

Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE CONCRETO ESTRUCTURAL LIGERO
UTILIZANDO PUZOLANA NATURAL COMO AGREGADO FINO DE LA CANTERA
RAQCHI, CUZCO - 2018”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

QUISPE MEZA EMANUEL SMITH JORDY

ASESOR:

Dr. TELLO MALPARTIDA OMART DEMETRIO

JURADO:

Dr. CANCHO ZÚÑIGA GERARDO ENRIQUE

Ms. GARCIA URRUTIA OLAVARRÍA ROQUE JESÚS LEONARDO

Ms. TABORY MALPARTIDA GUSTAVO AUGUSTO

LIMA – PERÚ

2019

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado una familia maravillosa y por guiar mi camino siempre; a mis padres por ser el motor que me impulsan a ser mejor cada día, y por su apoyo y cariño incondicional a lo largo de estos años; A mis hermanos por estar siempre conmigo, por su apoyo y cariño incondicional y a todos los colaboradores que ayudaron con su granito de arena para el desarrollo de esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Rosa Ysabel Meza Pineda y Timoteo Quispe Reyes, por sus consejos, por darme el cariño, confianza y fuerza para desarrollar esta investigación, que sin ellos no hubiera sido posible. A mis hermanos Ysabel, Kevin y Jhoana por estar siempre conmigo y por brindarme su cariño incondicional. A mis familiares en general, por haber aportado con su cariño y apoyo para el desarrollo de esta investigación.

A mi asesor, el Dr. Ing. Omart Demetrio Tello Malpartida, por haber tenido la paciencia y el entusiasmo de transmitirme sus conocimientos, por ser un claro ejemplo de profesional a seguir, le dedico esta investigación con mucho cariño, respeto y admiración.

A mi querida Universidad Nacional Federico Villarreal, en específico a la Facultad de Ingeniería Civil, por ser mi alma mater, por forjarme en el profesional que hoy en día soy, por haberme dado la oportunidad de conocer a maravillosas personas y por todas las enseñanzas aprendidas en los 5 años de mi etapa universitaria, por parte de las Autoridades, Alumnos, Docentes, Personal administrativo y Personal de seguridad, les dedico esta investigación con mucho cariño, respeto y gratitud.

A mis colaboradores que aportaron con su granito de arena a lo largo de toda esta investigación, Sr. Fredy Villanueva, técnico de laboratorio de materiales, por su asistencia y colaboración con los ensayos realizados; a la empresa Ulmen, por la donación de aditivo W73, el cual se agradece el espíritu de colaboración con las investigaciones en el Perú; a mi colega José Bravo por la recolección, traslado y envío de la puzolana natural de la Cantera Raqchi y por su apoyo en general; a mi colega Diego Minaya por compartir sus experiencias con el concreto y a todos mis compañeros de Universidad y colegas que brindaron con su apoyo físico e intelectual para la culminación de esta investigación.

INDICE

| | |
|---|-----|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| RESUMEN..... | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| CAPÍTULO I..... | 3 |
| I. Introducción | 3 |
| 1.1 Descripción y formulación del problema | 4 |
| 1.1.1 Descripción del problema..... | 4 |
| 1.1.2 Formulación del problema | 6 |
| 1.2 Antecedentes..... | 7 |
| 1.2.1 Desde cuando existe o se conoce el problema | 7 |
| 1.2.2 Estudios o investigaciones anteriores..... | 10 |
| 1.3 Objetivos..... | 35 |
| 1.3.1 Objetivo General | 35 |
| 1.3.2 Objetivos específicos..... | 35 |
| 1.4 Justificación | 35 |
| 1.4.1 Justificación Teórica | 35 |
| 1.4.2 Justificación práctica | 36 |

| | | |
|-------------------|--|----|
| 1.4.3 | Justificación metodológica..... | 37 |
| 1.4.4 | Justificación social | 38 |
| 1.4.5 | Limitaciones de la investigación..... | 38 |
| 1.5 | Hipótesis..... | 41 |
| 1.5.1 | Hipótesis principal..... | 41 |
| 1.5.2 | Hipótesis secundarias | 41 |
| CAPÍTULO II | | 42 |
| II. | Marco Teórico..... | 42 |
| 2.1 | Bases teóricas sobre el tema de investigación | 42 |
| 2.1.1 | Definición del concreto estructural ligero..... | 42 |
| 2.1.2 | Ventajas y desventajas del uso de concreto estructural ligero | 42 |
| 2.1.3 | Clasificación del concreto ligero..... | 43 |
| 2.1.4 | Métodos de obtención del concreto ligero | 44 |
| 2.1.5 | Propiedades en estado fresco del concreto | 48 |
| 2.1.6 | Propiedades en estado endurecido del concreto..... | 52 |
| 2.1.7 | Diseño de mezclas del concreto | 58 |
| 2.1.8 | Agregados ligeros utilizados en las mezclas de concreto ligero | 75 |
| 2.1.9 | Microestructura del concreto..... | 86 |
| 2.1.10 | Fabricación del concreto estructural ligero | 96 |
| 2.1.11 | Transporte, colocación y curado..... | 98 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO III..... | 100 |
| III. Método | 100 |
| 3.1 Tipo de investigación..... | 100 |
| 3.2 Ámbito temporal y espacial..... | 100 |
| 3.3 Variables..... | 101 |
| 3.3.1 Variable dependiente..... | 101 |
| 3.3.2 Variable independiente..... | 102 |
| 3.3.3 Operacionalización de variables..... | 103 |
| 3.4 Población y muestra..... | 104 |
| 3.4.1 Unidad de estudio..... | 104 |
| 3.4.2 Población..... | 104 |
| 3.4.3 Muestra..... | 104 |
| 3.5 Instrumentos | 105 |
| 3.5.1 Instrumentos metodológicos o de recolección de datos | 105 |
| 3.5.2 Instrumentos de ingeniería | 106 |
| 3.5.3 Técnicas de investigación..... | 112 |
| 3.5.4 Validación de los instrumentos | 113 |
| 3.6 Procedimientos | 113 |
| 3.6.1 Diseño de Ingeniería..... | 113 |
| 3.6.2 Procedimientos de recolección de datos..... | 115 |

| | | |
|-------------------|--|-----|
| 3.6.3 | Procesamiento de datos | 169 |
| 3.7 | Análisis de datos | 169 |
| CAPÍTULO IV | | 171 |
| IV. | Resultados | 171 |
| 4.1 | Caracterización de los materiales | 171 |
| 4.1.1 | Granulometría del agregado fino (arena gruesa)..... | 171 |
| 4.1.2 | Granulometría del agregado grueso | 173 |
| 4.1.3 | Granulometría del agregado fino ligero (Puzolana natural)..... | 175 |
| 4.1.4 | Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa) | 178 |
| 4.1.5 | Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso..... | 178 |
| 4.1.6 | Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero (puzolana natural)..... | 179 |
| 4.1.7 | Contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa)..... | 180 |
| 4.1.8 | Contenido de humedad del agregado grueso..... | 180 |
| 4.1.9 | Contenido de humedad del agregado fino ligero (puzolana natural) | 181 |
| 4.1.10 | Peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa) | 182 |
| 4.1.11 | Peso específico y absorción del agregado grueso..... | 183 |
| 4.1.12 | Peso específico y absorción del agregado fino ligero (Puzolana natural) | 183 |
| 4.1.13 | Peso unitario del agregado fino (Arena natural)..... | 185 |
| 4.1.14 | Peso unitario del agregado grueso | 185 |
| 4.1.15 | Peso unitario del agregado fino ligero (Puzolana natural) | 186 |

| | | |
|--------------------|--|-----|
| 4.2 | Diseños de mezcla | 188 |
| 4.2.1 | Diseño N° 01 de concreto estructural ligero | 188 |
| 4.2.2 | Diseño N° 02 de concreto estructural ligero | 188 |
| 4.2.3 | Diseño N° 01 de concreto patrón de control | 189 |
| 4.2.4 | Diseño N° 02 de concreto patrón de control | 189 |
| 4.3 | Ensayos del concreto en estado fresco | 190 |
| 4.3.1 | Asentamiento del concreto | 190 |
| 4.3.2 | Temperatura del concreto..... | 190 |
| 4.3.3 | Peso unitario del concreto | 191 |
| 4.4 | Ensayos de concreto en estado endurecido..... | 193 |
| 4.4.1 | Resistencia a compresión | 193 |
| 4.4.2 | Resistencia a la tracción indirecta del concreto | 196 |
| 4.4.3 | Resistencia a la flexión del concreto..... | 198 |
| 4.4.4 | Densidad en equilibrio del concreto..... | 200 |
| CAPÍTULO V | | 203 |
| V. | Discusión de resultados | 203 |
| CAPÍTULO VI..... | | 223 |
| VI. | CONCLUSIONES | 223 |
| CAPÍTULO VII | | 226 |
| VII. | RECOMENDACIONES | 226 |

| | |
|-------------------------|-----|
| CAPÍTULO VIII | 228 |
| VIII. REFERENCIAS | 228 |
| CAPÍTULO IX..... | 238 |
| IX. ANEXOS..... | 238 |

INDICE DE TABLAS

| | | |
|----------|---|----|
| Tabla 1 | Propiedades físicas de los agregados ligeros | 11 |
| Tabla 2 | Propiedades volumétricas del concreto ligero | 12 |
| Tabla 3 | Resumen de resistencia a compresión a través del tiempo | 12 |
| Tabla 4 | Peso específico y absorción de los agregados..... | 14 |
| Tabla 5 | Densidad seca al horno | 15 |
| Tabla 6 | Densidad de equilibrio | 15 |
| Tabla 7 | Resistencia a la compresión promedio..... | 16 |
| Tabla 8 | Resumen de propiedades físicas de los agregados volcánicos tipo I y tipo II | 18 |
| Tabla 9 | Resistencias alcanzadas..... | 18 |
| Tabla 10 | Composición química de las puzolanas de la cantera Ccocha (Raqchi) | 22 |
| Tabla 11 | Características físicas de los agregados | 23 |
| Tabla 12 | Resumen de resistencia a la compresión de concreto elaborado con piedra pómez grande..... | 24 |
| Tabla 13 | Resumen de resistencia a la compresión de concreto elaborado con piedra pómez media..... | 24 |
| Tabla 14 | Dosificación utilizada en el concreto del puente Benecia-Martinez..... | 25 |
| Tabla 15 | Resultados del concreto utilizado en el puente Benecia-Martinez | 26 |
| Tabla 16 | Propiedades de los agregados utilizados en el concreto | 27 |
| Tabla 17 | Resumen de resultados de densidad y resistencia a la compresión del concreto ligero | 28 |
| Tabla 18 | Propiedades de los agregados utilizados en el concreto | 29 |
| Tabla 19 | Resultado de los ensayos realizados a las mezclas de concreto..... | 30 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 20 Diseños de mezcla del concreto ligero..... | 33 |
| Tabla 21 Resumen de resultados de los ensayos realizados al concreto en condiciones de curado húmedo y seco..... | 34 |
| Tabla 22 Clasificación del concreto ligero según su densidad | 44 |
| Tabla 23 Clases de mezcla según su asentamiento | 50 |
| Tabla 24 Relación de la resistencia a la compresión y el peso volumétrico en concretos ligeros | 53 |
| Tabla 25 Factor de incremento de la desviación estándar..... | 63 |
| Tabla 26 Tabla para el cálculo del f'_{cr} | 64 |
| Tabla 27 Asentamiento recomendados para diversos tipos de estructuras | 65 |
| Tabla 28 Requerimientos aproximados de agua de mezclado y de contenido de aire | 67 |
| Tabla 29 Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto | 68 |
| Tabla 30 Requisitos para condiciones especiales de exposición | 69 |
| Tabla 31 Volumen del agregado grueso por unidad de volumen de concreto | 70 |
| Tabla 32 Módulo de fineza de la combinación de agregados | 73 |
| Tabla 33 Composición química de las puzolanas | 80 |
| Tabla 34 Composición química de las puzolanas de la cantera Raqchi..... | 80 |
| Tabla 35 Canteras de puzolana en el Perú por regiones, año 2004..... | 86 |
| Tabla 36 Operacionalización de variables | 103 |
| Tabla 37 Tamaño de la muestra de la investigación | 105 |
| Tabla 38 Diseño de Ingeniería | 114 |
| Tabla 39. Límites granulométricos del agregado fino | 117 |
| Tabla 40 Masa de muestra mínima de ensayo de Tamizado para agregados ligeros finos... | 120 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 41. Requisitos granulométricos de agregados ligeros para concreto estructural | 121 |
| Tabla 42 Diseños iniciales a realizar en la investigación..... | 137 |
| Tabla 43 Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 60% - piedra 40% | 138 |
| Tabla 44 Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 78% - piedra 22% | 140 |
| Tabla 45 Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.40$; contenido de cemento = 667.32 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 84% - piedra 16% | 143 |
| Tabla 46 Porcentajes en función de volumen del diseño de mezcla con relación $a/c = 0.4$; contenido de cemento = 667.32 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 84 % - piedra 16%. 143 | |
| Tabla 47 Resumen de características físicas de los agregados..... | 145 |
| Tabla 48 Cantidad aproximada de contenido de aire | 146 |
| Tabla 49 Resumen del volumen de materiales obtenidos | 147 |
| Tabla 50 Resumen del diseño de mezcla sin corregir | 148 |
| Tabla 51 Diseño N° 01 de concreto estructural ligero | 149 |
| Tabla 52 Resumen de características físicas de los agregados..... | 149 |
| Tabla 53 Resumen del volumen de materiales obtenidos | 150 |
| Tabla 54 Resumen del diseño de mezcla sin corregir | 151 |
| Tabla 55 Diseño N° 02 de concreto estructural ligero | 152 |
| Tabla 56 Resumen de características físicas de los agregados..... | 152 |
| Tabla 57 Resumen del volumen de materiales obtenidos | 153 |
| Tabla 58 Resumen del diseño de mezcla sin corregir | 154 |
| Tabla 59 Diseño N° 01 de concreto patrón de control | 155 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 60 Resumen de características físicas de los agregados..... | 155 |
| Tabla 61 Resumen del volumen de materiales obtenidos | 156 |
| Tabla 62 Resumen del diseño de mezcla sin corregir | 157 |
| Tabla 63 Diseño N° 02 de concreto patrón de control | 158 |
| Tabla 64. Granulometría del agregado fino- Muestra 01 | 171 |
| Tabla 65. Granulometría del agregado fino - Muestra 02..... | 172 |
| Tabla 66. Granulometría del agregado grueso- Muestra 01 | 173 |
| Tabla 67. Granulometría del agregado grueso - Muestra 02..... | 174 |
| Tabla 68 Granulometría del agregado fino ligero - Muestra 01..... | 176 |
| Tabla 69 Granulometría del agregado fino ligero - Muestra 02..... | 177 |
| Tabla 70 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino - Muestra 01..... | 178 |
| Tabla 71 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino - Muestra 02..... | 178 |
| Tabla 72 Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso - Muestra 01 | 178 |
| Tabla 73 Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso - Muestra 02 | 179 |
| Tabla 74 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero - Muestra 01 | 179 |
| Tabla 75 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero - Muestra 02 | 179 |
| Tabla 76 Contenido de humedad del agregado fino - Muestra 01 | 180 |
| Tabla 77 Contenido de humedad del agregado fino - Muestra 02 | 180 |
| Tabla 78 Contenido de humedad del agregado grueso - Muestra 01 | 181 |
| Tabla 79 Contenido de humedad del agregado grueso - Muestra 02..... | 181 |
| Tabla 80 Contenido de humedad del agregado fino ligero - Muestra 01 | 181 |
| Tabla 81 Contenido de humedad del agregado fino ligero - Muestra 02..... | 181 |
| Tabla 82 Peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa)..... | 182 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tabla 83 | Peso específico y absorción del agregado grueso | 183 |
| Tabla 84 | Peso específico y absorción del agregado fino ligero (puzolana natural)..... | 184 |
| Tabla 85 | Peso unitario suelto del agregado fino (Arena gruesa) | 185 |
| Tabla 86 | Peso unitario compactado del agregado fino (Arena gruesa)..... | 185 |
| Tabla 87 | Peso unitario suelto del agregado grueso | 186 |
| Tabla 88 | Peso unitario compactado del agregado grueso | 186 |
| Tabla 89 | Peso unitario suelto del agregado fino ligero (puzolana natural)..... | 187 |
| Tabla 90 | Peso unitario compactado del agregado fino ligero (puzolana natural)..... | 187 |
| Tabla 91 | Requisitos de máxima densidad aparente seca suelta de agregados ligeros para concreto estructural | 187 |
| Tabla 92 | Resumen de la caracterización de los materiales | 188 |
| Tabla 93 | Diseño N° 01 de concreto estructural ligero | 188 |
| Tabla 94 | Diseño N° 02 de concreto estructural ligero | 189 |
| Tabla 95 | Diseño N° 01 de concreto patrón de control | 189 |
| Tabla 96 | Diseño N° 02 de concreto patrón de control | 190 |
| Tabla 97 | Asentamiento del concreto..... | 190 |
| Tabla 98 | Temperatura del concreto..... | 191 |
| Tabla 99 | Temperatura promedio y gradiente térmica | 191 |
| Tabla 100 | Peso unitario del diseño N° 01 de concreto estructural ligero | 191 |
| Tabla 101 | Peso unitario del diseño N° 01 de concreto patrón de control | 192 |
| Tabla 102 | Peso unitario del diseño N° 02 de concreto estructural ligero | 192 |
| Tabla 103 | Peso unitario del diseño N° 02 de concreto patrón de control | 192 |
| Tabla 104 | Peso unitario y rendimiento del concreto..... | 193 |

| | |
|--|-----|
| Tabla 105 Resistencia a compresión a 3 días de ensayo | 193 |
| Tabla 106 Resistencia a compresión a 7 días de ensayo | 194 |
| Tabla 107 Resistencia a compresión a 14 días de ensayo | 194 |
| Tabla 108 Resistencia a compresión a 28 días de ensayo | 195 |
| Tabla 109 Resistencia a compresión del concreto | 195 |
| Tabla 110 Porcentaje de resistencia a la compresión alcanzada en función de su diseño patrón de control..... | 196 |
| Tabla 111 Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°01 de concreto estructural ligero | 196 |
| Tabla 112 Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°01 de concreto patrón de control | 197 |
| Tabla 113 Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°02 de concreto estructural ligero | 197 |
| Tabla 114 Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°02 de concreto patrón de control | 197 |
| Tabla 115 Resistencia a la tracción indirecta del concreto | 198 |
| Tabla 116 Resistencia a la flexión del diseño N°01 de concreto estructural ligero | 198 |
| Tabla 117 Resistencia a la flexión del diseño N°01 de concreto patrón de control..... | 199 |
| Tabla 118 Resistencia a la flexión del diseño N°02 de concreto estructural ligero | 199 |
| Tabla 119 Resistencia a la flexión del diseño N°02 de concreto patrón de control..... | 199 |
| Tabla 120 Resistencia a la flexión alcanzada por el concreto..... | 200 |
| Tabla 121 Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 01 de concreto estructural ligero | 200 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 122 Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 01 de concreto patrón de control | 201 |
| Tabla 123 Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 02 de concreto estructural ligero | 201 |
| Tabla 124 Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 02 de concreto patrón de control | 202 |
| Tabla 125 Densidad en estado seco y en equilibrio del concreto..... | 202 |

INDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1. Curva de Distribución Normal de Frecuencias..... | 62 |
| <i>Figura 2.</i> Modelos de interfaz que varían entre sí. | 89 |
| <i>Figura 3.</i> Efecto de la fuerza de adherencia pasta-agregado en la resistencia a compresión (σ_c) y flexión (σ_f). | 90 |
| <i>Figura 4.</i> Representación esquemática de la hemorragia en concreto recién colocado..... | 91 |
| <i>Figura 5.</i> Diagrama esquemático que representa la reducción del tamaño y la porosidad de la zona de transición mediante la adición de material puzolánico..... | 92 |
| <i>Figura 6.</i> Microestructura de la zona interfacial entre el agregado Liapor™ 8 y la pasta de cemento (200x)..... | 93 |
| <i>Figura 7.</i> Puzolana natural en la Cantera Raqchi (Cuzco)..... | 115 |
| <i>Figura 8.</i> Extracción de puzolana natural de la Cantera Raqchi (Cuzco)..... | 115 |
| <i>Figura 9.</i> Trituración de la puzolana natural | 116 |
| <i>Figura 10.</i> Tamizado por la malla 3/8" de la puzolana natural..... | 117 |
| <i>Figura 11.</i> Granulometría del agregado fino (Arena gruesa) | 118 |
| <i>Figura 12.</i> Granulometría del agregado grueso | 120 |
| <i>Figura 13.</i> Granulometría del agregado fino ligero | 121 |
| <i>Figura 14.</i> Ensayo del material pasante la malla N°200 del agregado fino (Arena gruesa).. | 123 |
| <i>Figura 15.</i> Ensayo del material pasante la malla N°200 del agregado grueso | 123 |
| <i>Figura 16.</i> Ensayo del material pasante la malla N°200 del agregado fino ligero (Puzolana natural) | 124 |
| <i>Figura 17.</i> Ensayo de peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa) | 128 |
| <i>Figura 18.</i> Ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso..... | 130 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 19.</i> Peso específico del agregado fino ligero (Puzolana natural) | 132 |
| <i>Figura 20.</i> Ensayo de peso unitario suelto del agregado fino (Arena gruesa) | 134 |
| <i>Figura 21.</i> Ensayo de peso unitario compactado del agregado fino (Arena gruesa). | 134 |
| <i>Figura 22.</i> Ensayo de peso unitario suelto y compactado del agregado grueso | 135 |
| <i>Figura 23.</i> Ensayo de peso unitario suelto y compactado del agregado fino ligero (puzolana natural) | 136 |
| <i>Figura 24.</i> Probetas del diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 60% - piedra 40% | 138 |
| <i>Figura 25.</i> Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 63.5% - piedra 36.5% | 139 |
| <i>Figura 26.</i> Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 78% - piedra 22% | 140 |
| <i>Figura 27.</i> A la izquierda una probeta con contenido de cemento de 450, al centro una con 475 kg/m ³ y a la derecha una con 570 kg/m ³ | 141 |
| <i>Figura 28.</i> Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.55$; contenido de cemento = 500 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 84% - piedra 16%. | 142 |
| <i>Figura 29.</i> Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.40$; contenido de cemento = 667.32 kg/m ³ y un porcentaje de puzolana de 84% - piedra 16% | 143 |
| <i>Figura 30.</i> Preparación de las mezclas de concreto. | 159 |
| <i>Figura 31.</i> Asentamiento del concreto | 160 |
| <i>Figura 32.</i> Temperatura del concreto | 161 |
| <i>Figura 33.</i> Peso unitario del concreto | 162 |
| <i>Figura 34.</i> Resistencia a la compresión del concreto | 163 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 35.</i> Resistencia a la tracción indirecta del concreto | 165 |
| <i>Figura 36.</i> Resistencia a la flexión del concreto | 167 |
| <i>Figura 37.</i> Densidad en estado seco y densidad de equilibrio del concreto | 169 |
| <i>Figura 38.</i> Curva granulométrica del agregado fino - Muestra 01 | 172 |
| <i>Figura 39.</i> Curva granulométrica del agregado fino - Muestra 02 | 173 |
| <i>Figura 40.</i> Curva granulométrica del agregado grueso - Muestra 01 | 174 |
| <i>Figura 41.</i> Curva granulométrica del agregado grueso - Muestra 02 | 175 |
| <i>Figura 42.</i> Curva granulométrica del agregado fino ligero - Muestra 01 | 176 |
| <i>Figura 43.</i> Curva granulométrica del agregado fino ligero - Muestra 02 | 177 |
| <i>Figura 44.</i> Porcentaje de material que pasa la malla N° 200 de los agregados | 204 |
| <i>Figura 45.</i> Contenido de humedad de los agregados | 205 |
| <i>Figura 46.</i> Peso específico de los agregados | 206 |
| <i>Figura 47.</i> Absorción de los agregados | 207 |
| <i>Figura 48.</i> Peso unitario suelto y compactado de los agregados | 208 |
| <i>Figura 49.</i> Porcentaje en volumen de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero.. | 209 |
| <i>Figura 50.</i> Asentamiento de los diseños de mezcla de concreto. | 210 |
| <i>Figura 51.</i> Porcentaje de aditivo utilizado en los diseños de mezcla del concreto | 211 |
| <i>Figura 52.</i> Temperatura del concreto y temperatura de ambiente | 212 |
| <i>Figura 53.</i> Porcentaje de P.U del Concreto estructural ligero, en función de sus diseños de concreto patrón..... | 213 |
| <i>Figura 54.</i> Peso unitario teórico y real de los diseños de mezcla del concreto | 215 |
| <i>Figura 55.</i> Evolución de la resistencia a la compresión del concreto..... | 216 |

| | |
|---|-----|
| <i>Figura 56.</i> Porcentaje de resistencia a la tracción del C.E.L en función del concreto patrón de control. | 219 |
| <i>Figura 57.</i> Porcentaje de resistencia a la flexión del C.E.L en función del concreto patrón de control | 221 |
| <i>Figura 58.</i> Porcentaje de la densidad en equilibrio de los C.E.L respecto a sus diseños de control. | 222 |
| <i>Figura 59.</i> Recolección de la puzolana natural de la cantera Raqchi | 243 |
| <i>Figura 60.</i> Tamizado, trituración y secado de la puzolana natural de la cantera Raqchi | 243 |
| <i>Figura 61.</i> Muestra final de puzolana natural de la cantera Raqchi (Cuzco) | 244 |
| <i>Figura 62.</i> Caracterización del agregado fino convencional (arena gruesa | 244 |
| <i>Figura 63.</i> Caracterización del agregado grueso | 245 |
| <i>Figura 64.</i> Caracterización del agregado fino ligero (puzolana natural) | 245 |
| <i>Figura 65.</i> Elaboración de probetas de plástico cumpliendo las normativas correspondientes. | 246 |
| <i>Figura 66.</i> Elaboración de los diseños de mezcla del concreto. | 246 |
| <i>Figura 67.</i> Conformación de probetas y vigas de concreto | 247 |
| <i>Figura 68.</i> Desencofrado y curado de probetas y vigas de concreto | 247 |
| <i>Figura 69.</i> A la izquierda, asentamiento del C.E.L N°01 y a la derecha el asentamiento de su diseño de control | 248 |
| <i>Figura 70.</i> A la izquierda, asentamiento del C.E.L N° 02 y a la derecha el asentamiento de su diseño de control. | 248 |
| <i>Figura 71.</i> A la izquierda, temperatura del diseño N°01 de C.E.L y a la derecha de su diseño de control. | 249 |

| | |
|--|-----|
| <i>Figura 72.</i> A la izquierda, temperatura del diseño N°02 de C.E.L y a la derecha de su diseño de control. | 249 |
| <i>Figura 73.</i> Peso Unitario del concreto. | 250 |
| <i>Figura 74.</i> Resistencia a la compresión del concreto. | 251 |
| <i>Figura 75.</i> Rotura de probetas del concreto..... | 251 |
| <i>Figura 76.</i> Resistencia a la tracción indirecta de los diseños de mezcla | 252 |
| <i>Figura 77.</i> Probetas ensayadas a la resistencia a la tracción indirecta, se observa homogeneidad en las mezclas..... | 252 |
| <i>Figura 78.</i> Resistencia a la flexión de los diseños realizados..... | 253 |
| <i>Figura 79.</i> Densidad en estado seco y en equilibrio de los diseños realizados..... | 254 |

RESUMEN

El trabajo tiene como objetivo, evaluar el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi, Cuzco -2018. Se utilizó a la puzolana con el fin de reducir la densidad del concreto, adicionalmente se utilizó piedra, agua, cemento Sol tipo I y aditivo Ulmen W73, quien fue el encargado de dar la consistencia deseada a la mezcla. El método utilizado, estuvo basado en sucesiones iterativas de mezclas, las cuales se explican en esta investigación. Se logró encontrar dos diseños de concreto estructural ligero, denominados C.E.L N°01 y C.E.L N°02.

Los diseños N° 01 y 02 de C.E.L obtuvieron consistencia entre 3 a 5 pulgadas y entre 1 a 2 pulgadas respectivamente; temperaturas dentro del rango dado por la NTP 339.114; redujo sus pesos unitarios en 21% (1864 kg/m³ frente a los 2353 kg/m³) y en 24% (1777 kg/m³ frente a los 2350 kg/m³) respecto sus diseños de control respectivamente; disminuyó las resistencias a compresión en 26% (567 kg/cm² frente a 762 kg/cm²) y en 45% (321 kg/cm² frente a 582 kg/cm²); disminuyó las resistencias de tracción indirecta y flexión respecto a sus diseños de control y redujo las densidades en estado de equilibrio en 23% (1715 kg/m³ frente a los 2234 kg/m³) y en 27% (1623 kg/m³ frente a los 2213 kg/m³) respecto a sus diseños de control.

Si bien las resistencias en general han disminuido con la presencia de la puzolana, estas se ven compensadas con las bajas densidades alcanzadas por nuestros diseños.

Palabras claves: Concreto estructural ligero, concreto ligero, puzolana natural, cantera Raqchi, agregados ligeros, concreto, baja densidad, alta resistencia, ACI 213R-03.

ABSTRACT

The objective of the investigation is to evaluate the performance of structural lightweight concrete mix designs using natural pozzolan from the Raqchi quarry, Cuzco -2018. The pozzolan was used in order to reduce the density of the concrete, additionally, stone, water, cement type I and Ulmen W73 additive were used, which was in charge of giving the desired consistency to the mixture. The method used was based on iterative successions of mixtures, which are explained in this investigation. It was possible to find two designs of structural lightweight concrete, denominated C.E.L N ° 01 and C.E.L N ° 02.

Designs No. 01 and 02 of C.E.L obtained consistency between 3 to 5 inches and between 1 and 2 inches respectively; temperatures within the range given by NTP 339.114; it reduced its unit weights by 21% (1864 kg / m³ compared to 2353 kg / m³) and by 24% (1777 kg / m³ compared to 2350 kg / m³) with respect to its control designs, respectively; decreased the compressive strengths by 26% (567 kg / cm² versus 762 kg / cm²) and by 45% (321 kg / cm² versus 582 kg / cm²); it decreased the resistance of indirect traction and flexion with respect to its control designs and reduced the equilibrium densities by 23% (1715 kg / m³ compared to 2234 kg / m³) and by 27% (1623 kg / m³ compared to the 2213 kg / m³) with respect to its control designs.

Although the resistances in general have diminished with the presence of the pozzolana, these are compensated with the low densities reached by our designs.

Keywords: structural lightweight concrete, lightweight concrete, natural pozzolana, Raqchi quarry, lightweight aggregates, concrete, low density, high strength, ACI 213R-03.

