de este cemento puzolánico también es más sostenible que el cemento portland. Yang (2013) afirma que, por necesitar de menores cantidades combustible para su combustión, ya que para dicho proceso el primero necesita 900°C mientras el segundo 1400°C y que además es responsable del 7% de las emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera.

Como dato económico a tener en cuenta, el 2015 en Estados Unidos, la industria del concreto generó 50 000 000 0000 de dólares, y la producción de cemento portland fue igual a 84

000 000 000 de toneladas, el equivalente a 90 puentes como el Golden Bridge de San Francisco, según información del US Geological Survey (Guerrero, 2017).

Fotografía 2

Dispersión de una nube de ceniza volcánica tras una erupción.



Fuente: <https://eos.org/>

2.3.1.1.2 Puzolana como roca volcánica

Este material resulta del enfriamiento de la lava tras las erupciones volcánicas de manera rauda, este efecto le genera características porosas; a diferencia de la ceniza volcánica este tipo de puzolana se encuentra naturalmente como rocas, tienen una textura un tanto semejante a la tufa o toba volcánica o escoria roja volcánica.

Ante los estudios de los beneficios sobre la puzolana como ceniza volcánica usada por los romanos, no cabe duda que muchos se cuestionarían porque a partir de esos descubrimientos no se reemplazó el cemento portland para usar este antiguo y genial invento del imperio, Yang (2013) asegura:

Que la razón principal es su escasez en el planeta, ya que es un material considerado no abundante, sin embargo, la puzolana como roca volcánica o simplemente puzolana es abundante en el planeta y posee propiedades similares a las cenizas volcánicas.

Según se investiga, podría cubrir el 40% de la demanda del cemento portland en la fabricación de hormigón. Los más interesados financistas en esta investigación proceden de Arabia Saudita quienes tienen grandes excedentes de puzolana en su país (Pérez D. , 2013).

En Francia, los Estados Unidos y otros lugares se emplea este material con fines ornamentales, drenaje y jardinería en las casas y parques, a manera de mantillo natural que limita el rebrote de las hierbas y el riego debido a su capacidad de retener agua, además de su aporte de minerales.

Este tipo de puzolanas son el motivo de esta investigación y se ha trabajado desde su adquisición en la cantera Racchi en Cusco, y posteriormente en su granulometría, donde se tuvo que realizar trabajos intensos de chancado y tamizado para llegar a la granulometría más óptima para satisfacer los objetivos de esta investigación,

Se usaron dos granulometrías distintas, la primera, como el agregado grueso ligero donde se trabajó con un Huso 9 y la segunda, como agregado fino liviano donde se sugirió una granulometría especial, existen muestras de concreto donde se usó solamente puzolana como agregado fino y grueso, y las otras tienen piedra chancada de Huso granulométrico 89.

Fotografía 3
Puzolana natural en la cantera Racchi – Cusco.



Fotografía 4
*Fragmentos de puzolana natural como roca volcánica o simplemente **puzolana**.*



2.3.2 Agregado fino y grueso de peso ligero – puzolana natural

Los agregados finos son provenientes de la desintegración natural o artificial de las rocas, donde las partículas son todas pasantes a través del tamiz 3/8.

Las rocas de puzolana natural fueron trituradas vigorosamente con combas y herramientas pesadas capaces de reducir el material a partículas muy pequeñas.

La fabricación de granulometrías fue todo un desafío de esfuerzo y tiempo en la investigación; es sumamente importante trabajar los agregados cuando existe la demanda de obtener concretos de alta resistencia, la finalidad de esto es conseguir una estructuración de agregados lo más densificados posible, sin embargo, en esta investigación existe la dicotomía de densificar el agregado hasta un punto máximo que no traspase el concepto opuesto de aligerar el concreto como conjunto.

Fotografía 5
Trituración de la roca.



Fotografía 6
La trituración se hizo de entre 3 a 4 personas.



Fotografía 7
Zarandeo de la puzolana con los tamices.



Fotografía 8
Separación de la puzolana por el tamaño de sus granos.



2.3.2.1 Propiedades físicas

La determinación de las características físicas de estos agregados se efectuó en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

2.3.2.1.1 Granulometría

2.3.2.1.1.1 Granulometría del agregado grueso de Puzolana Natural

El tamaño máximo nominal de agregado grueso de puzolana natural a utilizarse en esta investigación fue determinado por la influencia de los antecedentes de concretos de alta resistencia de agregados convencionales, donde es frecuente el empleo de tamaños máximos nominales menores a $\frac{3}{4}$ de pulgada que revelan que mientras menores son los tamaños máximos nominales se ha logrado resistencias mayores, por ello se optó el huso 9 de la NTP 400.037.

Tabla 1
Granulometría propuesta para el agregado grueso de puzolana natural

Malla	Retenido (%)	Ret. Acum. (%)	Acum. Pasa (%)
3/8"	0	0	100
N° 4	10	10	90
N° 8	50	60	40
N° 16	30	90	10
N° 30	10	100	0
N° 50	0	-	0
Fondo	0	-	-
Total	100	-	-

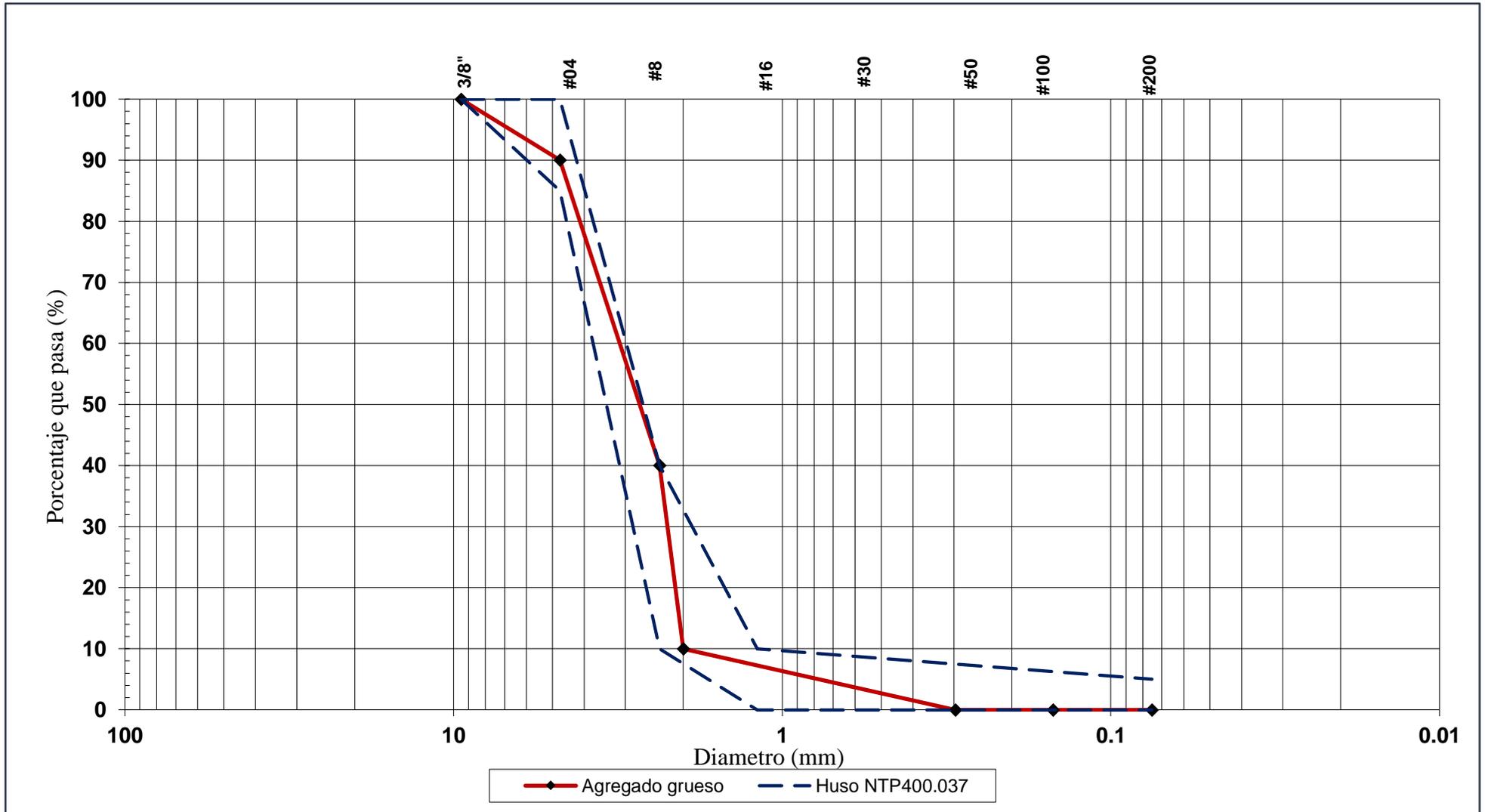
Origen: confección propia.

Tabla 2 -Husos granulométricos para el agregado grueso de peso normal

HUSO	TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	PORCENTAJE QUE PASA POR LOS TAMICES NORMALIZADOS													
		100 mm (4 pulg)	90 mm (3 1/2 pulg)	75 mm (3 pulg)	63 mm (2 1/2 pulg)	50 mm (2 pulg)	37,5 mm (1 1/2 pulg)	25,0 mm (1 pulg)	19,0 mm (3/4 pulg)	12,5 mm (1/2 pulg)	9,5 mm (3/8 pulg)	4,75 mm (No. 4)	2,36 mm (No. 8)	1,18 mm (No. 16)	4,75 µm (No. 50)
1	90 mm a 37,5mm (3 1/2 a 1 1/2 pulg)														
2	63 mm a 37,5 mm (2 1/2 a 1 1/2 pulg)	---	---	100	90-100	35-70	0-15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	---
3	50 mm a 25,0 mm (2 a 1 pulg)	---	---	---	100	90-100	35-70	0 a 15	---	0-5	---	---	---	---	---
357	50 mm a 4,75 mm (2 pulg a No. 4)	---	---	---	100	95-100	---	35 a 70	---	0-30	---	0-5	---	---	---
4	37,5 mm a 19,0 mm (1 1/2 a 3/4 pulg)	---	---	---	---	100	90-100	20-55	0-5	---	0-5	---	---	---	---
467	37,5 mm a 4,75 mm (1 1/2 pulg a No. 4)	---	---	---	---	100	95-100	---	35-70	---	10-30	0-5	---	---	---
5	25,0 mm a 12,5 mm (1 a 1/2 pulg)	---	---	---	---	---	100	90-100	20-55	0-10	0-5	---	---	---	---
56	25,0 mm a 9,5 mm (1 a 3/8 pulg)	---	---	---	---	---	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	---	---	---
57	25,0 mm a 4,75 mm (1 pulg a No. 4)	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25-60	---	0-10	0-5	---	---
6	19,0 mm a 9,5 mm (3/4 a 3/8 pulg)	---	---	---	---	---	---	100	90-100	20-55	0-15	0-5	---	---	---
67	19,0 mm a 4,75 mm (3/4 pulg a No. 4)	---	---	---	---	---	---	100	90-100	---	20-55	0-10	0-5	---	---
7	12,5 mm a 4,75 mm (1/2 pulg a No. 4)	---	---	---	---	---	---	---	100	90-100	40-70	0-15	0-5	---	---
8	9,5 mm a 2,36 mm (3/8 pulg a No. 8)	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85-100	10-30	0-10	0-5	---
89	9,5 mm a 1,18 mm (3/8 pulg a No. 16)	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90-100	20-35	5-30	0-10	0-5
9	4,75 mm a 1,18 mm (No. 4 a No. 16)	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85-100	10-40	0-10	0-5

Origen: NTP 400.037.

Gráfico 2.1. Curva granulométrica del agregado grueso de puzolana natural



2.3.2.1.1.2 Granulometría del agregado fino de Puzolana Natural

La granulometría que se empleará en esta investigación estuvo influenciada por la norma ASTM C330 “Especificación estándar para agregados livianos para concreto estructural” de tal manera que se logre conseguir la mayor liviandad posible del concreto. La granulometría se encuentra dentro de los parámetros establecidos para los agregados finos ligeros, sin embargo, se prescindió de las partículas finas pasantes de la malla N° 100. EL Committee ACI 211 (1998) indica que a diferencia de las partículas más grandes del agregado ligero que pueden flotar en el agua, las partículas que pasan el tamiz N° 100 pueden tener un peso específico parecido a la arena de peso normal y por lo tanto incrementar la densidad del concreto en conjunto.

Tabla 3
Granulometría propuesta para el agregado fino de puzolana natural

Malla	Retenido (%)	Ret. Acum. (%)	Acum. Pasa (%)
3/8"	0	0	100
N° 4	0	0	100
N° 8	2	2	98
N° 16	25	27	73
N° 30	27	54	46
N° 50	23	77	23
N° 100	23	100	0
N° 200	0	100	0
Total	100	100	0

Origen: confección propia.

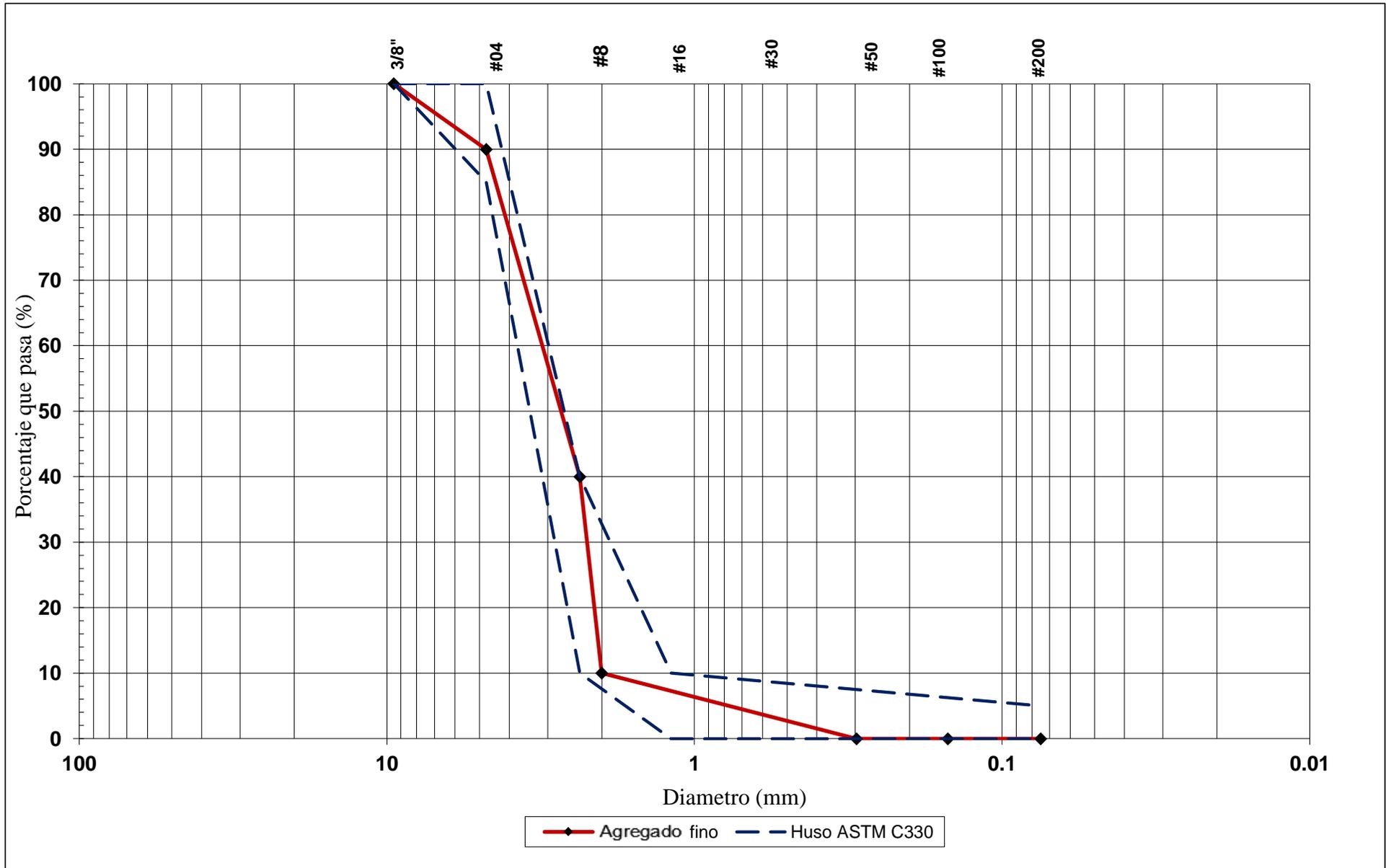
Tabla 4

Límites granulométricos para el agregado fino de peso ligero según ASTM C330

Tamiz estándar (abertura cuadrada)	% que pasa
3/8" (9.51 mm)	100
N° 4 (4.75 mm)	85 a 100
N° 8 (2.38 mm)	-----
N° 16 (1.19 mm)	40 a 80
N° 30 (0.595 mm)	-----
N° 50 (0.297 mm)	10 a 35
N° 100 (0.150 mm)	5-25
N° 200 (0.075 mm)	-----

Origen: ASTM C330.

Gráfico 2.2 Curva granulométrica del agregado fino de puzolana natural



2.3.2.1.2 Modulo de Finura (MF)

Es un valor adimensional que se determina por la suma porcentual de los valores retenidos acumulados de los tamices que se especifican en esta expresión:

$$MF = \sum \frac{\%Ret.Acum.(3'' + 1\frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ} 4 + N^{\circ} 8 + N^{\circ} 16 + N^{\circ} 30 + N^{\circ} 50 + N^{\circ} 100)}{100}$$

Para el agregado fino de puzolana es $MF_{fino} = 2.6$

Para el agregado grueso de puzolana es $MF_{grueso} = 4.6$

2.3.2.1.3 Peso específico y la absorción

El bajo peso específico de la puzolana como agregado fino y grueso representa una de las características de mayor importancia para producir un concreto ligero. Para efectuar este ensayo se hizo una combinación de los agregados, y por su granulometría se determinó el peso específico de la combinación con los procedimientos para el agregado fino.