CAPÍTULO I

I. Introducción

La necesidad de elaborar concreto estructural ligero se ha incrementado a través de los años, pues sus ventajas como disminución del peso de la estructura, menores costos de transporte y acarreo, reducción de elementos estructurales, disminución de costos globales del proyecto, entre otros; han logrado que este tipo de concretos sean muy atractivos y una alternativa de solución para las diversas construcciones en la actualidad.

Desde la antigüedad se ha demostrado, que es factible el uso de puzolanas naturales para las construcciones; es así que los romanos utilizaron dicho material como una adición mineral y/o como agregado ligero, para la construcción del coliseo Romano y el Panteón de Adriano, construcciones que persisten hasta la actualidad. De la misma manera el desarrollo de concretos estructurales con agregados ligeros se han desarrollado a lo largo de los últimos 50 años.

Por otro lado, somos conscientes de que los materiales utilizados para la construcción son materiales no renovables, los cuales podrían llegar a escasear en el futuro, siendo necesario buscar alternativas en materiales que se encuentren en nuestro país, propios de las diversas zonas del Perú, para la elaboración de las mezclas de concreto.

Así mismo, la informalidad se ha incrementado en los últimos años, la necesidad de una vivienda ha ocasionado que las personas construyan sus casas en lugares inadecuados y peligrosos, ocasionado por el alto costo de las viviendas en el país. Es así que existe la necesidad de reducir los costos de los proyectos de edificación, siendo una alternativa viable la de disminuir el peso de la estructura utilizando materiales ligeros de la zona con el fin de aminorar los costos, pues cada vez se construyen edificios más altos, pesados y costosos.

Por último, el poco desarrollo de este tipo de concretos especiales en el País, nos obliga a investigar acerca de ellos, pues son escasas las investigaciones que se pueden encontrar acerca del uso de materiales ligeros existentes en nuestro país para la elaboración de concreto ligero estructural. El uso de materiales ligeros para la disminución del peso del concreto, es una alternativa que se ha utilizado a lo largo de los años. De igual manera, son pocas las investigaciones encontradas acerca del uso de puzolana natural para la elaboración de concreto estructural ligero, y aún menos las investigaciones que utilizan al agregado ligero y puzolana natural como remplazo del agregado fino convencional; por lo que con esta investigación se busca contribuir al poco conocimiento existente del concreto estructural ligero en el Perú, planteando como alternativa el uso de puzolana natural de la Cantera Raqchi como agregado fino para la elaboración de este tipo de concretos, los cuales tendrán que cumplir con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213 R-03, para posteriormente ser evaluados a los ensayos más representativos de control de calidad y finalmente realizar sus diseños patrón de control, los cuales serán comparados y evaluados con sus respectivos diseños de concreto estructural ligero.

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del problema

El crecimiento en la industria de la construcción, se ha convertido en un factor clave en el desarrollo económico y social de cada país. Detrás de cada obra a realizar, se está generando empleos y se abre una puerta al progreso e inclusión social. Es así que los países que tienen un alto desarrollo económico, son aquellos que cuentan con infraestructuras modernas y de calidad. El Perú es partícipe de esta realidad, según el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI, 2017), en el mes de octubre, el Producto Bruto Interno (PBI) creció un 2.99%, teniendo así un registro de 99 meses de crecimiento continuo, resultado el cual se sustenta en la evolución positiva

de la mayoría de los sectores, siendo el sector construcción el que más destaca, cuyo índice de producción aumentó en un 14.25 %, influenciado por el mayor consumo de cemento (6.59%) e inversión en obras públicas (42.35 %).

La necesidad de construir con el pasar de los años estructuras cada vez más complejas ha conllevado a la búsqueda de nuevos materiales y tecnologías que ayuden a optimizar los procesos constructivos y que aporten a la durabilidad de estas estructuras, siendo el concreto el material de construcción universal, debido a sus propiedades de resistencia, durabilidad y capacidad para ser moldeado en diversas formas y tamaños. Es así que se han desarrollado concretos especiales como respuesta ante estas necesidades, desarrollándose en la actualidad concretos con distintas propiedades, como: concretos de peso pesado, expansivos, de alta resistencia, reforzados con fibras, pos tensado, autocompactados, ligeros, etc. (Suárez, 2012).

Los concretos ligeros se han desarrollado a lo largo de la historia debido a su reducido peso. En los Estados Unidos se utilizó como agregado ligero a la arcilla expandida para elaborar un concreto que fue usado en la construcción de barcos durante la primera guerra mundial. Sin embargo, fue aún en 1950 en la Gran Bretaña cuando se usó formalmente el concreto ligero con arcilla expandida. Antes de la segunda guerra mundial, se utilizaba en Reino Unido un concreto elaborado con agregados ligeros para la fabricación de bloques para muros no portantes, posteriormente, debido a la mejora del concreto con el uso de escorias espumosas como agregado ligero, se logró utilizar este concreto para elementos estructurales. Las ventajas de usar este tipo de concretos son numerosas; por ejemplo, se reducen las cargas muertas debido a su bajo peso específico, mayor rapidez de construcción, se reducen los tiempos de transporte y acarreo. Un factor importante en el diseño de estructuras, es el peso que soporta la cimentación, especialmente en la actualidad que la tendencia es hacia la construcción de edificios más altos. El uso de concreto ligero ha hecho

posible, que en ciertas ocasiones se lleve a cabo diseños que se hubieran abandonado por razones del peso (Short y Kinniburgh, 1967). Siendo estos concretos una excelente alternativa de solución para aquellas construcciones que serán cimentadas en suelos de baja capacidad portante.

Es así, que debido al gran crecimiento vertical que han experimentado las construcciones en los últimos años, a la baja capacidad portante de algunos suelos del Perú y al ser un País altamente sísmico, es necesario el desarrollo de un concreto estructural ligero con materiales existentes en el Perú. El uso de agregados ligeros como puzolana natural en remplazo del agregado grueso o como sustituto parcial de este, es una alternativa que se ha desarrollado en diversos países del mundo. Son escasas las investigaciones que se pueden encontrar y más aún el uso de este tipo de concretos en el Perú, existiendo la necesidad de investigar y evaluar acerca de su desempeño, planteando como alternativa, el desarrollo de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como remplazo del agregado fino, tema poco abordado en las investigaciones de estos concretos especiales, los cuales tendrán que cumplir con los requerimientos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03 y posteriormente evaluados a los ensayos más representativos de control de calidad del concreto, tanto en estado fresco como endurecido.

1.1.2 Formulación del problema

1.1.2.1 *Problema Principal*

Cuál es el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero, utilizando puzolana natural como agregado fino de la cantera Raqchi, Cuzco - 2018.

1.1.2.2 *Problema Secundario*

1.1.2.2.1 *Problema secundario número 01*

Cuál es la dosificación de los diseños de mezcla, para obtener concreto estructural ligero que cumpla con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03, utilizando a la puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino.

1.1.2.2.2 *Problema secundario número 02*

Cuál es el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

1.2 **Antecedentes**

1.2.1 **Desde cuando existe o se conoce el problema**

Según Villegas (2012) a través de los años, los arquitectos y constructores han buscado soluciones tecnológicas especiales para poder realizar sus diversas obras arquitectónicas. En el siglo I d.c Antonio Vitrubio relata, que la civilización Romana utilizó a la Puzolana como un aditivo mineral en la fabricación de sus concretos, ésta era una piedra volcánica, porosa y ligera extraída de un Pueblo llamado Pozzuoli al pie del Vesubio. Además utilizaron otros aditivos naturales como leche, sangre y grasa animal para mejorar la trabajabilidad de las mezclas de concreto y mortero. Estos materiales fueron utilizados para construir el Coliseo Romano en el año 80 d.c y el Panteón de Adriano construido en el año 123 d.c, que fue durante 1500 años la mayor cúpula construida, con 43.3 m. de diámetro. El uso de estos materiales proporcionó la durabilidad a estas construcciones que han perdurado hasta la actualidad.

Según Yagual y Villacís (2015) en 1917 Stephen J. Hayde, en la ciudad de Kansas City, por medio de un horno tubular rotatorio implementó un proceso para expandir pizarras y arcillas,

logrando obtener agregados de baja densidad. En 1919 el S.S. Selma de 7500 toneladas, fue el primer buque de hormigón armado donde se dio lugar a la primera aplicación de concreto ligero, en el casco de este buque. En Kansas en 1922 se construye el primer edificio fabricado con concreto estructura ligero, este concreto se utilizó en la instalación de un gimnasio (ampliación) el cual está ubicado en la Escuela de Deportes Acuáticos. Se optó por usar este tipo de concreto debido a la baja capacidad portante del terreno donde se cimentó este edificio.

Posteriormente el uso de agregados ligeros para trabajos estructurales reales, en calidad mejorada, fue estudiado por Estados Unidos de Norte América, Alemania y los países entonces llamados Unión Soviética y Gran Bretaña. En los Estados Unidos, el concreto ligero fue desarrollado a gran escala y más rápida que en ningún otra parte, debido principalmente al enorme territorio que tiene ese país, por lo que mover los materiales pesados a través de grandes distancias desde los centros industriales de producción a las poblaciones, originaba altos costos de transporte, pese a que no había escases de agregados comunes (piedra y arena). Adicionalmente el costo de mano de obra relativamente altos, obligó al desarrollo de concretos con agregados de la localidad, incrementando la investigación y uso de una variedad de agregados ligeros como la arcilla expandida para el desarrollo de estos concretos. En Alemania el desarrollo de concreto ligero se enfocó principalmente en el uso de pómez y de escorias espumosas, y algunas clases de concreto aireadas y porosas (Short y Kinniburgh, 1967).

Es así que en con el avance tecnológico del pasar de los años, se desarrollaron algunas alternativas de agregados ligeros para la fabricación de concreto ligero; como las arcillas, pizarras y escorias expandidas, las cuales han dado muy buenos resultados en la actualidad. También se han desarrollado agregados artificiales como el poliestireno expandido y agregados con aporte de sílice como es la cascara de arroz (Hou, Caicedo y Falconí, 2009).

López (como se citó en Cañarte, 2016) menciona que desde los años 1950 en América del Sur, se ha investigado los concretos ligeros, especialmente en Chile debido a que es un país que es atravesado por la Cordillera de los Andes, una red montañosa que alberga una serie de volcanes, originando una gran cantidad de depósitos de piedras pómez localizados a lo largo de todo el País. Es así que por esta razón se ha logrado analizar las características físicas de la piedra pómez como agregado ligero, para la fabricación de estos concretos especiales.

Según Cañarte (2016) en Venezuela, en 1969, se instala por primera vez una planta para la producción de concreto estructural ligero utilizando a la arcilla expandida térmicamente. La empresa denominada ALIVEN (áridos livianos de Venezuela) está asentada sobre un yacimiento de 50 Has de arcilla, lo que permite la explotación y desarrollo de concretos ligeros usando como agregado a la arcilla expandida térmicamente.

En el Perú el desarrollo y aplicación de concreto ligero es muy limitado; pese a que , según el Ministerio de Energía y Minas (Minem, 2015) en el reporte de su Anuario Minero Perú 2015, este produjo 56 499 800 toneladas métricas de material no metálico en el 2015, registrando un aumento del 79 % en comparación a la última década (2011), de las cuales 1 420 153 toneladas métricas pertenecen a la producción de puzolana natural, reflejando así la gran cantidad de puzolana existente en el país. UNICON (s.f), empresa que elabora concreto ligero con poliestireno expandido, afirma que se ha utilizado concreto ligero en el Perú, en algunas estructuras, como por ejemplo como cobertura de techo de nuestro aeropuerto Jorge Chavez ubicado en Lima-Callao. De igual manera se utilizó este tipo de concretos para la elaboración del revestimiento de tuberías de planta criogénica en la llamada Planta de Licuefacción de Gas natural Pampa Melchorita – Perú LNG, ubicado en Cañete. Lo que evidencia un déficit de concreto estructural ligero en el País.

El American Concrete Institute Perú (ACI PERÚ, 2016), menciona que estudiantes de la Universidad Nacional San Antonio de Abad del Cusco, utilizaron puzolana natural de la cantera Raqchi como parte del agregado del concreto, obteniendo así el primer lugar en el XIV Concurso Nacional Estudiantil ACI PERÚ 2015, el cual consistía en obtener concretos con densidades menores a 2000 kg/m³ con la máxima resistencia a compresión posible. ACI PERU busca promover por medio de estos concursos la investigación de este tipo de concreto especiales.

En la actualidad en la industria de la construcción en el Perú, se producen cementos con puzolana como adición mineral (Cementos Puzolánicos); pero, no utilizan la puzolana en su estado natural, si no, de forma procesada. Son pocas las investigaciones acerca del uso de puzolana natural como remplazo total o parcial del agregado grueso para obtener concreto estructural ligero, y más aún, son escasas las investigaciones en las cuales se utiliza como remplazo del agregado fino, el cual es objeto de esta investigación.

1.2.2 Estudios o investigaciones anteriores

1.2.2.1 Antecedentes Nacionales

Tupa (2018), en la investigación “**CONCRETO ESTRUCTURAL LIVIANO CON ESCORIA Y CENIZA VOLCÁNICAS DEL DISTRITO DE YURA**” tiene como objetivo principal determinar si es factible emplear escoria y ceniza volcánicas del distrito de Yura como agregados para la elaboración del concreto estructural ligero. Además analizó el beneficio-Costo de una vivienda típica tipo modular que emplee elementos de concreto estructural ligero con una construcción convencional con la misma arquitectura, como respuesta al déficit de viviendas de bajo costo en la zona, y al desconocimiento de las propiedades de los agregados ligeros naturales del distrito de Yura para la elaboración de concreto estructural ligero. El método aplicado es el volumétrico (ACI 211.2-98) con variaciones en los procedimientos. El autor creyó necesario

modificar este método, teniendo como variable dependiente la cantidad de agregado global, en función de las cantidades de agregado fino y grueso. Para la relación agua/cemento, cantidades de agua y cemento del diseño se utilizaron las tablas de ACI 211.2-98. Además el autor vio conveniente usar el peso específico aparente en lugar del peso unitario fresco del concreto. Se diseñó para 4 niveles de resistencia a la compresión; 210 kg/cm², 280 kg/cm², 350kg/cm² y el más alto posible (500 kg/cm² teóricamente) y un asentamiento de 3 pulgadas, utilizando agregados ligeros como escoria volcánica y ceniza volcánica; cemento tipo I, y agua. Es importante mencionar la aplicación de aditivo hiperplastificante basado en nanosílice (AQUA 206 de la empresa Ulmen) para el caso de las relaciones agua/cemento que así lo requirieron (350Kg/cm² y 500 kg/cm² teóricamente). Las características físicas de los agregados utilizados se muestran en la tabla N° 1, del cual se puede observar que estos cuentan con un menor peso específico en comparación con los agregados convencionales, resaltando también el alto grado de absorción, característica de este tipo de agregados.

Tabla 1
Propiedades físicas de los agregados ligeros

| Concreto ligero | | |
|---|--------------|------------------------|
| DESCRIPCIÓN | ARENA | AGREGADO GRUESO |
| Peso específico SSS (gf/cm ³) | 2,04 | 1,99 |
| Contenido de humedad (%) | 0,16 | 4,15 |
| Absorción (%) | 19,95 | 15,69 |
| PU suelto (gf/cm ³) | 0,827 | 0,953 |
| PU Varillado (gf/cm ³) | 0,956 | 1,054 |
| Modulo de fineza | 1,57 | 3,22 |
| Más fino que 0,075mm (%) | 2,2 | - |

Fuente: Tupa (2018)

Posteriormente, los diseños de mezcla fueron sometidos tanto a ensayos de control de calidad en estado fresco, como endurecido; en la tabla N° 2 se puede apreciar las propiedades volumétricas

del concreto ligero, del cual se puede inferir que las densidades alcanzadas son menores que las estipuladas por el ACI 213R-03, de 1920 Kg/m³, siendo un antecedente de la factibilidad de estos materiales (puzolana natural) para cumplir con los requerimientos de densidad según la norma antes mencionada en la elaboración de concreto ligero.

Tabla 2
Propiedades volumétricas del concreto ligero

| Densidad | f'c (kg/cm²) | | | |
|---|--------------------------------|------------|------------|------------|
| | 210 | 280 | 350 | 500 |
| Fresco/fraguado (g/cm ³) | 1,856 | 1,881 | 1,892 | 1,930 |
| Seco al aire 2 días (g/cm ³) | 1,799 | 1,836 | 1,865 | 1,913 |
| Seco al aire 14 días (g/cm ³) | 1,770 | 1,784 | 1,812 | 1,858 |
| Seco al horno (g/cm ³) | 1,664 | 1,690 | 1,730 | 1,815 |
| Máximo ACI 213R (g/cm ³) | 1,92 | 1,92 | 1,92 | 1,92 |

Fuente: Tupa (2018)

Las resistencias a compresión alcanzadas a los 7, 14 y 28 días se muestran en la tabla N° 3, los datos obtenidos logran superar tranquilamente el requisito de resistencia a la compresión según ACI 213R-03 para un concreto ligero estructural, lo que confirma que la utilización de materiales como puzolana natural permitirá diseñar un concreto estructural ligero. El autor menciona que a un mayor contenido de cemento, se mantiene una relación proporcional directa con la resistencia a compresión.

Tabla 3
Resumen de resistencia a compresión a través del tiempo

| Edad (días) | Resistencia a la compresión (kg/cm²) | | | |
|--------------------|--|------------|------------|------------|
| | 210 | 280 | 350 | 500 |
| 7 | 201,967 | 278,84 | 334,221 | 398,27 |
| 14 | 257,371 | 342,44 | 389,467 | 536,49 |
| 28 | 382,493 | 425,07 | 486,590 | 621,03 |

Fuente: Tupa (2018)

El autor concluye que la modificación del método volumétrico del diseño de mezclas del ACI 211.2- 98 brindó mejores resultados sobre la precisión en la obtención de la densidad plástica requerida, por lo que se puede inferir que el método ACI 211.2-98 no es el óptimo y no es aplicable

en su totalidad para agregados ligeros como puzolana natural de la zona, siendo necesario realizar cambios para poder cumplir con los objetivos deseados. Así también menciona que la utilización de estos agregados ligero naturales funcionan como incorporadores naturales de aire en el concreto fresco, siendo una alternativa de solución para climas fríos. Es importante mencionar que este concreto tuvo mayor absorción y menor conductividad térmica que un concreto convencional, las resistencias alcanzadas por el concreto estructural ligero tuvo una mayor resistencia que el convencional, siendo importante indicar que el método utilizado para el concreto convencional fue el ACI 211.1. En el análisis estructural, para la vivienda de arquitectura común en ambos sistemas, para lo que es prefabricado se redujo los esfuerzos de corte y flexión en 8.06 %, menos que un sistema común de albañilería confinada, reduciendo también en un 23.5 % el costo de los prefabricados comparándolo con un sistema común de albañilería confinada.

Tantaquilla (2017), en la investigación llamada **“INFLUENCIA DE PIEDRA PÓMEZ SOBRE ASENTAMIENTO, DENSIDAD, ABSORCIÓN Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN CONCRETO LIVIANO ESTRUCTURAL”** tiene como objetivo principal determinar la influencia de la piedra pómez sobre la densidad, absorción, asentamiento y resistencia a compresión en concreto liviano estructural, evaluando así el diseño de mezcla óptimo que presente propiedades aceptables físicas y mecánicas, para posteriormente realizar el análisis de costo de la producción. El autor creyó conveniente distribuir la piedra pómez en dos tamaños, 12.50 mm (1/2”), para el agregado grueso y 2.36mm (N°8) para el agregado fino. El método utilizado por el autor para los cálculos del diseño de mezcla patrón fue el ACI 211.1, posteriormente realizó dos tipos de diseños de mezcla, uno que utilice como agregado ligero, a la piedra pómez fina y otro que utilice, a la piedra pómez gruesa, para cada tipo de diseño reemplazó porcentualmente en 20 %, 40 %, 60 %, 80 % y 100 %. Es importante mencionar que los diseños

fueron mezclados manualmente debido a que se trabajó con mezclas menores a 0.007m³. Para posteriormente ser sometidos a los ensayos de control de calidad del concreto mencionados en los objetivos. El autor menciona que fue necesario retirar los moldes después de 30 horas de haberse moldeado debido a que a las 24 horas las probetas no presentaban la solides necesaria debido al uso del súper plastificante. En la tabla N° 4 se puede observar la absorción y el peso específico de los agregados de peso normal y ligeros utilizados, observando el bajo peso específico de los agregados ligeros en comparación con los agregados convencionales, y así también, el alto grado de absorción que presenta la piedra pómez.

Tabla 4

Peso específico y absorción de los agregados

| Agregados | Peso específico (Kg/m³) | Absorción (%) |
|-------------------------|---|----------------------|
| Agregado fino | 2,610 | 1 |
| Agregado grueso | 2,670 | 1 |
| Agregado fino - pómez | 1,350 | 30 |
| Agregado grueso - pómez | 1,130 | 37 |

Fuente: Tantaquilla (2017)

En la tabla N° 5 y N° 6 se pueden observar las densidad seca y densidad en equilibrio respectivamente alcanzadas por los diseños de mezcla. El autor destaca que la densidad en equilibrio difiere más de las densidad seca, a medida que se va aumentando el agregado ligero; ya que la densidad seca va a tener una menor diferencia con la densidad de equilibrio cuando no se use agregados ligero en el concreto. Al emplear desde un 20 % hasta un 100 % de agregado ligero como remplazo de agregado convencional, existe una diferencia aproximada ente la densidad seca y la de equilibrio en 40 Kg/m³, corroborando así lo dicho por la ASTM C567 que menciona una diferencia aproximada de 50 kg entre estas densidades. Dato importante para nuestra investigación, debido a que se calculará la densidad de equilibrio teóricamente según ASTM C567 después de haber hallado experimentalmente la densidad seca al horno.

Tabla 5
Densidad seca al horno

| Densidad seca | | |
|----------------------|---|---------------------------------------|
| % Pómez | A. Grueso (kg/m³) | A. Fino (kg/m³) |
| Patrón | 2253 | |
| 20% | 2133 | 2186 |
| 40% | 2011 | 2118 |
| 60% | 1892 | 2051 |
| 80% | 1787 | 1985 |
| 100% | 1681 | 1919 |

Fuente: Tantaquilla (2017)

Tabla 6
Densidad de equilibrio

| Densidad de equilibrio | | |
|-------------------------------|---|---------------------------------------|
| % Pómez | A. Grueso (kg/m³) | A. Fino (kg/m³) |
| Patrón | 2263 | |
| 20% | 2150 | 2201 |
| 40% | 2032 | 2138 |
| 60% | 1918 | 2076 |
| 80% | 1822 | 2015 |
| 100% | 1723 | 1956 |

Fuente: Tantaquilla (2017)

En la tabla N° 7 se puede observar las resistencias alcanzadas por los diseños de mezcla, las cuales cumplen holgadamente con los requerimientos de resistencia a la compresión según ACI 213R-03. Los diseños fueron ensayados a las edades de 28 y 56 días, cabe mencionar que se observa también la palabra Patrón' haciendo referencia a las mezclas sin aditivo y Patrón para aquellas mezclas que fue necesario la utilización de aditivo súper plastificante.

Tabla 7
Resistencia a la compresión promedio

| Resistencia a compresión | | | | | | | | |
|--------------------------|------------------|--------------------|---------|--------------------|------------------|--------------------|---------|--------------------|
| Probetas | Curado a 28 días | | | | Curado a 56 días | | | |
| | A. Grueso | | A. Fino | | A. Grueso | | A. Fino | |
| | Mpa | Kg/cm ² | Mpa | Kg/cm ² | Mpa | Kg/cm ² | Mpa | Kg/cm ² |
| Patrón' | 23.3 | 237 | 23.3 | 237 | 25.6 | 261 | 25.6 | 261 |
| Patrón | 29 | 296 | 29 | 296 | 31.7 | 323 | 31.7 | 323 |
| 20% | 27.1 | 276 | 28.1 | 287 | 29.7 | 303 | 30.3 | 309 |
| 40% | 25.1 | 256 | 27 | 275 | 27.7 | 283 | 28.8 | 294 |
| 60% | 22.9 | 233 | 25.6 | 261 | 25.4 | 259 | 27.6 | 282 |
| 80% | 20.5 | 209 | 23.9 | 244 | 22.9 | 234 | 25.7 | 262 |
| 100% | 17.8 | 182 | 21.8 | 222 | 20.1 | 205 | 23.3 | 238 |

Fuente: Tantaquilla (2017)

Es importante resaltar que nuevamente el método ACI 211.2 para concreto estructural ligero, no resultó eficiente para elaborar concretos con los agregados de la zona. El autor concluye que el porcentaje óptimo de piedra pómez fue de 60 % como remplazo del agregado grueso convencional, alcanzando resistencias de 233 kg/cm² a 28 días y 259 kg/cm² a 56 días, teniendo una densidad de equilibrio de 1918 kg/m³, con un costo de producción de 240.84 soles por m³; así también , el porcentaje óptimo de piedra pómez como remplazo del agregado fino fue de 100%, alcanzando una resistencia de 222kg/cm² a 28 días y 238 kg/cm² a 56 días, teniendo una densidad de equilibrio de 1956 con un costo de producción de 242.73 soles por m³. Es así que nuevamente se corrobora la factibilidad del uso de materiales ligeros como la piedra pómez para la producción de concreto estructural ligero, tomándose como antecedente para la viabilidad de nuestra investigación.

Ventura (2015), en la investigación “**PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE LA ROCA VOLCÁNICA DEL CERRO ACUCHIMAY PARA EL DISEÑO DE CONCRETO LIVIANO EN LA CIUDAD DE AYACUCHO, PERÚ**” tiene como objetivo determinar la incidencia de la adición del agregado ligero (roca volcánica del cerro Acuchimay) en las características físicas y mecánicas del concreto ligero con el concreto normal. Para la fabricación de los diseños de mezcla del concreto ligero se utilizaron dos tipos de rocas volcánicas: Agregado

volcánico tipo I (Roca volcánica rojo del cerro Acuchimay) y agregado volcánico tipo II (Roca volcánica azul del Acuchimay – Quicapata, alrededor), para posteriormente ser trituradas mecánicamente mediante una chancadora obteniendo así agregado fino (tamizado por la malla de $\frac{1}{4}$ ") y agregado grueso (tamizado por la malla de $\frac{3}{4}$ "). Para la proporción de la mezcla, se realizó mediante cuatro métodos (Método ACI 211.1, Módulo de Fineza, Agregado Global y ACI 211.2) tanto para mezclas con agregados del tipo I como del tipo II. Posteriormente se eligió dos de los cuatro métodos para cada tipo de agregado, para luego ser ensayados a pruebas de resistencias a la compresión y ser comparados entre ellos, y así saber cuál de estos métodos obtiene mejores resultados. El autor menciona que debido a que es difícil de controlar la absorción de los agregados ligeros, no se puede utilizar la relación agua/cemento para calcular de manera eficiente la dosificación, por tal motivo el autor creyó conveniente realizar un reajuste a los diseños obtenidos por los métodos antes mencionados bajo la premisa de poder tener la consistencia de acuerdo al asentamiento de diseño sin afectar la relación agua/cemento establecida, por lo que recomendó si el asentamiento es el incorrecto, incrementar o disminuir el contenido de agua aproximadamente en 2 litros por metro cúbico de concreto para cada incremento o reducción de 10 mm en el asentamiento. En la tabla N° 8 se puede observar las características físicas de los agregados utilizados en el concreto, donde se puede ver que pese a que el peso específico del agregado fino no es bajo, en comparación con un agregado convencional, definitivamente existe una diferencia.

Tabla 8

Resumen de propiedades físicas de los agregados volcánicos tipo I y tipo II

| Ensayos de laboratorio | Agregado Volcánico Tipo I | | Agregado volcánico tipo II | |
|--------------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|
| | A. fino | A. Grueso | A. fino | A. grueso |
| Peso unitario suelto seco (PUSS) | 1124.30 kg/m ³ | 836.46 kg/m ³ | 1228.65 kg/m ³ | 815.27 kg/m ³ |
| Peso unitario compactado seco (PUCS) | 1273.24 kg/m ³ | 983.19 kg/m ³ | 1357.39 kg/m ³ | 948.16 kg/m ³ |
| % de vacíos suelto | 43.78% | 55.28% | 43.60% | 54.09% |
| % de vacíos compactado | 36.34% | 47.44% | 37.69% | 46.61% |
| Peso específico aparente | 2 | 1.87 | 2.18 | 1.78 |
| Peso específico aparente (S.S.S.) | 2.27 | 2.05 | 2.37 | 1.91 |
| Peso específico nominal | 2.75 | 2.27 | 2.7 | 2.05 |
| Absorción | 13.64% | 9.35% | 8.85% | 7.43% |
| Contenido de humedad | 3.82% | 3.19% | 2.09% | 1.71% |
| %de grava | 2.88% | 97.79% | 3.60% | 97.21% |
| %de arena | 92.87% | 1.79% | 92.55% | 2.05% |
| %de fino | 4.25% | 0.42% | 3.84% | 0.34% |
| Módulo de fineza | 3.42 | 6.77 | 3.49 | 6.62 |
| Tamaño máximo | | 3/4" | | 3/4" |
| Tamaño máximo nominal | | 1/2" | | 1/2" |

Fuente: Ventura (2015)

En la tabla N° 9 se puede observar las resistencias alcanzadas por el óptimo diseño (módulo de fineza) a compararse con un concreto convencional. Notamos que claramente cumple con los requerimientos de resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

Tabla 9

Resistencias alcanzadas

| N° | Tipo de muestra | Edad Ensayo (Días) | Peso Unitario (tn/m ³) | Resistencia Compresión (Kg/cm ²) |
|----|---|--------------------|------------------------------------|--|
| 1 | C. Liviano 1 f _c =140- f _{cr} =210 kg/cm ² | 7 | 1.95 | 141.36 |
| 2 | C. Liviano 1 f _c =140- f _{cr} =210 kg/cm ² | 28 | | 235.23 |
| 3 | C. Liviano 2 f _c =210- f _{cr} =294 kg/cm ² | 7 | 1.99 | 220.83 |
| 4 | C. Liviano 2 f _c =210- f _{cr} =294 kg/cm ² | 28 | | 329.33 |
| 5 | C. Liviano 3 f _c =280- f _{cr} =364 kg/cm ² | 7 | 2.03 | 296.29 |
| 6 | C. Liviano 3 f _c =280- f _{cr} =364 kg/cm ² | 28 | | 385.98 |

Fuente: Ventura (2015)

El autor menciona mientras que en los concretos normales la relación agua/cemento es índice de su resistencia, en la mayoría de los concreto ligeros no es factible su uso, debido a la porosidad de los agregados, por lo que se definirá la resistencia con el contenido de cemento para un uso de revenimiento determinado.

Se concluye que los agregados utilizados son aptos para la fabricación de concreto ligero; que el método que más se adecuó a los requerimientos es el método de módulo de fineza, comprobando una vez más que el método 211.2 no se adecúa para elaborar concreto ligero con materiales ligeros de la zona. Por lo que será un antecedente más de por qué no se usará este método para la presente investigación. Así también el autor menciona que la variación obtenida entre los ensayos se debe prácticamente al tipo de agregado utilizado, pues cuentan con un alto grado de absorción y contenido de humedad, logrando así imposibilitar dar con una relación agua/cemento confiable y precisa.

Ibarcená (2013), en la investigación **“USO DE CONCRETO LIGERO CON AGREGADOS DE ROCA VOLCÁNICA EN LA FABRICACIÓN DE UNIDADES DE ALBAÑILERÍA NO ESTRUCTURAL”** tiene como objetivo principal determinar la incidencia de la adición de roca volcánica como agregado grueso en las características físicas, mecánicas y económicas del concreto ligero para la fabricación de unidades de albañilería no estructural. El autor menciona que para la elección de los agregados de peso ligeros a utilizar, se procedió a realizar pruebas exploratorias de tres tipos de rocas; roca volcánica de Yura, roca volcánica de Yarabamba y piedra pómez, concluyendo que se debe usar la piedra pómez como agregado, debido a que es el material que alcanzó la densidad más baja y por lo tanto según el autor la más apta para la fabricación de un material de características térmicas y ligeras. El método base para el diseño de mezclas fue el convencional establecido por el ACI 211.1, para posteriormente hacer modificaciones en sus procedimientos con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados. Inicialmente se realizaron vaciados de especímenes con diferentes relaciones agua/cemento con dosificaciones tentativas de agregado grueso y agregado fino. La cantidad necesaria que se usó fue la que cumplía con el requerimiento de 1 pulgada para así evitar que la mezcla se segregue, posteriormente los

especímenes realizados fueron ensayados a las edades de 7, 14, y 28 días de edad. Con la información obtenida se pudo realizar un diseño de mezclas especialmente realizado para fabricar concreto con piedra pómez. El autor menciona que las densidades alcanzadas fueron de 1450 kg/m³ cuando se utilizó arena gruesa, y de 1050 kg/m³ cuando se utilizó piedra pómez fina. Una vez que se tuvo el diseño de mezclas adecuado, se procedió a fabricar los bloques de concreto para luego ser sometidos a ensayos de calidad correspondientes y así formar pilas de bloques para ensayarlas a compresión. Finalmente se construyó un tabique con los bloques ligeros para poder así calcular el rendimiento de la mano de obra y los acabados, para luego realizar el análisis de costos comparando los bloques ligeros con los bloques convencionales.

El autor concluye finalmente que la adición de roca volcánica, reduce la densidad del concreto entre 34 % para el diseño de densidad de 1450 kg/m³ y 52 % para el diseño de densidad de 1050 kg/m³, haciendo que el concreto sea más poroso, se reduzca notoriamente su conductividad térmica de hasta un 67% (0.458 W/m*K), proporcionando además un acabado más vistoso y elegante. También se deduce que al utilizar este agregado ligero, se reduce la resistencia a compresión entre un 75% a 87%, sin embargo, al ser usados en bloques de concreto esta característica no se vio afectada sustancialmente. En referencia al costo, cuando se requiere una densidad del muro de 1330 Kg/m³, mantiene un costo de 51 soles por m², con respecto a un muro de bloques de concreto convencional, este tiene un costo de 50.23 soles por m²; pero es 35 % más económico que al utilizar ladrillos convencionales para la fabricación del muro. Por otra parte, si se requiere una densidad del muro de 1183 Kg/m³ tiene un costo de 69.62 soles por m² para bloques con agregado ligero, es 20 % más elevado que un muro de bloques de concreto convencional; pero, 15 % más barato que un muro realizado con ladrillos convencionales. De esta investigación, nuevamente podemos inferir que debido al alto grado de absorción de los materiales

ligeros, no existe un método adecuado para calcular las proporciones de mezcla, por lo que el autor en esta investigación adaptó el método ACI 211.1, corroborando así que el método ACI 211.2, no se adecua óptimamente a los agregados de la zona (puzolana natural), por lo que existe la necesidad de iniciar con dosificaciones tentativas e ir realizando los ajustes a lo largo de la investigación.

Camino y Camino (2017), en la investigación **“EVALUACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA, PROPIEDADES FÍSICO – MECÁNICAS DEL LADRILLO KING-KING 18 HUECOS ADICIONADO CON PUZOLANA DE LA CANTERA RAQCHI EN DIFERENTES PORCENTAJES, CON RESPECTO A UN LADRILLO TRADICIONAL”** tiene como objetivo evaluar la conductividad térmica y propiedades físico – mecánicas del ladrillo King-Kong 18 huecos; adicionado con puzolana tradicional en la ciudad de Cuzco. El método utilizado para la dosificación de los materiales fue de manera artesanal y práctica, manera en la que se realiza un ladrillo por los maestros de la empresa Latesa. Cada ladrillo está compuesto por arcilla, agua y un aditivo que es la arenilla, el cual es arcilla proveniente de la molienda de los mismos ladrillos que resultaron rajados o rotos en el horno al momento del quemado. Para la dosificación de ladrillos adicionados con puzolanas, el autor menciona que realizó una dosificación que utilizaba puzolana tamizada con retenidos en las mallas N° 16, N° 30; N° 50 y N° 100, para posteriormente remplazar el 10 % de la mezcla de agua con arcilla por 10 % de puzolana tamizada. Como segunda alternativa realizó una dosificación con puzolana global (todos los tamaños de puzolana que pasaron el tamiz N° 4 hasta el fondo), los cuales remplazaban la mezcla de agua con arcilla en porcentajes de 10 %, 20% y 30% por puzolana global. El autor concluye que la adición de puzolana natural de la cantera Raqchi a la masa cerámica del ladrillo King-Kong 18 huecos mejoró la propiedad de la conductividad térmica del ladrillo, reduciendo hasta en 18% y 24 % con respecto a un ladrillo tradicional patrón; a la vez se demostró que a mayor porcentaje adicionado

de puzolana natural, se obtiene un mayor porcentaje de absorción fluctuando para los diferentes diseños en entre 14.98% a 18.10 %. De manera similar se demostró que la succión aumentaba a medida que se incrementaba el porcentaje de puzolana natural. Con respecto a la resistencia a la compresión y resistencia a la tracción, se observa de los datos del autor que solo algunos diseños permitieron incrementar estas propiedades, por lo que en general estas propiedades se vieron reducidas por el incremento de puzolana natural. Por último, el autor en su investigación adjunta una tabla de la composición química de las puzolanas de la cantera Raqchi, la cual servirá como información adicional para el conocimiento de las propiedades químicas de la puzolana y la manera en la que influirá en nuestros diseños de concreto estructural ligero. Se puede apreciar la composición química de estas puzolanas en la Tabla N° 10.

Tabla 10

Composición química de las puzolanas de la cantera Ccocha (Raqchi)

| | Muestra A | Muestra B | Muestra C |
|--------------------------------|------------------|------------------|------------------|
| SiO ₂ | 64.73 | 63.62 | 64.05 |
| AL ₂ O ₃ | 13.29 | 14.18 | 13.75 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.55 | 3.47 | 3.63 |
| CaO | 6.18 | 6.42 | 6.72 |
| MgO | 3.62 | 2.31 | 2.38 |
| Na ₂ O | 0.37 | 0.49 | 0.53 |
| K ₂ O | 3.45 | 3.48 | 3.17 |
| SO ₃ | 1.19 | 1.85 | 2.03 |
| Carbón | 0.92 | 1.02 | 0.99 |
| PPC | 2.67 | 2.63 | 2.55 |
| Total | 99.97 | 99.67 | 99.8 |

Fuente: Camino y Camino (2017).

1.2.2.2 *Antecedentes internacionales*

Cañarte (2016), en la investigación “**ESTUDIO DE AUMENTO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN LIVIANO CON PIEDRA PÓMEZ**” tiene como objetivo principal realizar un estudio de aumento de la resistencia a la compresión y durabilidad del

hormigón liviano con piedra pómez de dimensiones 4.76 mm y 9.51 mm como solución estructural y económica de la construcción. Para la elaboración del concreto el autor creyó conveniente utilizar dos tamaños de material ligero en la mezclas; piedra pómez gruesa que pasa por el tamiz de 3/8” y es retenida por el tamiz N°4 (Tamaño máximo 9.51mm) y piedra pómez media que pasa por el tamiz N°4 y es retenida por el tamiz N°50 (Tamaño máximo 4.76mm), estos materiales se obtuvieron de la Cantera La Calera, del Cantón Latacunga, provincia de Cotopaxi. Una vez tratado el material ligero, se procedió a hallar las características físicas de los materiales a utilizar en las mezclas de concreto para posteriormente hacer diseños con remplazo total del agregado grueso por el material ligero, las resistencias a diseñar fueron de 210 kg/cm², 290 kg/cm² y 390 kg/cm², tanto para el concreto elaborado con piedra pómez gruesa como para el concreto elaborado con piedra pómez media. Es importante mencionar que para la fabricación del concreto se utilizó un plastificante llamado Plastocrete 161 HE a un 2 % del peso del cemento para mejorar la trabajabilidad de las mezclas. En la tabla N°11 se muestra las características físicas de los agregados utilizados en las mezclas de concreto, observando la baja densidad con la que cuenta la piedra pómez, siendo factible el uso de estos agregados como material ligero del concreto.

Tabla 11
Características físicas de los agregados

| Propiedades | Arena Fabricada | Piedra N°8 | Piedra Pómez Media | Piedra Pómez Grande |
|-------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|----------------------------|
| M.F. | 3,1 | 2,99 | 2,90 | 2,76 |
| Dsss. kg/m ³ | 2512,56 | 2434,47 | 1944,44 | 1078,49 |
| % Ab. | 3,48 | 3,34 | 16,78 | 20,89 |
| PVS kg/m ³ | 1497,82 | 1337,33 | 1104,54 | 725,36 |
| PVV kg/m ³ | - | 1472,54 | 1173,75 | 791,96 |

Fuente: Cañarte (2016)

En las tablas N°12 y N° 13 se muestran las resistencias alcanzadas por los diseños de mezcla con piedra pómez grande y piedra pómez media respectivamente. Se observa que pese a que los

diseños no llegaron a las resistencias deseadas; los diseños de 290kg/cm² y 390 kg/cm² lograron alcanzar una resistencia mayor a la establecida por ACI 213R-03, 175 kg/cm². Esto será tomado como antecedente para la investigación, la cual nos permite justificar el uso de puzolana natural, para el diseño de concreto estructural ligero según ACI 213R-03.

Tabla 12

Resumen de resistencia a la compresión de concreto elaborado con piedra pómez grande

| Resistencia a la compresión | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Edad | 210 kg/cm² | 290 kg/cm² | 390 kg/cm² |
| 7 | 167,05 | 221,90 | 279,29 |
| 7 | 79,55 | 175,99 | 267,81 |
| 14 | 194,89 | 263,98 | 344,33 |
| 14 | 230,69 | 248,68 | 271,63 |
| 28 | 167,05 | 229,55 | 260,16 |
| 28 | 159,09 | 229,55 | 229,55 |

Fuente: Cañarte (2016)

Tabla 13

Resumen de resistencia a la compresión de concreto elaborado con piedra pómez media

| Resistencia a la compresión | | | |
|------------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Edad | 210 kg/cm² | 290 kg/cm² | 390 kg/cm² |
| 7 | 111,73 | 172,93 | 79,55 |
| 7 | 165,52 | 183,64 | 286,37 |
| 14 | 198,63 | 229,55 | 143,18 |
| 14 | 202,76 | 233,38 | 89,09 |
| 28 | 198,63 | 206,60 | 103,41 |
| 28 | 190,35 | 252,51 | 95,46 |

Fuente: Cañarte (2016)

El autor concluyó que el tamaño del material ligero a utilizar (piedra pómez) influye en las propiedades de peso específico y densidad del concreto ligero, que a menor cantidad de alveolos, se tendrá una menor absorción de humedad, resultando así un concreto ligero estructural de mayor densidad. Por último es importante indicar, que las densidades promedio obtenidas fueron de 1783 Kg/m³ y 1809.08 Kg/m², tanto para el concreto elaborado con piedra pómez grande como el que fue elaborado con piedra pómez media.

Hou, Caicedo y Falconí (2016), en la tesina “**HORMIGONES LIVIANOS DE ALTO DESEMPEÑO**” el cual tiene como objetivo recompilar información de los Hormigones livianos de alto desempeño. En esta investigación se observó antecedentes, definiciones, propiedades y aplicaciones de los hormigones livianos de alto desempeño (concreto ligero de alto desempeño). Dentro de las aplicaciones de este tipo de concreto, el autor relata que se utilizó concreto ligero de alto desempeño en el puente Benicia – Martinez (San Francisco), el cual debía cumplir con ciertos requerimientos debido a la envergadura de la obra. Este concreto especial debía tener una densidad de 2000 kg/m³ para aminorar el peso de la estructura y una resistencia a la compresión de 46 Mpa a los 28 días. Se debería contar con un módulo de elasticidad de 24 Gpa, por lo que fue necesario incrementar la cantidad de materiales cementicios. La contracción y el flujo plástico debían ser 0.05 % y 0.48 % respectivamente. Debido a la gran cantidad de calor generado por la hidratación del cemento, fue necesario utilizar nitrógeno y hielo con el fin de reducir la temperatura del concreto y poder mantener la temperatura especificada durante el curado de 71°C. La dosificación y los resultados alcanzados por este concreto se muestran en la tabla N°14 y N°15 respectivamente.

Tabla 14

Dosificación utilizada en el concreto del puente Benecia-Martinez

| Dosificación Usada Kg/m³ | |
|--|------|
| Cemento | 495 |
| Ceniza Volante | 29 |
| Metacaolin | 58.3 |
| Agua | 180 |
| Arena | 733 |
| Agregado Liviano | 510 |
| A/mc | 0.31 |

Fuente: Hou, Caicedo y Falconí (2016).

Tabla 15

Resultados del concreto utilizado en el puente Benecia-Martinez

| Resultados del concreto | |
|------------------------------------|--------------|
| Densidad (kg/m³) | 2001 |
| f/c (Mpa) | 74 a 35 días |
| E (Gpa) | 27 |
| Retracción (%) | 0.042 |
| Flujo plástico (%) | 0.22 |

Fuente: Hou, et al. (2016).

Se puede inferir de la información mostrada, que la densidad final alcanzada por el concreto utilizado en el puente Benecia-Martinez fue de 2001 Kg/m³, alcanzando una resistencia a la compresión de 74Mpa (764.8 kg/cm²). Esta densidad fue alcanzada gracias al uso de agregado liviano, quien proporcionó ligereza al concreto. Debido al gran contenido de cemento, baja relación agua/material cementicio (0.31) y el uso de ceniza volcánica y metacaolín se pudo lograr que la resistencia alcanzada sea mayor a la requerida, tal cual se muestra en la tabla N° 15. Por último el autor concluye que el usar materiales ligeros para la elaboración de estos concretos especiales, permite reducir las fuerzas sísmicas que soportará una estructura debido a la disminución del peso, esta disminución del peso contribuirá a reducir el tamaño de las secciones de las estructura y la cantidad de acero a utilizar, permitiendo así que el transporte sea más rápido debido a la baja densidad de las mezclas de concreto. El autor menciona que el efecto que puede tener un mal curado en las mezclas de concreto ligeros de alto desempeño es menor a la de un concreto convencional, esto debido a que existe agua atrapada en los agregados porosos, el cual se libera y ayuda a curar internamente, mejorando la hidratación del cemento en su zona de transición interfacial. Esta información servirá como aporte para el conocimiento de esta investigación y el entendimiento del concreto estructural ligero.

Iza (2009), en la investigación “**HORMIGÓN LIVIANO CON AGREGADO DE ORIGEN VOLCÁNICO Y ADITIVO INCORPORADOR DE AIRE**” tiene como objetivo elaborar concreto ligero con agregados volcánicos y aditivo incorporador de aire, para posteriormente realizar paneles con la mejor dosificación obtenida. El autor menciona que para esta investigación no existió un método específico debido a que no existen normas de diseño para elaborar concreto ligero con agregados volcánicos, por lo tanto se consideró que el método de diseño empleada es realizar algunas mezclas, para determinar las cantidades bases de cada material, de manera que se tuvo que cumplir con las propiedades objetivo buscadas en el concreto, como densidad, trabajabilidad y resistencia a la compresión, y así finalmente de las mezclas realizadas elegir la dosificación con mejores características, elaborar concreto con esta dosificación y utilizar este concreto en la construcción de paneles. Los materiales utilizados en la elaboración del concreto fueron: cemento portland IP (cuyo contenido no debe ser menor a 300 kg/m³, ni mayor a 500kg/m³); el agregado ligero a utilizar fue de origen volcánico denominado Lapilli (Comúnmente llamado Chasqui de la provincia de Cotopaxi), el autor creyó conveniente separar en dos granulometría a los agregados, obteniéndose un agregado ligero grueso y un agregado ligero fino; arena de río (agregado fino convencional); filler calizo (polvo mineral); fibras de polipropileno; aditivo incorporador de aire (Millenium y Lightcrete) y agua. Las propiedades de los agregados utilizados se pueden apreciar en la tabla N°16.

Tabla 16
Propiedades de los agregados utilizados en el concreto

| AGREGADO | Ds.s.s (kg/m³) | P.U.S (Kg/m³) | P.U.C (Kg/m³) |
|---------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Agregado volcánico fino | 1727 | 716.7 | 766.7 |
| Agregado volcánico grueso | 1450 | 433.3 | 470.8 |
| Arena natural | 2600 | 1570 | 1680 |

Fuente: Iza (2009).

Los resultados de densidad y resistencia a la compresión alcanzadas por las dosificaciones realizadas por el autor se muestran en la tabla N°17, de los cuales se observa que las densidades alcanzadas cumplen con los requerimientos del ACI 213R-03; si bien la resistencia alcanzada, no llega a considerarse como resistencia mínima estructural, se puede inferir que con la aplicación de más cemento en la mezcla, se podría estar llegando a un concreto estructural ligero que cumpla con ACI 213R-03, por lo que se toma como antecedente para nuestra investigación, al ser la roca volcánica una puzolana natural.

Tabla 17

Resumen de resultados de densidad y resistencia a la compresión del concreto ligero

| Muestra | Edad | Densidad Kg/m ³ | Resistencia Mpa | Densidad Kg/m ³ | Resistencia Mpa |
|---------|------|----------------------------|-----------------|----------------------------|-----------------|
| | | Dosificación 1 | | Dosificación 2 | |
| 1 | 7 | 1591 | 13.31 | 1353 | 7.21 |
| 2 | 7 | 1548 | 12.34 | 1364 | 7.6 |
| 3 | 14 | - | - | 1389 | 9.01 |
| 4 | 14 | - | - | 1365 | 8.09 |
| 5 | 28 | 1556 | 14.35 | 1377 | 9.6 |
| 6 | 28 | 1579 | 15 | 1401 | 9.69 |

Fuente: Iza (2009).

El autor concluye, que la dosificación con mejores características es la dosificación 2, por lo que con estas cantidades se procedió a construir los paneles. Así también, se menciona que el módulo de elasticidad y la constante térmica del concreto ligero, está por abajo de la mitad comparado con un concreto convencional. Recomienda tener sumo cuidado con la vibración del concreto en los paneles, ya que el exceso de este producirá segregación y exudación del agregado ligero en la mezcla. Por último es importante resaltar que el autor comenta la inexistencia de un método para la elaboración de estos concretos elaborados con agregado volcánico, por lo que es normal que las dosificaciones de este tipo de concretos sean halladas empíricamente.

Videla y Lopez (2002), en el artículo “**EFFECTOS DE LA RESISTENCIA INTRÍNSECA DEL ÁRIDO LIGERO EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RIGIDEZ DEL HORMIGÓN LIGERO**” tiene como objetivo desarrollar expresiones que permitan describir el

efecto que tienen las propiedades y cantidad de cada fase componente en las propiedades mecánicas del concreto. Esta investigación se basó principalmente en el concepto de que el concreto estructural ligero es un material de dos fases, una fase denominada “soportante”, representada por el cemento más la arena convencional y otra fase denominada “ligera” formada por el agregado ligero. El autor menciona que la fase soportante es la encargada de aportar la resistencia, y la fase ligera, la encargada de disminuir la densidad del concreto. De esta forma, el autor fue capaz de describir el comportamiento mecánico del hormigón en función de parámetros del agregado ligero y el mortero del cemento. Para el proyecto se consideró seis tipos de fase soportante en las que se varió la trabajabilidad y resistencia a la compresión, así también, se consideró tres tipos de fase liviana, dos de piedras pómez de diferentes características y procedencias las cuales se les denominó pómez 1 (Arica) y pómez 2 (Valdivia) y por último Arcilla expandida (Leca - Argentina), representadas como “L”. Las propiedades de los agregados utilizados se pueden apreciar en la tabla N° 18, de las cuales se distingue su baja densidad y su alto contenido de absorción. Se menciona también que el agregado ligero fue utilizado como remplazo del agregado grueso.

Tabla 18

Propiedades de los agregados utilizados en el concreto

| Propiedades | P. Pómez 1 | P. Pómez 2 | Leca (L) | Arena Normal |
|---|-------------------|-------------------|-----------------|---------------------|
| Densidad real SSS: DRSSS (Kg/m ³) | 1245 | 1228 | 1120 | 2556 |
| Densidad real seca: DRseca (Kg/m ³) | 887 | 573 | 982 | 2483 |
| Densidad Ap.Compact Seca: | 564 | 314 | 640 | 1549 |
| Absorción (%) | 40 | 85 | 17 | 2.9 |
| Módulo de finura: Mf | 5.96 | 542 | 5.96 | 1.74 |
| Valor del 10% de finos: TPFV (KN) | 35 | 24 | 69 | - |
| Valor de trituración: ACV (%) | 79 | 97 | 52 | - |

Fuente: Revista materconstrucc (2002)

A cada mezcla se le realizó diferentes ensayos de control en estado fresco, tales como, asentamiento del cono de Abrams, medición de densidad en estado fresco y por último medición de contenido de aire. Los ensayos de control en estado endurecido fueron; resistencia a

compresión, módulo de elasticidad y medición de la densidad seca al aire. Todas las probetas fueron sometidas a curado normalizado. En la tabla N° 19 se muestran algunos resultados de los ensayos realizado por el autor, donde la nomenclatura consiste en una letra “M” de mortero, de ser concreto, representados por las siglas “P1”, “P2” y “L” que corresponde a la identificación del agregado ligero; piedra pómez 1, piedra pómez 2 y Leca. Seguido de esto, se encuentra un número que corresponde a la resistencia a compresión cúbica de la fase soportante en MPa (49, 45, 38, 32, 29 y 24) y por último continúa con un número que indicará el porcentaje en volumen de mezcla del agregado ligero.

Tabla 19

Resultado de los ensayos realizados a las mezclas de concreto

| Tipo | Densidad | Rcu3 | Rcu7 | Rcu28 | E7 | E28 |
|-------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|------------|------------|
| | Kg/m3 | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa | Mpa |
| M49 | 2110 | 30.4 | 36.7 | 49.1 | 14000 | 17675 |
| P1/49/30 | 1810 | 13.3 | 19.1 | 25.6 | 5600 | 11375 |
| P1/49/43 | 1693 | 5.9 | 10.3 | 15.5 | 6650 | 9975 |
| P1/49/55 | 1573 | 7.9 | 10.6 | 14.7 | 3150 | 8750 |
| P1/49/66 | 1533 | 3.1 | 6.1 | 10.2 | 4200 | 6300 |
| P2/49/30 | 1797 | 16.1 | 17.8 | 25.8 | 10500 | 12600 |
| P2/49/43 | 1673 | 12.2 | 13.8 | 18.6 | 5950 | 10675 |
| P2/49/66 | 1360 | 4.1 | 4.6 | 6.1 | 4200 | 4550 |
| L/49/30 | 1777 | 27.3 | 34.1 | 39.1 | 12600 | 14525 |
| L/49/43 | 1687 | 26 | 30.9 | 34.9 | 11900 | 12950 |
| L/49/66 | 1510 | 21.2 | 25.6 | 28.8 | 9450 | 11025 |
| M45 | 2127 | 22 | 32.6 | 45.2 | 13300 | 16275 |
| P1/45/30 | 1770 | 11.7 | 15.1 | 20.2 | 8050 | 9975 |
| P1/45/43 | 1653 | 7.2 | 9.2 | 13.7 | 6300 | 8400 |
| P1/45/55 | 1557 | 5.6 | 8.7 | 12.9 | 5600 | 7525 |
| P1/45/66 | 1457 | 2.1 | 4.1 | 7.1 | 3500 | 4900 |

Dónde: Rcu n: Resistencia cúbica a compresión a n días En= Módulo de Elasticidad a n días.

Fuente: Revista materconstrucc (2002)

El autor concluye que es factible la elaboración de concreto estructural ligero con cualquiera de los tres agregados, siendo el concreto con piedra pómez una alternativa viable para ser usados en construcción, sobre todo en aquellos países con material abundante de pómez. Se puede apreciar

de que a mayor contenido de agregados ligeros (fase ligera) en el concreto, se reduce la resistencia a compresión. El autor determina que la disminución no es constante, por lo que depende de la resistencia de cada fase, no obstante, esta disminución será compensada con la disminución de la densidad del concreto. Esta investigación nos aportará información para entender mejor el diseño de concreto estructural ligero, con el concepto de dos fases.

Correa y Ratti (2015), en la investigación **“EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE AGREGADO LIGERO DE ARCILLA EXPANDIDA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UN CONCRETO ESTRUCTURAL ALIGERADO”** busca evaluar el efecto de la variación de la dosificación del agregado ligero de arcilla expandida en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural ligero. El método utilizado para las proporciones de mezcla de concreto convencional fue el descrito en el ACI 211.1, el cual se fundamenta en el principio básico de la relación agua/cemento desarrollada por Abrams. Los diseños se realizaron para un asentamiento de 7.5 cm. Se utilizó aditivo plastificante con la finalidad de obtener mayor manejabilidad en el concreto. Para el concreto estructural ligero se utilizó el método ACI 211.2 como base, para posteriormente encontrar un método adecuado que se ajuste a los materiales utilizados. Se realizó 4 diseños de mezclas en los que se utilizaba a la arcilla expandida térmicamente (AET) en porcentajes de 0%, 25%, 50% y 100% del total de agregados utilizados en la mezcla. Se hicieron ensayos previos para encontrar la relación de agua/cemento adecuada para cumplir con los requerimientos de resistencia, siendo las elegidas de 0.70, 0.63, 0.62 y 0.57 respectivamente. El autor concluye que el concreto con más de 50% de remplazo de AET se puede clasificar como concreto ligero. Estos concretos en comparación de un concreto convencional, resultaron ser menos resistentes, sin embargo se compensa con la disminución de la densidad del concreto. En el módulo de elasticidad

se encontró que en los concretos ligeros el módulo de elasticidad se redujo entre 20% a 40% en comparación del concreto convencional, para aquellas dosificaciones de 50 % y 100% de AET. A comparación del concreto convencional, la utilización del concreto estructural ligero permitió disminuir el peso de la estructura entre 5% a 10% del peso total de la estructura. Por último, es importante recalcar, que pese a haber utilizado el método ACI 211.2 para la elaboración base del concreto estructural ligero, al final es inevitable no realizar ajustes a los diseños de mezclas, por lo que se comprueba otra vez que utilizar un método específico solo servirá de manera base y referencial, para posteriormente encontrar la dosificación que más se adecúe a los materiales ligeros utilizados.

1.2.2.3 *Antecedentes en ingles*

El American Concrete Institute en la guía titulada “**GUIDE FOR STRUCTURAL LIGHTWEIGHT-AGGREGATE CONCRETE (ACI 213R-03)**” tiene como objetivo proporcionar información y directrices para diseñar y usar concreto estructural ligero. Esta guía define al concreto estructural ligero como todo aquel concreto que está compuesto por agregados ligeros de manera parcial o total, el cual debe tener una densidad de equilibrio entre 1120kg/m³ a 1920kg/m³, y una resistencia a la compresión a 28 días como mínimo de 17 Mpa. En este documento se menciona aspectos importantes a tener en cuenta al momento de dosificar, mezclar, manejar y colocar concreto estructural ligero; así también, proporciona información acerca de las características físicas y mecánicas del concreto estructural ligero, y de sus diversas aplicaciones en construcciones especiales a lo largo de los años. La información proporcionada nos servirá como base de inicio y nos ayudará a entender mejor el comportamiento de estos concretos especiales. Es así, que en esta investigación se plantea cumplir con los requerimientos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

Mouli & Khelafi (2007) en la investigación “**PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE MADE WITH CRUSHED NATURAL POZZOLANA AS COARSE AGGREGATE**” tiene como objetivo determinar la influencia en las propiedades del concreto ligero elaborado con puzolana natural como agregado grueso. El método utilizado para la dosificación de las mezclas de concreto fue el experimental, el autor creyó conveniente realizar dosificaciones en base a requerimientos de densidad, resistencia y asentamiento del concreto. Se realizaron 3 mezclas con un contenido aproximado de cemento de 400kg/m³ y con diferentes relaciones agua/cemento, los cuales conducían a asentamientos diferentes (3, 5 y 7 cm de slump), estas mezclas fueron llamadas LWC1, LWC2 y LWC3; así también se realizaron dos diseños de mezcla con contenido de cemento aproximado de 300kg/m³ y 350kg/m³ y un asentamiento constante de 3 cm. Cada mezcla fue sometida a ensayos de resistencia a la compresión, densidad, resistencia a la tracción y módulo de elasticidad. En la Tabla N°20 se muestra las dosificaciones utilizadas en los diseños de mezcla realizados.

Tabla 20

Diseños de mezcla del concreto ligero

| Materiales | LWC1 | LWC2 | LWC3 | LWC4 | LWC5 |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Cemento, Kg/m ³ | 414 | 410 | 405 | 366 | 312 |
| Agregado grueso ligero, Kg/m ³ | 585 | 578 | 574 | 575 | 564 |
| Arena , kg/m ³ | 613 | 604 | 600 | 654 | 704 |
| Agua, lt/m ³ | 168 | 180 | 190 | 173 | 177 |
| Agua absorbida, lt/m ³ | 54 | 53 | 53 | 53 | 52 |

Fuente: Mouli & Khelafi (2007)

Es importante resaltar que en la investigación se evaluaron todos los ensayos a 3, 7, 28, 90 y 365 días de curado. Así también, se evaluó el comportamiento del concreto de estos especímenes bajo dos condiciones de curado, una sometida a un curado húmedo y otra sometida a un curado seco. En la tabla N°21 se puede observar los resultados de los ensayos de resistencia a compresión y tracción del concreto.