En el proceso del ensayo se pudo apreciar que a pesar de que el material llegaba a perder mucha humedad en el proceso de secado (hasta volverse seco en la mayor parte), este mantenía su forma luego de compactarlo en el cono metálico, por lo que luego de tres intentos fallidos del ensayo se determinó que el método establecido por ASTM C128 no es aplicable en su totalidad a este material. Luego de observar y analizar las características del material que imposibilitaban hacer el ensayo tal como se desarrollaría con una arena normal, se concluyó que desmoronarse incluso en seco no era su particularidad, entonces se buscó criterios para determinar el punto exacto en que la humedad se encontrase solamente dentro, y no fuera como si se tratase del ensayo para el agregado grueso, es decir, para determinar el momento en el que el material se encontrase saturado superficialmente seco; para continuar con los demás proceso del ensayo.

La absorción de la puzolana natural es alta debido a la gran cantidad de poros que presenta el material. Según lo recomienda el ACI 211.2 se debe mojar el agregado previamente a la mezcla con los demás materiales, por ello en esta investigación se planteó trabajar con los agregados hasta alcanzar un estado de saturados superficialmente secos, con esto se mantendría una consistencia más equilibrada durante la mezcla, transporte y colocación del concreto puesto a que perdería menos asentamiento por la no absorción de agua de la mezcla al interior de las partículas de la puzolana natural, asimismo podría influir en una menor contracción por secado del concreto.

Fotografía 9
Ensayo fallido de peso específico y absorción.



Fotografía 10
El agregado compactado no cae completo, pese a un bajo nivel de humedad (semi seco).



Fotografía 11
Ensayo definitivo de absorción.



Fotografía 12
Condición de humedad: saturado superficialmente seco definida visualmente, el cono de puzolana no se descompone en absoluto.



Tabla 5

Determinación del peso específico y absorción del agregado combinado de Puzolana natural

	M-1	M-2	M-3	unidades
Volumen de la fiola		1000		cm ³
Peso de la fiola + agua	1254.8	1254.8	1254.8	g
Peso de la muestra S.S.S.	392	392	392	g
Peso S.S.S. + fiola + agua	1438.1	1437.8	1438.9	g
Peso de la muestra seca	346.9	346.2	347.0	g
Volumen de la puzolana	208,70	209,00	208,40	cm ³
Peso específico	1,662	1,656	1,665	g/cm ³
Peso específico promedio		1,661		g/cm ³
Peso Específico Saturado				
Superficialmente Seco	1,878	1,876	1,881	g/cm ³
Peso Específico Saturado				g/cm ³
Superficialmente Seco		1,878		
promedio				
Absorción	13	13	13	%
Absorción promedio		13		%

Ensayos realizados en el laboratorio. Origen: confección propia.

2.3.2.1.3 Contenido de humedad

El agregado inicialmente tenía un contenido de humedad mayor al 37% puesto a que en el momento de su extracción en la cantera había presencia de lluvias propias de la estación, por ello se puso a secar el material exponiéndolo a la intemperie por 7 días y removiéndolo. Posteriormente se procedió a la trituración del material, acción que contribuyo a secar más el material. Al tener una humedad que no sobrepase el porcentaje de absorción la cantidad de agua del interior del material es más trabajable en los cálculos con relación al agua total a emplear para la mezcla.

Tabla 6

Contenido de humedad de la combinación de agregados de puzolana natural

Descripción	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra húmeda tarada	308.2	g
Peso de la muestra seca tarada	305.1	g
Contenido de humedad	1.0	%

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Fotografía 13

Puzolana natural en la intemperie, secado inicialmente por los rayos solares.



2.3.2.1.4 *Peso unitario suelto de la combinación de agregados ligeros*

ASTM C29

El peso unitario suelto o “peso volumétrico unitario suelto”; se refiere al volumen que ocupa el material incluyendo sus vacíos en un recipiente de determinada capacidad volumétrica. Por lo general se emplea este dato para convertir las proporciones en peso a proporciones en volumen del diseño final.

Los procedimientos se establecen en ASTM C29. Se empleó un recipiente de 1/10 de pie³ debido a nuestro tamaño máximo de agregado.

Tabla 7

Peso unitario suelto del agregado combinado de puzolana natural

	M-1	M-2	Unidades
Peso del Recipiente	2.8327	2.8327	kg
Volumen del Recipiente	0.002821	0.002821	m ³
Peso del material suelto + recipiente	4.7820	4.7743	kg
Peso del material suelto	1.949	1.941	kg
Peso unitario suelto	691.0	688.3	kg/m ³
Peso unitario suelto Promedio	691		kg/m ³

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

2.3.2.1.5 *Peso unitario compactado de la combinación de agregados ligeros*

ASTM C29

Se trabajó con tres muestras distintas del agregado combinado de la relación agregado grueso/agregado fino igual a 1/9. Esta relación fue definida por obtener el máximo peso unitario compactado de las relaciones ensayadas como se aprecia en la Tabla 9.

Se empleó un recipiente de $1/10$ de pie³ determinado por el tamaño máximo de agregado.

Fotografía 14

Peso del material compactado y el recipiente.



Tabla 8

Peso unitario compactado del agregado combinado de puzolana natural empleado

	M-1	M-2	M-3	Unidades
Peso del Recipiente	2.8327	2.8327	2.8327	kg
Volumen del Recipiente	0.002821	0.002821	0.002821	m ³
Peso del material compactado + recipiente	4.973	4.979	5.007	kg
Peso del material compactado	2.1403	2.1463	2.1743	kg
Peso unitario compactado	758.7	760.8	770.8	kg/m ³
Peso unitario compactado promedio		763.4		kg/m ³

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Los ensayos de peso unitario compactado fueron fundamentales para determinar la granulometría del agregado combinado a utilizar para la producción de los concretos en estudio por el método del máximo peso unitario compactado de la combinación de agregados.

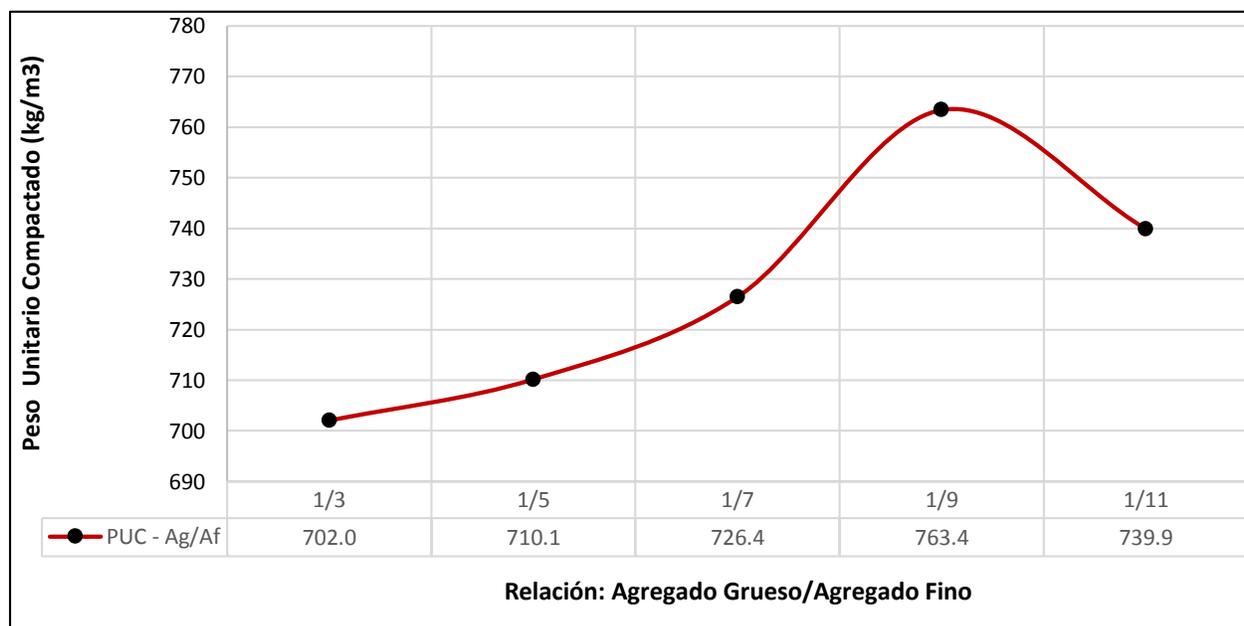
Tabla 9

Pesos unitarios compactados de diferentes relaciones de agregado grueso/agregado fino de peso ligero

Relación	Agregado grueso /Agregado fino	Peso unitario compactado (kg/m ³)
1	1/3	702.0
2	1/5	710.1
3	1/7	726.4
4	1/9	762.1
5	1/11	739.9

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 2.3 Curva de Pesos unitarios compactados Vs relación de agregados.



2.3.3 Agregado grueso de peso normal

Según la NTP 400.037 los agregados gruesos son partículas comprendidas que pueden tener tamaños máximos nominales des 90 mm (tamiz 3 1/2 plg) hasta los 4.75 mm (tamiz N° 4).

El agregado grueso de peso normal, se empleará también en algunos diseños de los concretos, con la finalidad de obtener mayores resistencias y asumiendo que incrementarían la densidad de los concretos en estudio.

Siguiendo a los antecedentes de concreto de alta resistencia con agregados convencionales, se empleará agregado grueso de huso 89 con tamaño máximo nominal 3/8 de pulgada proveniente de la cantera Jicamarca.

2.3.3.1 Propiedades físicas

2.3.3.1.1 Granulometría

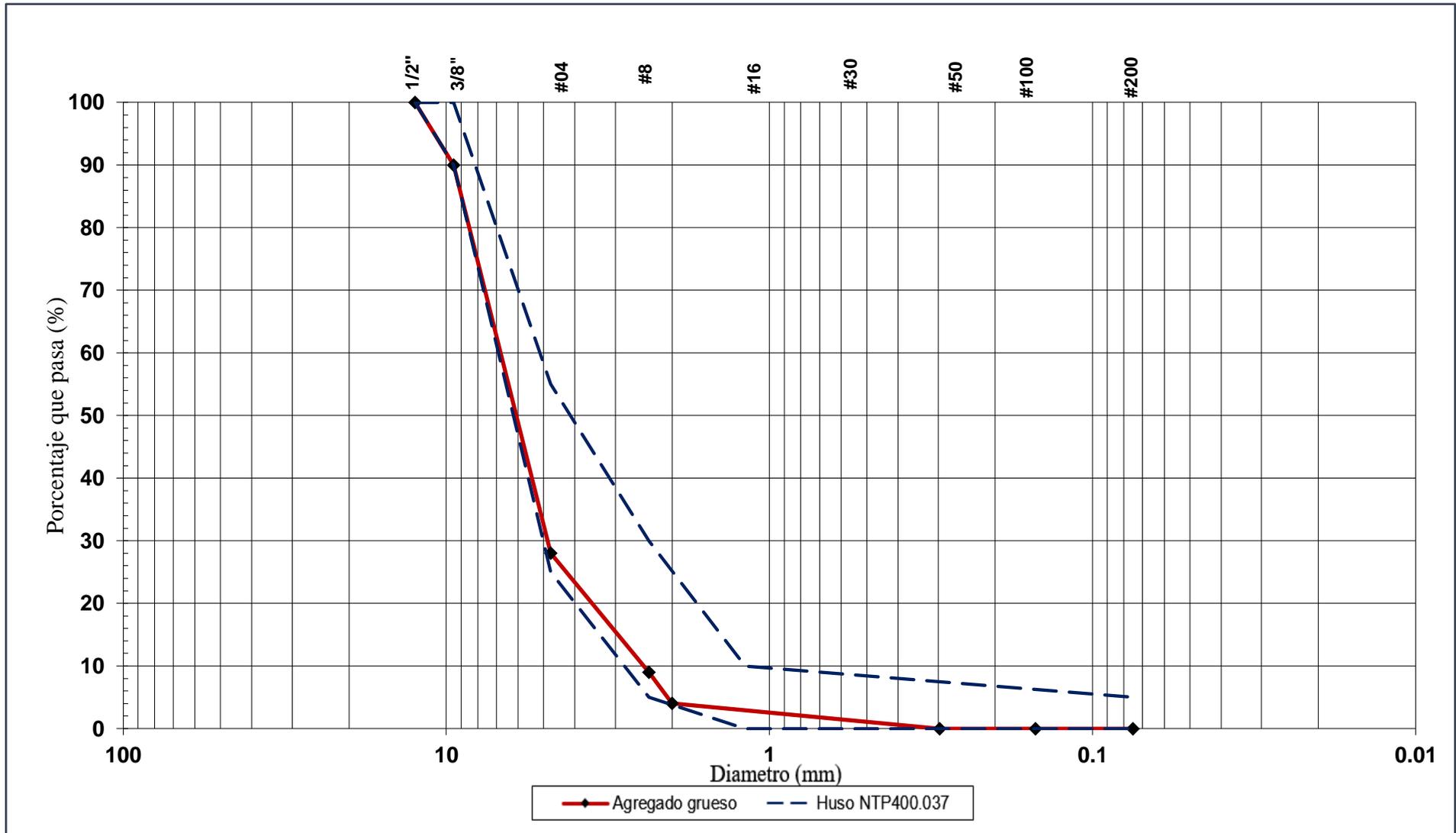
Se usaron 4 kg del material para determinar la granulometría.

Tabla 10
Granulometría para el agregado grueso huso 89

Malla	Peso	Retenido (%)	Ret. Acum. (%)	Acum. Pasa (%)
1/2"	0	0	0	100
3/8"	400	10	10	90
N° 4	2480	62	72	28
N° 8	760	19	91	9
N° 16	200	5	96	4
N° 30	160	4	100	0
N° 50	0	0	100	0
N° 100	0	0	100	0
Total	4000	100	-	-

Origen: confección propia.

Gráfico2.4 Curva granulométrica del agregado grueso de peso normal



2.3.3.1.2 Modulo de Finura (MF)

Es un valor adimensional que se determina por la suma porcentual de los valores retenidos acumulados de los tamices que se especifican en esta expresión:

$$MF = \sum \frac{\%Ret.Acum.(3'' + 1\frac{1}{2}'' + \frac{3}{4}'' + \frac{3}{8}'' + N^{\circ} 4 + N^{\circ} 8 + N^{\circ} 16 + N^{\circ} 30 + N^{\circ} 50 + N^{\circ} 100)}{100}$$

Para el agregado grueso de peso normal es $MF_{grueso} = 5.69$

2.3.3.1.3 Peso específico y absorción

ASTM

Debido a que el valor del peso específico de este agregado es más alto que el agregado ligero, se empleó con la finalidad de elevar el peso volumétrico del concreto endurecido, pero también a fin de pretender elevar su resistencia, sin sobrepasar los límites marcados por la definición de concretos livianos estructurales de 1920 kg/m^3 .

Tabla 11

Determinación del peso específico y absorción del agregado grueso de peso normal

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia

2.3.3.1.4 Contenido de humedad

Es el contenido de agua retenido en el agregado, y es importante tener este dato para el cálculo de agua total y el agua efectiva que forma parte del diseño del concreto. A diferencia del agregado ligero que tenía un alto contenido de humedad, este se encontraba prácticamente seco a simple vista, lo cual no aseguraba la existencia o no de partículas de agua al interior del material.

Tabla 12
Contenido de humedad del agregado grueso de peso normal

	M-1	M-2	unidades
Peso de la muestra S.S.S.	5190	5190	g
Peso de la canastilla dentro del agua	0	0	g
Peso S.S.S. dentro del agua + canastilla	3277	3277	g
Peso S.S.S. dentro del agua	3277	3277	g
Peso de la muestra seca	5142	5139	g
Peso Específico	2.688	2.686	g/cm ³
Peso Específico promedio	2.687		g/cm ³
Peso Específico SSS promedio	2.713		g/cm ³
Peso Específico Aparente promedio	2.758		g/cm ³
Absorción	0.93	0.99	%
Absorción promedio	0.96		%

Descripción	Cantidad	Unidad
Peso de la muestra húmeda tarada	2935	g
Peso de la muestra seca tarada	2776	g
Contenido de humedad	0.36	%

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

2.3.3.1.5 *Peso unitario suelto*

ASTM C29

Se empleó un recipiente de 1/10 de pie³ debido a nuestro tamaño máximo de agregado.

Tabla 13

Peso unitario suelto del agregado grueso de piedra chancada

	M-1	M-2	Unidades
Peso del Recipiente	2.8327	2.8327	kg
Volumen del Recipiente	0.002821	0.002821	m ³
Peso del material suelto + recipiente	7.0626	7.0343	kg
Peso del material suelto	4.2299	4.2016	kg
Peso unitario suelto	1499.4	1489.4	kg/m ³
Peso unitario suelto promedio		1494.4	kg/m ³

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

2.3.3.1.6 *Peso unitario compactado*

ASTM C29

Se empleó un recipiente de 1/10 de pie³ debido a nuestro tamaño máximo de agregado.

Tabla 14

Peso unitario compactado del agregado grueso de piedra chancada empleado

	M-1	M-2	Unidades
Peso del Recipiente	2.8327	2.8327	kg
Volumen del Recipiente	0.002821	0.002821	m ³
Peso del material compactado + recipiente	7,5983	7,5921	kg
Peso del material compactado	4,7656	4,7594	kg
Peso unitario compactado	1689,3	1687,1	kg/m ³
Peso unitario compactado promedio		1688,2	kg/m ³

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

2.3.4 Cemento

El cemento Portland es el más comúnmente empleado para la producción de concretos. La patente data de 1824 en Inglaterra y se llama así porque el color del cemento se asemeja a una piedra encontrada en la isla de Portland. El albañil Joseph Aspdin de Leeds, Inglaterra, fabricó por primera vez el cemento portland a principios del siglo XIX quemando piedra caliza y arcilla en polvo en la cocina de su cocina. Con este método crudo, sentó las bases para una industria que anualmente procesa literalmente montañas de piedra caliza, arcilla, y otros materiales en un polvo tan fino que pasará a través de un tamiz capaz de retener agua (Sanjuán y Chinchón, 2014).

America's Cement Manufacturers (s.f.) relata sobre el proceso de producción de cemento en la actualidad, de ello se destacan los aspectos más importantes:

La forma más común de fabricar cemento portland es a través de un método seco. El primer paso es extraer las principales materias primas, principalmente piedra caliza, arcilla y otros materiales. Después de la extracción, la roca es aplastada. Esto implica varias etapas. La primera es la trituración donde se fracciona la roca a un diámetro máximo de 6 pulgadas. Luego la roca pasa a las trituradoras secundarias o molinos de martillos para su reducción a aproximadamente 3 pulgadas o menos.