Tabla 21

Resumen de resultados de los ensayos realizados al concreto en condiciones de curado húmedo y seco

| Mezcla | Edad | Resistencia a la compresión, Mpa | | Resistencia a la tracción, Mpa | | Densidad, Kg/m ³ | |
|--------|------|----------------------------------|------|--------------------------------|------|-----------------------------|-------|
| | | Húmedo | Seco | Húmedo | Seco | Húmedo | Seco |
| LWC1 | 3 | 25.6 | 24.1 | 2.02 | 1.54 | 1844 | 1806 |
| | 7 | 32.4 | 30.3 | 2.51 | 1.99 | 1847 | 1791 |
| | 28 | 35.2 | 31.7 | 2.92 | 2.2 | 1850 | 1781 |
| | 90 | 37.4 | 34 | 3.06 | 2.45 | 1855 | 1775 |
| | 365 | 39.1 | 35.8 | 3.08 | 2.54 | 1862 | 17764 |
| LWC2 | 3 | 22 | 20.4 | 1.78 | 1.34 | 1831 | 1789 |
| | 7 | 28.2 | 26.4 | 2.22 | 1.74 | 1836 | 1771 |
| | 28 | 32.1 | 29.5 | 2.64 | 2.06 | 1841 | 1760 |
| | 90 | 34 | 30.9 | 2.83 | 2.24 | 1853 | 1754 |
| | 365 | 35.5 | 32.5 | 2.91 | 2.29 | 1853 | 1748 |
| LWC3 | 3 | 20 | 19.2 | 1.66 | 1.28 | 1834 | 1787 |
| | 7 | 25 | 23.6 | 2.06 | 1.6 | 1837 | 1771 |
| | 28 | 29.7 | 27.8 | 2.49 | 1.95 | 1840 | 1759 |
| | 90 | 31.2 | 29.7 | 2.64 | 1.97 | 1849 | 1752 |
| | 365 | 32.6 | 31.1 | 2.73 | 2.16 | 1848 | 1749 |
| LWC4 | 3 | 19.7 | 18.8 | 1.61 | 1.15 | 1827 | 1783 |
| | 7 | 24.8 | 23.8 | 2.01 | 1.48 | 1832 | 1766 |
| | 28 | 29 | 26.5 | 2.45 | 1.89 | 1836 | 1754 |
| | 90 | 31 | 28.9 | 2.52 | 1.9 | 1840 | 1750 |
| | 365 | 32.1 | 30.2 | 2.66 | 1.98 | 1842 | 1741 |
| LWC5 | 3 | 16 | 15 | 1.27 | - | 1812 | 1778 |
| | 7 | 19.7 | 18.2 | 1.53 | 1.18 | 1817 | 1763 |
| | 28 | 23.4 | 21.8 | 1.95 | 1.56 | 1823 | 1745 |
| | 90 | 24.9 | 23.6 | 2.07 | 1.61 | 1826 | 1741 |
| | 365 | 25.9 | 24.2 | 2.16 | 1.69 | 1832 | 1736 |

Fuente: Mouli & Khelafi (2007)

En la investigación concluyen que los diseños de mezcla realizados pueden considerarse como concreto estructural ligero por haber obtenido resistencias a la compresión mayores a 17 Mpa y tener una densidad seca menor a 1850 Kg/m³. Se puede apreciar que para las condiciones de curado, tanto en curado húmedo como en seco, el primero lleva una ligera ventaja respecto al segundo en relación a los ensayos sometidos, sin embargo, la diferencia no es grande; esto debido al agua absorbida por el agregado ligero, el cual cura internamente al concreto. Por último, se

puede concluir que pese a la existencia de un método referencial para el diseño de concreto estructural ligero, se opta por los investigadores diseñar este tipo de concretos especiales, de manera empírica, debido a que cada agregado ligero utilizado para elaborar concreto contará con diferentes porcentajes de absorción, dando como resultado mezclas con diferentes propiedades físicas y mecánicas.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural como agregado fino de la cantera Raqchi, Cuzco-2018.

1.3.2 Objetivos específicos

1.3.2.1 *Objetivo específico número 01*

Determinar la dosificación de los diseños de mezcla, para obtener concreto estructural ligero, que cumpla con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03, utilizando a la puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino.

1.3.2.2 *Objetivo específico número 02*

Evaluar el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

1.4 Justificación

1.4.1 Justificación Teórica

Esta investigación se realiza con el objetivo de aportar al conocimiento existente sobre la elaboración de concreto estructural ligero, utilizando como alternativa a la puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino. Los resultados obtenidos servirán como base de datos para

futuras investigaciones, dado que en la actualidad no se cuenta con la información necesaria para el adecuado desarrollo del uso de puzolanas naturales como agregado fino en el diseño de concreto estructural ligero.

1.4.2 Justificación práctica

A lo largo de la historia la necesidad de construir obras arquitectónicas especiales, han obligado a la búsqueda de nuevos materiales, tecnologías y formas para poder realizar estas construcciones. Siendo una de estas la de obtener un concreto ligero y resistente. El Perú no es ajeno a esta realidad, el crecimiento vertical ha aumentado en los últimos años, teniendo como resultado cada vez estructuras más pesadas, lo que refleja un mayor dimensionamiento de elementos estructurales, aumentando el costo y tiempo en el proyecto.

Adicionalmente la existencia de puzolana natural en el país, pues Díaz y Ramírez (2009) realizan una recopilación acerca de las canteras de puzolana natural en el Perú, existiendo 12 canteras en total, ubicándose en las regiones de Amazonas, Arequipa, Ayacucho, Cuzco, Puno y Tacna, lo que nos permite comprobar la factibilidad de usar estos materiales como parte de los agregados del concreto, y más aún la factibilidad de usar la puzolana natural de la cantera Raqchi de la ciudad de Cuzco como alternativa para elaborar concreto estructural ligero, pues no es un recurso escaso en el país. Iza (2009) utiliza agregados volcánicos (puzolana natural) para la elaboración de concreto ligero, obteniendo concretos con densidades de hasta 1200 kg/m³ y resistencias a la compresión que fluctuaban entre los 60kg/cm² hasta un máximo de 150 kg/cm². Lo que presenta un antecedente de la factibilidad de estos agregados para el desarrollo del concreto ligero.

Según la Unión de Concreteras (UNICON, s.f), se ha utilizado concreto ligero en el Perú, en algunas estructuras, como por ejemplo como cobertura de techo de nuestro aeropuerto Jorge

Chavez ubicado en Lima-Callao. De igual manera se utilizó este tipo de concretos para la elaboración del revestimiento de tuberías de planta criogénica en la llamada Planta de Licuefacción de Gas natural Pampa Melchorita – Perú LNG, ubicado en Cañete. Esto demuestra la poca utilización de este tipo de concretos especiales en el País, siendo necesaria su investigación e implementación.

El usar agregados ligeros, permite reducir aproximadamente en un 20% a 30% el peso específico del concreto, reduciendo el peso de la edificación, es así que se busca por medio de esta investigación realizar un buen aprovechamiento de la puzolana natural existente en el país en la elaboración de concreto estructural ligero, que pueda reducir el dimensionamiento de elementos estructurales, aumentar la rapidez de construcción y reducir los tiempos de transporte y acarreo (Short y Kinniburgh, 1967) , reflejando una disminución en los costos globales de la estructura.

Es por ello, que el desarrollo de esta investigación contribuirá a la utilización de puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, para la elaboración de concreto estructural ligero, el cual se presenta como una alternativa de solución para las diversas obras de ingeniería a realizarse en el Perú.

1.4.3 Justificación metodológica

El desarrollo de esta investigación aporta a la elaboración de concreto estructural ligero utilizando como agregado fino a la puzolana natural de la cantera Raqchi, siguiendo los procesos y consideraciones que se explicarán a lo largo de todo el desarrollo de esta investigación. El cual podrá ser estudiado, desarrollado y perfeccionado por futuros investigadores interesados en estos concretos especiales.

1.4.4 Justificación social

El desarrollo de concreto estructural ligero, es de gran importancia para el sector construcción, pues en los últimos años la necesidad de una vivienda en el país ha incrementado, ocasionando que las personas construyan sus viviendas en lugares inadecuados y peligrosos, reflejando un déficit de viviendas en el país, ocasionado por el alto costo de las viviendas en la actualidad. El uso de este tipo de concreto permite que los tiempos y costos del proyecto disminuyan, es así que el uso masivo de este tipo de concretos hará posible que las viviendas tengan un costo más asequible para los peruanos; así también, estamos contribuyendo a la reducción de la contaminación del medio ambiente que son causados cada año por la elaboración de estos materiales utilizados en la construcción y por ende dando una mejor calidad de vida a la sociedad, siendo así necesaria la investigación y desarrollo de estos concretos especiales en el Perú.

1.4.5 Limitaciones de la investigación

1.4.5.1 *Limitaciones en el ámbito del material*

En la presente investigación tendremos las siguientes limitaciones referentes al material; sin embargo, dichas limitaciones no afectan al desarrollo y cumplimiento de los objetivos de la investigación.

- Se limita al uso de puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino para poder elaborar concreto estructural ligero.
- Se limita al uso de Arena gruesa de la ciudad de Lima, para poder elaborar las mezclas de concreto patrón de control.
- Se limita al uso de Piedra Huso # 6, con TMN de 3/4”, procedente de la cantera de Unicon ubicada en Jicamarca.
- Se limita al uso de cemento portland Tipo I, Cemento Sol.

- Se limita al uso de agua potable de la ciudad de Lima, Distrito de Magdalena del Mar.
- Se limita al uso de aditivo plastificante, el cual estará en función del peso del cemento.

1.4.5.2 *Limitaciones en el ámbito de estudio*

En esta investigación tendremos las siguientes limitaciones con lo que respecta al ámbito de estudio; sin embargo, dichas limitaciones no afectan al desarrollo y cumplimiento de los objetivos de la investigación.

- Se realizarán los siguientes ensayos como parte de la caracterización física de los agregados: granulometría, según la Norma Técnica Peruana 400.012(NTP, 2001); material que pasa la malla N°200, según la Norma Técnica Peruana 400.018 (NTP, 2002); contenido de humedad, según la NTP 339.185(2013); peso específico y porcentaje de absorción, según las NTP 400.022(2013) y la NTP 400.021(2002); peso unitario, según la NTP 400.017(2011); porque, son los ensayos necesarios a realizar para poder hacer el diseño de mezcla, y cumplir así con los objetivos de la investigación.
- Se realizarán los siguientes ensayos como parte del control de calidad en estado fresco del concreto: ensayo de asentamiento del concreto de cemento portland, según la NTP 339.035 (2009); ensayo de temperatura del concreto, según la NTP 339.184 (2002); ensayo de peso unitario y rendimiento del concreto, según la NTP 339.046 (2008); puesto que, son los ensayos más representativos usados en obras de construcción para controlar la calidad del concreto en estado fresco.
- Se realizará el ensayo de resistencia a la compresión, según la ASTM C39 (2005), como parte de la evaluación del concreto en estado endurecido, puesto que es el ensayo más común de desempeño que se usa en la actualidad para el diseño de estructuras de concreto.

- Se realizará el ensayo de resistencia a la tracción indirecta, según la ASTM C496 (2004), como parte de la evaluación del concreto en estado endurecido, puesto que sirve para evaluar la resistencia al cortante y para calcular la longitud de desarrollo del refuerzo en el diseño estructural de miembros de concreto ligero.
- Se realizará el ensayo de resistencia a la flexión del concreto, según la ASTM C78 (2002), como parte de la evaluación del concreto en estado endurecido, puesto que es un ensayo común usado para el cálculo de losas y pavimentos, información que servirá como dato para futuras investigaciones del uso de este material, frente a ese tipo de estructuras.
- Se realizará el ensayo de Densidad en estado de equilibrio según la ASTM C567 (2005), el cual será calculado luego de realizar el ensayo de densidad en estado seco del concreto según la ASTM C567 (2005), para posteriormente hallar teóricamente la densidad en estado de equilibrio. ASTM C567 (2005) afirma que se ha realizado una numerosa cantidad de ensayos que pueden demostrar que pese a la existencia de diferentes contenidos de humedad inicial que presentan los agregados ligeros, aproximadamente la densidad en estado de equilibrio será mayor en 50 kg/m³ respecto a su densidad seca al horno. En consecuencia, al obtener la densidad en estado de equilibrio teóricamente, no afectará a la veracidad ni al cumplimiento de los objetivos de esta investigación.

Los ensayos antes mencionados serán suficientes para cumplir con los objetivos de la investigación, ya que se desea evaluar el desempeño de concreto estructural ligero en base a los ensayos más representativos de control de calidad, cumpliendo con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03, cosa que se logra cumplir con la realización de dichos ensayos, pese a la existencia de otros ensayos que podrían aplicarse.

1.4.5.3 *Limitaciones geográficas*

- Se realizará las mezclas de concreto en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería Civil, en la ciudad de Lima.
- Se realizará los ensayos de los agregados y control de calidad del concreto, en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional Federico Villarreal, Facultad de Ingeniería Civil y Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería, facultad de Ingeniería Civil, en la ciudad de Lima.

1.5 **Hipótesis**

1.5.1 **Hipótesis principal**

¿Tendrán buen desempeño los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural como agregado fino, de la cantera Raqchi, Cuzco - 2018?

1.5.2 **Hipótesis secundarias**

1.5.2.1 *Hipótesis secundaria número 01*

¿La dosificación de los diseños de mezcla, nos permitirá obtener concreto estructural ligero que cumpla con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03, utilizando a la puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino?

1.5.2.2 *Hipótesis secundaria número 02*

¿Será adecuado el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03?

CAPÍTULO II

II. Marco Teórico

2.1 Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1 Definición del concreto estructural ligero

Según ACI 213R-03 el concreto estructural ligero se define como todo aquel concreto que tiene una resistencia mínima a la compresión a 28 días de 17 MPa; una densidad en estado de equilibrio entre 1120 y 1920 Kg/m³ y se compone en su totalidad de agregados de peso ligero o una combinación de agregados peso ligero y normal.

El Reglamento Nacional de Edificaciones E060 (RNE, 2009) define al concreto estructural ligero como todo aquel que tiene como requisito el cumplimiento de lo estipulado en el título 3.3 de dicha norma y cuenta con una densidad en estado de equilibrio que es inferior a los 1850 kg/m³.

En esta investigación se elaborará concreto estructural ligero cumpliendo con los requisitos de resistencia y densidad, según ACI 213R-03.

2.1.2 Ventajas y desventajas del uso de concreto estructural ligero

Short y Kinniburgh (1967) destacan las siguientes ventajas al usar concreto ligero:

- Presentan menor densidad que el concreto convencional.
- Reducción de cargas muertas (peso de la estructuras).
- Menores costos de transporte y acarreo.
- Menores tiempos de ejecución en la obra, que con los materiales convencionales.
- Baja conductividad térmica.
- Buen aislante acústico.
- En algunas ocasiones presenta el gran mérito de proporcionar salidas a ciertos desechos de plantas industriales.

- Mayor resistencia al fuego que el concreto convencional.

Suarez y Valdez (2010) mencionan las siguientes desventajas de usar concreto ligero, frente al concreto convencional:

- Los agregados ligeros pueden resultar más costosos que el agregado convencional; sin embargo, esta diferencia se compensa con el ahorro de tiempo y costos en el transporte y colocación del concreto, así también, en la disminución del peso de la estructura, lo cual influye en la reducción de volúmenes de concreto y cantidades de acero, reduciendo el costo global del proyecto.
- Debido al bajo módulo de elasticidad que presentan, se pueden producir mayores deformaciones que un concreto convencional.
- No es posible calcular con exactitud a la relación agua/cemento en el concreto ligero, debido al gran porcentaje de absorción que tienen los agregados ligeros.
- Respecto a la contracción del concreto, la originada por el secado, es superior a la originada en un concreto convencional, por lo que es importante tener en cuenta al momento de dimensionar los elementos estructurales.
- Se necesita mano de obra más calificada para la elaboración y colocación del concreto ligero, en comparación de un concreto convencional.
- Será necesario considerar un mayor recubrimiento al concreto, para evitar la corrosión del acero, debido a la gran absorción del concreto ligero.

2.1.3 Clasificación del concreto ligero

ACI 213R-03 clasifica al concreto ligero según la densidad y aplicación del concreto, tal como se muestra en la tabla N° 22.

Tabla 22
Clasificación del concreto ligero según su densidad

| Densidad del concreto | Resistencia a la compresión | Aplicación |
|---|-----------------------------|-------------|
| 300kg/m ³ - 1120kg/m ³ | 0.7 a 7 Mpa | Aislante |
| 1120kg/m ³ - 1680kg/m ³ | 7 a 17 Mpa | Relleno |
| 1680kg/m ³ - 1920kg/m ³ | > 17Mpa | Estructural |

Fuente: ACI 213R-03.

2.1.4 Métodos de obtención del concreto ligero

Rodríguez (2017) afirma: “La multiplicidad de tipos existentes dificulta la clasificación de los concretos ligeros en categorías y divisiones netamente diferenciadas en base a los distintos métodos de elaboración, ya que algunos utilizan simultáneamente varios de ellos” (p.10).

Existen tres maneras que de manera simultánea o individual, permitirá elaborar concreto ligero en sus distintos tipos, siendo los siguientes: concreto sin finos, concreto con agregados ligeros y concreto celular o aireado (Short y Kinniburgh, 1967).

2.1.4.1 Concreto sin finos:

El concreto sin finos, se caracteriza por poseer nada o poco contenido de agregado fino, generando así que este concreto cuente con vacíos distribuidos uniformemente. Este tipo de concreto consiste en el conjunto de agregado grueso y pasta de cemento. Comparado con el concreto convencional, la gran interconexión entre los vacíos que tiene, le proporciona una baja densidad. El concreto sin finos debido a las características que tiene, es ideal para pisos y aquellas estructuras en las que se requiere drenado. Sin embargo, no es recomendable en aquellos lugares

donde el agua a drenar es agresiva para el concreto. El agregado grueso debe tener como principal característica el ser perfectamente un material de un solo tamaño (10 y 20mm entre los más comunes); no obstante, se ha encontrado que los agregados combinados (10 mm y 7mm, y 20mm y 14mm) funcionan satisfactoriamente (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 2007).

La resistencia de este tipo de concretos depende de los agregados que vayan a ser usados, así como también del contenido de mezcla; al igual que en un concreto convencional, la resistencia de un concreto sin finos aumenta a medida que el contenido de cemento se incrementa. La mayoría de los concreto sin finos se hacen en una relación cemento/agregados entre 1:6 y 1:10 en volumen, lo que dependerá básicamente de la resistencia a compresión deseada y del agregado que se utilice (Short y Kinniburgh, 1967).

El concreto sin finos, a diferencia del concreto convencional, es sumamente sensible al contenido de agua. Es así, que al existir una gran variedad de agregados, no podría ser utilizada una sola proporción de contenido de agua para una mezcla dada, deberá determinarse el contenido de agua más conveniente para cada tipo de agregado realizando mezclas tentativas. En el caso de que se use una cantidad insuficiente de agua, se experimentaría una pérdida de cohesión entre las partículas generando como consecuencia una pérdida de resistencia en el concreto. De lo contrario, si se utiliza demasiada agua, ocurriría segregación en la mezcla, ocasionando que las partículas de cemento se escurrirán de los agregados y se segregarán formando una capa de lechada, que deja a la estructura del concreto deficiente en cemento y consecuentemente más débil (Short y Kinniburgh, 1967).

2.1.4.2 *Concreto celular o aireado:*

El concreto aireado es un material celular de peso ligero. Es diferente a otros concretos pues en su mayoría no contienen agregados, puede considerarse como un mortero aireado. Básicamente,

el concreto aireado o celular se elabora introduciendo aire u otro gas, en una lechada de cemento y arena fina, y permitiéndosele que frague en estas condiciones. En la práctica comercial la arena es remplazada frecuentemente por cenizas de combustible pulverizado u otro material silicoso, y el cemento puede sustituirse por la cal. (Short y Kinniburgh, 1967, p.307).

Existen dos métodos diferentes para lograr la aeración del concreto, el primero, consiste en que, por medio de una reacción química, se puede generar un gas adentro de la mezcla cuando esta se encuentra todavía en un estado plástico; y el segundo, en que se pueden introducir burbujas de aire mezclado en el concreto con una espuma estable, o bien, injertando partículas de aire por medio de un agente inclusor de aire. El primero de estos métodos es el que se usa principalmente en las fábricas de elementos precolados, en las cuales las unidades precoladas pasan a curarse en autoclaves con objeto de producir concretos que tengan una resistencia relativamente alta y una contracción por secado un tanto baja. El segundo método se utiliza principalmente para colados de concreto insitu, como en el caso de plantillas o acabados aislantes para azoteas o para empaques aislantes de tuberías. (Short y Kinniburgh, 1967, p.56).

Mediante unos ajustes apropiados en la composición y en el método de fabricación, el concreto aireado puede producirse con un límite de densidades entre 400 y 1440 Kg/m³. Es importante mencionar, que un producto que tenga variaciones tan amplias en la densidad, tendrán necesariamente un amplio límite de variación en otras propiedades. (Short y Kinniburgh, 1967, p.308).

Aunque el concreto aireado es funcionalmente un concreto, su composición es muy diferente a la del concreto común, tal y como generalmente se le conoce; el material puede describirse mejor como un mortero aireado o un bloque aireado de arena y cal. En efecto el término “concreto” puede ocasionar ciertas confusiones, por lo cual se ha sugerido como término más descriptivo el de

“silicato aireado” o “silicato celular”, (...). El concreto curado al aire tiene a menudo una resistencia menor de la mitad que de la de los concretos de la misma densidad curados en autoclave; muestran además, una contracción por secado que es cuatro y hasta cinco veces mayores que la del concreto de autoclave. (Short y Kinniburgh, 1967, p.309).

2.1.4.3 *Concreto con agregados ligeros*

Este tipo de concretos tiene la característica principal de que se sustituyen los agregados minerales convencionales usados en el concreto común, por agregados ligeros, los cuales pueden ser inorgánicos u orgánicos. La estructura que presentan los concretos con agregados ligeros es aparentemente parecida a la de un concreto común, pero contienen en su interior una gran cantidad de alvéolos ocupando un volumen considerable. A diferencia de los concretos celulares o aireados, los cuales tienen distribuidos los alvéolos uniformemente en su masa, los concretos con agregados ligeros tienen una distribución heterogénea de vacíos repartidos en los agregados (Ventura, 2015).

Alvarez y Saes (2012) mencionan que el concreto que utiliza algunos agregados de peso ligero, es en general, el único capaz de permitirnos elaborar mezclas que funcionen estructuralmente, para su aplicación en elementos estructurales, pues se le considera dentro de los concretos de altas prestaciones debido al desarrollo de sus propiedades. Sin embargo, pese a que la resistencia a compresión alcanzada por los concretos que utilizan agregados de peso ligero es en general baja, la utilización de agregados ligeros artificiales nos ha permitido mejorar estos resultados, ya que el uso de la arcilla expandida, ha logrado desarrollar resistencias de hasta casi 1000 kg/cm² con densidades menores a los 2000 kg/m³, revolucionando así el uso de los concretos ligeros estructurales.

Es importante, que para que este tipo de concretos reúnan las propiedades esenciales requeridas es indispensable que los agregados ligeros estén distribuidos de manera muy regular en la mezcla,

que no estén colmatadas por el mortero de cemento y que no presenten una excesiva absorción de agua (Ventura, 2015).

2.1.5 Propiedades en estado fresco del concreto

2.1.5.1 Trabajabilidad y consistencia

A) Trabajabilidad del concreto

Según Rivva (2000) define a la trabajabilidad como:

La facilidad con la cual una cantidad determinada de materiales puede ser mezclada para formar el concreto, y luego este puede ser, para condiciones dadas de obra, manipulado, transportado y colocado con un mínimo de trabajo y un máximo de homogeneidad. (p.205)

La trabajabilidad no está determinada por una sola variable, si no, que está en función de muchos factores, como; las propiedades de los agregados, la cantidad de cemento, la granulometría, contenido de agua, la proporción de agregado fino/ agregado grueso, porcentaje de aire en la mezcla, aditivos y finalmente las condiciones ambientales (Rivva, 2000).

Por otro lado, la fineza del cemento también influye en la trabajabilidad, pues los cementos que cuentan con una alta fineza, mejoran considerablemente esta propiedad; sin embargo, se debe controlar el agrietamiento que este puede causar por el secado. Se considera que los cementos que tienen una fineza del orden de 3300 cm^2/gr son los que más se recomiendan (Rivva, 2000).

Oshiro (1979), menciona que generalmente para lograr una buena trabajabilidad los puntos más importantes a considerar son:

- Hacer uso de una mayor cantidad de cemento.
- Buena forma de agregados.
- Porcentaje de finos un tanto mayor.
- Hacer uso de aditivos apropiados.

- Entremezclar materiales con la ceniza fina, que produzca consistencia en la mezcla. (p.54).

Es así que, Chandra y Berntsson (2002) mencionan que en los concretos ligeros, es común, que se produzcan divergencias en los valores de trabajabilidad y densidad, debido a la alta absorción que producen estos agregados. Así también, encontraron que las mezclas son más densas, haciendo necesario el uso de plastificantes.

B) Consistencia del concreto

Rivva (2000) define a la consistencia del concreto de la siguiente manera:

La consistencia es una propiedad que define la humedad de la mezcla por el grado de fluidez de la misma; entendiéndose por ello que cuanto más húmeda es la mezcla, mayor será la facilidad con la que el concreto fluirá durante su colocación. (p. 208).

Si bien muchos relacionan la consistencia con la trabajabilidad, éstas tienen cierta relación, más, no son sinónimos; esto debido a que puede existir una mezcla trabajable para una estructura de pavimentos con una alta consistencia, la cual no será la apropiada para una placa o columna, pues dificultará su colocación; del mismo modo, una mezcla con una consistencia adecuada para una columna o viga, será muy trabajable para la colocación de estructuras masivas (Rivva, 2000).

La consistencia dependerá del contenido de agua utilizado, las propiedades físicas de los agregados y de su granulometría (Rivva, 2000).

Abanto (2013) menciona que la consistencia del concreto se mide mediante un ensayo de control, el cual es llamado prueba de revenimiento o con su nombre en inglés “Slump Test”, este ensayo es utilizado para evaluar el comportamiento del concreto en su estado fresco. Como su nombre lo indica, esta prueba fue desarrollada por el investigador Duft Abrams, y consiste

básicamente en la medición del asentamiento de la mezcla luego de ser consolidado en un molde troncocónico y luego de desmoldar. Este ensayo nos ayudará a medir la “consistencia”; es decir, la capacidad que tendrán nuestras mezclas para adaptarse al encofrado o molde con facilidad, manteniéndose homogéneo con un mínimo de vacíos.

Abanto (2013) menciona que las clases de mezcla según su asentamiento son:

Tabla 23

Clases de mezcla según su asentamiento

| CONSISTENCIA | SLUMP | TRABAJABILIDAD | MÉTODO DE COMPACTACIÓN |
|---------------------|--------------|-----------------------|-------------------------------|
| Seca | 0" a 2" | Poco trabajable | Vibración normal |
| Plástica | 3" a 4" | Trabajable | Vibración ligera chuseado |
| Fluida | > 5" | Muy trabajable | Chuseado |

Fuente: Abanto (2013).

ACI 213R-03 menciona que generalmente el slump del concreto ligero debe limitarse a un máximo de 5", ya que un slump de 3" imparte suficiente trabajabilidad, manteniendo la cohesión y el cuerpo del concreto, evitando así que se produzca el fenómeno de segregación del concreto.

El ensayo de revenimiento o Slump, se realiza de acuerdo a las recomendaciones de la NTP 339.035 (2009).

2.1.5.2 Temperatura del concreto

La temperatura que presentan los materiales utilizados en las mezclas de concreto, tienen gran influencia en esta propiedad, es así, que los agregados al tener una mayor presencia en volumen en las mezclas, influirán en la temperatura del concreto. Por lo que en base a lo antes mencionado, en climas cálidos, donde se necesita disminuir la temperatura del concreto, según las recomendaciones del ACI 305 R, se puede enfriar al agregado grueso por inmersión de agua fría o por el rociado de las pilas del agregado. De manera contraria, para climas fríos, donde se requiere

incrementar la temperatura del concreto, según las recomendaciones del ACI 306R, puede ser necesario calentar a los agregados para alcanzar las temperaturas requeridas (Rivva, 2000).

El ensayo de temperatura del concreto se realiza de acuerdo a las recomendaciones de la NTP 339.184 (2002).

2.1.5.3 *Peso unitario del concreto fresco*

El ensayo del peso unitario del concreto en estado fresco se realiza de acuerdo a las recomendaciones de la NTP 339.046 (2008).

El peso unitario es el peso varillado, el cual se expresa en kg/m^3 de una muestra representativa del concreto en su estado fresco. El peso unitario se ve influenciado por el porcentaje de aire y el grado de compactación, pues un incremento del porcentaje de aire generará que el peso unitario disminuya; por otro lado, la excesiva compactación, incrementará esta propiedad. El tipo de agregado utilizado, será el responsable de las modificaciones del peso unitario. El ensayo utilizado para determinar el peso unitario del concreto, es de gran importancia para calcular y comprobar el rendimiento de los diseños de mezcla, poder determinar la cantidad de materiales por cada metro cúbico de concreto, así como el porcentaje de aire; dándonos así una idea del grado de compactación y de la calidad del concreto (Leandro, 2010).

Ayala (como se citó en Ventura, 2015) menciona, que el peso unitario del concreto ligero, debido, a la gran variedad de agregados ligeros, de los diversos tipos de concretos, de los métodos de fabricación usados, de la colocación, entre otros, son muy variables, ya que presentarán características diferentes según los factores mencionados. Pese a eso, el rango de variación puede estar entre 400 y 1900 kg/m^3 .

2.1.6 Propiedades en estado endurecido del concreto

2.1.6.1 Resistencia a compresión

Rivva (2000) afirma. “La resistencia es el máximo esfuerzo que puede ser soportado por el concreto sin romperse. La resistencia en compresión se utiliza como índice de la calidad del concreto” (p.232).

Según Neville y Brooks (1998) indica que uno de los factores más importantes para evaluar la resistencia del concreto es la densidad, es decir, en términos generales tendrán una mayor resistencia a la compresión aquellos concretos que tengan una mayor densidad. Es así, que el que cumplirá la función de reducir el peso del concreto será el agregado ligero, ya que la resistencia a compresión del concreto ligero está en función al aporte de sus partes.

Ayala (como se citó en Ventura, 2015) menciona que para definir la resistencia a la compresión de los concretos ligeros, se tiene que definir primero un tipo específico de concreto, ya que varía considerablemente de una clase a otra. Es así, que a pesar de que sea un mismo tipo de concreto ligero, habrá variaciones en resistencia que dependerán del peso volumétrico, contenido de humedad, relación agua/cemento empleada y el tipo de fabricación, donde un factor importante es el curado del concreto. Mientras, que en el concreto convencional la relación agua/cemento es indicador de su resistencia, en general, en los concretos ligeros, esta relación no es usada como tal para medir la resistencia a la compresión, en virtud de la dificultad para cuantificar el agua de hidratación debida sobre todo a la porosidad de los agregados. Por lo que la base empleada para definir la resistencia del concreto, estará determinada al contenido de cemento para un revenimiento dado (slump). (p. 26).

ACI 213R-03 menciona que para que un concreto ligero se considere estructural, este debe alcanzar resistencias mayores a 17 MPa a 28 días.

Ayala (como se citó en Ventura, 2015) menciona que es conveniente fijar una idea general de los rangos en que varían el concreto ligero según sea el método utilizado para elaborarlo, es así que en la Tabla N°24 se muestra la relación de la resistencia a la compresión con el peso volumétrico de los concretos ligeros, donde se puede observar que el concreto con agregados ligeros es el que mayores resistencias alcanzan.

Tabla 24

Relación de la resistencia a la compresión y el peso volumétrico en concretos ligeros

| Concreto Ligero | Resistencia a la compresión (Kg/cm²) | Peso Volumétrico (Kg/m³) |
|------------------------|--|--|
| Sin Finos | 50-90 | 1800-2000 |
| Celulares o Aireados | 15-60 | 400-1600 |
| Agregado ligero | 70-500 | 500-2100 |

Fuente: Ayala (como se citó en Ventura, 2015)

Tantaquilla (2017) menciona que la relación entre la densidad y resistencia no son los únicos factores importantes que determinarán la resistencia del concreto, existen otros factores como:

- Relación Agua/Cemento

Terreros (como se citó en Tantaquilla, 2017) menciona que a menor relación agua/cemento, se obtendrán mejores resistencias; sin embargo, para concretos ligeros, es muy difícil estimar este valor, debido a la porosidad que presentan estos concretos.

- Granulometría del agregado ligero

Martínez (como se citó en Tantaquilla, 2017) indica que por lo general, el tamaño máximo de agregados ligeros artificiales más usados, son de 8 mm. Se considera que el tamaño máximo que presenten los agregados ligeros naturales sea de 20 mm.

- Aditivos plastificantes

Terreros (como se citó en Tantaquilla, 2017) menciona que el uso de aditivos químicos plastificantes desarrollados mediante la Normativa ASTM C594 permiten alcanzar altas resistencias.

- Curado del concreto

Neville y Brooks (como se citó en Tantaquilla, 2017) mencionan que es fundamental la hidratación con agua del concreto ligero a través del curado de esta, no obstante, mencionan que el incremento de la resistencia a la compresión es menos afectado por un pobre curado, esto debido a que la estructura porosa de los agregados ligeros absorben agua y esto ayuda a mantener hidratado al concreto contribuyendo así con el curado interno.

El ensayo de resistencia a la compresión del concreto se realiza de acuerdo a las recomendaciones del ASTM C39 (2005).

2.1.6.2 *Densidad de equilibrio*

ASTM C567 (2005) define a la densidad en equilibrio de la siguiente manera:

Densidad alcanzada por un concreto estructural liviano después de ser expuestos a una humedad relativa de $50 \pm 5\%$ y una temperatura de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ ($73.5 \pm 3.5^{\circ}\text{F}$) durante un periodo de tiempo suficiente para alcanzar una masa constante. (p.344).

ASTM C567 (2005) menciona que la densidad del concreto en estado fresco al utilizar agregados de peso ligero, estará en función de diversos factores como; la dosificación de la mezcla, del porcentaje de aire, del contenido de agua, del peso específico y contenido de humedad de los agregados ligeros. De igual manera, en general, para el concreto estructural ligero, la densidad en estado de equilibrio es alcanzada alrededor de los 180 días.

ASTM C567 (2005) afirma que se ha realizado una numerosa cantidad de ensayos que pueden demostrar que pese a la existencia de diferentes contenidos de humedad inicial que presentan los agregados ligeros, aproximadamente la densidad en estado de equilibrio será mayor en 50 kg/m^3 respecto a su densidad seca al horno.

La densidad en equilibrio calculada teóricamente según la ASTM C567 (2005), se determina de la siguiente manera:

$$E_c = O_m + 50 \frac{kg}{m^3}$$

Dónde:

E_c = Densidad de Equilibrio calculada

O_m = Densidad seca al horno medida, Kg/m³

Tantaquilla (2017) menciona que es importante resaltar que a medida que se incrementa la presencia del agregado ligero (porcentaje), la densidad en estado de equilibrio se aleja más de su densidad seca; es decir, que en esta investigación, mientras menos porcentaje de agregado ligero existía, menor era la diferencia entre estas densidad; sin embargo, al utilizar los porcentajes en 20%, 40%, 60%, 80% o 100%, la diferencia que existía comenzó a crecer proporcionalmente a cada porcentaje utilizado, alcanzando para el total de 100% una diferencia aproximada de 40 kg/m³.

El ensayo de densidad de equilibrio se realiza de acuerdo a las recomendaciones del ASTM C567 (2005).

2.1.6.3 *Densidad seca*

ASTM C567 (2005) define a la densidad seca de la siguiente manera: “Densidad alcanzada por un concreto estructural liviano después de ser colocado en un horno de secado a 110 ± 5 °C (230 ± 9 °F) durante un periodo de tiempo suficiente para alcanzar una masa constante” (p. 344).

El ensayo de densidad seca al horno se realiza de acuerdo a las recomendaciones del ASTM C567 (2005).

2.1.6.4 *Resistencia a cortante*

Ayala (como se citó en Ventura, 2015) menciona:

En virtud de que los concretos de agregados livianos son los más apropiados para usarse con carácter estructural, las investigaciones sobre resistencia a la cortante (tensión diagonal) se han encaminado casi exclusivamente a este tipo de concretos, (...). La determinación de la resistencia a tensión diagonal se hace en base al esfuerzo de tensión recabado mediante la prueba brasileña, más que por su resistencia a la compresión. El uso de arenas naturales finas aumenta la resistencia a la tensión y por lo tanto incrementa la tensión diagonal. (p. 29).

Álvarez y Saez (2012) mencionan que si bien el concreto ligero a corto plazo presenta una resistencia a la cortante ligeramente inferior a la del concreto de peso normal, esta diferencia se va acortando a largo plazo. Esto se debe a que en el concreto normal la falla ocasionada por la cortante es producida bien por la separación de los agregados con la masa o bien por que el mortero de cemento llegó a su esfuerzo final, pero difícilmente se da por fractura en los agregados. Por lo que las fisuras iniciales generadas por el cortante, no indican agotamiento, debido a que se forma un ensamblaje dentado generado por los agregados que bordean la fisura, requiriendo mayores esfuerzos para llegar a su agotamiento. En el caso del concreto ligero, no se genera el engranaje dentado debido a que la fisura atraviesa los agregados, es decir, luego de la primera fisura no existirá resistencia a la cortante, por lo que el cortante alcanzado por el concreto ligero será inicialmente menor a la alcanzada por el concreto de peso normal. Es así, que se indica que inicialmente la resistencia a la cortante del concreto ligero será de 10 % menor que la del concreto convencional, no obstante, a largo plazo, luego de que el concreto ha sido sometido a numerosas cargas repetidas, el ensamblaje generado inicialmente se rompe debido a que los agregados se han

ido liberando poco a poco, perdiendo así la ventaja inicial que tenía el concreto de peso normal respecto al concreto ligero.

ASTM C 496 (2004) menciona que la resistencia a la tracción por hendimiento se utiliza para calcular la resistencia a la cortante y longitud de desarrollo del refuerzo de los concretos estructurales ligeros.

ASTM C 496 (2004) indica que por lo general la resistencia alcanzada a la tracción por hendimiento será mayor que la alcanzada a la tracción directa, pero menor que el módulo de rotura alcanzado por la resistencia a flexión del concreto.

Tantaquilla (2017) menciona que es necesario investigar el comportamiento del concreto estructural ligero frente a cargas de tensión, debido a que estos al tener gran presencia de poros, si se incrementa la deformación, los poros se harán mayores, lo que producirá una falla por coalescencia, siendo principalmente común que este tipo de fallas se den cuando son sometidas a fuerzas de tensión.

La resistencia a cortante del concreto se controla mediante el ensayo de resistencia a la tracción indirecta de acuerdo a las recomendaciones del ASTM C496 (2004).

2.1.6.5 *Resistencia a la flexión*

Rivera (sf) menciona que la resistencia a la flexión del concreto es superior a la resistencia en tracción; sin embargo, es muy inferior en comparación con su resistencia a compresión.

Este parámetro, sirve para el diseño de pavimentos rígidos, ya que al tener contacto las llantas de un vehículo con el pavimento, estas ejercen esfuerzos a compresión los cuales pueden llegar a ser de 5 o 6 kg/cm², mostrando una clara diferencia a la resistencia a compresión del concreto que esta entre 175 a 350 kg/cm². Es así que para pavimentos, la resistencia a compresión no es el ensayo que demuestra la calidad de esta, si no, la resistencia a flexión (Rivera, sf).

Es así que con fines netamente investigativos, se realizará el ensayo de resistencia a la flexión, con el fin de que sirva como base de partida para la investigación de concretos permeables, ya que al ser un concreto poroso, puede ser adaptado y mejorado para la elaboración de estos concretos.

El ensayo de resistencia a la flexión se realiza de acuerdo a las recomendaciones del ASTM C78 (2002).

2.1.7 Diseño de mezclas del concreto

Torre (2004) menciona:

Se define a la selección de las proporciones de los materiales a utilizar en un metro cúbico de concreto, como al proceso que se basa en la aplicación práctica y técnica de los conocimientos existentes de los componentes del concreto y de su interacción entre ellos; permitiendo obtener un diseño de mezcla que pueda satisfacer de manera económica y eficiente las diferentes necesidades del proyecto constructivo.

Álvarez y Saez (2012) mencionan que para dosificar a los concretos ligeros, es indispensable conocer los requerimientos iniciales, siendo las propiedades más frecuentes a evaluar las siguientes; tamaño máximo, consistencia, resistencia y densidad. Es así, que para dosificar a los concretos ligeros, a diferencia del concreto de peso normal, se tendrá una nueva variable, la densidad. Esta propiedad estará en función del tipo de agregado a utilizar y de las diferentes proporciones volumétricas de los materiales que constituyen al concreto. Por otro lado existe una relación proporcionalmente directa entre la resistencia y la densidad del concreto ligero, pues se puede afirmar de manera general que a igual condición de otros parámetros, el aumento de la densidad será indicador de un aumento de resistencia en el concreto; no obstante, existirá ciertas limitaciones debido a que para el uso de concreto estructural, la densidad debe estar entre los

rangos de 1200 a 2000 kg/m³ generalmente; sin embargo, en algunas investigaciones ya se han obtenido concretos estructurales con densidades que bordean los 1000 kg/m³.

Dentro de las consideraciones a tener en cuenta, según Álvarez y Saez (2012) tenemos:

- El agregado de peso ligero tiene una resistencia que es inferior a la del agregado de peso normal, por lo que la transmisión de esfuerzos en el concreto es soportada fundamentalmente por el mortero que lo envuelve. Esto obliga a que necesitemos trabajar con diseños de mezclas más resistentes y ricas, especialmente para los concretos estructurales ligeros, ya que al someter al ensayo de resistencia a compresión, la rotura se da de manera habitual en el agregado.
- Una de las características principal del agregado ligero, es su alto grado de absorción, lo que puede generar una reducción del agua efectiva en la pasta de cemento; por lo que para evitar ésta pérdida, que ocasionaría que el concreto en estado fresco pierda trabajabilidad y en estado endurecido, se vea afectado la resistencia y la durabilidad, se recomienda utilizar agregados hidrofugados, de no poder ser posible, se debe seguir estos tres métodos: Inmersión del agregado ligero en agua por un tiempo de 12 horas o realizar un premezclado con la arena con al menos el 50 % de agua de la mezcla o semi saturar al agregado ligero mediante regado abundante con algún medio, por lo menos durante 24 horas o 48 horas antes del mezclado.

Si nos referimos a la consistencia que debe tener la mezcla de este tipo de concretos, se recomienda tener una consistencia blanda (2 -4 pulgadas) para que al momento de colocar en obra pueda ser poco plástica, nunca seca. No es aconsejable contar con una consistencia fluida o líquida, debido a que al ser una mezcla que tiene como agregados a materiales de baja densidad, el concreto

puede llegar a segregarse por flotación de los mismos, a no ser que se usen aditivos especiales que aumenten la cohesión de la masa y así eviten dicha segregación (Álvarez y Saez, 2012).

Iza (2009) menciona que no existe un método exacto, ni se cuenta con normas específicas para el diseño de concreto ligero utilizando agregados de origen volcánico, por lo tanto se puede utilizar como método de diseño, el realizar varias mezclas, con el fin de obtener las cantidades base de los materiales a utilizar, los cuales tendrán que cumplir con los requerimientos de trabajabilidad, densidad y resistencias buscadas en el concreto; para posteriormente realizar un concreto patrón el que será utilizado en la construcción. Es así que debido al gran porcentaje de absorción que presentan los agregados ligeros, el determinar de manera exacta la relación agua/cemento para cálculos precisos de diseño, no será posible.

A continuación, se describirán los principales métodos de diseño de mezclas del concreto:

2.1.7.1 *Método ACI 211.1*

Solano (2003) menciona que dentro de esta clasificación realizada por el American Concrete Institute (ACI) se encuentran aquellos diseños de mezcla de concreto que utilizan agregados de peso normal y pesado, así mismo incluyendo concreto masivo.

- **Concreto Normal:** Solano (2003) menciona que son aquellos concretos que utilizan como agregados, aquellos de peso normal, siendo así el concreto de mayor uso en la industria de la construcción. Los agregados cuentan con un peso unitario que varían entre 1440 a 1760 kg/m³ y tienen una densidad que puede variar desde los 2200 a 2530 kg/m³, la cual dependerá del tamaño máximo del agregado a utilizar y la cantidad de aire de la mezcla.
- **Concreto Pesado:** Solano (2003) indica que son aquellos concretos que utilizan agregados pesados (barita, minerales de hierro como la magnetita, limonita y hematita,

entre otros). Los agregados utilizados en estos diseños, cuentan con un peso específico que puede variar entre los 3.4 a 7.5 tn/m³; obteniendo así con la ayuda de estos agregados concretos que pueden llegar a pesar hasta 5600 kg/m³. Estos concretos especiales son usados generalmente en la construcción de reactores nucleares o aquellas instalaciones que requieren la protección de rayos gamma y rayos X.

- **Concreto Masivo:** Solano (2003) menciona que son aquellos concretos que cuentan con un volumen de colocación lo suficientemente grandes, que ameritan que con el objetivo de reducir el agrietamiento, sea necesaria tomar medidas para poder controlar el calor generado durante la hidratación del cemento, así también evitar el cambio volumétrico generado por la pérdida de agua. En algunas ocasiones se pueden utilizar agregados de tamaño máximo de hasta 6 pulgadas; sin embargo, no necesariamente son concretos con agregados de gran tamaño. Generalmente se utiliza este tipo de concretos en la construcción de presas o cimentaciones; no obstante, para aquellas estructuras que cuenten con una gran masa, puede llegar a ser una buena alternativa este tipo de concretos.

Torre (2004) indica que los pasos básicos para diseñar una mezcla de concreto con este método son los siguientes:

- a) Es necesario contar con la siguiente información:

Resistencia a compresión requerida para la estructura, tipo de clima a tener durante el vaciado, condiciones extremas a las que será expuesta la estructura de concreto, forma y tamaño de las estructuras a vaciar y características de los materiales.

- b) Determinar la resistencia requerida:

Torre (2004) menciona que esta resistencia estará en base a la disponibilidad de información del diseñador o en función a la experiencia de este; sin embargo, es importante que solo un pequeño porcentaje de muestras tenga una resistencia inferior a la especificada, por lo que siempre se va a tener que diseñar para algo más de resistencia, tal cual como se observa en la siguiente figura:

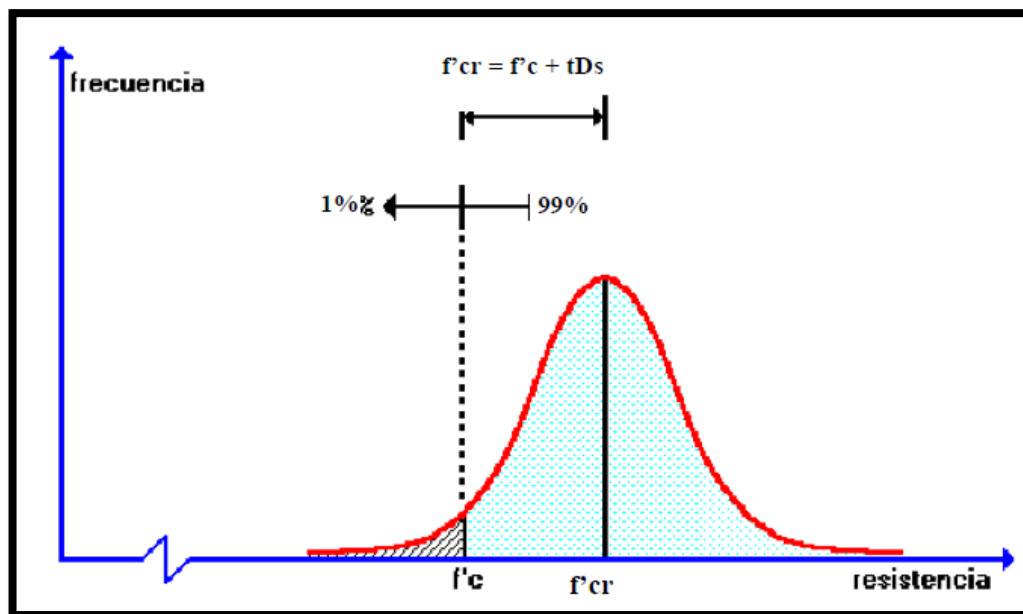


Figura 1. Curva de Distribución Normal de Frecuencias. Fuente. Torre, (2004).

Según Torre (2004), el comité ACI 3188- 99, menciona tres posibles casos que se podrían presentar al tratar de calcular la resistencia requerida (f'_{cr}):

- Caso 01: Si en obra se cuentan con datos estadísticos de producción así como los resultados de rotura de resistencia a la compresión de probetas, en este caso se utilizarán las siguientes fórmulas para calcular el f'_{cr} :

$$F'_{cr} = f'c + 1.34Ds \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$F'_{cr} = f'c + 2.33 Ds - 35 \quad \dots\dots\dots (2)$$

Donde:

$F'c$: Resistencia a la compresión especificada (Kg/cm²)

F'_{cr} : Resistencia a la compresión requerida (kg/cm²)

D_s : Desviación estándar en obra (kg/cm²)

Siendo el f'_{cr} requerido para diseñar, el mayor valor de los resultados obtenido en las ecuaciones (1) y (2).

- Caso 02: Si solo se cuenta con datos estadísticos, entre 15 y 30 resultados:

Se utilizarán las formulas (1) y (2) mencionadas anteriormente, donde el valor de D_s se amplificará por un valor de acuerdo a la tabla N° 25.

Tabla 25

Factor de incremento de la desviación estándar

| N° ENSAYOS | FACTOR DE INCREMENTO |
|-------------------|-----------------------------|
| Menos de 15 | Usar Tabla caso 3 (N°26) |
| 15 | 1.16 |
| 20 | 1.08 |
| 25 | 1.03 |
| 30 o más | 1 |

Fuente: Torre (2004).

Por lo tanto para el cálculo del f'_{cr} se utilizará las siguientes formulas:

$$F'_{cr} = f'_{c} + 1.34 (\alpha D_s) \dots\dots\dots (3)$$

$$F'_{cr} = f'_{c} + 2.33 (\alpha D_s) - 35 \dots\dots\dots (4)$$

Donde:

α : Factor de amplificación

- Caso 03: Si se cuenta con escasos (menos de 15 ensayos) o ningún dato estadístico:

En este caso, el Comité del ACI nos indica que debemos usar la tabla N°26 para el cálculo del f'_{cr} .

Tabla 26
Tabla para el cálculo del f'_{cr}

| f'_c especificado | F'_{cr} (Kg/cm ²) |
|---------------------|---------------------------------|
| < 210 | $f'_c + 70$ |
| 210 a 350 | $f'_c + 84$ |
| > 350 | $f'_c + 98$ |

Fuente: Torre (2004).

c) Seleccionar el tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN):

Torre (2004) menciona que el tamaño máximo del agregado en su mayoría de veces se ve limitado de acuerdo a las características geométricas y las condiciones de refuerzo de las estructuras; no obstante, hay consideraciones a tener en cuenta como la producción, el transporte y la colocación del concreto, que pueden llegar a limitar el tamaño máximo del agregado. El TMN del agregado grueso no debería ser mayor a uno de estos puntos:

- Un quinto de la menor dimensión entre las caras de encofrados.
- Tres cuartos del espacio libre mínimo entre barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras, torones o ductos de pre esfuerzo.
- Un tercio del peralte de las losas.

Torre (2004) menciona que si bien lo mencionado anteriormente se debe cumplir, estas limitaciones pueden ser evitadas si los métodos de compactación y la trabajabilidad nos garantizan que nuestro concreto podrá ser colocado en las estructuras sin dejar vacíos o zonas en forma de panal.

d) Selección del asentamiento:

Torre (2004) menciona que si no se encuentra en los requerimientos especificado el asentamiento, entonces se puede partir con los valores indicados en la tabla N° 27.

Tabla 27

Asentamiento recomendados para diversos tipos de estructuras

| TIPO DE ESTRUCTURA | SLUMP MÁXIMO | SLUMP MÍNIMO |
|---|--------------|--------------|
| Zapatas y muros de cimentación reforzados | 3" | 1" |
| Cimentaciones simples y calzaduras | 3" | 1" |
| Vigas y muros armados | 4" | 1" |
| Columnas | 4" | 2" |
| Muros y pavimentos | 3" | 1" |
| Concreto Ciclópeo | 2" | 1" |

Fuente: Torre (2004).

e) Determinación del contenido de aire:

Torres (2004) indica que el ACI 211 establece una tabla con la cantidad aproximada en porcentaje del aire atrapado a ser esperado en una mezcla de concreto que no cuenta con aire incorporado, el cual estará en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso. Es así, que si por cuestiones de durabilidad debido a la presencia de estructuras expuestas a ciclos de congelación y deshielo, agua de mar o sulfatos, es necesario concreto con aire incorporado, esta tabla también presenta los niveles recomendables del porcentaje promedio de aire para el concreto. Estos valores se muestran en la tabla N° 28.

f) Determinación del volumen de agua:

Abanto (2013) menciona que el contenido de agua por metro cúbico de concreto necesario para los requerimientos de asentamiento, estarán en función de varios factores, como; la granulometría, textura y forma, perfil y tamaño máximo de los agregados; así también del porcentaje de aire presente en la mezcla, no siendo apreciablemente afectado por la cantidad de cemento.

Abanto (2013) menciona que con ayuda de la Tabla N° 28 se podrá tener para los diferentes tamaños máximos de agregado una inicial estimación del contenido de agua

a utilizar en las mezclas del concreto ya sea con la incorporación o no de aire. Como se puede observar la Tabla N° 28 no toma en cuenta la influencia de factores como granulometría, textura y perfil de los agregados para la estimación del contenido de agua utilizado en la mezcla. Sin embargo, si bien esta tabla nos da lo suficientemente valores adecuados para una primera estimación, los factores antes mencionados, tendrá gran incidencia en el contenido de agua, por lo que finalmente los valores requeridos para el agua de mezclado, pueden estar por arriba o por debajo de dichos valores.

Es así que las diferencias entre los valores antes mencionados, no son un indicador que afecta la resistencia final del concreto, debido a que existen otros factores compensatorios que están involucrados. Concluyendo el autor que las formas de las partículas de un agregado, no son un indicador de la calidad de producción de resistencia.

Tabla 28

Requerimientos aproximados de agua de mezclado y de contenido de aire

| ASENTAMIENTO O SLUMP | Agua en lt/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales de agregados gruesos y consistencia indicados | | | | | | | |
|---|--|------|------|-----|--------|-----|-----|-----|
| | 3/8" | 1/2" | 3/4" | 1" | 1 1/2" | 2" | 3" | 6" |
| CONCRETOS SIN AIRE INCORPORADO | | | | | | | | |
| 1" a 2" | 205 | 200 | 185 | 180 | 160 | 155 | 145 | 125 |
| 3" a 4" | 225 | 215 | 200 | 195 | 175 | 170 | 160 | 140 |
| 6" a 7" | 240 | 230 | 210 | 205 | 185 | 180 | 170 | --- |
| Cantidad aproximada de aire atrapado, en porcentaje | 3 | 2.5 | 2 | 1.5 | 1 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |
| CONCRETOS CON AIRE INCORPORADO | | | | | | | | |
| 1" a 2" | 180 | 175 | 165 | 160 | 145 | 140 | 135 | 120 |
| 3" a 4" | 200 | 190 | 180 | 175 | 160 | 155 | 150 | 135 |
| 6" a 7" | 215 | 205 | 190 | 185 | 170 | 165 | 160 | --- |
| Promedio recomendado para el contenido total de aire, en porcentaje | 8 | 7 | 6 | 5 | 4.5 | 4 | 3.5 | 3 |

Estas cantidades de agua de mezclado se utilizarán en el cálculo del factor cemento en mezclas de prueba. Son valores máximos para agregado grueso angular y bien formado, y cuya granulometría está dentro de las especificaciones aceptadas (ASTM C 33 o ITINTEC 400.037). Los valores del asentamiento en concretos que contienen agregados con tamaños máximo mayor de 1 1/2", están basados en ensayos de asentamientos hechos después de retirar, por cernido húmedo las partículas mayores de 1 1/2".

Fuente: Abanto (2013).

g) Selección de la relación agua/cemento

Torre (2004) menciona que la relación agua/cemento, si bien, se determina en función de los requisitos de resistencia, es importante tener en cuenta factores como las propiedades para el acabado y la durabilidad. Es así que para condiciones severas de exposición, si bien se puede cumplir con los requisitos de resistencia requeridos con valores altos de relación agua/cemento, estas deberán mantenerse bajas. Para mejor entendimiento se muestran las tablas N° 29 y N° 30.

Tabla 29

Relación agua/cemento y resistencia a la compresión del concreto

| Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm²) | Relación agua/cemento de diseño en peso | |
|--|--|---------------------------|
| | Concreto sin aire incorp. | Concreto con aire incorp. |
| 450 | 0.38 | --- |
| 400 | 0.43 | --- |
| 350 | 0.48 | 0.4 |
| 300 | 0.55 | 0.46 |
| 250 | 0.62 | 0.53 |
| 200 | 0.7 | 0.61 |
| 150 | 0.8 | 0.71 |

Fuente: Abanto (2013).

Abanto (2013) menciona que las relaciones que se observan en la Tabla N° 29, han sido dadas para un tamaño máximo de agregado de $\frac{3}{4}$ " y 1" para una cantera dada. Es así que se debe tener en cuenta que la resistencia a compresión es inversamente proporcional con el tamaño máximo del agregado, debido que la resistencia generada por una relación agua/cemento dada, logrará que este se incremente con la disminución del tamaño máximo del agregado.

Tabla 30
Requisitos para condiciones especiales de exposición

| Condición de la exposición | Relación máxima agua - material cementante (en peso) para concretos de peso normal * | f'c mínimo (MPa) para concretos de peso normal o con agregados ligeros* |
|--|---|--|
| Concreto que se pretende tenga baja permeabilidad en exposición al agua. | 0.5 | 28 |
| Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo en condición húmeda o a productos químicos descongelantes. | 0.45 | 31 |
| Para proteger de la corrosión el refuerzo de acero cuando el concreto está expuesto a cloruros provenientes de productos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o a salpicaduras del mismo origen. | 0.4 | 35 |

Fuente: RNE, Norma E 0.60 (2010)

h) Cálculo del contenido de cemento

Se podrá obtener este valor, dividiendo los valores obtenidos en los pasos (f)/(g).

i) Cálculo de los pesos de los agregados

Abanto (2013) indica que se usará la Tabla N°31 para fines de cálculo del peso del agregado grueso, pues nos proporciona valores aproximados del volumen de agregado grueso para un metro cubico de concreto, pues como se puede observar en dicha tabla, este estará en función del módulo de fineza y tamaño máximo para una similar trabajabilidad.

Cantidad de agregado grueso (en kg) = (Vol. De agregado grueso de tabla N°31 en m3)
x (Peso unitario seco y compactado del agregado grueso en kg/m3)

Tabla 31

Volumen del agregado grueso por unidad de volumen de concreto

| Tamaño Nominal Máximo del agregado grueso | Volumen de agregado grueso, seco y compactado (*) por unidad de volumen de concreto, para diversos módulos de fineza del agregado fino | | | |
|---|--|------|------|------|
| | Módulo de Fineza | | | |
| | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 3 |
| 3/8" | 0.5 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| 1/2" | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 |
| 3/4" | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.6 |
| 1" | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 1 1/2 " | 0.76 | 0.74 | 0.72 | 0.7 |
| 2" | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 3" | 0.81 | 0.79 | 0.77 | 0.75 |
| 6" | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 |

* Los volúmenes de agregado grueso mostrados, está en condición seca y compactada, tal como se describe en la norma ASTM C29

Fuente: Torre (2004).

Abanto (2013) menciona que para la estimación del volumen del agregado fino, se utilizará el método de los volúmenes absolutos, que será la diferencia entre el volumen unitario del concreto y la suma de los volúmenes absolutos de los materiales ya conocidos (cemento, agua, aire, agregado grueso).

- j) Presentar el diseño de mezcla en condiciones secas.
- k) Corrección por humedad del diseño de mezcla en estado seco:

Abanto (2013) menciona que en obra al momento de elaborar el concreto, los agregados a utilizar se encontraran húmedos, por lo que es importante determinar los pesos de los materiales en condiciones húmedas.

Torre (2004) indica que para el cálculo del peso húmedo de los agregados, se utilizará la siguiente fórmula:

$$\text{Peso agregado húmedo} = \text{Peso agregado seco} (1 + \text{Cont. Humedad el agregado} (\%))$$

Torre (2004) menciona que es importante calcular el agua efectiva, debido a que el agua a utilizarse en la mezcla de concreto deberá incrementarse o reducirse en una cantidad igual a la humedad libre que contiene el agregado, es decir, humedad total menos absorción, por lo que se usará la siguiente fórmula.

$$\text{Aporte de humedad de los agregados} = \text{Peso agregado seco (\% cont. De humedad - \% absorción)}$$

Entonces

$$\text{Agua efectiva} = \text{Agua de diseño} - \text{aporte de humedad de los agregados}$$

- l) Presentar el diseño de mezcla en condiciones húmedas.
- m) Realizar los ajustes a las mezclas de pruebas

Torre (2004) menciona que una vez que se tiene el diseño de mezclas, se procederá a elaborar la mezcla de concreto con los datos obtenidos en los diferentes pasos antes mencionados; se procederá a realizar el ensayo de consistencia del concreto y se comparará con la consistencia requerida, de no ser iguales, se procede a realizar un segundo diseño de mezclas con las proporciones ajustadas, que garanticen la consistencia requerida; para luego sacar muestras de concreto y someterles al ensayo de resistencia a la compresión, de no ser igual o mayor a la resistencia requerida; se procederá a realizar una tercera mezcla con las proporciones ajustadas, que garanticen el cumplimiento de la consistencia y resistencia requerida.