La roca triturada se combina con otros ingredientes, como mineral de hierro o ceniza volante y se muele, se mezcla y se alimenta a un horno de cemento.

El horno de cemento calienta todos los ingredientes a unos 2.700 grados Fahrenheit (1480° C) en enormes hornos rotatorios de acero cilíndrico forrados con ladrillo refractario especial. Los hornos son con frecuencia de hasta 12 pies de diámetro (3.7m), lo suficientemente grandes como para acomodar un automóvil y más largos en muchos casos que la altura de un

edificio de 40 pisos. Los hornos grandes están montados con el eje ligeramente inclinado respecto a la horizontal.

La materia prima finamente molida o la lechada se alimenta en el extremo superior. En el extremo inferior hay un estallido de llamas rugiente, producido por la quema controlada con precisión de carbón en polvo, petróleo, combustibles alternativos o gas bajo corriente forzada.

A medida que el material se mueve a través del horno, ciertos elementos son expulsados en forma de gases. Los elementos restantes se unen para formar una nueva sustancia llamada clinker. Clinker sale del horno como bolas grises, del tamaño de canicas.

El clinker se descarga al rojo vivo desde el extremo inferior del horno y generalmente se reduce a la temperatura de manejo en varios tipos de enfriadores. El aire caliente de los refrigeradores se devuelve a los hornos, un proceso que ahorra combustible y aumenta la eficiencia de combustión.

Después de que el clinker se enfría, las plantas de cemento lo muelen y lo mezclan con pequeñas cantidades de yeso y piedra caliza. El cemento es tan fino que 1 libra de cemento contiene 150 mil millones de granos. El cemento ahora está listo para ser transportado a empresas de concreto premezclado para ser utilizado en una variedad de proyectos de construcción.

Aunque el proceso en seco es la forma más moderna y popular de fabricar cemento, algunos hornos en los Estados Unidos usan un proceso húmedo. Los dos procesos son esencialmente iguales, excepto en el proceso húmedo, las materias primas se muelen con agua antes de ser alimentadas al horno. (p.1)

Sobre su comportamiento y reacciones, cuando se mezcla con agua, el cemento portland forma una pasta que se va endureciendo hasta formar un material endurecido. Esta reacción

química se conoce como hidratación. Cualquier cemento, que fragua y se pone duro en la mezcla con agua y a su vez puede hacerlo bajo el agua, tiene el nombre de cemento hidráulico.

El cemento Portland generalmente es de color gris, pero se puede hacer en blanco o pulido ajustando los ingredientes básicos.

2.3.4.1 Características de cemento portland tipo I

Es un cemento Portland es bastante comercial o común, adecuado para todos los usos que no requieran las propiedades especiales de los otros tipos. Este cemento es empleado para un concreto que no está sujeto a condiciones específicas, que podrían ser el ataque de sulfatos del suelo o del agua, o a un incremento de temperatura considerable correspondiente al calor generado por la hidratación. Sus usos son perfectamente aplicables en todo tipo de proyectos que incluyen pavimentos, aceras, edificios de hormigón armado, puentes, estructuras ferroviarias, tanques, depósitos, alcantarillas, tuberías de agua, unidades de mampostería por citar algunos ejemplos.

2.3.4.2 Comparación de fichas técnicas de los cementos portland tipo I

Elegir el cemento que se iba utilizar para el presente trabajo de investigación fue todo un reto, se hicieron consultas a profesionales y por otro lado se comparó las fichas técnicas de los cementos existentes en el mercado local.

La tesis *Estudio de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido utilizando cemento de la República Dominicana Quisqueya portland- tipo I* del 2010, influenció a ejecutar una prueba comparativa, entre el cemento Quisqueya (cemento con mejores resistencia según los experimentos de la tesis) y el cemento Sol, por ser, según las fichas técnicas actuales, el que desarrolla mejores resistencias a 3 días.

Se elaboraron cuatro probetas de concreto, dos por tipo de cemento, y se efectuó la rotura a los 7 días, utilizando el mismo diseño para ambos casos donde la única variable era el cemento, las proporciones de microsilice, nanosilice, agregados y agua fueron constantes.

Los resultados de la rotura a 7 días determinaron una mayor resistencia para los concretos producidos con cemento Sol. Por lo tanto, el cemento utilizado para esta investigación experimental fue el Cemento Sol tipo I.

A continuación, se mostrarán las fichas técnicas de los cementos que influenciaron a realizar la comparación mencionada:

Cemento Quisqueya - 2007

Tabla 15

Ficha Técnica del Cemento Quisqueya 2007

Característica física	Resultados	Requisito ASTM C-150
Superficie específica Blaine (m ² /kg)	384	Mínimo 280
Contenido de aire (%)	3,47	Máximo 12
Expansión autoclave (%)	0,00	Máximo 0.8
Fraguado inicial Vicat (min)	91	Mínimo 45
Fraguado final Vicat (min)	225	Máximo 375
f'c a 3 días (kg/cm ²)	322	120 (12.0 MPa)
f'c a 7 días (kg/cm ²)	417	190 (19.0 MPa)

Origen: INASSA-International Analytical Services S.A.C. – 2007

Cemento Quisqueya - actual:

El cemento portland tipo I de esta marca, según esta fuente, ha cambiado sus características por presentar una resistencia mucho menor de 264 kg/cm² respecto a la anterior de 328 kg/cm² (2007), esto significó una contradicción con la tesis de referencia; por ello se hizo una comparativa de resistencia con uno de los diseños preliminares de concreto con los que se partió en esta investigación.

Ilustración 2.2 Ficha técnica y presentación del cemento portland Quisqueya TI



CEMENTO QUISQUEYA TI UE
Cemento Tipo I Quisqueya

Ver precio por Tienda:
Lima y Callao

Ficha Técnica

Atributos	Detalles
Usos	En la producción de elementos prefabricados y estructurales (losas, columnas, techos, etc)
Peso	42.50 kg / 94 lib
Tipo	Cemento Portland Tipo I
Características	264kg/cm ² de resistencia a la compresión en 3 días. Fraguado final en 200 minutos.
Norma	ISO 9001:2008
Disponible en	Lima Metropolitana, Chincha, Ica, Huacho

Origen: <http://www.maestro.com.pe> en enero de 2018

Cemento Sol - 2011

En una comparativa de resistencias a 3 días respecto al cemento Quisqueya del 2007 y actual, el cemento Sol sigue en desventaja, por lo menos hasta la ficha técnica que es presentada a continuación donde alcanza los 254 kg/cm², sin embargo, una fuente actual indica que el cemento Sol llegaría hasta los 272 kg/cm², lo que implica un alcance superior respecto al cemento Quisqueya actual. Ambas fuentes respecto al cemento Sol al igual que con el cemento Quisqueya suponen que las propiedades de los cementos varían en el tiempo, posiblemente por modificaciones en la composición ligadas aspectos competitivos y de marketing entre empresas.

La duda estaba sembrada, y con la finalidad de buscar mejores resistencias para nuestra investigación experimental, se prepararon las mezclas a competir, los ensayos de resistencia se efectuaron y de ello se determinó que era más conveniente el cemento Sol por los resultados obtenidos.

Tabla 16
Ficha técnica del Cemento Sol Portland Tipo I

Característica física	Tipo I - Sol	ASTM C-150
Peso específico (gr/cm ³)	3.15	---
Fineza Malla 100 (%)	0.04	---
Fineza Malla 200 (%)	4.14	---
Superficie específica Blaine (cm ² /gr)	3480	Mínimo 2800
Contenido de aire (%)	9.99	Máximo 12
Expansión autoclave (%)	0.18	Máximo 0.8
Fraguado inicial Vicat (hr.min)	1.49	Mínimo 0.45
Fraguado final Vicat (hr.min)	3.29	Máximo 6.15
f'c a 3 días (kg/cm ²)	254	124 (12.4 MPa)
f'c a 7 días (kg/cm ²)	301	193 (19.3 MPa)
f'c a 28 días (kg/cm ²)	357	276 (27.6 MPa)
Calor de hidratación 7 días (cal/gr)	70.6	---
Calor de hidratación 28 días (cal/gr)	84.3	---

Nota: Recuperado de "Concreto de alta resistencia usando aditivo superplastificante, microsílíce y nanosílíce con cemento Portland tipo I", Loayza V. 2011, p.25.

Cemento Sol - 2011

Ilustración 2.3 Datos técnicos y presentación del cemento portland Sol TI



CEMENTO SOL TI UE

Cemento Sol TI 42.5 Kgs

Ver precio por Tienda:
Lima y Callao ▼

Ficha Técnica

Atributos	Detalles
Tipo	Portland tipo I
Características	272 kg/cm ² de resistencia a la compresión n 3 días. Fraguado final en 304 minutos.
Uso	Construcciones en general y de gran envergadura que no requieren características especiales.
Peso	42 kg

Origen: <http://www.maestro.com.pe> en enero de 2018

Fotografía 15
Probetas de comparación entre ambos cementos.



2.3.5 Nanosílice

La nanosílice es un descubrimiento producto de los avances en nanotecnología que las investigaciones de al menos dos décadas han desarrollado y le han atribuido la categoría de material por excelencia para el concreto por sus características en la mejora de la producción y propiedades contribuyentes al concreto, además de las disminuciones de los costos globales que podría implicar su uso.

La nanosílice es un material compuesto principalmente por SiO_2 , en partículas de tamaños manométricos, tiene propiedades puzolánicas que en adición al cemento hidratado desarrolla mejoras en sus características. Estas reacciones tienen espacio nada menos que en los poros más pequeños de la pasta de cemento, y en otros casos reduciendo el tamaño de los poros, estas

características mejoran principalmente la durabilidad del concreto, ya que se reduce la penetración de agentes agresivos al concreto.

La adición mineral más usada por más de noventa años en la producción de concretos de alta resistencia, la microsílíce, parece tener en su hermano menor, un sustituto ideal. Bajo los mismos conceptos y criterios de aplicación que la microsílíce, la nanosílíce se compone de partículas mil veces más pequeñas y que por sus propiedades ha permitido obtener reacciones químicas produciéndose silicatos de calcio hidratados con mayor rapidez y capaces de cubrir los poros más pequeños para así densificar al concreto y como resultado la obtención de concretos de alta resistencia, más impermeable al agua y más resistente a los ataques de agentes químicos.

En palabras de Otilia Saxi, directora del Instituto de Nanotecnología de Stirling, Gran Bretaña:

Una de las mayores desventajas de la microsílíce ha sido el precio, que, comparada con las otras adiciones, resulta ser la más costosa, es más agresivo con el medio ambiente en su producción, además de ser una amenaza constante para sus operadores por ser un polvo exageradamente fino que bajo condiciones no apropiadas de seguridad podrían transformarse en una enfermedad llamada “silicosis”. Algo que este nuevo nanomaterial pretende en gran medida, es disminuir los costos de producción unitarios de concreto por las cantidades bastante reducidas a emplearse comparado con su antecesor, el humo de sílice.

“La nanotecnología nos permite la viabilidad de obtener materiales con propiedades notablemente nuevas; hará factible modificar todo lo que creamos y cómo lo creamos”. Y añade “los materiales de construcción no están exentos, ya que de la misma manera serán afectados por la nano-revolución” (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, s.f., 1).

La nanosílíce que se empleará en la presente investigación es ‘HP 300: Nanosílíce para prefabricados’ de la empresa Ulmen S.A, líquido de color blanquecino y de un peso específico de

1060 \pm 20 kg/m³ y que por su composición y propiedades hace que se prescindiera de aditivos reductores de agua (superplastificantes).

Fotografía 16
Nanosílice (líquido blanco) y Microsílice (polvo gris/acero), pesadas antes del mezclado del concreto.



2.3.6 Microsílice

Según The Silica Fume Association (2014) el humo de sílice o microsíllice es un subproducto de la producción de aleaciones de silicio metálico o ferrosilicio. Uno de los usos más beneficiosos para el humo de sílice es en el concreto. Debido a sus propiedades químicas y físicas, es una puzolana muy reactiva. El concreto que contiene humo de sílice puede tener una resistencia muy alta y puede ser muy duradero. El humo de sílice está disponible en proveedores de aditivos para concreto y, cuando se especifica, simplemente se agrega durante la producción de concreto. La colocación, el acabado y el curado del hormigón con humo de sílice requieren una atención especial por parte del contratista de hormigón.

El humo de sílice consiste principalmente en dióxido de silicio amorfo (no cristalino) (SiO_2). Las partículas individuales son extremadamente pequeñas, aproximadamente 1 / 100 del tamaño de una partícula de cemento promedio. Debido a sus partículas finas, su gran área de superficie y su alto contenido de SiO_2 , el humo de sílice es una puzolana muy reactiva cuando se utiliza en concreto. La calidad del humo de sílice está especificada por ASTM C 1240 y AASHTO M 307.

El concreto de alta resistencia es un material muy económico para transportar cargas verticales en estructuras de gran altura. Hasta hace unos años, el concreto de 6,000 psi se consideraba de alta resistencia. Hoy, usando humo de sílice, se puede producir fácilmente concreto con una resistencia a la compresión superior a 15,000 psi.

La Microsílice ha acompañado por casi un siglo a las grandes construcciones, como un componente optimizado respecto a las otras adicciones minerales y aditivos existentes, sus propiedades químicas en el proceso de hidratación de los componentes cementicios son los que mejores resultados consiguen en el tiempo de endurecimiento del concreto, de esta manera se han producido concretos de las más altas resistencias en edificios y construcciones emblemáticas.

La microsílice empleada es de la marca Basf, de nombre MasterLife SF 100 y de peso específico 2200 kg/m^3 .

2.3.7 Agua

El agua es un recurso fundamental en la elaboración de cualquier tipo de concreto, las cantidades empleadas el origen de la fuente de obtención serán importantes para el desarrollo de sus características en la fase fresca y endurecida.

El agua para la mezcla del concreto satisface tres finalidades:

- La hidratación, de la reacción con los materiales cementantes.
- Hacer la función de lubricante para otorgarle trabajabilidad a la mezcla.

- Formar espacios dentro de la mezcla para que se desarrollen los materiales hidratados luego de las reacciones químicas.

El agua puede provenir de diferentes fuentes, y las más convenientes son las que presentan menos impurezas, como regla práctica, las que no dañen al hombre al consumirla, o agua potable. El agua de mar también puede ser usada, como antecedente se sabe que en el imperio romano se hacía uso de este recurso para fabricar concretos puzolánicos.

En el Perú la NTP 339.008 establece los límites de sustancias disueltas en el agua para la mezcla y curado de concretos y morteros, como se ve en el siguiente cuadro:

Tabla 17
Límites permisibles para el agua de mezcla

Descripción	Límite Máximo Permisible
Sólidos en Suspensión	1500 ppm
Materia orgánica	10 ppm
Sales de magnesio	150 ppm
Sales solubles totales	1500 ppm
Sulfatos	300 ppm
Cloruros	300 ppm
PH	Mayor de 7

Origen: Norma Técnica Peruana NPT 339.008.

El agua empleada para la mezcla y curado de los concretos de la presente investigación es la que distribuye la empresa estatal distribuidora de agua potable Sedapal en el distrito de Magdalena del Mar.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis General

- Hipótesis General: Con dosificaciones de materiales se pueden obtener concretos livianos de alta resistencia (ACI 211.2-98 y ACI 363.2R), a través de las recomendaciones técnicas ACI, ASTM y/o procesos nuevos.

2.4.2 Hipótesis Secundarias

- La dosificación de nanosílice como adición mineral a utilizar es determinante en la obtención de concretos livianos de alta resistencia.
- La dosificación a emplear de puzolana como agregado ligero fino y grueso es determinante en la obtención de concretos livianos de alta resistencia.

2.5 Variables

Las variables de esta investigación, por su naturaleza, son cuantitativas continuas y, por su grado de complejidad, las independientes son simples, mientras la dependiente es compleja.

2.5.1 Variables independientes:

X: Dosificación de materiales.

X1: Dosificación de nanosílice como adición mineral.

X2: Dosificación de puzolana como agregado fino y grueso de peso ligero.

2.5.2 Variable dependiente:

Y: Concreto liviano de alta resistencia (que satisfaga la denominación de liviandad del ACI 211.2-98 y de alta resistencia del ACI 363.2R).

2.5.3 Variables extrañas:

Son las variables que por su naturaleza no pueden ser controladas con facilidad por el investigador.

r: El almacenamiento de los materiales cementicios en una zona con mucha humedad (influye en la calidad del concreto).

s: La disponibilidad de asistencia de los técnicos de laboratorio para operar los ensayos (influye en el tiempo de ejecución de la investigación).

t: La temperatura fría de la estación en que se desarrollaron los ensayos de laboratorio (variable extraña más compleja en cuanto a su control, que posiblemente ha incidido de manera favorable o desfavorable en algunos resultados del laboratorio).

2.5.4 Operacionalización de variables

Tabla 18
Operacionalización de Variables

Variables	Indicadores	Medición
Dosificación de materiales	Nanosílice	kg/m ³
	Puzolana Natural	kg/m ³
Concreto liviano de alta resistencia	Resistencia a la compresión	kg/cm ²
	Densidad	kg/m ³

Origen: confección propia.

2.6 Tipo y Diseño de Investigación

Esta investigación es de tipo experimental, y el diseño es de la orden experimento puro. Para obtener estos nuevos concretos, sin antecedentes como tales en su composición, se tendrá que preparar y optimizar una serie de mezclas de concreto modificando las variables independientes y observando resultados, en el tiempo, de la variable dependiente; con esto se pretende comprobar la hipótesis de manera favorable.