2.1.7.2 *Método del módulo de fineza de la combinación de agregados*

Torre (2004) menciona que este método al igual que el método ACI 211.1 tiene como base las tablas dadas por el ACI, la principal diferencia consiste en la forma de calcular el peso del agregado fino y agregado grueso, por lo que para su cálculo será necesario utilizar la Tabla N° 32.

Según Torre (2004) los pasos para el diseño de mezclas según este método será el siguiente:

a) Es necesario contar con la siguiente información:

Resistencia a compresión requerida para la estructura, tipo de clima a tener durante el vaciado, condiciones extremas a las que será expuesta la estructura de concreto, forma y tamaño de las estructuras a vaciar y características de los materiales.

b) Selección de la resistencia requerida (f'_{cr})

Al igual que en el método ACI 211.1 se procederá a calcular el f'_{cr} de acuerdo la información de datos estadísticos con los que se cuente.

c) Selección del TMN del agregado grueso.

d) Selección del asentamiento según la tabla N° 27.

e) Determinación del contenido de aire según la tabla N° 28.

f) Selección del contenido de agua según la tabla N° 28.

g) Selección de la relación agua/cemento ya sea por resistencia a la compresión o por durabilidad según las tablas N° 29 y N° 30.

h) Cálculo del contenido de cemento dividiendo (f)/(g).

i) Cálculo del volumen absoluto de los materiales sin incluir los agregados.

j) Cálculo del módulo de fineza de la combinación de agregados:

Se calculará el módulo de fineza de la combinación de agregados (m), utilizando la tabla N° 32.

Tabla 32
Módulo de fineza de la combinación de agregados

| Tamaño Nominal Máximo del agregado grueso | Módulo de fineza de la combinación de agregados el cual da las mejores condiciones de trabajabilidad para distintos contenidos de cemento en bolsas/m ³ | | | |
|---|--|------|------|------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 3/8" | 3.96 | 4.04 | 4.11 | 4.19 |
| 1/2" | 4.46 | 4.54 | 4.61 | 4.69 |
| 3/4" | 4.96 | 5.04 | 5.11 | 5.19 |
| 1" | 5.26 | 5.34 | 5.41 | 5.49 |
| 1 1/2 " | 5.56 | 5.64 | 5.71 | 5.79 |
| 2" | 5.86 | 5.94 | 6.01 | 6.09 |
| 3" | 6.16 | 6.24 | 6.31 | 6.39 |

Fuente: Torre (2004).

k) Cálculo del porcentaje de agregado fino:

Luego de calcular el módulo de fineza de la combinación de agregados, se utilizará la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de agregado fino.

$$\% \text{ Agregado fino} = (mg - m) / (mg - mf)$$

Donde:

m : Módulo de fineza de la combinación de agregados

mg: Módulo de fineza del agregado grueso

mf: Módulo de fineza del agregado fino

l) Cálculo de los pesos secos de los agregados.

m) Presentación del diseño en estado seco.

n) Corrección del diseño por humedad.

o) Presentación del diseño en estado húmedo.

2.1.7.3 Método ACI 211.2

Solano (2003) hace mención que en esta clasificación se encuentran aquellos concretos que utilizan como agregados, a aquellos de peso ligero; ya sea agregado grueso de peso ligero con agregado fino de peso normal o con la combinación de ambos agregados ligeros.

Diseñando así mezclas denominadas como concreto estructural ligero. En este apartado del ACI se desarrolla el método de diseño aproximado para este tipo de concretos.

El ACI 211.2-98 menciona la existencia de dos maneras de diseñar este tipo de concretos especiales, los cuales se describen a continuación.

- Método de gravedad específica:

En el ACI 211.2-98 mencionan que este método es aplicable para aquellas mezclas donde se cuente con agregado grueso de peso ligero y agregado fino de peso normal. Se puede observar que la principal variable para este método es la gravedad específica. Este método será similar al método ACI 211.1 debido a que inicialmente se siguen los mismos procedimientos, no obstante, se utilizarán las tablas brindadas por el ACI 211.2-98; tanto para el cálculo del porcentaje de contenido de aire, contenido de agua, relación agua cemento y cálculo del volumen del agregado grueso por unidad de volumen del concreto. Así también brindan información de la estimación del peso fresco del concreto ligero en función del factor de gravedad específica y el porcentaje de contenido de aire.

- Método volumétrico:

En el ACI 211.2-98 mencionan que este método es aplicable para aquellas mezclas que contienen agregados de peso ligero o aquellas mezclas que cuentan con agregados de peso ligero y agregados de peso normal. Este método consiste básicamente en contar con información brindada por los productores de agregados ligeros u alguna otra fuente que de un punto de inicio (proporciones en volúmenes sueltos húmedos y contenidos de cemento necesario para alcanzar una determinada resistencia), para que posteriormente con esas informaciones se puedan elaborar mezclas de concreto confiables para los

requerimientos solicitados en dichas mezclas. Por lo que para este método es indispensable determinar el peso unitario suelto de los agregados.

Para mayor entendimiento de estos dos métodos, se adjunta el link de descarga de la guía ACI 211.2-98 en las referencias.

Por último es importante indicar que para la presente investigación no se utilizarán los métodos antes descritos, debido a que como se observa en los antecedentes, cada método utilizado en el diseño de mezcla, fue modificado para cumplir con los objetivos de sus investigaciones. Es así, que Tupa (2018) pese a que se podría decir que utiliza el método volumétrico del ACI 211.2 -98 para sus diseños de mezcla, este usa diseños tentativos para calcular el porcentaje de agregados óptimo de sus diseños, siendo un método ya más empírico. De la misma manera Ventura (2015) menciona que debido a que es difícil de controlar la absorción de los agregados ligeros, la utilización de la relación agua/cemento para cálculos precisos de dosificación resulta difícil de calcular, por lo que realizó ajustes a sus diseños de mezcla. Ibarcená (2013) utiliza el método ACI 211.1, sin embargo realiza mezclas empíricas con diferentes dosificaciones tentativas de agregado grueso y agregado fino. Es así que debido a que no existe un método óptimo para el diseño de mezclas de concreto estructural ligero y más aun utilizando como agregado fino a la puzolana natural de la cantera Raqchi, se optó por un diseño más empírico tal cual se explicará más adelante.

2.1.8 Agregados ligeros utilizados en las mezclas de concreto ligero

Álvarez y Saez (2012) clasifica a los agregados ligeros de la siguiente manera:

- Naturales no elaborados: Tendremos a los siguientes materiales, piedra pómez, conchas machacadas, diatomitas, tobas volcánicas, escorias, lapillo, travertinos.
- Naturales Elaborados: Tendremos a los siguientes materiales, Esquistos sinterizados, arcilla sinterizada, obsidiana expandida, Diatomita expandida, perlita expandida,

Vermiculita, Pizarra expandida, Esquisto Expandido, Arcilla expandida, Vidrio expandido.

- Industriales no elaborados: Se tendrá a los siguientes materiales, la escoria de alto horno, cenizas volantes.
- Industriales elaborados: Se tendrá los siguientes materiales: Cenizas expandidas, cenizas sinterizadas, espuma de escoria, escoria expandida.
- Orgánicos: Tendremos a los siguientes materiales como, las cascaras de cereales, virutas celulósicas, Partículas de plástico.

A continuación se describirán a los agregados ligeros más utilizados en la actualidad:

2.1.8.1 *Perlita*

Álvarez y Saez (2012) menciona que la perlita es un material muy ligero, cuya característica principal es su ligereza (30 a 180 kg/m³) y su baja conductividad térmica, es por esto que su principal uso es para aislamiento. Sin embargo, su resistencia a compresión es muy baja, siendo inferior a los 0.5 Mpa. La perlita se origina del calentamiento de los vidrios volcánicos a temperaturas extremas entre 900 y 1100 °C. Este material se trata de una roca vítrea rica en sílice, color marrón y cuenta con una dureza que varía entre 5.5 a 7 en la escala de Mohs).

Ventura (2015) indica que entre las denominaciones comerciales de este producto se encuentran: Pernalite, Superlite, Peralex, Ryolex, entre otros.

2.1.8.2 *Vermiculita*

Según Álvarez y Saez (2012) la vermiculita es un material muy ligero (50 a 125 kg/m³), presenta un color entre marrón oscuro y un amarillo claro, este material se obtiene mediante la cocción de ciertos filosilicatos a temperaturas que varía entre los 900 y 1100° C.

Según Ventura (2015) este material puede llegar a sufrir una expansión de 30 a 35 veces su volumen inicial, debido al proceso denominado exfoliación, liberación de vapor de agua por efectos del calor, el cual origina la expansión de la vermiculita. Los concretos ligeros que utilizan este material pueden llegar a alcanzar pesos específicos aparentes que rondan los 350 a 1200 kg/m³.

2.1.8.3 *Arcilla Expandida*

Según Álvarez y Saez (2012) describe a la arcilla expandida como uno de los agregados ligeros de mayor versatilidad conocidos actualmente, pues la utilización de este material nos permite elaborar desde concretos aislantes (550 kg/m³), hasta concretos que presentan una densidad menor a los 2000 kg/m³ y tienen una resistencia a la compresión elevada. Si se observara este material en un microscopio, este tiene una estructura cerrada porosa la cual es origen de los gases producidos en su fabricación. Es por ello que se dice que el origen de sus altas prestaciones está en la estructura de poros no comunicados, característica de este material.

2.1.8.4 *Esquistos y pizarras expandidas*

Según Álvarez y Saez (2012) menciona que estos materiales son muy parecidos a las arcillas expandidas, tienen una composición muy similar y cuentan con un proceso de fabricación muy semejante con la utilización de hornos rotatorios. Entre sus características tenemos que los esquistos cuentan con un contenido de carbono que varía entre 4 a 10 % y tienen una temperatura de expansión más elevada, siendo de 1350 a 1400 °C. Este tipo de materiales, debido a sus propiedades, son por lo general utilizados para la elaboración de concretos estructurales o en la producción de prefabricados, no siendo su uso común, el de ser aislante.

2.1.8.5 *Escoria y Ceniza sintetizada*

Según Álvarez y Saez (2012) describe a estos materiales que se origina del subproducto producido en la fabricación del hierro y las cenizas, las cuales son producidas en las plantas térmicas. La densidad con la que cuentan este tipo de materiales, es más alta que otros agregados ligeros, por lo que su uso es principalmente para la elaboración de concretos estructurales.

2.1.8.6 *Vidrio Celular*

Álvarez y Saez (2012) menciona que es un material de muy reciente uso en el mundo de la construcción, este material es creado a partir de polvo de vidrio cocido. Se le conoce también como vidrio expandido y a lo largo de estos años, se ha utilizado este material en las construcciones como aislante térmico o como protección contra el fuego, en otros casos para falsos techos donde existe la necesidad de mantener buenas condiciones de asepsia, sin olvidar su uso como agregado ligero en el diseño de concreto ligero. Es un material impermeable al agua y al vapor de agua, debido a que su principal característica es que las burbujas o células que encierran el material no están comunicadas entre sí, por otro lado es muy buen aislante térmico, además de ser un material incombustible. Es importante mencionar que debido a sus características, este material presenta una muy baja conductividad térmica, en torno a los $0.048\text{W/m}^\circ\text{C}$).

2.1.8.7 *Poliestireno Expandido*

Álvarez y Saez (2012) menciona que son muchas las empresas que utilizan este tipo de material ya sea para la formación de envases, piezas de soporte, moldes o incluso para la construcción; por lo que debido a esta manipulación se ocasiona un sobrante que generalmente se les llama “perlitas” de manera vulgar, y que es un sub producto que se debe reducir, reciclar o llevar a un vertedero autorizado. Es así, que este tipo de perlitas ya sean tratadas o sin tratar, pueden utilizarse para la elaboración de concreto ligero y morteros ligeros. Por lo antes mencionado, se podría dividir en

dos tipos a estos materiales; los naturales y los reciclados; si bien, los reciclados generan concretos con resistencias inferiores ($< 0.5 \text{ N/mm}^2$) para aquellos diseños de mezcla que tienen como único agregado a este material, se ha demostrado que la conductividad térmica $\alpha < 0.13$ según UNE – EN-1745: 2002, logrando así morteros con poliestireno expandido reciclado que tienen densidades que rondan los 300 kg/m^3 . Por ello, se puede contribuir al medio ambiente mediante el reciclado de estos materiales para ser utilizados en el mundo de la construcción. Evitando así la creación de un material nuevo para tal fin.

2.1.8.8 *Puzolanas*

La norma ASTM C 618 (como se citó en Villegas, 2012) define a la puzolana como: “Es un material silíceo o sílico-aluminoso, que finalmente dividido y en presencia de agua, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio para formar compuestos que poseen propiedades hidráulicas” (p. 9).

Díaz y Ramírez (2009) mencionan que se llama puzolana a la ceniza volcánica que se da en las faldas del Vesubio, originario de la población de Puzzuoli, lugar en el que desde tiempos de los romanos, esta roca venía siendo explotada. Posteriormente este término se extendió a todo los materiales que presentaban características similares a la puzolana natural, por lo que podían tener usos sustitutivos. Las puzolanas se caracterizan por que bajo este nombre se agrupan a una determinada cantidad de materiales, los cuales presentan gran diversidad, pues cuentan con diferencias en su composición mineralógica, química, origen y estructura, teniendo en común a lo que se llama hoy en día como actividad puzolánica.

Las puzolanas debido a sus propiedades desarrollan un endurecimiento hidráulico si estas son mezcladas con agua y a temperaturas ordinarias, pues estos materiales presentan minerales

aluminosos y silíceos que por sí solos no cuentan con cualidades cementantes, pero que reaccionan en presencia de agua con el hidróxido cálcico, el que funciona como activador.

Composición de las puzolanas

Díaz y Ramírez (2009) afirma: “Están compuestos de silicatos aluminos, alcalinos hidratados análogos a las arcillas, en forma vítrea o cristalina, y hay quien afirma que sus propiedades se deben a la sílice y alúmina libre” (p. 212).

Tabla 33

Composición química de las puzolanas

| | |
|--------------------------------|----------|
| Sílice | 42 - 66% |
| Alúmina | 14 - 20% |
| Fe ₂ O ₃ | 5 - 20% |
| CaO | 3 - 10% |
| MgO | 1 - 6% |
| Álcalis | 2 - 10% |
| H ₂ O | 1 - 15% |

Fuente: Orus (1985).

Camino y Camino (2017) adjuntan en su investigación la composición química de las puzolanas de la Cantera Raqchi, la cual se observa en la Tabla N°34 y nos servirá para un mejor entendimiento de la composición de este material.

Tabla 34

Composición química de las puzolanas de la cantera Raqchi

| | Muestra A | Muestra B | Muestra C |
|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| SiO ₂ | 64.73 | 63.62 | 64.05 |
| AL ₂ O ₃ | 13.29 | 14.18 | 13.75 |
| Fe ₂ O ₃ | 3.55 | 3.47 | 3.63 |
| CaO | 6.18 | 6.42 | 6.72 |
| MgO | 3.62 | 2.31 | 2.38 |
| Na ₂ O | 0.37 | 0.49 | 0.53 |
| K ₂ O | 3.45 | 3.48 | 3.17 |
| SO ₃ | 1.19 | 1.85 | 2.03 |
| Carbón | 0.92 | 1.02 | 0.99 |
| PPC | 2.67 | 2.63 | 2.55 |
| Total | 99.97 | 99.67 | 99.8 |

Fuente: Camino y Camino (2017).

Clasificación de las puzolanas

Díaz y Ramírez (2009) los clasifican de la siguiente manera:

- Puzolanas naturales:

Díaz y Ramirez (2009) mencionan que las puzolanas naturales se originan de las rocas eruptivas volcánicas, como las llamadas andesitas, traquitas, basaltos y riolitas, entre otras que han adquirido características de una roca frágil (deleznable), las cuales se presentan en formas de cenizas o escorias.

Las puzolanas naturales se producen por el enfriamiento brusco de la lava, este material está constituido principalmente por una masa vítrea que está cementando fragmentos de escorias, pómez, pequeños cristales de mica, augita, piroxenos, etc. Se pueden clasificar de acuerdo a su composición en básicas si presentan porcentaje de SiO₂ que varían entre 40 a 55 % y neutras si presentan porcentajes entre 65 a 70 %. (Díaz y Ramirez, 2009).

Villegas (2012) clasifica a las puzolanas naturales en cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas y tierras de diatomeas.

Cenizas Volcánicas, este tipo de material se ha ido formando por el carácter explosivo que presentan las erupciones en los volcanes, las cuales se convierten en pequeñas partículas que son templadas a temperatura de ambiente, generando lo que llamamos la formación del estado vítreo (Villegas, 2012).

Tobas volcánicas o Tufos (zeolitas), este tipo de materiales puzolánicos, son generados por acciones hidrotermales que recaen sobre las llamadas cenizas volcánicas y por su posterior cementación diagenética (Villegas, 2012).

Tierras de diatomeas (diatomitas), estos materiales son puzolanas de origen orgánico, provenientes de los depósitos de los caparazones silíceos de las algas unicelulares (Villegas, 2012).

- **Puzolanas artificiales:**

Según Villegas (2012) menciona que las puzolanas artificiales, son originadas en las plantas industriales, pues son un subproducto de estas, los cuales tratan a sus materiales térmicamente. Estos materiales se pueden clasificar de la siguiente manera:

Cenizas volantes (fly ash), este material es el subproducto que se origina en las plantas térmicas donde se genera electricidad (centrales termoeléctricas), las cuales utilizan carbón pulverizado como combustible, siendo este material resultado de la combustión del carbón (Villegas, 2012).

Arcillas activadas térmicamente, este material no es más que el calentamiento mediante tratamiento térmico a temperaturas de orden de 600 a 900°C de las arcillas naturales (Villegas, 2012).

Escorias de fundición, son producto de la fundición de aleaciones ferrosas en altos hornos, por lo que estas escorias deben ser bruscamente enfriadas para poder tener una estructura amorfa (Días y Ramírez, 2009).

Cenizas de residuos agrícolas, estos materiales son producto del quemado de las cenizas de bagaso o la paja de la caña de azúcar o cascarilla de arroz, pues estos obtienen gracias al quemado, un residuo mineral rico en alúmina y sílice, los cuales

tendrán una estructura que dependerá de la temperatura de su combustión (Días y Ramírez, 2009).

Usos de la puzolana

Días y Ramírez (2009) mencionan los usos de la puzolana en los siguientes sub sectores de la economía

- **En construcción**

En el sector de la construcción se utiliza a la puzolana en la industria del cemento puzolánico, el cual es la mezcla de clinker con puzolana. Es muy usado en aplicaciones de albañilería debido a su fraguado lento, y en construcciones costeras debido a que una de sus características más importantes es su resistencia al ataque del agua de mar. En el Perú existen los siguiente cementos puzolánicos; cemento portland puzolánico tipo IP, cemento portland puzolánico modificado tipo IPM y el cemento hidráulico modificado con puzolana tipo MP-RCTR. (Días y Ramírez, 2009).

La utilización de la puzolana como adición mineral para la elaboración de concretos con altas resistencias finales, se ha ido incrementando, estas resistencias por lo general se pueden apreciar a los 56 y 90 días de edad, y si bien, este tipo de concreto es aplicable para cualquier tipo de estructuras, se ha ido recomendando para aplicaciones que requieren de características especiales de durabilidad como ataque a los sulfatos y bajo calor de hidratación (Días y Ramírez, 2009).

La utilización de la puzolana en el concreto compactado con rodillo es uno de los logros más importantes en la aplicación de tecnología de presas, pues el proceso

constructivo y su reducido costo ha sido el causante de que se gane bastante aceptación alrededor del mundo en un corto tiempo. Si bien el concreto compactado con rodillo se utiliza para la construcción de presas, este ha sido utilizado también para pavimentos, pues debido a la rapidez con la que se puede poner en marcha este tipo de concretos, los bajos contenido de cementos utilizados, y la utilización de adiciones minerales como la puzolana, ha generado que este concreto sea atractivo para la industria de la construcción por el factor económico que este presenta. Es así que, el uso de la puzolana natural puede contribuir a reducir el costo de este tipo de concretos, pues se utiliza como sustituto parcial del cemento para reducir la cantidad de calor de hidratación y costos; así mismo, como un aditivo que incorpora finos a la mezcla y mejora la trabajabilidad al dosificar mezclas con volúmenes de pasta mínimos (Díaz y Ramírez, 2009).

Díaz y Ramírez (2009) mencionan que las puzolanas se han utilizado como agregados para el diseño de concreto estructural ligero, permitiendo así la construcción de prefabricados, con las ventajas de una disminución en peso y una más fácil maniobrabilidad de los productos, bloques, bovedillas, tuberías, etc.

- **Agrícola:**

En el campo agrícola se ha utilizado a la puzolana para el control de nutrientes, pues este presenta características que son idóneas para su empleo como substrato inerte, pudiéndose realizar un exhaustivo seguimiento de la planta debido a que se pueden controlar de manera adecuada los nutrientes y tratamientos mediante el agua de riego. Por otro lado, debido a la gran durabilidad, baja densidad y estabilidad que

presentan las puzolanas, se ha utilizado este material como aireantes y soportes de cultivos hidropónicos (Díaz y Ramírez, 2009).

- **Aislante térmico:**

Díaz y Ramírez (2009) mencionan que las puzolanas cuentan con valores medios inferiores a 0.21 Kcal. /Hm²C en su estado natural, lo que les convierte en un aislante de sumo interés.

- **Filtros naturales y absorbentes:**

Díaz y Ramírez (2009) mencionan que debido a la gran porosidad de las puzolanas, le hace un material de gran permeabilidad, permitiendo así el filtraje de líquidos. A su vez esta porosidad, le da una gran capacidad de absorción, permitiendo así su empleo en la industria, así como preparados olorosos (tierras volcánicas clorosas).

- **Instalaciones deportivas:**

Díaz y Ramírez (2009) mencionan que en el rubro de las instalaciones deportivas se ha utilizado a este material en la construcción de pistas de tenis y polideportivas, como también, cumpliendo la función de drenaje natural en los campos de fútbol.

- **Jardinería:**

Díaz y Ramírez (2009) mencionan que debido a la gran versatilidad de la puzolana en coloración, encontrando desde negras hasta rojas, además debido a su formación en lapilli cementado o bomba volcánica, permiten el uso de la puzolana como elemento decorativo, es así que un claro ejemplo del uso de estas, es los grandes maceteros de las olimpiadas de Barcelona. Se puede agregar, que uno de los factores de su gran uso en este rubro, es el escaso mantenimiento y la innecesaria contratación de personal especializado para su instalación.

Canteras de puzolana en el Perú por regiones

Díaz y Ramírez (2009) indican de que la puzolana en el Perú, está muy relacionada a la fabricación de cementos, como cementos puzolánicos, y de ladrillos, especialmente por aquellos productores que están ubicados cerca de las canteras de puzolana. En la Tabla N° 35 se puede apreciar la ubicación y el número de canteras existentes en nuestro país, siendo evidente de que contamos con puzolana en nuestras regiones para poder implementar el uso de este material para la elaboración de concreto estructural ligero.

Tabla 35
Canteras de puzolana en el Perú por regiones, año 2004

| REGIÓN | N° DE CANTERAS |
|----------|----------------|
| Amazonas | 1 |
| Arequipa | 3 |
| Ayacucho | 1 |
| Cusco | 1 |
| Puno | 3 |
| Tacna | 3 |
| TOTAL | 12 |

Fuente: Díaz (como se citó en Díaz y Ramírez, 2009).

2.1.9 Microestructura del concreto

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) menciona que en cuanto a microestructura cuenta con lo siguiente:

2.1.9.1 *Interfaces en el concreto*

Chandra y Berntsson (2002) mencionan que el concreto es un material que está compuesto por partículas agregadas con una gran variedad de tamaños y composición mineralógica, todo ello incrustado en una matriz de pasta de cemento hidratada (phc). Esta matriz endurecida se deriva de las reacciones de hidratación entre el agua y el cemento. No obstante, si bien el concreto está compuesto por cemento, agua y agregados, los concretos actuales tienen por lo general alguna de las siguientes adiciones:

- Aditivos Químicos
- Materiales puzolánicos como escorias de alto horno, ceniza volante o humos de sílice.
- Fibras discontinuas como las realizadas de acero, vidrio o algún otro material natural, sintético u orgánico.

Así también, el concreto estructural presenta la incorporación de barras de acero reforzadas, o cables pretensados; por lo que la presencia de estos materiales conlleva a una gran variedad de interfaces en el concreto, siendo las más importantes las siguientes (Chandra y Berntsson,2002) :

- Las diversas fases que componen la pasta de cemento hidratada (phc).
- La pasta de cemento hidratada y los granos de cemento no hidratados.
- La pasta de cemento hidratada y la porción no reaccionada de los materiales puzolánicos.
- La pasta de cemento hidratada y el agregado.
- La pasta de cemento hidratada y las fibras discontinuas.
- La pasta de cemento hidratada y el acero de refuerzo.
- Es importante mencionar que las fases sólidas, el agua o el aire, no serán mencionadas en esta revisión, ya que no contribuyen al comportamiento mecánico.

2.1.9.1.1 Naturaleza de las regiones de interfaz en el concreto

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que:

La combinación de diferentes mecanismos, como los enlaces de hidrógeno, las fuerzas de van der Waal, y probablemente los enlaces químicos, son los factores principales de que se generen los enlaces en los sistemas compuestos de cemento. Es por ello, que la naturaleza de estos

mecanismos, variará de un sistema a otro dependiendo de factores como las condiciones de hidratación, la naturaleza química de las materias, etc.

Así también, Mehta (como se citó en Tupa, 2018) con respecto a la pasta de cemento hidratado señala lo siguiente: “La naturaleza intrínseca de las fuerzas de unión, tanto entre los diversos productos de hidratación, como dentro de cada uno, permanece variable y por lo tanto indeterminado” (p. 35).

De la misma manera, Scrivener & Pratt (como se citó en Tupa, 2018), mencionan:

El movimiento relativo de los granos de arena y de cemento durante el mezclado y posiblemente la sedimentación de los granos de arena antes del fraguado de la pasta de cemento, puede conducir a regiones de baja densidad de pasta alrededor de los granos de arena y zonas de sangrado localizado en la interfaz donde grandes cristales de CH precipitan. (p. 35).

Según Chandra y Berntsson (2002), se han presentado varios modelos de las zonas de interfaz que varían entre sí, algunos de estos modelos lo podemos ver en la Fig. N° 02.

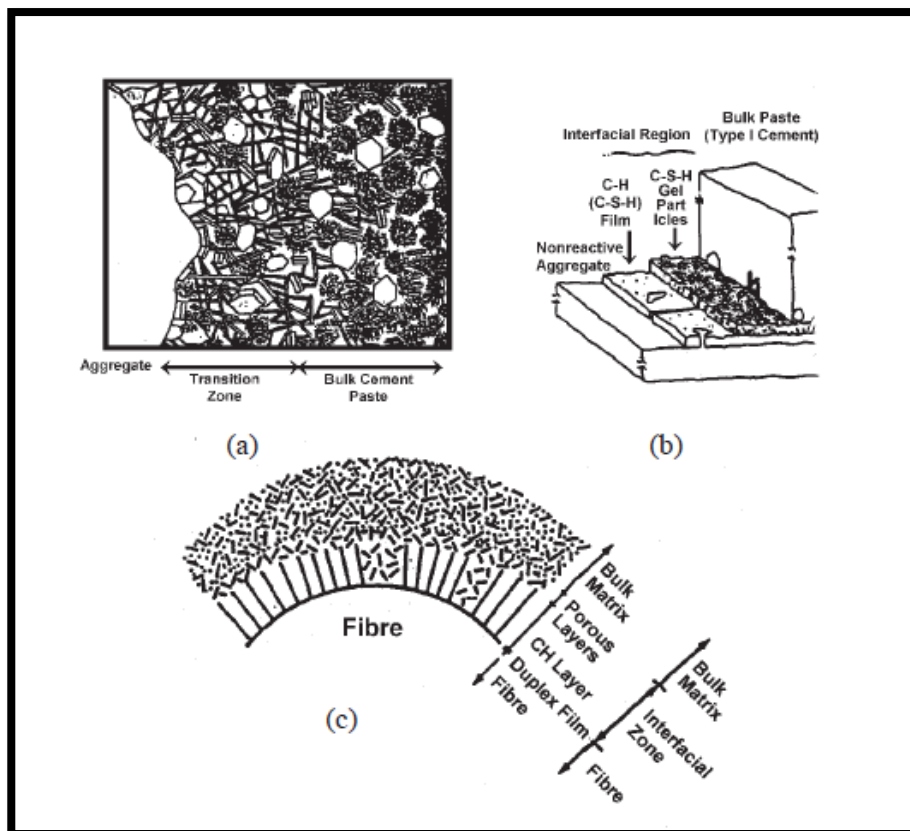


Figura 2. Modelos de interfaz que varían entre sí. Fuente. Chandra & Berntsson. (2002).

(a) Representación esquemática de la zona de transición y de la masa en concreto (Mehta, 1986); (b) Región interfacial formada entre un sustrato de sílice no reactivo y pasta de cemento de tipo I (Langton & Roy, 1980); (c) Zona interfacial en la interfaz de fibra de acero (Bentur, Gray & Mindess, 1986).

2.1.9.1.2 Unión Pasta – Agregado

Según Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que la interfaz entre la pasta de cemento hidratado y el agregado es el eslabón más débil, debido a las siguientes razones:

- La zona interfacial del agregado-cemento tiene una morfología abierta comparada con la phc mayoritaria.
- La zona interfacial contiene grandes cristales de portlandita, Ca(OH)_2 , preferentemente orientados para crear planos de debilidad.
- El agua de sangrado a menudo se acumula debajo de las partículas de gran tamaño, creando planos adicionales de debilidad. (p. 36).

Según Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) indica que existen varias maneras de mejorar el enlace entre la pasta de cemento hidratado y el agregado, siendo una de ellas, la adición de humo de sílice. Esta adición permite densificar la región interfacial y mejora el enlace del agregado de cemento, es así que, la mejora de su resistencia en el enlace se debe principalmente a que existirá menos agua libre (es decir, agua de sangrado/exudación) en la interfaz durante la preparación de la muestra y a la reducción en el tamaño de la zona de transición debido a la reacción puzolánica.

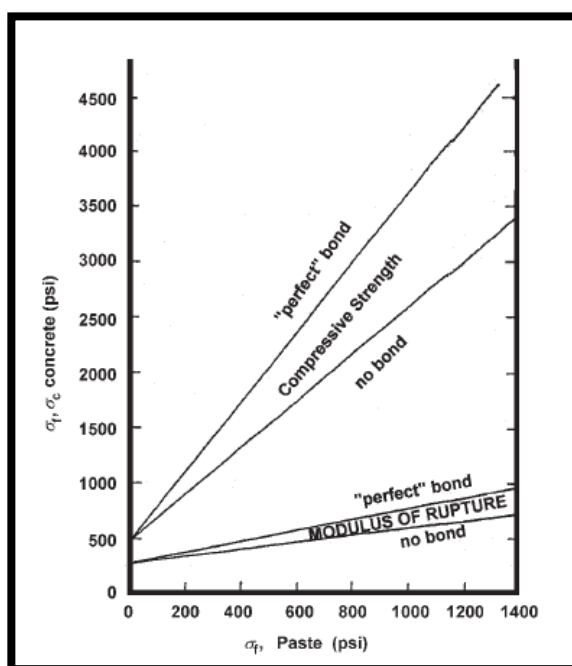


Figura 3. Efecto de la fuerza de adherencia pasta-agregado en la resistencia a compresión (σ_c) y flexión (σ_f). Fuente: Alexander & Taplin. (1964).

2.1.9.1.3 Interfaz pasta – agregado ligero

Según Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) la interfaz se caracteriza por la combinación de una interacción química en forma de reacción puzolánica y un enclavamiento mecánico. Debido a la porosidad que presentan los agregados ligeros, parte del aglutinante penetrará en el agregado, por lo que posteriormente disminuirá la zona de agua de sangrado interno. A diferencia del sangrado superficial, fenómeno conocido que se debe a la alta

permeabilidad de la pasta de cemento no hidratada, lo que ocasiona en el concreto endurecido una película de mortero altamente porosa y débil (lechada); el fenómeno de sangrado interno, es poco conocido. En la Fig. N°04 se puede ilustrar este fenómeno. El agua de sangrado interno es el agua que no ha podido alcanzar la superficie, es por ello, que esta se localizará bajo el agregado grueso en el concreto. Al igual que la lechada superficial, esta puede contener partículas finas de arena y cemento poroso en la superficie del agregado.

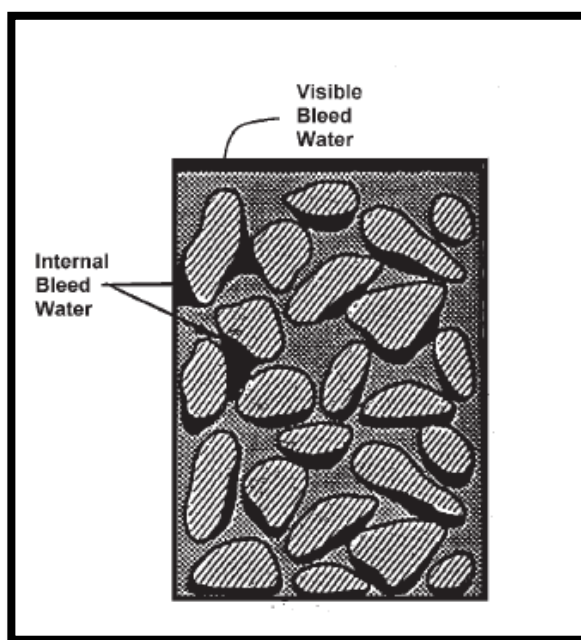


Figura 4. Representación esquemática de la hemorragia en concreto recién colocado. Fuente. Alexander & Taplin. (1964).

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que cuando se utiliza agregados porosos o de carácter puzolánico, como en el caso de los agregados ligeros (pizarra, arcilla expandida, etc.) o cuando se incorporan adiciones minerales, el área de sangrado interno disminuirá tal cual como se observa en la figura N° 05.

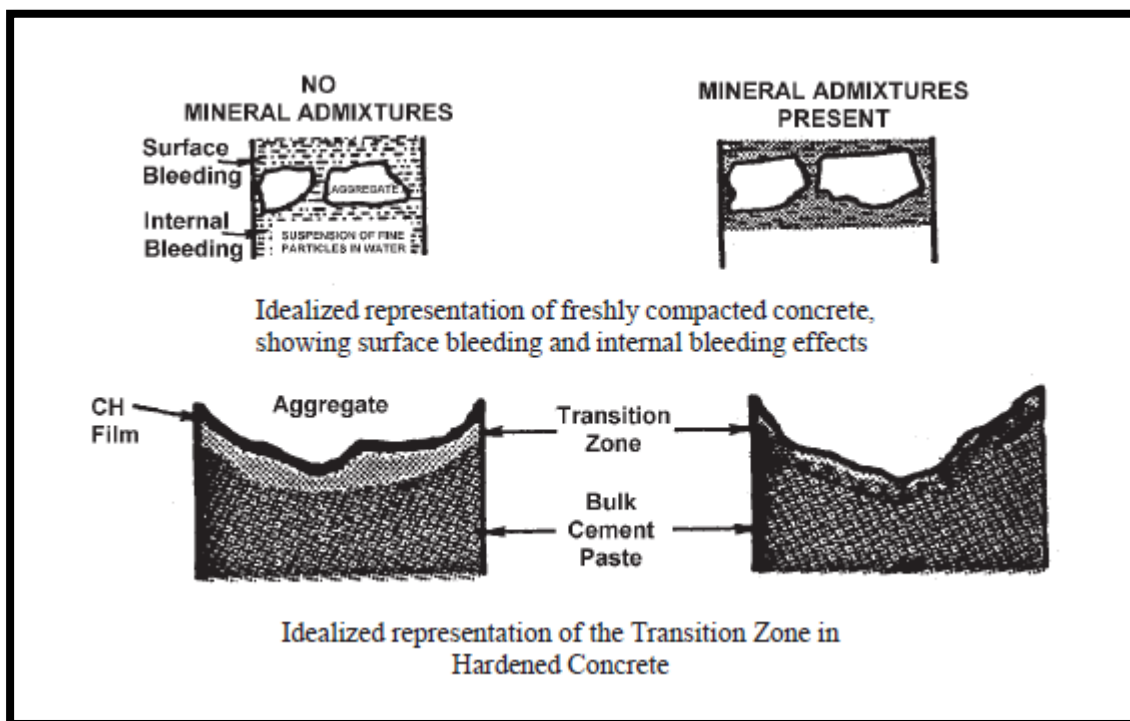


Figura 5. Diagrama esquemático que representa la reducción del tamaño y la porosidad de la zona de transición mediante la adición de material puzolánico. Fuente. Alexander & Taplin. (1964).

2.1.9.2 Estructura porosa del agregado ligero

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que los agregados ligeros tienen como característica principal la porosidad y su gran capacidad de succión, siendo importante examinar la estructura de los poros de los agregados ligeros. Existen dos tipos de poros en estos agregados; poros abiertos, que son aquellos que están interconectados, siendo parte de la permeabilidad del concreto y los poros cerrados, que son aquellos que están sellados y no están interconectados. La porosidad total dependerá de la suma de los poros cerrados y abiertos, mientras que la permeabilidad solo dependerá de los poros abiertos. Es así que la manera simple de evaluar la interconectividad de los poros es realizando el ensayo de absorción de agua.

2.1.9.3 *Microestructura de la zona de transición de interfaz (ITZ)*

Según Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018), la microestructura de la zona de transición de interfaz, se estudia utilizando un microscopio electrónico de barrido con un sistema de análisis de rayos X dispersivo de energía. Es posible identificar cuatro componentes de la microestructura: material anhídrido, hidróxido de calcio masivo, otros productos de hidratación y poros.

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan como ejemplificación de una microestructura típica de la zona interfacial, a una partícula de Liapor TM8 y pasta de cemento, tal cual se observa en la Fig. N° 6. El área de la izquierda en la imagen es el agregado y el área a la derecha es la pasta de cemento, los poros en el agregado y en la zona interfacial (área negra) y las partículas de cemento no hidratadas (brillantes) pueden distinguirse fácilmente. Es así, que se puede decir que para un agregado ligero, con una cubierta externa muy densa, es posible la formación de una zona interfacial porosa que contiene Ca(OH)_2 masivo. Esto es probablemente causado por el efecto de la pared y sangrado localizado, ya que la absorción de agua por la capa densa es mínima.

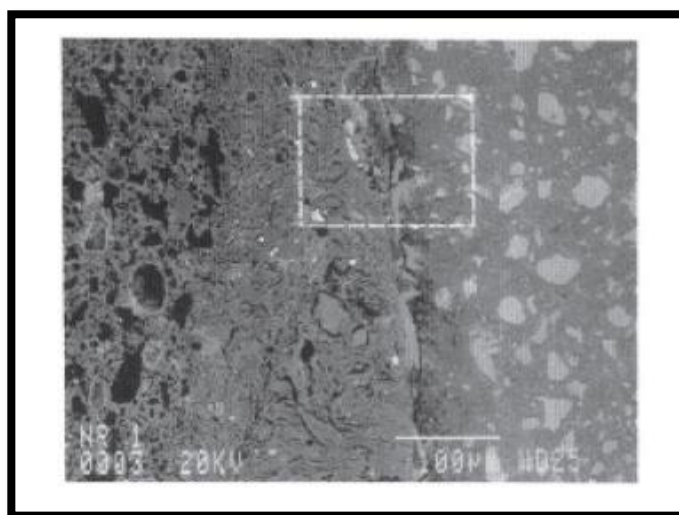


Figura 6. Microestructura de la zona interfacial entre el agregado Liapor™ 8 y la pasta de cemento (200x).
Fuente. Zhang & Gjorv. (1990).

2.1.9.3.1 Microestructura del concreto viejo

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) menciona: “Las microestructuras de algunos concretos viejos de puentes no han mostrado un límite distinto entre el agregado y la pasta de cemento. En cambio, se desarrollan nuevas fases en el punto de contacto del agregado y la pasta de cemento” (p. 41).

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que cuando el concreto estructural ligero es sometido a cambios de volumen o por tensiones aplicadas, a concentración de tensión se produce en la interfaz de agregado débil-pasta de cemento, lo que es el causante de que se origine micro-fisuras. Es por ello, que con el fin de comprender el comportamiento mecánico por el cual el concreto estructural ligero mejora el rendimiento, es importante conocer el cómo se puede reducir estas concentraciones de estrés.

Khokhorin (como se citó en Tupa, 2018) comparó la dureza en y fuera de la zona de contacto para los agregados expandidos y densos. La microdureza de la fracción de mortero fuera de esa zona fue considerablemente mayor que la microdureza de la fracción de mortero fuera de la zona cuando se usan agregados expandidos, es así que los resultados de Khokhorin se resumen de la siguiente manera: “En general se debe observar que la calidad definida por la cohesión, densidad y resistencia de la zona de contacto de los concretos a base de agregados porosos es mejor que la de la zona de contacto de concreto normal a base de agregado denso” (p. 42).

2.1.9.3.2 Compatibilidad elástica

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que por lo general en el concreto, las grietas se ubican en la interfaz entre el agregado y la pasta de cemento; sin embargo, en el caso del concreto ligero, uno no los ve. La razón principal de la falta de grietas de adhesión puede darse a la similitud de la rigidez elástica del agregado ligero y la fracción de mortero restante. Las curvas

de tensión-deformación de los concretos con agregados livianos son típicamente lineales a niveles cercanos al 90% de la resistencia a la falla, lo que indica la compatibilidad relativa de los constituyentes y la reducción de los casos de micro-fisuramiento. Cuando se reduce el micro-fisuramiento, se reducen las fuerzas disruptivas que se generan debido a la congelación de grietas llenas de agua. De forma similar, el movimiento rápido de cloruro también se limitará cuando se reduce el micro-fisuramiento.

2.1.9.3.3 Interacción puzolánica

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) menciona:

Un agregado liviano tiene una superficie vítrea, que se forma durante el proceso de sinterización. Esta fase es amorfa, potencialmente reactiva. En general, las arcillas bien sinterizadas a alta temperatura funcionan como material puzolánico. Este material puzolánico interactúa químicamente con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento. En un estudio ruso realizado por Khokhorin (Khokhorin N. K., 1993) sobre reactividad puzolánica de agregados keramzita fue reportado. Las micrografías electrónicas de barrido revelaron nuevas formaciones químicas en la zona interfacial entre el agregado liviano y la matriz. Además, los ensayos de microdureza de la zona interfacial entre el agregado liviano y la matriz indicaron que la anchura de la ITZ era de aproximadamente 60 mm. La microdureza de la matriz dentro de la ITZ fue de 9-15 MPa, mientras que fuera de ella fue 6-9 MPa. Esto demuestra que el producto recién formado es duro. (p. 43).

2.1.9.4 Relación entre la microestructura y propiedades mecánicas del concreto

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan que la resistencia y la microestructuras se estudian generalmente por separado y no existe mucha bibliografía que demuestre la dependencia de la microestructura sobre la resistencia del concreto. Sin embargo,

Sarkar, Chandra & Berntsson (1992) estudiaron la microestructura y resistencia del concreto ligero de la composición correspondiente y la resistencia de los respectivos concretos y han correlacionado la resistencia con la microestructura. No obstante, La resistencia del concreto, en general, está relacionada con su microestructura, pero este no es el único factor responsable del desarrollo de la resistencia. Una serie de otros factores relacionados, como la dosificación, el tipo de aditivos, la relación agua-cemento o agua / aglomerante, la porosidad, la densidad, entre otros, también desempeñan funciones importantes.

2.1.9.4.1 Influencia de la relación agua-cemento.

Chandra y Berntsson (como se citó en Tupa, 2018) mencionan:

Los cristales de hidróxido de calcio orientados que normalmente están presentes en la interfaz de pasta y agregado en el concreto convencional no se pudieron detectar en las muestras de fractura de los concretos con agregados ligeros. Una razón es que el hidróxido de calcio reacciona retardando el efecto puzolánico, y la otra es que la capacidad de absorción de agua del agregado ligero reduce el contenido de agua en la zona interfacial de pasta y agregado. (p. 44).

2.1.10 Fabricación del concreto estructural ligero

Álvarez y Saez (2012) mencionan que las instalaciones de fabricación constituyen un tema muy importante, para la consecución final de las características requeridas, la constancia y homogeneidad de las propiedades del producto y, al fin y al cabo, para la seguridad y garantía de calidad final del concreto. Si hablamos de la dosificación, debería estar en peso; al menos para los agregados, cemento y de existir, también para las adiciones, sin olvidar que las basculas deben estar debidamente calibradas.

Álvarez y Saez (2012), indican que la mezcla se puede realizar por vía seca o húmeda, aunque esta última es la más recomendable, debido a que se obtiene una mejor regularidad en el producto final. Es importante mencionar que se debe aumentar el tiempo de mezcla del concreto, en relación a una mezcla de concreto convencional, y así controlar la absorción del agregado ligero y conseguir una mezcla homogénea. Sin embargo, no solo se debe buscar un valor técnico al momento de elaborar concreto ligero, si no, debe realizarse buscando un valor añadido; que no solo busque beneficiar al contratista y cliente económicamente, si no buscar el beneficio del usuario y la sociedad, siendo así partícipes de un desarrollo sostenible, por lo que es realmente importante que se deba tener en cuenta para aquellos procesos a materiales reciclado en su uso.

Tupa (2018) menciona que en el concreto estructural ligero, el rendimiento de las mezclas, pueden ser distintas al volumen esperado o calculado, pues si bien las variaciones pueden ser ocasionadas por una mala dosificación, error de cálculo, o equipo de pesaje; es más probable que se justifique en la variabilidad que presenta la densidad de los agregados debido a cambios en el propio agregado o en su contenido de humedad. Es por ello, que para reducir el facto error, la densidad aparente y la humedad de los agregados de peso ligero deben ser medidas regularmente y por ende las proporciones de mezcla ser ajustadas. Por otro lado, el autor menciona que para algunas circunstancias es necesaria determinar el contenido de aire presente en nuestras mezclas, por lo que si bien para el concreto de peso normal se utiliza el método de presión, para este tipo de concretos sería factible su aplicación, esto debido a que al realizar este método, el aire presente en las partículas del agregado ligero también es considerado, arrojando un resultado engañoso, siendo necesaria la aplicación de otro método para el cálculo de contenido de aire en concretos estructurales ligeros.

2.1.11 Transporte, colocación y curado

El transporte del concreto debe hacerse en camiones especialmente para estos y se debe hacer un remezclado antes del vaciado. Es importante mencionar que este tipo de concretos tienden a perder la consistencia durante el transporte, en mayor nivel que los concretos convencionales, así como tienen también mayor tendencia a la segregación, lo que puede manifestarse en mayor medida en concretos de consistencia fluida y ante a agregados de menor densidad. Es por ello, que se recomienda usar aditivos o adiciones que nos permitan reducir el contenido de agua (Tupa, 2018).

El bombeo de este tipo de concretos requiere de mayores precauciones, debido a sus características. Dependiendo de la presión de bombeo, la cual está en función de la distancia y la altura, puede que se genere sangrados del agua absorbida por los agregados ligeros, lo que en general limita de forma más determinante las distancias y alturas de bombeo. Por lo que es recomendable, que se realicen pruebas de bombeo para comprobar que el bombeo de este concreto no afectará de forma determinante las características del concreto fresco (Tupa, 2018).

La compactación del concreto ligero debe tomar precauciones en cuanto a la reducción de la distancia entre puntos de inmersión de vibrado, en comparación a lo que normalmente se adopta en concretos convencionales. Debido a que el uso de agregados ligeros, los cuales tienen tendencia a flotar, hace que se deban tomar precauciones especiales, para poder introducir a los agregados en el interior de la mezcla. Una alternativa para este tipo de problemas, pueden ser los llamados concretos autocompactantes de peso ligero; sin embargo, existen limitaciones entorno a la densidad y a las características de escurrimiento que se generan (Tupa, 2018).

En lo que respecta al curado del concreto ligero, la gran capacidad de absorción de agua que presentan los agregados ligeros, logran que en general el concreto ligero, disponga de agua

suficientemente para culminar su proceso de hidratación interno, incluso sin necesidad de aportar agua exterior. No obstante, esto solo es válido, para aquellos diseños de mezcla que utilicen agregados saturados, pero en el caso de que los agregados no estén saturados, debe realizarse las condiciones de curado como si fuera un concreto convencional. Por lo demás, se debe evitar la desecación superficial, al igual que en los concreto convencionales, en los casos de humedad relativa baja y temperaturas altas. Los tiempos de curado deben ser del mismo orden que en los concretos convencionales. Debido a la reducida conductividad térmica de los agregados ligero, estos concretos tienden a liberar en menor medida el calor de hidratación pero, debido al reducido módulo de elasticidad de los agregados, la microfisuración de la matriz resultaría menor que en los concretos convencionales (Tupa, 2018).

CAPÍTULO III

III. Método

3.1 Tipo de investigación

La siguiente investigación es de tipo exploratoria y descriptiva, con un enfoque correlacional.

Esta investigación tiene como alcance exploratorio debido a que no existen antecedentes en el desempeño de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino. Por lo que se tendrán que hacer diseños experimentales, para poder lograr los objetivos propuestos.

Esta investigación tiene como alcance descriptivo, debido a que se busca especificar las propiedades, características y procesos del concreto estructural ligero, utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino.

El diseño de esta investigación es el experimental debido a que se busca establecer el efecto de una causa que se manipula. Es decir, se manipularan las variables independientes, para analizar las consecuencias que estas tienen sobre las variables dependientes (efectos). En esta investigación se realizará el análisis y síntesis del trabajo de laboratorio.

3.2 Ámbito temporal y espacial

La siguiente investigación tiene como ámbito espacial el departamento de Lima, específicamente el Laboratorio de Materiales de la facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional Federico Villarreal, lugar donde se han realizado los diversos ensayos y mezclas de concreto estructural ligero; sin embargo, esta tesis puede ser aplicada en cualquier destino del Perú, siempre y cuando se tenga la viabilidad económica del traslado de puzolana natural de la cantera Raqchi al lugar del proyecto a realizar.

Respecto al ámbito temporal, los ensayos de laboratorio y mezclas de concreto se realizaron entre los meses de enero a octubre del año 2017.

3.3 Variables

3.3.1 Variable dependiente

Desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

3.3.1.1 *Dimensión de la variable dependiente*

X1: Concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

X2: Desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03.

3.3.1.2 *Indicador de la variable dependiente*

3.3.1.2.1 *Indicador de la dimensión de la variable X1*

- Resistencia a la compresión (Kg/cm²).
- Densidad en estado de equilibrio (Kg/m³).

3.3.1.2.2 *Indicador de la dimensión de la variable X2*

- Asentamiento (Pulg.).
- Temperatura (Grados Celsius).
- Peso unitario y rendimiento (Kg/m³).
- Resistencia a la compresión (Kg/cm²).

- Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm²).
- Resistencia a la flexión (Kg/cm²).
- Densidad en estado de equilibrio (Kg/m³).

3.3.2 Variable independiente

Diseños de mezcla del concreto estructural ligero.

3.3.2.1 Dimensión de la variable independiente

Y1: Características físicas de los agregados.

Y2: Dosificación de las mezclas de concreto estructural ligero.

3.3.2.2 Indicadores de las variables independientes

3.3.2.2.1 Indicador de la dimensión de la variable Y1

- Granulometría (% que pasa por cada tamiz)
- Material que pasa la malla número 200 (% de finos)
- Contenido de humedad (% de humedad)
- Absorción (% de absorción)
- Peso específico (Gr/cm³)
- Peso Unitario (Kg/m³)

3.3.2.2.2 Indicador de la dimensión de la variable Y2

- Porcentaje de puzolana natural (% del volumen de agregados)
- Porcentaje del agregado grueso (% del volumen de agregados)
- Porcentaje de aditivo plastificante (% del peso del cemento)
- Contenido de agua (Litros)
- Contenido de cemento (Kg)

3.3.3 Operacionalización de variables

Tabla 36
Operacionalización de variables

| VARIABLES | | DIMENSIÓN | DESCRIPCIÓN | INDICADOR | UNIDADES |
|------------------------|--|--|---|-------------------------------------|---------------------------|
| VARIABLE INDEPENDIENTE | Diseños de mezcla del concreto estructural ligero | Características físicas de los agregados | Propiedades físicas que tendrán los agregados a utilizar en las mezclas de concreto. | Granulometría | % Que pasa por cada Tamiz |
| | | | | Material que pasa la malla #200 | % de finos |
| | | | | Contenido de Humedad | % de Humedad |
| | | | | Absorción | % de absorción |
| | | | | Peso Especifico | Gr/cm3 |
| | | | | Peso Unitario | Kg/m3 |
| | Dosificación de las mezclas de concreto estructural ligero | Selección de las proporciones necesarias de materiales a utilizar en las mezclas de concreto para cumplir con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03. | Porcentaje de Puzolana natural | % del volumen de agregados | |
| | | | Porcentaje de agregado grueso | % del volumen de agregados | |
| | | | Porcentaje de Aditivo Plastificante | % del peso del cemento | |
| | | | Contenido de Agua | Litros | |
| Contenido de Cemento | | | Kilogramos | | |
| VARIABLE DEPENDIENTE | Desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03. | X1: Concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03. | Concreto que deberá cumplir con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03. | Resistencia a la compresión | Kg/cm2 |
| | | | | Densidad en Estado de Equilibrio | Kg/m3 |
| | Desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03. | X2: Desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplan con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03. | Evalúa el desempeño de los diseños de mezcla de concreto en base a los ensayos más representativos de control de calidad, tanto para estado fresco como endurecido. | Asentamiento | Pulg. |
| | | | | Temperatura | Grados Celsius |
| | | | | Peso Unitario y Rendimiento | Kg/m3 |
| | | | | Resistencia a la compresión | Kg/cm2 |
| | | | | Resistencia a la tracción indirecta | Kg/cm2 |
| | | | | Resistencia a la flexión | Kg/cm2 |
| | Densidad en Estado de Equilibrio | Kg/m3 | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio de esta investigación es el diseño de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi, como agregado fino, en el cual cada diseño elaborado será sometido a ensayos de control de calidad tanto en estado fresco, como endurecido.

3.4.2 Población

Para la presente investigación se estudió a la puzolana natural como elemento principal de un concreto estructural ligero, para posteriormente dicho concreto ser sometido a ensayos de control de calidad tanto en estado fresco, como endurecido. Es decir, la población de esta investigación viene a ser el concreto estructural ligero, utilizando la puzolana natural como agregado fino.

3.4.3 Muestra

Las muestras de estudio corresponden a la elaboración de concreto estructural ligero, utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino. Este concreto será realizado en el laboratorio de concreto de acuerdo a los diseños de mezclas estimados; las cuales serán almacenados cumpliendo con las normas ASTM C31M y C 470M, en probetas cilíndricas de 4" x 8" de diámetro y altura respectivamente; y probetas prismáticas de concreto de 15 cm x 15cm x 53 cm (ancho, altura y longitud); para posteriormente ser sometidos a los ensayos más representativos de control de calidad tanto en estado fresco, como endurecido.

El método de muestreo en esta investigación fue el no probabilístico, debido a que cada ensayo de control de calidad del concreto, cuenta con una normativa que define el número de probetas y vigas a realizar según sea el caso; por lo que, no será necesario realizar un muestreo probabilístico para la elección de la muestra.

El tamaño de la muestra es de 92 probetas cilíndricas de concreto de 4" x 8" de diámetro y altura respectivamente y 8 probetas prismáticas de concreto de 15 cm x 15cm x 53 cm (ancho, altura y longitud), los cuales se distribuirán en los dos diseños de concreto estructural ligero realizados y sus respectivos diseños de mezcla patrón de control. En la siguiente Tabla se puede observar la distribución de probetas para cada uno de los ensayos realizados.

Tabla 37
Tamaño de la muestra de la investigación

| ENSAYOS | Días | Diseño N°01 de C.E.L | Diseño N°01 Patrón | Diseño N°02 de C.E.L | Diseño N°02 Patrón | TOTAL |
|-------------------------------------|------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Asentamiento o "slump test" | - | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | - |
| Temperatura del concreto | - | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | - |
| Peso Unitario y rendimiento | - | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | Muestra de concreto fresco | - |
| Resistencia a la compresión | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 probetas cilíndricas |
| Resistencia a la compresión | 7 | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 probetas cilíndricas |
| Resistencia a la compresión | 14 | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 probetas cilíndricas |
| Resistencia a la compresión | 28 | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 probetas cilíndricas |
| Resistencia a la tracción indirecta | 28 | 8 | 8 | 8 | 8 | 32 probetas cilíndricas |
| Resistencia a la flexión | 28 | 2 | 2 | 2 | 2 | 8 probetas prismáticas |
| Densidad en estado de equilibrio | 5 | 3 | 3 | 3 | 3 | 12 probetas cilíndricas |
| TOTAL | | 92 probetas cilíndricas y 8 probetas prismáticas | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Instrumentos

3.5.1 Instrumentos metodológicos o de recolección de datos

Para esta investigación se utilizaron como instrumentos de recolección de datos, en primera instancia la investigación documental, que constó básicamente en recolectar información de otras

investigaciones, normas, artículos, guías, etc, relacionada al concreto estructural ligero. Posteriormente se utilizaron formatos de laboratorio (fichas), donde se recolectó información acerca de las características de los materiales a utilizar en el concreto y los ensayos de control de calidad del concreto; así mismo, se emplearon hojas de cálculo en Excel para la verificación de los resultados en contraste con la normativa correspondiente. Por otro lado se hizo uso de tablas y gráficos en Excel con el fin de analizar y expresar de una mejor manera los resultados obtenidos.

Las fichas utilizadas se muestran en el anexo N° 03 y son las siguientes:

- Fichas de caracterización de materiales.
- Ficha de diseño de mezclas.
- Ficha de ensayo de asentamiento del concreto.
- Ficha de ensayo de temperatura del concreto.
- Ficha de ensayo de peso unitario del concreto.
- Ficha de ensayo de resistencia a la compresión del concreto.
- Ficha de ensayo de resistencia a la tracción indirecta del concreto.
- Ficha de ensayo de resistencia a la flexión del concreto.
- Ficha de ensayo de densidad en estado de equilibrio del concreto.

3.5.2 Instrumentos de ingeniería

3.5.2.1 Instrumentos para la caracterización de los materiales

3.5.2.1.1 Granulometría del agregado fino (arena gruesa)

- Balanza sensible al 0.1 % del peso de la muestra a ensayar.
- Tamices: 3/8", N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100.
- Tela para cuartear.
- Cucharones.

- Bandejas.
- Horno, capaz de mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.5.2.1.2 *Granulometría del agregado grueso*

- Balanza sensible al 0.1 % del peso de la muestra a ensayar.
- Tamices: 2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N° 16.
- Tela para cuartear.
- Cucharones.
- Bandejas.
- Horno, capaz de mantener una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.5.2.1.3 *Granulometría del agregado fino ligero (Puzolana natural)*

Los instrumentos requeridos serán los mismos que se utilizaron para el cálculo de la granulometría del agregado fino (Arena gruesa).

3.5.2.1.4 *Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa)*

- Se utiliza el tamiz normalizado N° 16 y el N° 200.
- Recipiente.
- Balanza con precisión al 0.1 % del peso de la muestra.
- Horno, capaz de mantener una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Agente Humectante (agua).

3.5.2.1.5 *Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso*

Se utilizan los mismos instrumentos mencionados anteriormente para el material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa).

3.5.2.1.6 *Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero (puzolana natural)*

Se utilizan los mismos instrumentos mencionados anteriormente para el material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa).

3.5.2.1.7 *Contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa)*

- Balanza con sensibilidad al 0,1 % del peso de la muestra.
- Bandeja
- Horno capaz de mantener una temperatura constante de $110^{\circ} \text{C} \pm 5^{\circ} \text{C}$.

3.5.2.1.8 *Contenido de humedad del agregado grueso*

Se utilizaran los mismos instrumentos mencionados para el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).

3.5.2.1.9 *Contenido de humedad del agregado fino ligero (puzolana natural)*

Se utilizaran los mismos instrumentos mencionados para el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).

3.5.2.1.10 *Peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa)*

- Balanza con una capacidad de 1 kg o más y con una precisión de 0.1 gr.
- Frasco volumétrico (fiola) de 500 cm³ de capacidad, calibrado a hasta 0.10 cm³ a 20° C.
- Molde cónico metálico con las medidas estipuladas en la norma mencionada.
- Barra compactadora de metal con las medidas estipuladas en la norma mencionada.
- Estufa.
- Recipientes.

3.5.2.1.11 *Peso específico y absorción del agregado grueso*

- Balanza con capacidad de 5 kg a más y una precisión de 0.5 gr.

- Cesta de malla de alambre con abertura correspondiente al tamiz N°6.
- Depósito de agua para sumergir la cesta y un dispositivo para suspenderla del centro de la escala de la balanza.
- Horno.