2.7 Matriz de Consistencia

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología	Tipo y diseño
<p>Problema General: ¿De qué manera la dosificación de materiales influye en el concreto liviano de alta resistencia bajo recomendaciones técnicas de producción de concretos?</p>	<p>Objetivo General: Determinar la dosificación de los materiales a fin de obtener concretos livianos de alta resistencia (ACI 211.2-98 y ACI 363.2R), a través de las recomendaciones técnicas ACI, ASTM y/o procesos nuevos.</p>	<p>Hipótesis General: Con dosificaciones de materiales se pueden obtener concretos livianos de alta resistencia (ACI 211.2-98 y ACI 363.2R), a través de las recomendaciones técnicas ACI, ASTM y/o procesos nuevos.</p>	<p>Variable independiente: Dosificación de materiales. Variable dependiente: Concreto liviano de alta resistencia (ACI 211.2-98 y ACI 363.2R).</p>	<p>1. Estudios teóricos 2. Determinación de los materiales a emplear. 3. Obtención de los materiales. 4. caracterización de los materiales mediante ensayos de laboratorio. 5. Diseños, replanteo y resultados de los concretos preliminares. 6. Diseño, replanteo y resultados de los concretos optimizados.</p>	<p>El tipo de investigación es experimental. El diseño es de la orden experimento puro.</p>
<p>Problema Específico 1: ¿La nanosílice como adición mineral tendrá una influencia favorable en el concreto en fase endurecida contribuyendo a ganar niveles de alta resistencia y sin perjudicar el peso liviano del concreto?</p>	<p>Objetivo Específico 1: Determinar la dosificación de nanosílice como adición mineral a fin de obtener concretos livianos de alta resistencia.</p>	<p>Hipótesis Específica 1: La dosificación de nanosílice como adición mineral a utilizar es determinante en la obtención de concretos livianos de alta resistencia.</p>	<p>Variable independiente: Dosificación de Nanosílice como adición mineral. Variable dependiente: Concreto liviano de alta resistencia (ACI 211.2-98 y ACI 363.2R).</p>		
<p>Problema Específico 2: ¿Existen dosificaciones de la puzolana natural a ser empleada como agregado grueso y/o fino para producir un concreto liviano y de alta resistencia al mismo tiempo?</p>	<p>Objetivo Específico 2: Determinar la dosificación de puzolana natural como agregado fino y grueso de peso ligero a fin de obtener concretos livianos de alta resistencia.</p>	<p>Hipótesis Específica 2: La dosificación a emplear de puzolana como agregado ligero fino y grueso es determinante en la obtención de concretos livianos de alta resistencia.</p>	<p>Variable independiente: Dosificación de puzolana como agregado fino y grueso de peso ligero. Variable dependiente: Concreto liviano de alta resistencia (ACI 211.2-98 y ACI 363.2R).</p>		

Tabla 19 - Matriz de Consistencia

Origen: confección propia.

CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA

3.1 Metodología de la investigación

El enfoque de esta investigación es cuantitativo debido a que es un conjunto de sucesiones secuenciales y pueden ser probadas a través del control y medición de las variables (independientes y dependiente).

El tipo de investigación es experimental, porque se actúa conscientemente sobre el objeto de estudio. Las acciones producidas en la manipulación de las variables independientes permitirán conocer los efectos resultantes en la variable dependiente, de esta manera se busca validar la hipótesis.

El alcance de esta investigación es exploratorio, porque el objetivo es abordar un problema de investigación que hasta la fecha no tiene antecedentes científicos conocidos que aborden sobre el uso de nanosílice como adición mineral y puzolana natural como agregado de peso ligero en la obtención de concretos livianos de alta resistencia. Esta tesis también tiene estudios de alcance descriptivo, porque busca explicar las propiedades, características y procesos que conforman la obtención de este tipo de concreto.

El diseño de investigación es experimental; de la orden experimento puro, porque existe manipulación intencional de las variables independientes, medición de variables dependientes, y al finalizar se validará la hipótesis.

3.2 Características de la Muestra

Las muestras preliminares son cubos de 2 pulg de lado que se producirán para optimizar la mezcla, distribuida en 6 semanas de ensayos y preparación de la mezcla, para hacer comparaciones y trabajar en la tecnología de los materiales a emplear.

Los diseños optimizados seleccionados, son especímenes de concreto en probetas cilíndricas de 4 pulg de diámetro y 8 pulg de altura, que serán ensayados en 4 fechas de roturas: a 3 días, 7 días, 28 días y 56 días de fraguado y curado para someterlas a la máquina de compresión y saber sus resistencias.

Las muestras para determinar la tracción por compresión diametral fueron probetas cilíndricas de 4 pulg de diámetro y 8 pulg de altura y se ensayaron a los 28 días de fraguado y curado.

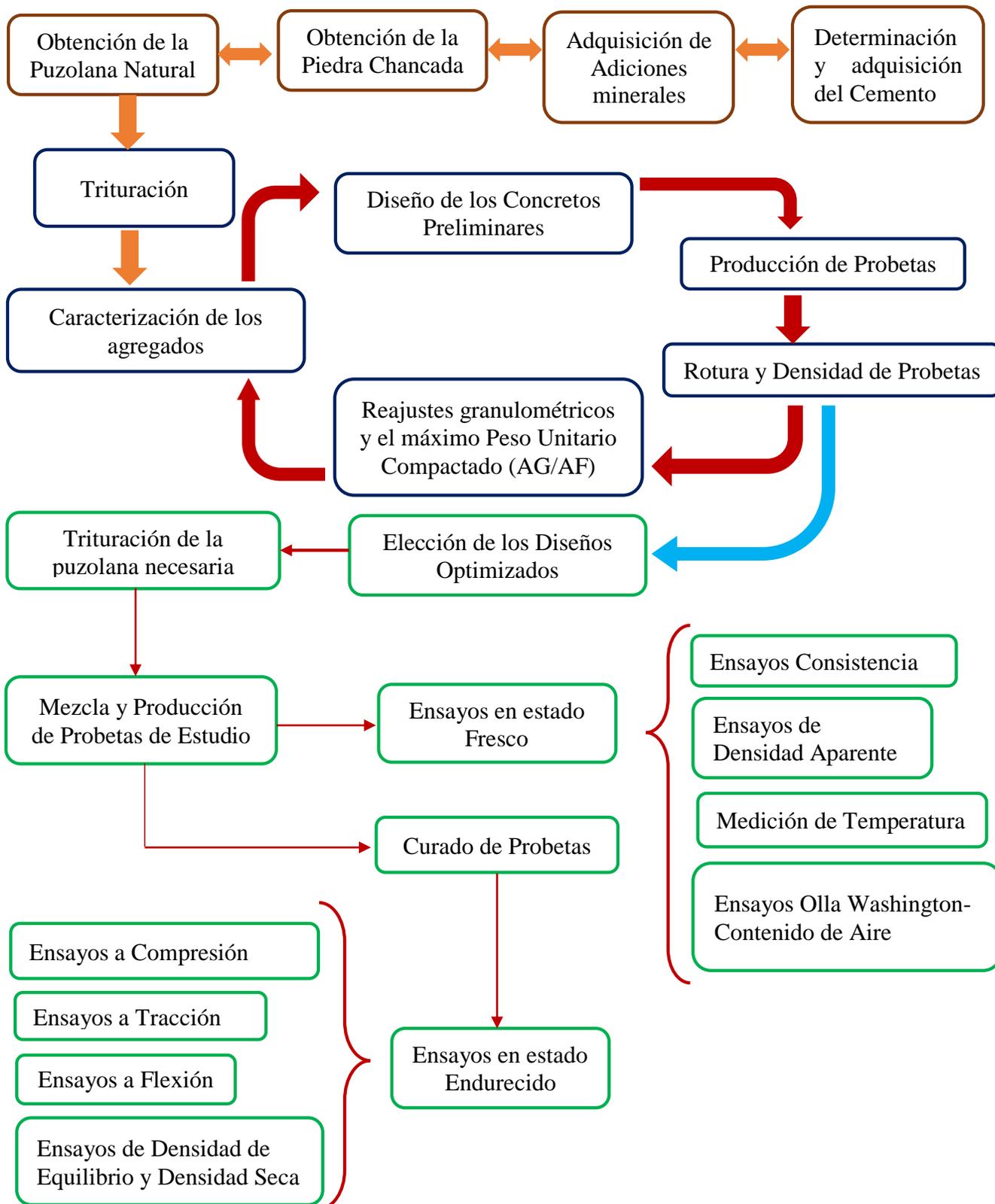
Los prismas regulares de concreto de 15 cm x 15 cm x 53 cm se prepararon y se curaron con la finalidad de hallar el módulo de rotura a 28 días.

Las muestras de concreto transcurridas las 24 horas +- 2h después del vaciado fueron desencofradas y puestas a curar en la poza de agua con cal, hasta por lo menos 2 horas antes de la fecha de su rotura a compresión, flexión y tracción.

Se desarrollaron las siguientes cantidades de muestras para efectuar las pruebas de investigación:

- Más de 28 cubos de 2 pulg de lado para optimizar la muestra
- Más de 75 probetas cilíndricas de concreto para los ensayos de resistencia a compresión, tracción a través de la compresión diametral y densidad de equilibrio.
- 4 probetas para la comparación de cementos en la rotura a compresión.
- 4 vigas de 15cm x 15cm x 53cm para el módulo R de rotura del concreto.
- 5 muestras de concreto fresco de $\frac{1}{4}$ pie³ para los ensayos de contenido de aire.

3.4 Diagrama de Procesos de Trabajos en el Laboratorio



3.5 Instrumentos de Investigación

- Las probetas: Cúbicas y cilíndricas
- El trompo mezclador de concreto.
- Máquina de rotura a compresión.
- Balanzas Electrónicas
- Balanza de peso sumergido.
- Tamices.
- Los encofrados metálicos prismáticos.
- Almohadillas de Neopreno y los moldes de acero para el cabeceado.
- Máquina de rotura de vigas prismáticas.
- Horno eléctrico de control digital
- Poza de curado.
- Olla Washington para el contenido de aire.
- Herramientas de laboratorio.

3.6 Diseños preliminares de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)

En la primera semana se partió utilizando los conceptos y recomendaciones para la producción de concretos ligeros estructurales del ASTM 330 y ACI 211.2 específicamente para la granulometría de los agregados; para ver si resultaban viables para este estudio, sin embargo, los resultados no fueron los esperados, las resistencias a compresión obtenidas no correspondían a concretos de alta resistencia, pese a la cantidad de materiales cementantes; además la mezcla requería de mucha agua para tener plasticidad, el peso unitario inicial del material era de un valor

muy bajo además. Además, se pensó que la cantidad de nanosílice, que también actúa como superplastificante, era pobre por tener un agregado muy absorbente.

En la segunda semana se replantearon las cantidades de nanosílice y microsílice, por ello se redujo el agua al haber más componente plastificante manteniendo las granulometrías, pero las resistencias tuvieron un ligero incremento y se concluyó en que para incrementar la plasticidad de la mezcla se requerían mayores cantidades de nanosílice que las recomendadas por el fabricante.

En la tercera semana se modificó la granulometría con una mejor relación de la combinación de agregados a partir de sus máximos pesos unitarios, como se explica en el capítulo 2, ello con la finalidad de incrementar la masa unitaria del concreto para ganar mayores resistencias, para 3 de ellos, y los otros dos con menor a/mc y mayor microsílice, y mayor nanosílice porque los concretos tenían poca plasticidad y cangrejas luego de desencofrarlos. El diseño dm5 fue el más interesante de esta semana el cual se buscó optimizar en la semana 5 con dm7 y resultó.

En la cuarta semana, con la finalidad de incrementar la resistencia, se incrementó la cantidad de cemento y redujo la de cantidad de puzolana; la proporción de microsílice se propuso en dos valores 10 y 11 respecto al cemento. De esta semana se dedujo que era más conveniente un 11% de microsílice y que es mejor 7,5 de nanosílice.

En la quinta semana se introdujo el concepto de previa saturación de los agregados a manera de prueba, y resultó en la optimización de dm5 en dm7, D11-7,5 en d3. En las propuestas D10-800 y D10-750 se disminuyeron las cantidades de cemento respecto a D11-7,5 y se optó por una cantidad mayor relación a/mc pero sin saturar los agregados a manera de prueba y resultó.

En la sexta semana se eligió el mejor diseño de la quinta semana, y para alcanzar mayores propuestas de resistencias, pero sacrificando la baja densidad, se empleó piedra de huso 89 en 10%, 20%, 30% y 40% en reemplazo de la cantidad de puzolana.

Tabla 20
Proceso de optimización de la mezcla – Semana 1

Mix		m1	m2	m3	m4	m5
<i>Agua añadida a la mezcla, w</i>	(kg/m ³)	180	195	210	225	240
<i>Cemento, c</i>	(kg/m ³)	600	650	700	750	800
<i>Puzolana, pz</i>	(kg/m ³)	600	600	600	600	600
<i>Microsílice, ms</i>	(kg/m ³)	48,00	52,00	56,00	60,00	64,00
<i>Nanosílice/Cemento, ns</i>	(kg/m ³)	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,30	0,30	0,30	0,30	0,30
<i>ms/c</i>		8,00%	8,00%	8,00%	8,00%	8,00%
<i>ns/c</i>		2,00%	2,00%	2,00%	2,00%	2,00%
<i>pz/(c+ms+ns)</i>	(%)	90,91%	83,92%	77,92%	72,73%	68,18%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	7,27%	7,27%	7,27%	7,27%	7,27%
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	1,82%	1,82%	1,82%	1,82%	1,82%
<i>Masa unitaria teórica (PU)</i>		1440	1510	1580	1650	1720
<i>Resistencia a la compresión f'c</i>		130	145	182	211	230

Origen: confección propia.

Tabla 21
Proceso de optimización de la mezcla – Semana 2

Mix		M1	M2	M3	M4	M5
<i>Agua añadida a la mezcla, w</i>	(kg/m ³)	150	163	175	188	200
<i>Cemento, c</i>	(kg/m ³)	600	650	700	750	800
<i>Puzolana, pz</i>	(kg/m ³)	625	625	625	625	625
<i>Microsílice, ms</i>	(kg/m ³)	60,00	65,00	70,00	75,00	80,00
<i>Nanosílice/Cemento, ns</i>	(kg/m ³)	42,00	45,50	49,00	52,50	56,00
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
<i>ms/c</i>		10,00%	10,00%	10,00%	10,00%	10,00%
<i>ns/c</i>		7,00%	7,00%	7,00%	7,00%	7,00%
<i>pz/(c+ms+ns)</i>	(%)	89,03%	82,18%	76,31%	71,23%	66,77%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	8,55%	8,55%	8,55%	8,55%	8,55%
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	5,98%	5,98%	5,98%	5,98%	5,98%
<i>Masa unitaria teórica (PU)</i>		1477	1548	1619	1690	1761
<i>Resistencia a la compresión f'c</i>		154	155	200	223	260

Origen: confección propia.

Tabla 22
Proceso de optimización de la mezcla – Semana 3

Mix		M3'	M4'	M5'	dm5	dm6
<i>Agua añadida a la mezcla, w</i>	(kg/m ³)	150	163	175	113	150
<i>Cemento, c</i>	(kg/m ³)	600	650	700	750	750
<i>Puzolana, pz</i>	(kg/m ³)	625	625	625	625	625
<i>Microsílice, ms</i>	(kg/m ³)	60,00	65,00	70,00	111,39	111,39
<i>Nanosílice/Cemento, ns</i>	(kg/m ³)	42,00	45,50	49,00	63,12	63,12
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,25	0,25	0,25	0,15	0,20
<i>ms/c</i>		10,00%	10,00%	10,00%	15,00%	15,00%
<i>ns/c</i>		7,00%	7,00%	7,00%	8,50%	8,50%
<i>pz/(c+ms+ns)</i>	(%)	89,03%	82,18%	76,31%	67,60%	67,60%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	8,55%	8,55%	8,55%	12,05%	12,05%
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	5,98%	5,98%	5,98%	6,83%	6,83%
<i>Masa unitaria teórica (PU)</i>		1477	1548	1619	1662	1700
<i>Resistencia a la compresión f'c</i>		290	310	321	330	322

Origen: confección propia.

Tabla 23
Proceso de optimización de la mezcla – Semana 4

Mix		D10-7,5	D11-7,5	D10-6,5	D11-6,5	D11-5,5
<i>Agua añadida a la mezcla, w</i>	(kg/m ³)	204	212	204	204	204
<i>Cemento, c</i>	(kg/m ³)	863	879	863	863	863
<i>Puzolana, pz</i>	(kg/m ³)	528	528	528	528	528
<i>Microsílice, ms</i>	(kg/m ³)	86,27	96,69	86,27	95,86	95,86
<i>Nanosílice/Cemento, ns</i>	(kg/m ³)	64,71	65,93	56,08	56,08	47,45
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
<i>ms/c</i>		10,00%	11,00%	10,00%	11,00%	11,00%
<i>ns/c</i>		7,50%	7,50%	6,50%	6,50%	5,50%
<i>pz/(c+ms+ns)</i>	(%)	52,09%	50,69%	52,53%	52,04%	52,48%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	8,51%	9,28%	8,58%	9,45%	9,53%
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	6,38%	6,33%	5,58%	5,53%	4,72%
<i>Masa unitaria teórica (PU)</i>		1745	1782	1737	1746	1738
<i>Resistencia a la compresión f'c</i>		399	460	420	430	240

Origen: confección propia.

Tabla 24
Proceso de optimización de la mezcla – Semana 5

Mix		dm5 ->dm7	d11-7,5->d3	D10-800	D10-750
Agua añadida a la mezcla, <i>w</i>	(kg/m ³)	113	212	233	233
Cemento, <i>c</i>	(kg/m ³)	750	879	792	750
Puzolana, <i>pz</i>	(kg/m ³)	625	528	649	649
Agua de saturación 12% de puzolana		75	63	0	0
Microsílice, <i>ms</i>	(kg/m ³)	111,39	96,69	79,20	75,00
Nanosílice/Cemento, <i>ns</i>	(kg/m ³)	63,12	65,93	55,44	52,50
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,15	0,20	0,25	0,27
<i>ms/c</i>		15,00%	11,00%	10,00%	10,00%
<i>ns/c</i>		8,50%	7,50%	7,00%	7,00%
<i>pz/(c+ms+ns)</i>	(%)	67,60%	50,71%	70,08%	74,01%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	12,05%	9,29%	8,55%	8,55%
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	6,83%	6,33%	5,98%	5,98%
Masa unitaria teórica (PU)		1737	1845	1809	1760
Resistencia a la compresión <i>f'c</i>		361	559	509	480

Nota: el agreado tenía 1% de humedad, por lo que se añadió 12% a los diseños dm7 y d3. Origen: confección propia.

Tabla 25
Proceso de optimización de la mezcla – Semana 6

Mix		d3->d11	d3->d12	d3->d13	d3->d14
Agua añadida a la mezcla, <i>w</i>	(kg/m ³)	212	212	212	212
Cemento, <i>c</i>	(kg/m ³)	879	879	879	879
Puzolana, <i>pz</i>	(kg/m ³)	90%= 475	85%= 449	80%= 422	60%= 317
Agua de saturación 12% de puzolana		57	54	0	0
Piedra, <i>pd</i>		10%= 53	15%= 79	20%= 106	40%= 211
Microsílice, <i>ms</i>	(kg/m ³)	99,64	99,64	99,64	99,64
Nanosílice/Cemento, <i>ns</i>	(kg/m ³)	67,54	67,54	67,54	67,54
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,20	0,20	0,20	0,20
<i>ms/c</i>		11,34%	11,34%	11,34%	11,34%
<i>ns/c</i>		7,69%	7,69%	7,69%	7,69%
<i>pz/(c+ms+ns)</i>	(%)	45,44%	42,91%	40,39%	30,29%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	9,53%	9,53%	9,53%	9,53%
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	6,46%	6,46%	6,46%	6,46%
Masa unitaria teórica (PU)		1786	1786	1786	1786
Resistencia a la compresión <i>f'c</i>		565	570	590	650

Origen: confección propia.

3.7 Diseños optimizados de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)

Los diseños optimizados que serán estudiados en todas sus características físicas con los ensayos de laboratorio, tanto para el concreto en la fase fresca y en la fase endurecida, son cinco diseños preliminares elegidos convenientemente por sus resistencias y densidad aparente (peso unitario) con la finalidad de satisfacer los objetivos de esta investigación.

Los diseños preliminares seleccionados fueron:

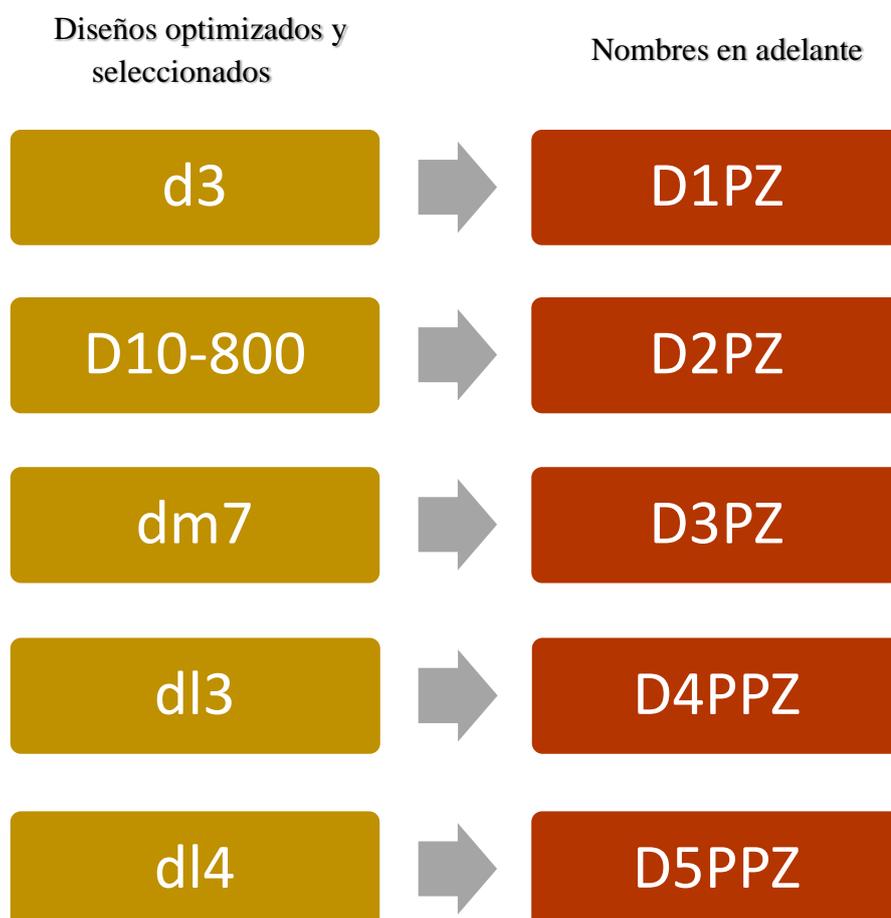


Tabla 26
Diseños optimizados de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)

Mix		D1PZ	D2PZ	D3PZ	D4PPZ	D5PPZ
<i>Agua añadida a la mezcla, w</i>	(kg/m ³)	213	236	142	211	196
<i>Cemento, c</i>	(kg/m ³)	883	804	750	873	815
<i>Puzolana SSS, %abs=13%, pzsss</i>	(kg/m ³)	594	659	698	531	570
<i>Microsílice, ms</i>	(kg/m ³)	100,12	80,43	112,72	99,03	92,43
<i>Nanosílice/Cemento, ns</i>	(kg/m ³)	67,87	56,30	63,46	67,09	62,62
<i>Piedra, pd</i>	(kg/m ³)	0,00	0,00	0,00	133	244
<i>w/(c+ms+ns)</i>		0,268	0,332	0,240	0,262	0,271
<i>Agua de saturación para puzolana</i>	(kg)	68,34	75,87	80,31	61,10	65,57
<i>agua en piedra = peso seco*(%h-%a)]</i>	(kg)	-	-	-	-0,79	-1,46
<i>Agua total de diseño corregida</i>	(kg)	281,35	312,36	222,25	272,58	262,65
<i>Agua de diseño/material cementante</i>		0,27	0,33	0,24	0,26	0,27
<i>ns/(c+ms+ns)</i>	(%)	6,46%	5,98%	6,85%	6,45%	6,45%
<i>c/(c+ms+ns)</i>	(%)	84,02%	85,47%	80,97%	84,02%	84,02%
<i>pzsss/(c+ms+ns)</i>	(%)	56,52%	70,08%	75,38%	51,10%	58,75%
<i>ms/(c+ms+ns)</i>	(%)	9,53%	8,55%	12,17%	9,53%	9,53%
<i>(pzsss +pd)/(c+ms+ns)</i>		0,57	0,70	0,75	0,64	0,84

Nota: La puzolana SSS es el peso de la puzolana saturada superficialmente seca. El agua de saturación de puzolana es igual a su % de absorción. Origen: confección propia.

3.8 Procedimiento de la mezcla de los Concretos Ligeros de Alta Resistencia (CLAR)

Para producir un concreto convencional primero se tienen que mezclar el agregado fino con el agregado grueso, luego todo ello con el cemento y al final el agua, hasta que la mezcla sea homogénea y llegue un nivel de plasticidad apropiado para realizar los trabajos. Para producir concretos de alta resistencia, se debe tener en cuenta los momentos adecuados para agregar cada material a la mezcla, el tiempo de inclusión de cada componente en diferente orden puede originar diferentes resultados para un mismo diseño.

Durante la primera semana se buscó la manera más conveniente para la amasada del concreto y se presentaron dos opciones.

Opción 1; en orden cronológico: mezcla inicial de los agregados, adición del cemento, inclusión de microsílíce y finalmente el agua y la nanosílíce previamente mezcladas.

Opción 2; en orden cronológico: mezcla del cemento con la microsílíce, inclusión de 4/5 de agua con toda la nanosílíce hasta que la masa se vuelva plástica, y por último los agregados previamente saturados y lo sobrante de agua.

Luego de comparar ambos procesos, se optó por la segunda opción debido a que se apreciaba una mejor plasticidad del concreto fresco.

CAPÍTULO 4

ENSAYOS Y RESULTADOS DE LABORATORIO

4.1 Ensayos de los Concretos en la Fase Fresca

4.1.1 Consistencia

ASTM C1611 / C1611M – 14 -ASTM C143/C94

Según el ASTM C1611 los concretos ensayados tienen un índice visual de estabilidad (VSI siglas en inglés) situados en el rango de “muy estables” con un valor igual a “cero” según su escala de 0 a 3, lo que significa que no presenta evidencia de segregación ni exudación de agua.

También se puede apreciar que los diseños D1PZ, D4PPZ y D5PPZ son concretos autocompactantes, sin embargo, no de la manera convencional con agregados normales, puesto a que el tiempo que tarda en reacomodarse por sí mismo es más extenso de lo comúnmente apreciado en este tipo de concretos, esto se debe únicamente a la puzolana natural empleada.

Los diseños D2PZ y D3PZ son concretos más viscosos y estables.

Se midió el flujo de asentamiento y el slump de las mezclas de los concretos. La aproximación para medir los diámetros es de 10 mm y los asentamientos 5 mm.

El flujo de asentamiento está determinado por la siguiente formula:

$$Fa = \frac{(d1 + d2)}{2}$$

Donde:

Fa = Flujo de asentamiento.

d1 = Diámetro mayor del esparcimiento o extensión del concreto.

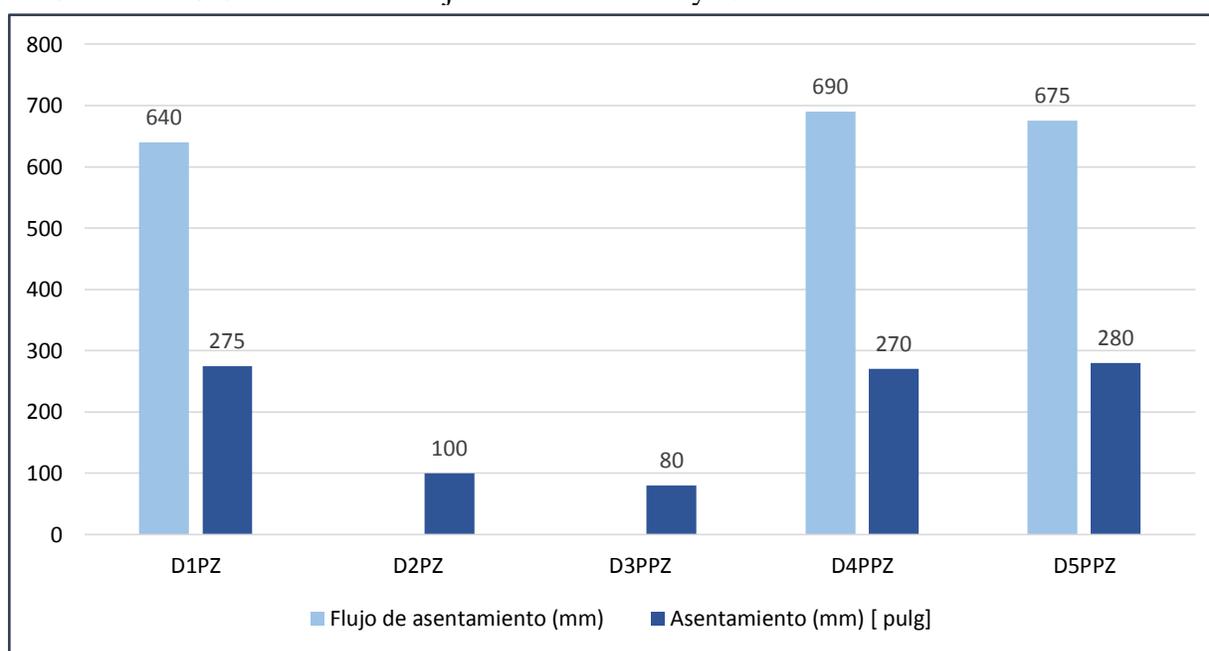
d2= Diámetro menor del espaciamento o extensión del concreto.

Tabla 27
Consistencias de los concretos ligeros de alta resistencia

Diseño	d1 (mm)	Flujo de asentamiento (mm)	Asentamiento (mm)
D1PZ	650	640	275
	630		
D2PZ	-	-	100
D3PZ	-	-	80
D4PPZ	730	690	270
	650		
D5PPZ	720	675	280
	630		

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 4.10 Consistencia. Flujo de asentamiento y asentamiento



4.1.2 Densidad Aparente (masa unitaria)

Para efectuar este ensayo se utilizó el ASTM C138. La finalidad de la masa unitaria o masa por unidad volumétrica (anteriormente llamado “peso unitario” según el ASTM C138) del concreto en la fase fresca es determinar el rendimiento de las mezclas y las densidades de los concretos recién mezclados, así como también los contenidos de aire (gravimétrico).

En este estudio se utilizaron los valores del rendimiento ‘Y’ para el reajuste de los valores de dosificación de los materiales por unidad de volumen (m³).

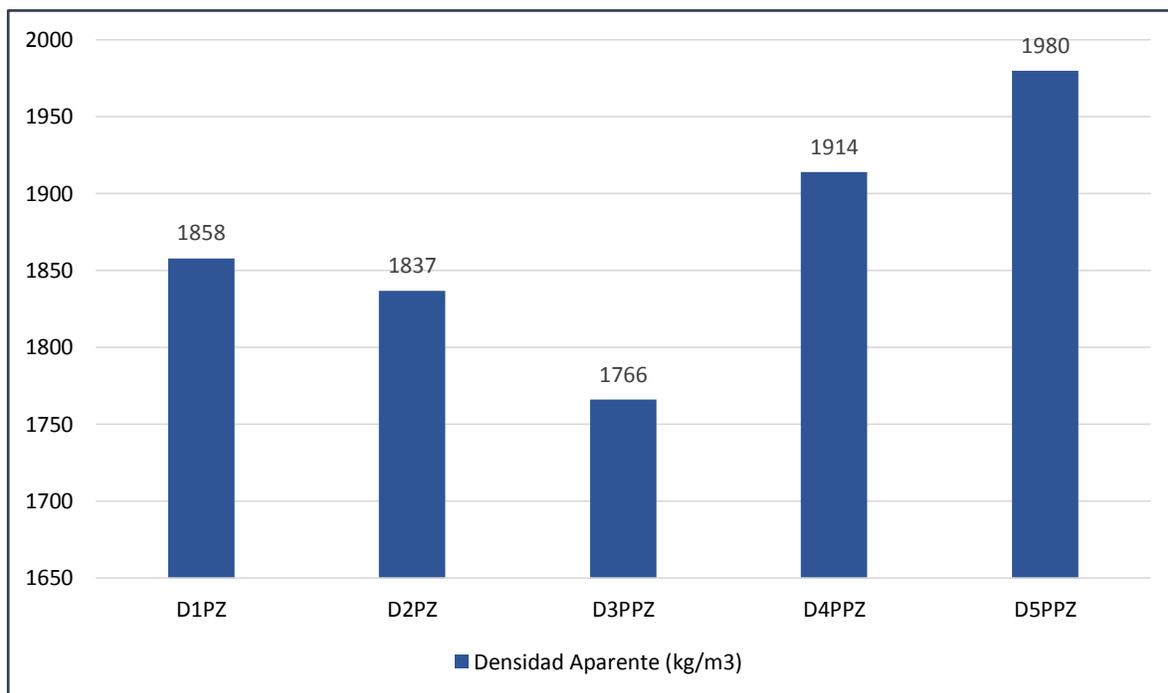
Tabla 28

Densidad Aparente en fase fresca de los concretos ligeros de alta resistencia

Mezcla	Peso Unitario ‘D’ (kg/m ³)	Contenido de aire ‘A’ (gravimétrico) (%)
D1PZ	1858	7.75
D2PZ	1837	6.42
D3PZ	1766	13.45
D4PPZ	1914	6.87
D5PPZ	1980	4.79

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 4.2 Densidad Aparente del concreto fresco



Fotografía 17
Peso del concreto fresco y el recipiente



4.1.3 Temperatura

Son las temperaturas registradas inmediatamente después de la mezcla del concreto, es decir, luego del vaciado del trompo a la carretilla buggy. La temperatura ambiental de ese día era de 19.5° C, registrada con el termómetro.

Tabla 29

Temperatura en la fase fresca de los concretos ligeros de alta resistencia

Mezcla	Temperatura (°C)	
D1PZ	20.8	21.0
D2PZ	20.5	20.6
D3PZ	20.3	20.5
D4PPZ	20.7	21.1
D5PPZ	20.8	21.2

Datos registrados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Fotografía 18
Medición de la temperatura con el termómetro.



4.1.4 Contenido de Aire

ASTM C231

En el diseño de concretos livianos, es importante tener en cuenta que se pueden conseguir resultados deseados con la presencia de un contenido significativo de aire atrapado en la mezcla de concreto, un efecto que puede estar relacionado con la granulometría y el porcentaje de poros del agregado de peso ligero.

Del desarrollo del ensayo se registró, en la Olla Washington, el contenido de aire aparente de los distintos diseños de concreto.

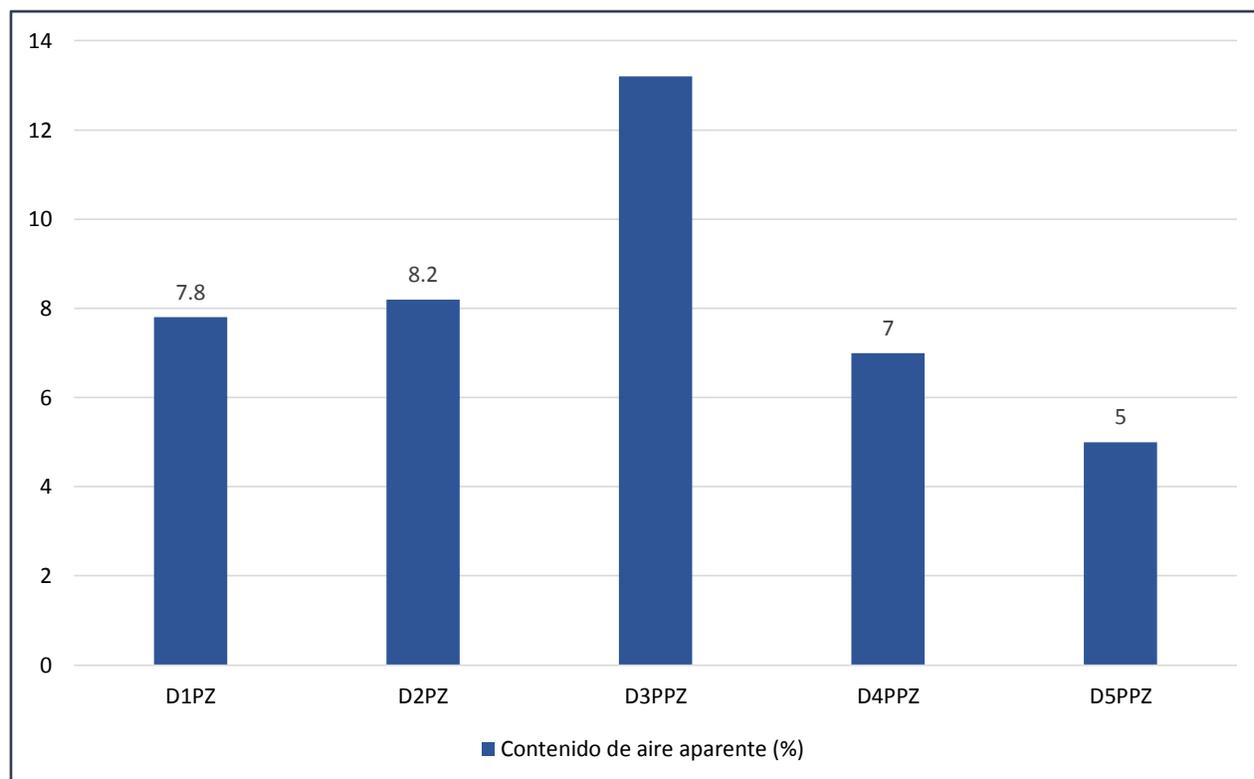
Tabla 30

Contenido de aire en fase fresca de los concretos ligeros de alta resistencia

Mezcla	Contenido de Aire aparente (%)
D1PZ	7.8
D2PZ	8.2
D3PZ	> 10.0
D4PPZ	7.0
D5PPZ	5.0

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 4.3 Contenido de aire aparente atrapado – Olla Washington



Fotografía 40

Olla Washington para determinar el contenido de aire atrapado.



4.2 Ensayos del concreto en la Fase Endurecida

4.2.1 Resistencia a la Compresión

ASTM C39

La resistencia a los esfuerzos de compresión del concreto es la característica más importante de este material, sobre todo respecto a la construcción de estructuras de cualquier proyecto de ingeniería. Además, es la principal motivación de los investigadores a explorar sobre nuevos métodos de producción y tecnologías de los materiales que componen el concreto.

El ensayo de resistencia a la compresión, en cuanto al control de calidad de las obras, son por general los más convenientes y confiables en la aceptación de los concretos respecto a los otros ensayos de resistencia.

La resistencia a compresión del concreto, es el valor determinado por el cociente de la carga axial máxima que resiste la muestra y el área de la sección media de la probeta, registradas en la máquina de ensayos a compresión.

Esta característica además es utilizada como un indicador de su calidad o desempeño, puesto a que su valor está relacionado generalmente a sus otras propiedades como por ejemplo la impermeabilidad, la resistencia a agentes químicos, la resistencia al fuego, entre otros aspectos de durabilidad.

Para realizar este ensayo se fabricaron probetas de 4 pulgadas de diámetro por 8 pulgadas de altura. El curado se efectuó hasta 2h antes de su rotura, para luego tomar las medidas. Se utilizaron almohadillas de neopreno con cabezales de acero.

Tabla 31
Resistencia a la compresión (kg/cm^2) de los concretos ligeros de alta resistencia

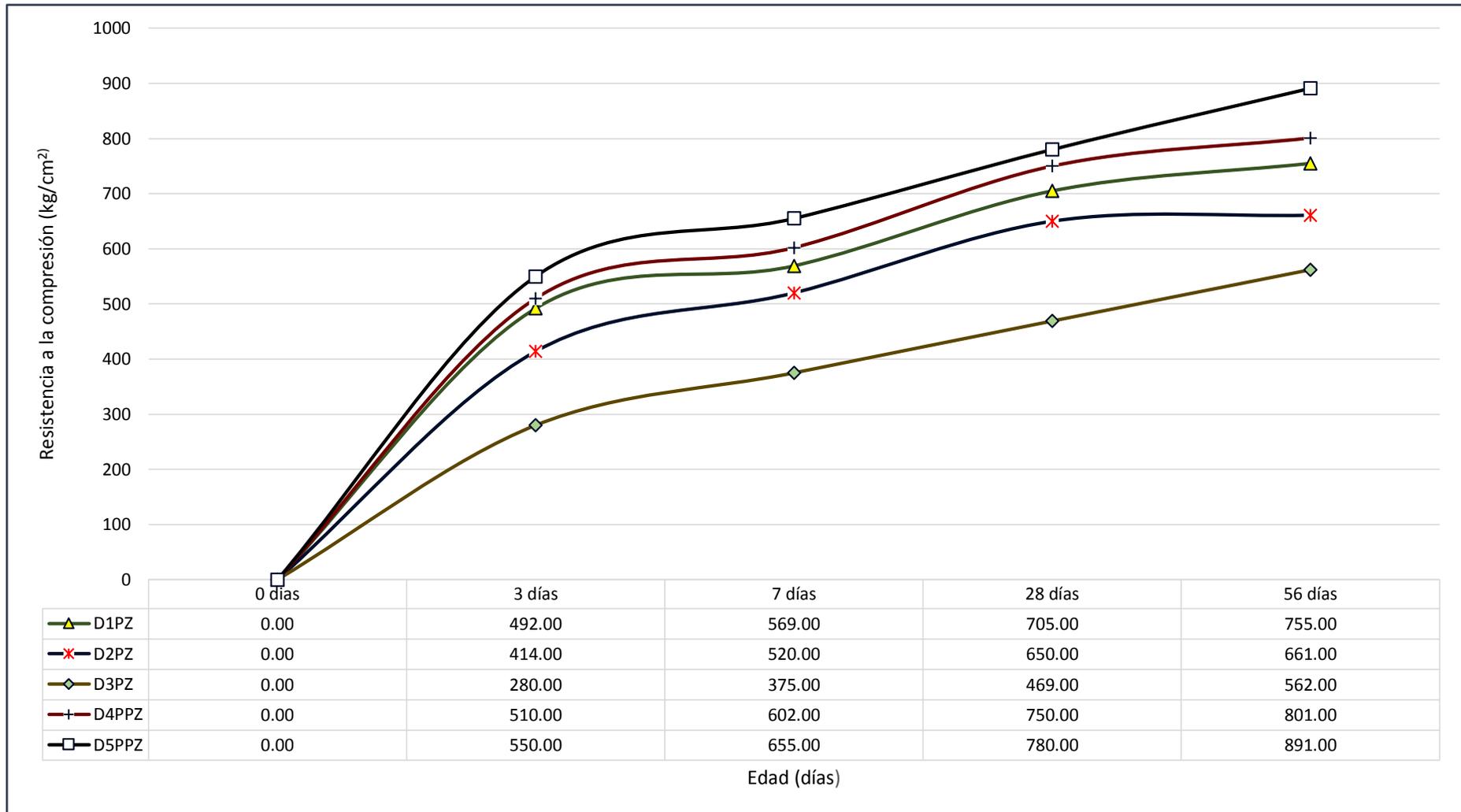
Diseño	Resistencias a la Compresión (kg/cm^2)			
	3 días	7 días	28 días	56 días
D1PZ	492	569	705	755
D2PZ	414	520	650	661
D3PZ	280	375	469	562
D4PPZ	510	602	750	801
D5PPZ	550	655	780	891

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Fotografía 20
Probeta rota en la máquina de ensayo a compresión.



Gráfico 4.4 Curva de resistencia a la compresión en el tiempo de todos los diseños de mezcla.



4.2.2 Resistencia a la Tracción por Compresión Diametral

ASTM C496

La aplicación de este ensayo consiste en someter la muestra a la compresión, aplicando la carga directamente sobre la generatriz del cilindro de concreto, los resultados son mucho menores que los obtenidos en la resistencia a la compresión.

Dentro de los múltiples métodos para determinar esta resistencia el más usado es la prueba de rotura o prueba brasileña, siendo una de las dificultades la estabilidad entre la muestra y las placas de acero que hacen contacto con la máquina de rotura.

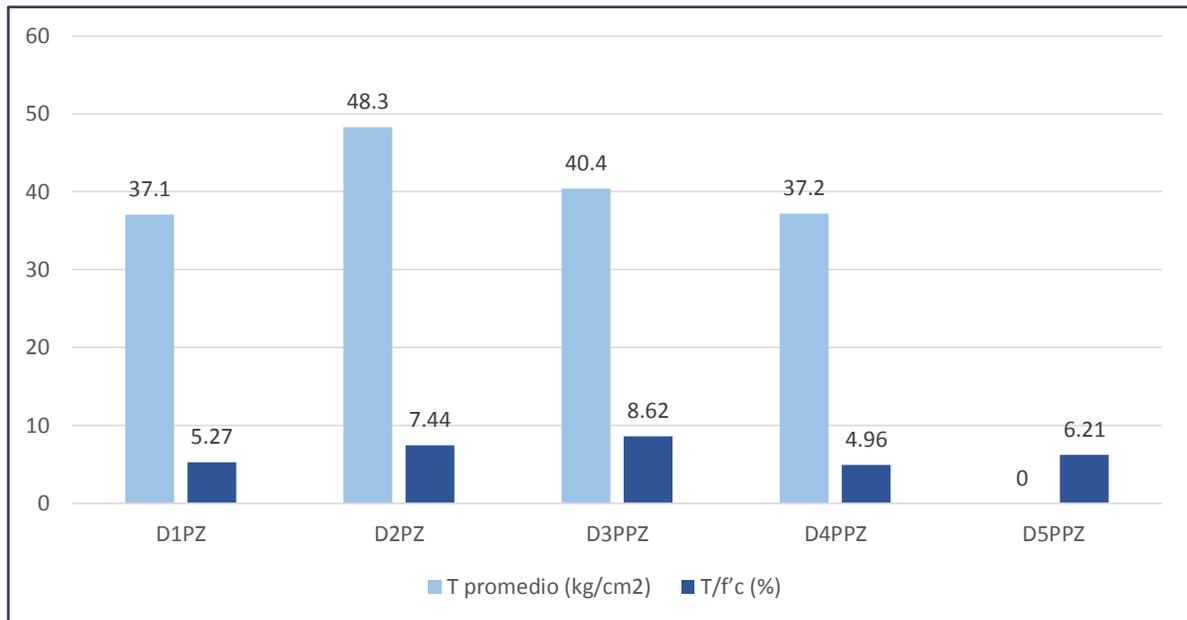
Las probetas cilíndricas tienen una dimensión de 4x8 pulgadas y fueron ensayadas a los 28 días de edad de la muestra. El curado se efectuó hasta 2h antes de su rotura, para luego tomar las medidas.

Tabla 32

Resistencias a la tracción por compresión diametral (T) de los concretos ligeros de alta resistencia

Diseño	T promedio (kg/cm ²)	T/f'c (%) – (28d)
D1PZ	37,1	5,27
D2PZ	48,3	7,44
D3PZ	40,4	8,62
D4PPZ	37,2	4,96
D5PPZ	48,5	6,21

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 4.5 Resistencia a la tracción porcentaje respecto a f_c *Fotografía 21*

Ensayo de resistencia a la tracción. Probeta rota en el eje longitudinal.



4.2.3 Resistencia a la flexión

ASTM C78

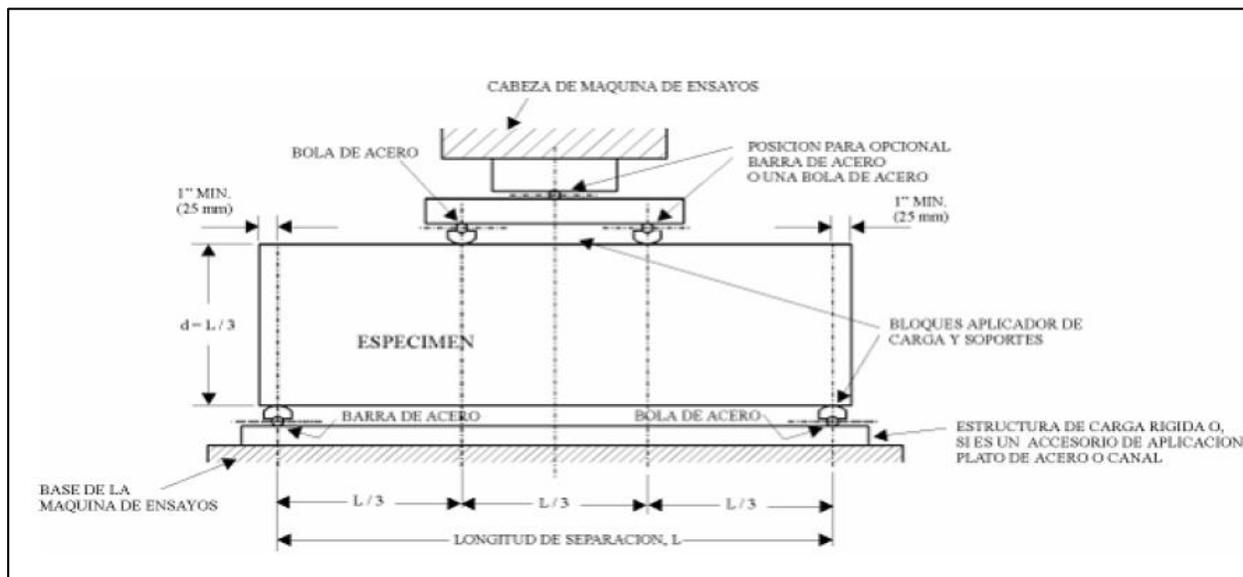
La resistencia a la flexión del concreto, es el valor de los esfuerzos a tracción que se producen en las fibras longitudinales del concreto, es el valor de la resistencia a la falla por momento en una viga o también una losa.

El módulo de rotura (R), es el valor de la resistencia a la flexión y es determinada mediante el método de ASTM C78 con cargas puntuales en dos puntos extremos del tercio medio de la viga de 53cm de luz y de 15cm*15cm de sección transversal.

El módulo de rotura es más empleado por los diseñadores de pavimentos quienes pueden requerir dosificaciones de concretos que alcancen a cierta edad en promedio o como mínimo un valor determinado de resistencia a la flexión.

El ensayo se efectuó a los 28 días de edad, y se mantuvo en curado hasta poco antes de su rotura.

Ilustración 4.1 Disposición de los apoyos y las cargas para efectuar el ensayo ASTM C78



Fuente: ASTM C78.

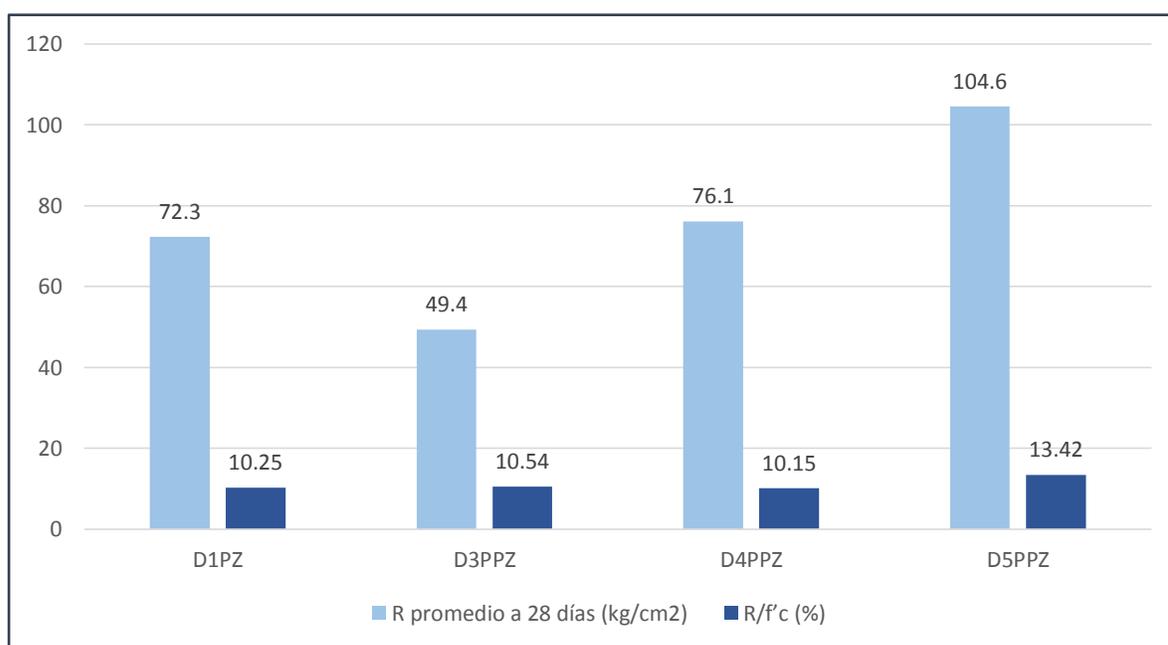
Tabla 33

Resistencias a la flexión (R) de los concretos ligeros de alta resistencia

Diseño	R promedio a 28 días (kg/cm ²)	R/f'c (%) – (28d)
D1PZ	72,3	10,25
D3PZ	49,4	10,54
D4PPZ	76,1	10,15
D5PPZ	104,6	13,42

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 4.6 Módulo de Rotura y porcentajes respecto a f'c



*Fotografía 22**Vigas rotas luego del ensayo de resistencia a la flexión.***4.2.3 Densidad de equilibrio y seca**

ASTM C567-05 “Método de prueba estándar para determinar la densidad del concreto ligero estructural”

Este ensayo al igual que el de resistencia a compresión conforman los aspectos de control que han motivado el desarrollo de esta investigación, para la disminución de los valores de densidad, fue el agregado ligero de puzolana natural que lo hizo posible, además de tener en cuenta el grado de resistencia que aporta el material.

Con el método ASTM C567 se miden o calculan 2 densidades: la densidad de equilibrio y la densidad seca.

4.2.3.1 Densidad de equilibrio

Esta densidad es el valor medido para un concreto ligero estructural tras una exposición a la humedad relativa dentro del rango de 45 a 55 % y la temperatura comprendida entre los 21 y 25 °C durante un período de tiempo considerable en el que se pueda alcanzar una masa constante.

La densidad de equilibrio está determinada por la siguiente formula:

$$D_e \text{ (kg/m}^3\text{)} = (M_{Se} \times 997) / (M_{SSSe} - M_{Ae})$$

$$D_e \text{ (lb/ft}^3\text{)} = (M_{Se} \times 62.3) / (M_{SSSe} - M_{Ae})$$

Donde:

D_e = densidad de equilibrio medida, kg/m³, (lb/ft³).

M_{Se} = masa de la probeta seca en el cuarto controlado de humedad, kg (lb).

M_{SSSe} = masa de la probeta saturado con superficie seca, kg (lb).

M_{Ae} = masa aparente de la probeta suspendida y sumergido, kg (lb).

4.2.3.2 Densidad seca

Esta densidad es el valor medido para un concreto ligero estructural luego de ser sometido al interior de un horno de secado entre los 105 y 115 °C durante un período de tiempo considerable en el que se pueda alcanzar una masa constante.

La densidad seca está determinada por la siguiente formula:

$$D_s \text{ (kg/m}^3\text{)} = (M_S \times 997) / (M_{SSS} - M_A)$$

$$D_s \text{ (lb/ft}^3\text{)} = (M_S \times 62.3) / (M_{SSS} - M_A)$$

Donde:

D_s = densidad seca medida, kg/m³ (lb/ft³).

M_S = masa de la probeta secado en el horno + de 72h, kg (lb).

MSSS = masa de la probeta saturada con superficie seca, kg (lb).

MA = masa aparente de la probeta suspendida y sumergido, kg (lb).

NOTA: Si se procura tomar medidas de la densidad seca a una edad diferente de 24h, se debe especificar.

4.2.3.3 Densidad aproximada de equilibrio

Se calcula a partir de la densidad seca, establecida por la fórmula:

$$D_c = D_s + 50 \text{ kg/m}^3 \text{ (3 lb/ft}^3\text{)}$$

Donde:

D_c = densidad de equilibrio calculada.

Un gran número de ensayos han determinado que a pesar de los distintos valores del contenido de humedad que puedan tener los agregados livianos, se cumple la superioridad en 50 kg/m^3 de la densidad de equilibrio respecto a la densidad seca.

El hecho de no contar con un cuarto o cerramiento controlado de humedad y temperatura, implicó determinar las densidades de equilibrio a partir de la fórmula de Densidad aproximada de equilibrio.

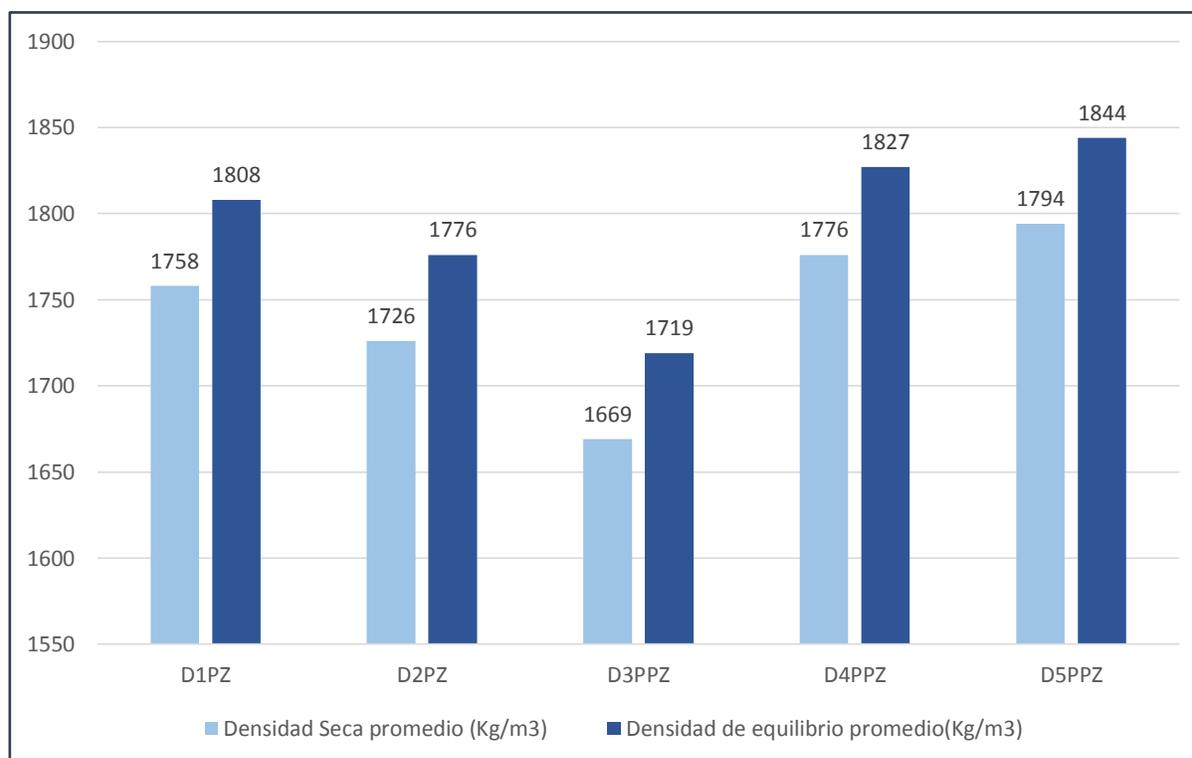
La densidad seca se midió según lo establece el ASTM C567-05 a los 28 días, para efectos de obtener resultados más confiables.

Tabla 34
Densidades de los concretos ligeros de alta resistencia

Diseño	Densidad Seca promedio (kg/m ³)	Densidad de equilibrio promedio(kg/m ³)
D1PZ	1758	1808
D2PZ	1726	1776
D3PZ	1669	1719
D4PPZ	1776	1827
D5PPZ	1794	1844

Ensayos ejecutados en el laboratorio. Origen: confección propia.

Gráfico 4.272 Densidades secas y de equilibrio



Fotografía 158

Medición de la masa aparente del cilindro suspendido – sumergido; para determinar la densidad seca medida (D_s).



CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Este estudio determinó que es posible obtener concretos livianos de alta resistencia en los límites establecidos por el ACI 211.2-98 y el ACI 363.2R utilizando nanosílice como adición mineral. Se estableció un rango de dosificaciones que van desde los de 56.30 kg por m³ de concreto (5.98% respecto al material cementicio) hasta 67.87 kg por m³ de concreto (6.46% respecto al material cementicio). Los resultados indican que, para valores menores del material, en la mayoría de casos, no se consiguen concretos suficientemente plásticos o con un nivel de cohesión aceptable para formar una masa, y en otros casos se puede formar una mezcla de mejor plasticidad, no obstante, el concreto no adquiere grandes resistencias. Para valores mayores del material, se pueden obtener concretos más fluidos que decaen en sus niveles de resistencia, con valores que podrían obtenerse con porcentajes menores del nanomaterial.
- La cantidad dosificada de puzolana natural, como agregado fino y grueso en el estudio de estos concretos, fue responsable de encontrar una baja densidad de equilibrio del concreto en la fase endurecido, y también permitió, en conjunto con los demás componentes, concretos de alta resistencia. Sus valores se establecieron en un rango que asciende desde los 530 hasta los 700 kg por m³ de concreto. Si el peso unitario compactado de la puzolana natural es muy liviano, el volumen ocupado por el material es mucho mayor para los mismos valores en peso, esto les deja menos espacio a los otros componentes, y la cohesión de la pasta se ve afectada. La estructura granulométrica y el peso unitario compactado del agregado componen una función

directa con la resistencia a compresión adquirida del concreto endurecido, esto se debe a que ambas constituyen una mayor densificación de la masa total.

5.2 Conclusiones Adicionales

- De los diseños de concretos estudiados en esta tesis, cuatro han alcanzado la denominación de alta resistencia a los tres días de edad con valores de 414 kg/cm², 492 kg/cm², 510 kg/cm² y 550 kg/cm². El diseño D3PZ alcanzó un valor de alta resistencia a los 28 días de edad, con 469 kg/cm². Las resistencias alcanzadas a los 56 días de edad fueron: para D3PZ 562 kg/cm²; para D2PZ, 661 kg/cm²; para D1PZ, 755 kg/cm²; para D4PPZ, 801 kg/cm² y para D5PPZ, 891 kg/cm²; sus densidades de equilibrio respectivamente fueron, 1719 kg/m³, 1776 kg/m³, 1808 kg/m³, 1827 kg/m³ y 1844 kg/m³; por tanto, todos los diseños validaron la hipótesis general.
- Si se asume que un concreto de alta resistencia convencional pesa en promedio 2400 kg/m³ entonces valdría decir que, partiendo desde el diseño más pesado, se aligerarían los pesos en más de media tonelada de diferencia por cada m³ de concreto utilizado. Las diferencias de densidades reducidas de todos los diseños son de menor a mayor valor: 556 kg/m³, 573 kg/m³, 592 kg/m³, 624 kg/m³ y 681 kg/m³.
- Con el tipo de nanosílice empleada, los concretos de alta resistencia en estudio han prescindido la necesidad de aditivos reductores de agua de alto rango; la nano SiO₂ por su naturaleza física en estado líquido y por los componentes químicos adicionados han generado un comportamiento equivalente.

5.3 Recomendaciones

- La nanosílice es un elemento relativamente nuevo en la producción de concretos en la construcción de los proyectos de ingeniería, y por lo tanto requiere mayores estudios sobre sus propiedades a nivel general en cuanto al desempeño a largo plazo del concreto endurecido. Esta tesis no ha determinado todas las características que pueden presentar los concretos estudiados con dosificaciones de nanosílice, por ejemplo, no se han abordado los temas concernientes a su durabilidad ante agentes químicos, por ello, para su uso, se sugiere alcances complementarios que prevengan problemas futuros.
- La puzolana natural, como roca volcánica, es un material que se acomoda a la obtención de los concretos ligeros de alta resistencia sin embargo no contamos con libros, tesis o artículos científicos sobre otros planteamientos granulométricos y de dosificación que puedan optimizar aún más la liviandad de los diseños planteados y paralelamente conseguir mejores resistencias, este aspecto podría estar enmarcado en otro estudio.
- La dosificación de materiales cementicios en general, determinan el mayor costo unitario de los concretos producidos, estos podrían optimizarse aún más en los concretos propuestos si se plantean estudios en función a las disminuciones de las cantidades de los materiales cementicios usados respecto a las resistencias y densidades de equilibrio obtenidas.

LISTA DE REFERENCIAS

- America's Cement Manufacturers . (n.d.). *How Cement is Made*. Retrieved from America's Cement Manufacturers (PCA): <http://www.cement.org/>
- Arauco, S. (2010). Estudio de las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido utilizando cemento de la República Dominicana Quisqueya portland- tipo 1 . (*Tesis de grado*). Lima.
- Arce, X. (1997). Hormigones Livianos. (*Tesis de grado*). Facultad de ingeniería en ciencias de la tierra.
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la Investigación* (Tercera ed.). Bogotá D.C.: Pearson educación.
- Bung-Wan, J., Chang-Hyun, K., Ghi-Ho, T., & Jong-Bin, P. (2005). Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles. (ScienceDirect, Ed.) *Construction and Building Materials*, p 1353.
- Carrera, J. (1980). Concreto Liviano Empleando Vidrio Volcanico como Agregado. (*Tesis de pregrado*). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Chandra, S., & Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate concrete - Science, Technology, and Applications*. Norwich: Noyes Publications.
- Committee 211. (1998). *ACI 211.2-98 Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*. Farmington Hills: ACI.
- Committee ACI 211. (1998). *ACI 211.4R Guide for selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash*. Farmington Hills: ACI.
- Committee ACI 213. (2003). *ACI 213R-03 Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. Farmington Hills: ACI.

- Committee ACI 363. (1998). *ACI 363.2R Guide to Quality Control and Testing of High-Strength Concrete ACI 363.2R-98*. Farmington Hills: ACI.
- Expanded Shale, Clay and Slate Institute. (1971). *History, applications and economics*. E.E.U.U.
- Gali, P. (2007). Las inmigraciones italianas y su aporte técnico-ornamental a la arquitectura argentina. (*Tesina*). Universidad de Belgrado, Argentina.
- Gestión, el diario de Economía y Negocios. (2016, Julio 4). *MEM: Producción minera no metálica creció 79% en los últimos cinco años*. Retrieved from Gestión, el diario de Economía y Negocios: <https://gestion.pe>
- Ghio, V. (1994). *Tecnología del concreto: eficiencia y competitividad en la construcción*. (A. Gómez, Ed.) Lima.
- Guerrero, T. (2017, Julio 3). *La 'receta' de los antiguos romanos para conseguir un hormigón superresistente al paso del tiempo*. Retrieved from El Mundo: <http://www.elmundo.es/>
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2010). *Metodología de la Investigación* (Quinta ed.). México D.F.: McGraw-Hill.
- Huincho, E. (2011). Concreto de Alta Resistencia Usando Aditivo Superplastificante, Microsilice y Nanosilice con Cemento Portland tipo I. (*Tesis de grado*). Universidad Nacional de ingeniería, Lima.
- INDECOPI. (2002). *Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en hormigón (concreto)-NTP 400.037*. Lima.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. (n.d.). *Nanoaditivos para el concreto*. Retrieved from Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto: <http://www.imcyc.com/>
- Ministerio de Energía y Minas. (2018, Mayo). *Anuario Minero 2017*. Retrieved from Ministerio de Energía y Minas: <http://www.minem.gob.pe>

Natural Pozzolan Association (NPA). (n.d.). *How Natural Pozzolans Improve Concrete*. Retrieved from Natural Pozzolan Association: <http://pozzolan.org/improve-concrete.html>

Páez, A. (1986). *Hormigón Armado*. Barcelona, España: Reverté.

Pérez, D. (2013, Junio 7). *El hormigón romano era mejor que el actual (y menos contaminante)*. Retrieved from El Confidencial: <https://www.elconfidencial.com/>

Pérez, L. (2016). Estudio de las características mecánicas de un tabicón elaborado con una mezcla de arena, cemento y tereftalato de polietileno (PET), como agregado grueso. (*Tesis de grado*). Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico DF.

Sanjuán, M. y Chinchón, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*. San Vicente del Raspeig, España: Unión de editoriales universitarias españolas.

The Silica Fume Association. (2014). *What is Silica Fume?* Retrieved from The Silica Fume Association: <http://www.silicafume.org/>

Villegas, C. (2012). Utilización de Puzolanas Naturales en la Elaboración de Prefabricados con Base Cementicia Destinados a la Construcción de Viviendas de Bajo Costo. *Tesis de Maestría*. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.

Yang, S. (2013, Junio 4). *To improve today's concrete, do as the Romans did*. Retrieved from Berkeley News: <http://news.berkeley.edu/>

ASTM (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales):

ASTM (1997). ASTM C 29/C 29M: Método de ensayo para el peso unitario y vacío en los agregados.

ASTM (1997). ASTM C566: Método de ensayo para el contenido de humedad del agregado por secado.

ASTM (2001). ASTM C127: Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, la densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos.

ASTM (2001). ASTM C128: Método de ensayo estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos.

ASTM (2005). ASTM C567: Método de ensayo para la determinación de la densidad del concreto estructural liviano.

ASTM (2008). ASTM C143: Determinación del asentamiento del concreto hidráulico.

ASTM (2009). ASTM C78: Método de ensayo para determinar el esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz).

ASTM (2009). ASTM C330: Agregados livianos para concreto estructural.

ASTM (2009). ASTM C138: Determinación de la densidad aparente (masa unitaria) rendimiento (volumen de concreto producido) y contenido de aire (gravimétrico) del concreto.

ASTM (2009). ASTM C1611: Método de ensayo. Determinación del flujo de asentamiento del concreto autoconsolidante.

ASTM (2014). ASTM C231: Determinación del contenido de aire del concreto hidráulico recién mezclado por el método de presión.

ASTM (2017). ASTM C496: Método de prueba estándar para determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.

ASTM (2018). ASTM C39: Método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto.

ANEXO A:
FICHAS TÉCNICAS



HP-300

Nanosilice para Prefabricados

Fecha de Emisión: Dic 20, 16
Revisión: 2
Fecha de Revisión: Jun 26, 17
Página: 1 de 1

ULMEN S.A Adicionante a Cemento

Descripción

HP-300 pertenece a la línea GAIA NANOSILICE, donde las reacciones químicas en la mezcla cementicia convierten las nanopartículas de silice en nanopartículas de cemento.

Es adicionante, líquido, a los cementos usados para la elaboración de elementos prefabricados

Aspectos Técnicos

HP-300 ha sido diseñado especialmente para conseguir resistencias de 300 kg/cm² a 18 horas, sin necesidad de utilizar curado al vapor.

Aporta mantención de la trabajabilidad al concreto, sin afectar el desarrollo de resistencias tempranas.

Reducción de costo

Permite disminuir la cantidad de cemento para cumplir con la resistencia del diseño

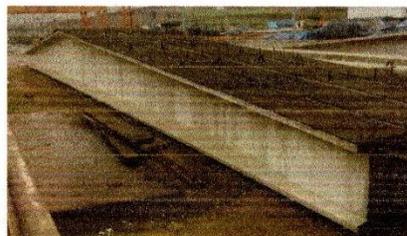
Elimina el uso de vapor y acorta los tiempos de desmolde. Consecuencialmente, la disminución en las actividades operacionales es notable.

Duración

6 meses almacenado en lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO 9001:2008

Presentación

En cilindro plástico de 220 kg
En dispenser retornable de 1000 kg



Dosis

Recomendamos dosis de 0.2 a 2% sobre peso del cemento. A fin de optimizar la aplicación, agradecemos contactar al servicio técnico ULMEN (vía e-mail es suficiente)

Información Técnica

Color : Gris Claro
Densidad : 1,06 ± 0,02 g/mL
pH : 5 ± 1
Viscosidad : 42 ± 2 (s) (C. Ford No. 4)
Sólidos : 29 ± 3%

Almacenaje

Almacenar en su envase original cerrado, protegido del sol y abrigado de heladas.

Clasificación

HP-300 se clasifica como aditivo tipo F según la norma ASTM C494.

Calle 4, Mz C-1, Sub Lt-2F – Cooperativa las vertientes, Villa Salvador – Lima.

Tel. (51-1) 719-4126 o 719-4127

www.cognoscibletechnologies.com

www.ulmen.cl

atencionalcliente@ulmen.cl



HOJA DE SEGURIDAD

HP-300

Fecha de Emisión: Dic 20, 16
 Revisión: Feb 28, 17
 Fecha de Revisión:
 Página 1 de 2

SECCION 1: IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DEL PROVEEDOR

Nombre del producto : **HP-300**
 Clasificación : Aditivo para Concretos
 Vida útil : 6 meses almacenado en lugar fresco y protegido del sol, recomendado
 Por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO 9001:2008
 Proveedor : INDUSTRIAS ULMEN S.A.
 E-mail : atencionalcliente@ulmen.cl
 Página Web : www.ulmen.cl
 Fono planta : (51-1) 7194126
 Fono Emergencia : (56 -2) 25952838



Toda llamada de emergencia dentro y/o fuera del país será reembolsada previa revisión

SECCION 2: COMPOSICIÓN/ INFORMACIÓN DE LOS COMPONENTES

Nombre químico : Mezcla de nanosilíce y ácidos poli-carboxílicos
 Fórmula química : Confidencial
 N° CAS : No aplica

SECCION 3: IDENTIFICACIÓN DE LOS RIESGOS

Marca en etiqueta : Rombo NFPA
 Clasificación de Salud (1) / Inflamabilidad (0)
 Reactividad (0) / Riesgo Especial (0)
 Riesgos : Ninguno
 Peligros para la salud : Ninguno



SECCION 4: MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Contacto con los ojos : Lavar con abundante agua durante 15 min. Referir al médico
 Contacto con la piel : Lavar con agua y jabón
 Inhalación : Dar aire fresco si fuese necesario
 Ingestión : Enjuagar boca con agua tibia. Referir al médico

SECCION 5: MEDIDAS PARA COMBATIR EL FUEGO

Agentes extintores : No inflamable ni combustible. Actuar según tipo de fuego existente
 Protección especial : Ninguna
 Proce. Especiales : No aplica
 Riesgo explosión : No aplica

SECCION 6: MEDIDAS PARA CONTROLAR DERRAMES O FUGAS

Medidas de emergencia : Lavar con agua y trapear
 Protección personal : Antiparras y guantes
 Daños al ambiente : Ninguno, líquido inofensivo
 Métodos de eliminación : Tratar como líquido inofensivo

SECCION 7: MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación : Usar antiparras y guantes
 Almacenamiento : Almacenar en lugar fresco y seco
 Embalajes : Almacenar sólo en envase original

SECCION 8: CONTROL DE EXPOSICIÓN/ PROTECCIÓN ESPECIAL

Medidas por exposición : No se requiere
 Protección respiratoria : No se requiere
 Protección de los ojos : Antiparras

www.cognoscibletechnologies.com

www.ulmen.cl

atencionalcliente@ulmen.cl



HOJA DE SEGURIDAD

HP300

Fecha de Emisión: Dic 20, 16
 Revisión:
 Fecha de Revisión:
 Página 2 de 2

SECCION 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Estado físico	:	Líquido
Color	:	Gris Claro
Olor	:	Característico
pH	:	5 ± 1
Densidad a 20° C	:	1,06 ± 0,02 (g/mL)
Viscosidad (Copa Ford N°4)	:	42 ± 2 seg.
Inflamación, Combustión, Explosión	:	No inflamable, No combustible, No explosivo
Solubilidad	:	Completamente soluble en agua

SECCION 10: ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad	:	Estable bajo condiciones normales
Reactividad	:	Ninguna

SECCION 11: INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad aguda	:	Por ingestión, dosis > 4000 mg/kg
Efectos peligrosos para la salud	:	Ninguno

SECCION 12: INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Inestabilidad	:	Estable
Persistencia/ degradabilidad	:	Los métodos para determinación de la biodegradabilidad No son aplicables a sustancias inorgánicas
Bio-acumulación	:	No aplica

SECCION 13: CONSIDERACIONES SOBRE DISPOSICIÓN FINAL

Método de eliminación del producto	:	Debe tratarse como líquido inofensivo
Eliminación de envases	:	Depositar en vertedero autorizado según Legislación vigente

SECCION 14: INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

Para Transporte Marítimo	:	Sin regulación
Precauciones para Transporte Marítimo	:	Comprobar que el recipiente este cerrado herméticamente
Clasificación NFPA	:	Salud: 1/Inflamabilidad: 0/Reactividad: 0/Riesgo específico: 0
Clasificación IATA (56th edition, 2015)	:	No es regulado como producto peligroso

SECCION 15: NORMAS VIGENTES

Normas internacionales aplicables	:	ASTMC-494
Normas nacionales aplicables	:	Ley N° 28256
Marca en etiqueta	:	Código NFPA

SECCION 16: OTRAS INFORMACIONES

El formato de esta hoja de seguridad cumple con ley N° 28256, Ley que regula el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos.
 La información contenida se entrega de buena fe y voluntariamente. ULMEN S.A. no se hace responsable por el buen o mal uso de esta información. Considerando que el uso de esta información y de los productos está fuera del control del proveedor, ULMEN S.A. no asume responsabilidad alguna por este concepto. Las condiciones de uso seguro del producto es obligación del usuario.



We create chemistry

MasterLife SF 100

Antes RHEOMAC SF100

Aditivo mineral, microsilice compactada

USOS RECOMENDADOS

- Estructuras de concreto reforzado con acero o aplicaciones de shotcrete vía húmeda expuestas a sales para deshielo o del aire
- Estructuras de estacionamiento, puentes, estructuras marinas, minas y túneles
- Cualquier proyecto de construcción que requiera la protección que da un concreto altamente durable y de baja permeabilidad
- Proyectos que requieran un concreto de alta resistencia/ alto desempeño para reducir el tamaño del elemento, incrementar la longitud del tramo, mejorar los costos estructurales y cumplir otros requerimientos estructurales de alto desempeño.

DESCRIPCION

MasterLife SF100 es un aditivo mineral de microsilice compactada en polvo formulado para producir concreto o mortero extremadamente fuerte y durable con características especiales de desempeño. Maximiza la vida de uso del concreto proporcionando una resistencia superior al ataque de elementos ambientales dañinos.

VENTAJAS

Cumple con los requerimientos de la especificación ASTM C 1240 "Especificación Estándar para Microsilice usada en Concreto y Mortero para Cemento Hidráulico"

- Mayor cohesividad
- Menor exudación
- Mayor vida útil
- Mayor resistencia y módulo de elasticidad
- Menor permeabilidad que permite una mayor durabilidad
- Mejor resistencia a la reactividad de sílice alcalina

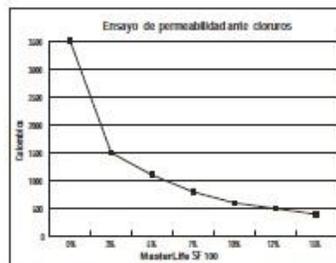
Permeabilidad

MasterLife SF 100 es un material de microllenado que físicamente llena los espacios entre las partículas de cemento; disminuye dramáticamente la permeabilidad y reduce el tamaño y número de capilares que permiten la entrada de contaminantes a la matriz.

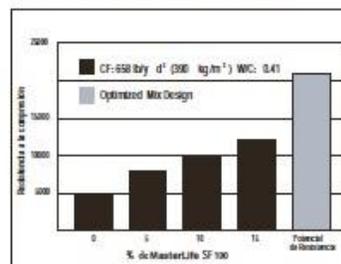
Resistencia a la Compresión

Siendo una pozolana, la microsilice MasterLife SF 100 reacciona químicamente dentro de la matriz cementicia para incrementar la cantidad del silicato de calcio hidratado (gel CSH) que se forma. El gel de CSH es el agente adherente que mantiene unida la matriz de una mezcla cementicia en su estado endurecido. El gel adicional de CSH incrementa la resistencia y disminuye la permeabilidad.

Permeabilidad rápida ante cloruros



Ensayo sobre resistencia a la compresión típica





We create chemistry

MasterLife SF 100

Antes RHEOMAC SF100

Gravedadespecífica

MasterLife SF 100 tiene una gravedad específica de 2.2

APLICACION

Dosificación

Se recomienda usar MasterLife SF100 para aplicaciones de concreto o concreto lanzado vía húmeda en un rango de dosificación de 5.0 a 15% por peso de material cementicio.

Mezclado

Para el concreto y shotcrete por vía húmeda, MasterLife SF100 se dosifica y adiciona en la planta productora de cemento en forma similar al cemento u otros materiales cementicios como son las cenizas voladoras. Puede adicionarse a una mezcladora central o del camión. Siga el procedimiento indicado en la especificación ASTM C 94, Especificación Estándar para Concreto Premezclado o haga referencia a la Guía del Usuario para Concretos con MasterLife SF 100 para instrucciones especiales de dosificación y mezclado.

RECOMENDACIONES

Corrosividad

No contiene Cloruros, No Corrosivo

El aditivo de microsilíce MasterLife SF100 no iniciará o promoverá la corrosión del acero reforzado embebido en el concreto o mortero. Ni el cloruro de calcio ni otros ingredientes con cloruros son usados en la manufactura de MasterLife SF 100.

Compatibilidad

MasterLife SF100 puede usarse con los cementos Pórtland aprobados de conformidad con las especificaciones ASTM, AASHTO o CRD. Es compatible con la mayoría de los aditivos para concreto, incluyendo todos los aditivos de BASF Construction Chemicals. Se recomienda usar MasterLife SF100 con aditivos reductores de agua de alto rango como GLENIUM® 3000 NS para obtener una máxima manejabilidad a la vez de mantener una baja relación agua: materiales cementicios.

ALMACENAMIENTO

MasterLife SF100 tiene una vida útil de 24 meses como mínimo. Dependiendo de las condiciones de almacenamiento, la vida útil puede ser mayor. El material envasado puede almacenarse indefinidamente en un área seca.

MasterLife SF100 se almacena, maneja y surte en forma similar al cemento o cenizas voladoras. Puede almacenarse en silos cuando está a granel. Consulte la Guía del Usuario de Concreto con Microsilíce MasterLife SF 100 cuando requiera información sobre el ajuste adecuado para el bombeo y manejo de microsilíce dentro de los silos.

EMPAQUE

MasterLife SF100 se suministra en sacos triturables de 11.6 kg (25 lb), super sacos de 907 kg (2000 lb) o a granel.

SEGURIDAD

Consulte la Hoja de Datos de Seguridad (MSDS) para este producto.

Para información adicional sobre este producto, consulte a su representante local de BASF Construction Chemicals.



We create chemistry

MasterLife SF 100

Antes RHEOMAC SF100

Contacto

BASF Química Colombia S.A.
Calle 99 # 69C – 32
Bogotá, D.C. Colombia
Tel: +57 1 632 20 99
www.basf-cc.com.co

BASF SA
Avenida das Nações Unidas,
14.171, Morumbi
04794-000 Sao Paulo – SP, Brasil
Tel: +55 11 2718 5507
www.basf-cc.com.br

BASF Venezolana S.A.
Edif. Torreón, Piso 4, Of. 4B
Av. Veracruz con calle la Guairita,
Urb. Las Mercedes, Caracas,
Venezuela Tel: + 58 212 958 6711
www.basf-cc.com.ve

**BASF Construction Chemicals
Ltda.**
Rio Palena 9665
Núcleo Empresarial ENEA
Santiago de Chile, Chile
Tel: +56-2 2799 4300
www.basf-cc.cl/

BASF Ecuatoriana S.A.
Av. Naciones Unidas 1014
y Av. Amazonas Edif. La Previsora
Torre A Piso 2, Quito, Ecuador
Tel: + 593 2397 9500
www.basf-cc.com.ec

**BASF Construction Chemicals
Perú S.A.**
Jr. Plácido Jiménez N° 630
Lima 1, Perú
Tel: +51-1 219 0630
www.basf-cc.com.pe

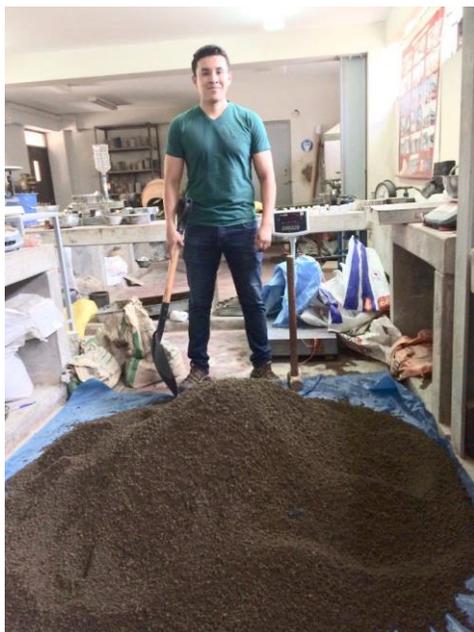
ANEXO B:
PANEL FOTOGRAFICO



Cantera de Puzolana Natural “Racchi”, San Pedro - Canchis - Cuzco – Perú.



Cantera de Puzolana Natural “Racchi”, San Pedro - Canchis - Cuzco – Perú.



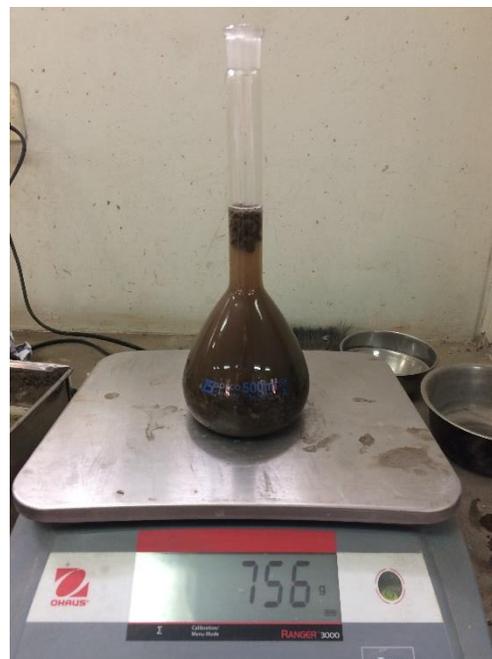
Puzolana natural en el laboratorio de materiales.



1^{ra} tanda de rocas menores, separadas de las más grandes. Inicio de trituración.



Primeros ensayos de caracterización de la Puzolana



Primer ensayo de Peso específico y absorción.



Secado en el Horno de control 115 ± 5 °C.
Diversos ensayos.



Peso específico y absorción del agregado grueso de peso normal.



Peso específico y absorción del agregado grueso de peso normal.



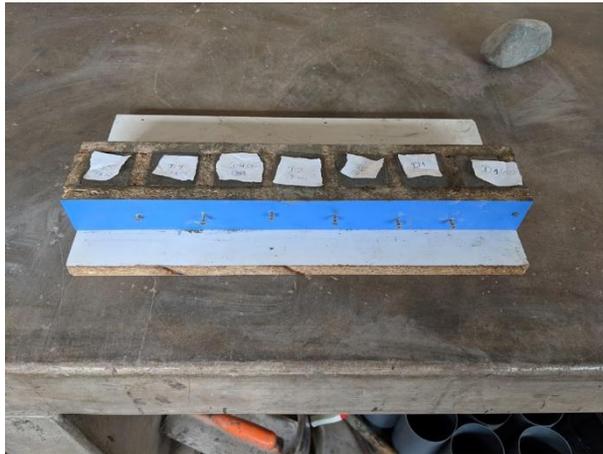
Rotura de probetas de comparación de cementos máquina de ensayo a compresión.



Encofrado fabricado para las probetas **cúbicas**.



Separación del agregado puzolánico para cada uno de los diseños de concreto.



Dados de concreto de los diseños preliminares.



Primera rotura de los dados de concreto en la máquina de compresión.



Inicio de los trabajos de separación de agregado puzolánico por **sus tamaño** de tamices, en diferentes costales.



Separación inicial para la producción de los concretos preliminares.



Proceso de optimización de concretos preliminares.



Proceso para hallar el máximo Peso Unitario Compactado entre el agregado fino y grueso.



Microsilice y cemento para un dado de concreto.



Mezcla de los materiales de 'dado por dado'.



Dados para medición y ensayo. Proceso de optimización de concretos preliminares.



Rotura de un dado de concreto.



Tamizado y separación de fragmentos. Para las probetas de concretos optimizados.



Trituración, tamizado y separación de fragmentos, para los diseños optimizados.



Dispersión de los finos luego del tamizado para su clasificación por tamaños.



Separación de los fragmentos de puzolana natural por su tamaño (por mallas).



Consistencia de la puzolana natural en su estado saturado superficialmente seco.



Replanteo de ensayo de Peso específico y Absorción de la puzolana.



Saturación de la puzolana previa a la mezcla de los materiales.



Materiales pesados antes de la mezcla.



Mezcla del concreto.



Mezcla del concreto y buggy receptor de la mezcla.



Ensayo de consistencia, flujo de asentamiento.



Medición del flujo de asentamiento.



Medición del flujo de asentamiento.



Olla Washington para el ensayo de contenido de aire.



Ensayo de densidad aparente del concreto (peso unitario fresco).



Ensayo de densidad aparente del concreto (peso unitario fresco).



Medida de la temperatura.



Tanda de vaciado en probetas.



Peso de la probeta luego de ser desencofrada.



Algunas probetas fueron refrentadas con azufre (cabeceo).



Encofrados cilíndricos fabricados con las características reglamentadas. Preferibles por su regularidad, practicidad y calzaban correctamente con las almohadillas de Neopreno.



Vaciado del concreto en una viga



Curado de probetas y retiro de las que serán ensayadas.



Tanda de vaciado de concreto en vigas y probetas.



Desenfofrado de probetas con aire a presión.



Rotura de la probeta de concreto en la máquina de Ensayo a compresión.



Diferentes tipos de rotura en el ensayo de resistencia a compresión de los especímenes cilíndricos.



Medición de las dimensiones de las probetas antes de la rotura.



Ensayo de resistencia a la Tracción por compresión diametral.



Briquetas rotas luego del ensayo de resistencia a la Tracción.



Peso de probetas aun húmedas, retiradas de la poza de curado.



Probetas de concreto para el ensayo de densidad de equilibrio y densidad seca.



Medición del peso sumergido de las probetas de concreto. Ensayos de densidades.



Probetas de concreto luego de 3 días de secado al horno. Ensayos de densidades.



Vigas retiradas de la poza de curado.



Vigas marcadas en los apoyos y los tercios donde se aplicaran las cargas para los ensayos de resistencia a Flexión.



Ensayo de resistencia a flexión de Vigas, medición del módulo de rotura.



Todas las vigas fallaron en el tercio medio de su luz. Ensayo de resistencia a Flexión.