3.5.2.1.12 Peso específico y absorción del agregado fino ligero (Puzolana natural)

Los instrumentos utilizados serán los mismos mencionados para el peso específico y absorción del agregado fino (arena gruesa).

3.5.2.1.13 Peso unitario del agregado fino (Arena gruesa)

- Balanza con precisión al 0.1% del peso de la muestra a ensayar.
- Varilla de apisonado, varilla lisa de acero, redondeada de 16mm de diámetro y 600 mm de longitud aproximadamente, con un extremo redondeado con forma de punta semiesférica.
- Recipiente con capacidad según la NTP 400.017.
- Pala, badilejo y regla.
- Placa de vidrio

3.5.2.1.14 Peso unitario del agregado grueso

Los instrumentos realizados serán los mismos mencionados para determinar el peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena gruesa).

3.5.2.1.15 Peso unitario del agregado fino ligero (Puzolana natural)

- Balanza con precisión al 0.1% del peso de la muestra a ensayar.
- Varilla de apisonado, varilla lisa de acero, redondeada de 16mm de diámetro y 600 mm de longitud aproximadamente, con un extremo redondeado con forma de punta semiesférica.

- Recipiente.
- Pala, badilejo y regla.
- Placa de vidrio

3.5.2.2 *Instrumentos para los diseños de mezclas*

- Trompo de mezclado.
- Balanza mecánica de laboratorio.
- Probetas cilíndricas
- Probetas prismáticas
- Carretilla tipo buggy.

3.5.2.3 *Instrumentos para los ensayos del concreto en estado fresco*

3.5.2.3.1 *Asentamiento del concreto*

- Molde con forma de tronco de cono de 8 pulgadas de diámetro en la base inferior, 4 pulgadas de diámetro en la parte superior y una altura de 12 pulgadas.
- Barra compactadora de acero liso de 600 mm de longitud y 16 mm de diámetro.
- Dispositivo de medida, como regla, cinta métrica, etc.
- Cucharón.

3.5.2.3.2 *Temperatura del concreto*

- Recipiente lo suficientemente grande para que el dispositivo de medir la temperatura tenga un recubrimiento de 3 pulgadas en todas sus direcciones.
- Dispositivo para medición de temperatura con una exactitud de ± 0.5 °C.

3.5.2.3.3 *Peso unitario del concreto*

- Balanza de medición con una precisión del 0.3 % de la carga a ensayar o de 45 gramos.

- Barra compactadora recta de acero liso de 600 mm de longitud y 16 mm de diámetro, con punta semiesférica.
- Mazo de goma.
- Recipiente de medida según la NTP 339.046.
- Cucharón.
- Placa plana para enrasar de forma rectangular con una ancho y longitud, 50 mm más que el diámetro del recipiente usado y un espesor de 6mm.

3.5.2.4 *Instrumentos para los ensayos del concreto en estado endurecido*

3.5.2.4.1 *Resistencia a compresión*

- Máquina de ensayo de resistencia a compresión calibrada cumpliendo con los requisitos de la ASTM C39.
- Vernier.

3.5.2.4.2 *Resistencia a la tracción indirecta del concreto*

- Máquina de ensayo de resistencia a la tracción indirecta la cual debe cumplir todos los requisitos de la ASTM C39.
- Placa o barra de apoyo suplementario.
- Listones de apoyo.

3.5.2.4.3 *Resistencia a la flexión del concreto*

- Máquina de prueba que cumpla los requisitos estipulados en la ASTM C78.
- Aparato de carga que cumpla los requisitos estipulados en la ASTM C78.
- Reglas metálicas
- Vernier

3.5.2.4.4 *Densidad en equilibrio del concreto*

Se menciona los instrumentos a utilizar en el cálculo de la densidad seca del concreto, para posteriormente con esta calcular la densidad en equilibrio teórica.

- Balanza con capacidad de 5 kg a más con sensibilidad a 0.5 gr.
- Cesta de malla de alambre con abertura correspondiente al tamiz N°6.
- Depósito de agua donde sumergir la cesta y un dispositivo para suspender la cesta del centro de la escala de la balanza.
- Horno.

3.5.3 **Técnicas de investigación**

3.5.3.1 *Análisis documental*

Esta técnica consiste en la recolección de datos de fuentes secundarias como libros, revistas folletos, artículos, periódicos, reglamentos, etc. Con esta técnica se buscó analizar la mayor información disponible acerca de concreto estructural ligero, para posteriormente encontrar información acerca de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural y de ser el caso; encontrar información acerca del diseño de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural como agregado fino de la cantera Raqchi.

3.5.3.2 *Observación y medición experimental*

Se busca elaborar datos de condiciones que se podrían decir que relativamente son controladas por el investigador, en especial, porque el investigador puede manipular las variables. Es así que con esta técnica se buscó observar, analizar y elaborar concreto estructural ligero utilizando puzolana natural como agregado fino de la cantera Raqchi, cumpliendo con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03, a través de la manipulación de sus

variables; para posteriormente cada diseño ser llevados a pruebas (medición) de control de calidad del concreto y ser comparados con sus respectivos diseños de mezcla patrón de control.

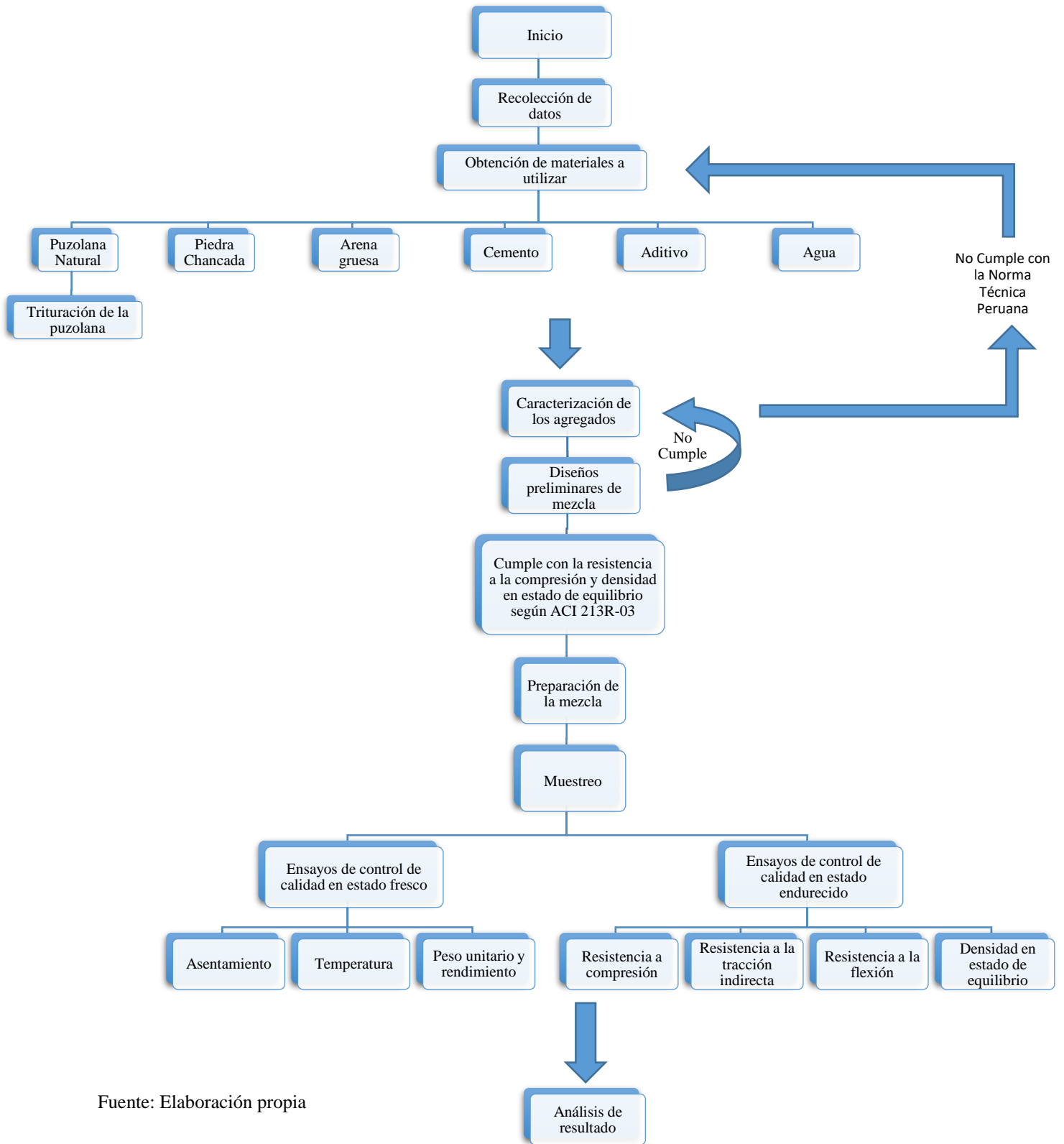
3.5.4 Validación de los instrumentos

La validación de los instrumentos, en especial los formatos utilizados para la caracterización de los materiales y los ensayos de control de calidad, serán validados con la correcta verificación de calibración de los equipos utilizado y con el cumplimiento de la normativa correspondiente al desarrollo de estas prácticas, por lo que cada trabajo realizado deberá cumplir con la normativa vigente, procedimientos y estándares ya estipulados. Siendo la Norma Técnica Peruana y el ASTM, las utilizadas para esta investigación. En anexos se adjunta los certificados de calibración de los equipos utilizados.

3.6 Procedimientos

3.6.1 Diseño de Ingeniería

En la tabla N° 38 se puede apreciar el diseño de Ingeniería en el cual se describe el flujo de trabajo a realizar para cumplir con los objetivos de la investigación.



Fuente: Elaboración propia

3.6.2 Procedimientos de recolección de datos

A continuación se describen los procedimientos a realizar para cada etapa de la investigación:

3.6.2.1 *Procedimientos previos a la investigación*

3.6.2.1.1 *Obtención de la puzolana natural*

La puzolana natural fue extraída de la cantera Raqchi, ubicada en el distrito de San Pedro, provincia de Canchis, Departamento de Cuzco. Para posteriormente este material ser enviado a la ciudad de Lima, para nuestra investigación.



Figura 7. Puzolana natural en la Cantera Raqchi (Cuzco). Fuente. Elaboración Propia.



Figura 8. Extracción de puzolana natural de la Cantera Raqchi (Cuzco). Fuente. Elaboración Propia.

3.6.2.1.2 Trituración de la puzolana natural

Debido a que la puzolana natural presentaba diferentes tamaños, y al tipo de uso que se iba a dar, como sustituto de la arena gruesa (agregado fino), se tuvo que pasar al material y separar todo lo pasante por la malla N° 3/8 con lo retenido en dicha malla. Es así que al material retenido, se mandó a triturar al laboratorio de la facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería. Inicialmente se pensó que se debía condicionar al agregado para que cumpla con la granulometría según la ASTM C 33, por lo que se iba a tamizar el material por las diversas mallas, hasta lograr cumplir con los límites de granulometría especificados por dicha norma; sin embargo, bajo el concepto de hacer un diseño de mezcla económico, se vio conveniente usar al material de manera natural, debido a que el costo por triturar el material y tamizarlo por las diversas mallas, era muy elevado; haciendo que el diseño a gran escala sea inviable debido al sobre costo ocasionado



Figura 9. Trituración de la puzolana natural. Fuente. Elaboración Propia.



Figura 10. Tamizado por la malla 3/8" de la puzolana natural. Fuente. Elaboración Propia.

3.6.2.2 Caracterización de los materiales

3.6.2.2.1 Granulometría del agregado fino (arena gruesa)

La granulometría del agregado fino se realiza bajo los procedimientos de la Norma Técnica Peruana 400.012. Es importante mencionar que nuestra arena inicialmente contenía un porcentaje de finos mayor al 5%, por lo que esta arena tuvo que ser lavada para disminuir este porcentaje y así cumplir con la normativa. Posteriormente se verificó que nuestra granulometría cumpla con los límites granulométricos de acuerdo a la Norma Técnica Peruana 400.037. Los límites granulométricos se muestran en la tabla N° 39.

Tabla 39.

Límites granulométricos del agregado fino

| TAMIZ | PORCENTAJE QUE PASA |
|-------------------|---------------------|
| 9.5 mm (3/8 pulg) | 100 |
| 4.75 mm (N° 4) | 95 a 100 |
| 2.36 mm (N° 8) | 80 a 100 |
| 1.18mm (N° 16) | 50 a 85 |
| 600 um (N° 30) | 25 a 60 |
| 300 um (N° 50) | 05 a 30 |
| 150 um (N° 100) | 0 a 10 |

Fuente: Norma Técnica Peruana 400.037 (2014).

A continuación se describen los procedimientos a seguir para determinar la granulometría del agregado fino (arena gruesa).

- Se procede a secar la muestra hasta que dos pesadas continuas y separadas por un lapso de una hora, no varíen en más del 0.1 %.
- Se procede a pesar la muestra para la granulometría, después del secado. Este debe ser de 300 g mínimo.
- Con el fin de obtener el porcentaje de finos que pasa la malla N° 200, se procedió a lavar la muestra en la malla antes mencionada.
- Secado de la muestra después del lavado para posteriormente ser pesadas.
- Se procede a colocar en la malla superior el material a tamizarse, las que estarán dispuestas en orden decreciente (3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100).
- Los tamices se procederán a agitar con un medio mecánico o manualmente.
- Se procede a pesar cada muestra retenida en cada tamiz, para posteriormente calcular el porcentaje retenido y porcentaje que pasa en cada malla.
- El módulo de finura se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$Mf = \frac{(\sum \text{Peso retenido acumulado de las mallas } N^{\circ}4,8,16,30,50,100)}{100}$$



Figura 11. Granulometría del agregado fino (Arena gruesa). Fuente. Elaboración Propia.

3.6.2.2.2 Granulometría del agregado grueso

Se realiza el ensayo bajo lo estipulado en la NTP 400.012. A continuación se describen los procedimientos a seguir para determinar la granulometría del agregado grueso.

- Se procede a secar la muestra hasta que dos pesadas continuas y separadas por un lapso de una hora, no varíen en más del 0.1 %.
- Se procede a pesar la muestra para la granulometría, este debe cumplir con la cantidad mínima según lo estipulado en la NTP 400.012, la cual estará en función del tamaño máximo nominal. En nuestro caso fue un mínimo de 5 kg.
- Con el fin de obtener el porcentaje de finos que pasa la malla N° 200, se procedió a lavar la muestra en la malla antes mencionada.
- Secado de la muestra después del lavado para posteriormente ser pesadas.
- Se procede a colocar en la malla superior el material a tamizarse, las que estarán dispuestas en orden decreciente (2", 1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8", N°4, N°8, N° 16).
- Los tamices se procederán a agitar con un medio mecánico o manualmente.
- Se procede a pesar cada muestra retenida en cada tamiz, para posteriormente calcular el porcentaje retenido y porcentaje que pasa en cada malla.
- El módulo de finura se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$Mf = \frac{(\sum \text{Peso retenido acumulado de las mallas } 3, 1\ 1/2, 3/4", 3/8", N^{\circ}4, 8, 16, 30, 50, 100)}{100}$$



Figura 12. Granulometría del agregado grueso. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.3 Granulometría del agregado fino ligero (*Puzolana natural*)

La granulometría del agregado fino ligero se realiza bajo los procedimientos de la Norma Técnica Peruana 400.012. La granulometría de este material debe cumplir con los límites granulométricos estipulados en la ASTM C 330 y cumplir con la cantidad de muestra mínima para agregados ligeros especificados en esta norma, las cuales se muestran a continuación.

Tabla 40

Masa de muestra mínima de ensayo de Tamizado para agregados ligeros finos

| Densidad nominal Aparente (Suelta) del agregado - kg/m ³ | Masa de la muestra de ensayo - gr |
|---|-----------------------------------|
| 80-240 | 50 |
| 240-400 | 100 |
| 400-560 | 150 |
| 560-720 | 200 |
| 720-880 | 250 |
| 880-1040 | 300 |
| 1040-1120 | 350 |

Fuente: ASTM C 330 (2005).

Tabla 41.

Requisitos granulométricos de agregados ligeros para concreto estructural

| Designación del tamaño nominal | Porcentaje (masa) que pasa Tamices con Aberturas Cuadradas | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|-------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | 25.0 mm (1") | 19.0 mm (3/4") | 12.5 mm (1/2") | 9.5 mm (3/8") | 4.75 mm (N°4) | 2.36 mm (N°8) | 1.18 mm (N°16) | 300 um (N°50) | 150 um (N°100) | 75 um (N°200) |
| Agregado Fino | | | | | | | | | | |
| 4.75 mm a 0 | - | - | - | 100 | 85-100 | - | 40-80 | 10-35 | 5-25 | - |
| Agregado Grueso | | | | | | | | | | |
| 25.0 mm a 4.75 mm | 95-100 | - | 25-60 | - | 0-10 | - | - | - | - | 0-10 |
| 19.0 mm a 4.75 mm | 100 | 90-100 | - | 10-50 | 0-15 | - | - | - | - | 0-10 |
| 12.5 mm a 4.75 mm | - | - | 90-100 | 40-80 | 0-20 | 0-10 | - | - | - | 0-10 |
| 9.5 mm a 2.36 mm | - | - | 100 | 80-100 | 5-40 | 0-20 | 0-10 | - | - | 0-10 |
| Agregado combinado de fino y grueso | | | | | | | | | | |
| 12.5 mm a 0 | - | 100 | 95-100 | - | 50-80 | - | - | 5-20 | 2-15 | 0-10 |
| 9.5 mm a 0 | - | - | 100 | 90-100 | 65-90 | 35-65 | - | 10-25 | 5-15 | 0-10 |

Fuente: Elaboración propia.

El procedimiento a realizar será el mismo que se estipula en la NTP 400.12 para el agregado fino, el cual se explica anteriormente; con excepción de que la masa de la muestra de ensayo para agregado fino ligero debe estar de acuerdo con la Tabla N° 40. El tamizado debe durar como mínimo 5 minutos.



Figura 13. Granulometría del agregado fino ligero. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.4 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa)

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos explicados en la Norma Técnica Peruana 400.018. Como se mencionó anteriormente, la arena presentaba gran cantidad de finos, por lo que

se tuvo que lavar para poder disminuir y así poder cumplir con el 5 % como máximo establecido en la NTP 400.037.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (arena gruesa).

- Secar la muestra a peso constante.
- Se procede a pesar la muestra, con aproximación al 0.1% del peso de la muestra.
- Se superponen los tamices N° 16 y el N° 200 de manera que el de mayor abertura quede en la parte superior.
- Se coloca la muestra a ensayar en el recipiente metálico y se procede a agregar suficiente agua para cubrirla.
- Se procede a lavar la muestra, y a eliminar las partículas finas por decantación.
- Se repite la operación hasta que las aguas de lavado sean claras.
- Se reintegra todo el material retenido en los tamices a la muestra lavada.
- Se procede a secar la muestra.
- Se procede a determinar el peso de la muestra seca con aproximación al 0.1 % del peso original de la muestra.
- Se calcula de la siguiente manera:

$$A = \left(\frac{P1 - P2}{P1} \right) \times 100$$

Donde:

A= Porcentaje que pasa la malla N°200.

P1= Peso seco de la muestra.

P2= Peso seco de la muestra lavada



Figura 14. Ensayo del material pasante la malla N°200 del agregado fino (Arena gruesa). Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.5 Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos explicados en la Norma Técnica Peruana 400.018. Este porcentaje de material que pasa la malla N°200 calculado deberá ser menor al 1 % según la NTP 400.037.

Los procedimientos a realizar son los mismo mencionados anteriormente para determinar el material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa).



Figura 15. Ensayo del material pasante la malla N°200 del agregado grueso. Fuente. Elaboración Propia.

3.6.2.2.6 *Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero (puzolana natural)*

Este ensayo se realiza cumpliendo el procedimiento explicado en la NTP 400.018

Los procedimientos a realizar son los mismo mencionados anteriormente para determinar el material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa).



Figura 16. Ensayo del material pasante la malla N°200 del agregado fino ligero (Puzolana natural). Fuente. Elaboración Propia.

3.6.2.2.7 *Contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa)*

El contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa) se realiza siguiendo los procedimientos explicados en la Norma Técnica Peruana 339.185. Es importante mencionar que este ensayo se realizó cada día que se realizaba un diseño de mezclas en laboratorio, para tener un mejor control del agua que proporcionaba este material.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).

- Determinar el peso de la muestra con precisión del 0.1%. Se debe cumplir con los requisitos mínimos de muestra estipulados en la NTP 339.185.
- Se procede a secar la muestra a peso constante.
- Determinar el peso de la muestra seca.
- Calcular el contenido de humedad utilizando la siguiente fórmula:

$$P = \frac{100(W - D)}{D}$$

Donde:

P = Contenido de humedad evaporable de la muestra en porcentaje

W= Masa de la muestra húmeda

D= Masa de la muestra seca

3.6.2.2.8 *Contenido de humedad del agregado grueso*

El contenido de humedad del agregado grueso se realiza siguiendo los procedimientos explicados en la Norma Técnica Peruana 339.185.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el contenido de humedad del agregado grueso.

- Se realizarán los mismos procedimientos mencionados para el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).
- Calcular el contenido de humedad utilizando la fórmula mencionada anteriormente para el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).

3.6.2.2.9 *Contenido de humedad del agregado fino ligero (puzolana natural)*

El contenido de humedad del agregado grueso se realizó siguiendo los procedimientos explicados en la Norma Técnica Peruana 339.185.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el contenido de humedad del agregado fino ligero.

- Se realizarán los mismos procedimientos mencionados para el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).
- Calcular el contenido de humedad utilizando la fórmula mencionada anteriormente para el contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa).

3.6.2.2.10 *Peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa)*

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos estipulados en la Norma Técnica Peruana 400.022. Se realizaron 4 ensayos para una mayor precisión.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el peso específico y absorción del agregado fino (arena gruesa).

- Se procede a elegir dos muestras, por el método del cuarteo, de las cuales cada muestra tenía la cantidad necesaria para sacar dos sub muestras, con el fin de tener una mayor precisión en este ensayo.
- Se procede a preparar las muestras elegidas, para ello se coloca cada muestra en un recipiente adecuado y se procede a cubrir la muestra con agua hasta estar completamente sumergida por un lapso de $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$. Luego, se decanta el exceso de agua, teniendo cuidado con los finos, para evitar perderlos y se coloca sobre una superficie plana, en este caso sobre una bandeja. Se procede a secar la muestra hasta que esté en condiciones de saturado superficialmente seco, por lo que para el secado se usó una secadora, utilizándose en un nivel suave de flujo de aire y agitándose constantemente para que el secado sea uniforme. Para comprobar que nuestra muestra está saturada, se sujeta firmemente el molde cónico, en el cual se rellena hasta el tope y amontonar material adicional por encima de la parte superior del molde, para ligeramente apisonar el agregado en el molde con 25 golpes con la barra compactadora, desde una altura de 5mm de la parte superior del molde. La ligera caída del agregado moldeado indica que se ha legado a un estado de saturado superficialmente seca.
- Una vez preparada la muestra, se elegirá 500 gr para cada ensayo a realizar.

- Se procede a pesar la fiola con agua hasta el nivel 500 ml a una temperatura de 23°C ± 2°C.
- Se coloca dentro de la fiola con agua, los 500 gr de muestra saturada superficialmente seca. Una vez introducido el material se procederá a eliminar las burbujas de aire visibles, por lo que se rueda, invierte o agita manualmente la fiola.
- Luego de eliminar todas las burbujas de aire se procede a determinar el peso total de la fiola, la muestra y el agua,
- Se retira el agregado fino de la fiola, se procede a secar la muestra en el horno a temperatura de 110 °C ±5 °C, y por último se calcula el peso seco de la muestra.
- Se aplicará la siguiente fórmula para el cálculo del peso específico y la absorción del agregado fino (Arena natural).

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Peso específico saturado sup. seco} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Absorción} = \left(\frac{S - A}{A} \right) \times 100$$

Donde:

A= Masa de la muestra seca al horno en gr.

B=Masa de la fiola llenada con agua hasta la marca de calibración en gr.

C=Masa de la fiola lleno de la muestra y el agua hasta la marca de calibración en gr.

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca.



Figura 17. Ensayo de peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa). Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.11 Peso específico y absorción del agregado grueso

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos estipulados en la Norma Técnica Peruana 400.021.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el peso específico y absorción del agregado grueso.

- Se procede a preparar la muestra, la cual se debe cumplir con las cantidades mínimas de muestreo según la NTP 400.21. Luego de tener el material seleccionado, se debe rechazar todo el material que pasa la malla N°4, para luego proceder a lavar la muestra para eliminar polvos u otras impurezas.
- Una vez lista la muestra, se procede a sumergir a temperatura de ambiente por un periodo de 24 ± 4 h.
- Se retira la muestra luego de transcurrido el tiempo, y se procede a secar las partículas sobre un paño absorbente de gran tamaño hasta que se elimine el agua superficial visible.

- Se determina el peso saturado superficialmente seco.
- Se coloca la muestra saturada con superficialmente seca en la canasta metálica y se determina el peso en el agua a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$.
- Se procede a secar la muestra en el horno, y por último se calcula el peso seco de la muestra.
- Se calculará el peso específico y absorción del agregado grueso utilizando la siguiente fórmula:

$$P_{em} = \frac{A}{(B - C)} \times 100$$

$$P_{eSSS} = \frac{B}{(B - C)} \times 100$$

$$P_{ea} = \frac{A}{(A - C)} \times 100$$

$$Ab, (\%) = \frac{B - A}{A} \times 100$$

Donde:

A = Peso de la muestra seca en gr.

B = Peso de la muestra saturada superficialmente seca en gr.

C = Peso en el agua de la muestra saturada en gr.



Figura 18. Ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.12 Peso específico y absorción del agregado fino ligero (*Puzolana natural*)

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos estipulados en la Norma Técnica Peruana 400.022. Se realizaron 4 ensayos para una mayor precisión.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el peso específico y absorción del agregado fino ligero.

- Se procedieron a elegir dos muestras, por el método del cuarteo, de las cuales cada muestra tenía la cantidad necesaria para sacar dos sub muestras, con el fin de tener una mayor precisión en este ensayo.
- Se procede a preparar las muestras elegidas, para ello se coloca cada muestra en un recipiente adecuado y se procede a cubrir la muestra con agua hasta estar completamente sumergida por un lapso de **72 h ± 4 h** agitando durante al menos un minuto cada 24 h. Luego, se decanta el exceso de agua, teniendo cuidado con los finos, para evitar perderlos y se coloca sobre una superficie plana, en este caso sobre una bandeja. Se procede a secar la muestra hasta que esté en condiciones de saturado superficialmente seco, por lo que para el secado se usó una secadora, utilizándose

en un nivel suave de flujo de aire y agitándose constantemente para que el secado sea uniforme. Para comprobar que nuestra muestra está saturada, se sujeta firmemente el molde cónico, en el cual se rellena hasta el tope y amontonar material adicional por encima de la parte superior del molde, para ligeramente apisonar el agregado en el molde con 25 golpes con la barra compactadora, desde una altura de 5mm de la parte superior del molde. La ligera caída del agregado moldeado indica que se ha llegado a un estado de saturado superficialmente seca.

- Una vez preparada la muestra, se elegirá entre 200 a 300 gr para cada ensayo a realizar.
- Se procede a pesar la fiola con agua hasta el nivel 500 ml a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.
- Se coloca dentro de la fiola con agua, los 500 gr de muestra saturada superficialmente seca. Una vez introducido el material se procederá a eliminar las burbujas de aire visibles, por lo que se rueda, invierte o agita manualmente la fiola.
- Luego de eliminar todas las burbujas de aire se procede a determinar el peso total de la fiola, la muestra y el agua,
- Se retira el agregado fino de la fiola, se procede a secar la muestra en el horno a temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, y por último se calcula el peso seco de la muestra.
- Se aplicará la siguiente fórmula para el cálculo del peso específico y la absorción del agregado fino ligero (puzolana natural)

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Peso específico saturado sup. seco} = \frac{S}{(B + S - C)}$$

$$\text{Peso específico} = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$\text{Absorción} = \left(\frac{S - A}{A} \right) \times 100$$

Donde:

A= Masa de la muestra seca al horno en gr.

B=Masa de la fiola llenada con agua hasta la marca de calibración en gr.

C=Masa de la fiola lleno de la muestra y el agua hasta la marca de calibración en gr.

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca.



Figura 19. Peso específico del agregado fino ligero (Puzolana natural). Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.13 Peso unitario del agregado fino (Arena natural)

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos estipulados en la Norma Técnica Peruana 400.017.

A continuación se describen los procedimientos a realizar para determinar el peso unitario del agregado fino (arena gruesa).

- Se llena con una pala hasta rebosar a una altura que no exceda los 5cm por encima de la parte superior del recipiente.
- Se elimina el agregado sobrante con una regla.
- Se procede a pesar el recipiente más el agregado.
- Previamente se debe calcular el volumen del molde, determinando con exactitud el peso del agua necesario para llenarlo.
- Se calculará utilizando la siguiente formula:

$$PUS = f \times Ws$$

Donde:

Ws = Peso de la muestra suelta

f = Factor de calibración (1000/Peso del agua)

Procedimientos para calcular el peso compactado del agregado:

- Se llena con la muestra hasta la tercera parte del recipiente, luego se nivela con la yema de los dedos.
- Se procede a apisonar con la varilla compactadora con 25 golpes.
- Se llena hasta los 2/3 y se procede a apisonar con 25 golpes más.
- Se llena hasta que el recipiente este rebosando, y se procede a apisonar con 25 golpes más.
- Se elimina el agregado sobrante con la regla.
- Se procede a pesar el recipiente más el agregado.
- Previamente se debe calcular el volumen del molde, determinando con exactitud el peso del agua necesario para llenarlo.
- Se calculará utilizando la siguiente formula:

$$PUC = f \times Wc$$

Donde:

W_s = Peso de la muestra compactada

f = Factor de calibración (1000/Peso del agua)



Figura 20. Ensayo de peso unitario suelto del agregado fino (Arena gruesa). Fuente. Elaboración propia.



Figura 21. Ensayo de peso unitario compactado del agregado fino (Arena gruesa). Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.14 Peso unitario del agregado grueso

Este ensayo se realiza bajo los procedimientos estipulados en la Norma Técnica Peruana 400.017.

Se utilizará el mismo procedimiento con el que se determina el peso unitario suelto y compactado del agregado fino (arena gruesa).



Figura 22. Ensayo de peso unitario suelto y compactado del agregado grueso. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.2.15 Peso unitario del agregado fino ligero (Puzolana natural)

La ASTM C330 recomienda realizar este ensayo bajo la normativa de la ASTM C29.

Procedimientos para calcular el peso unitario suelto del agregado:

- Para el recipiente a utilizar, si bien la ASTM C29 da diversos valores de la capacidad del recipiente; la ASTM C330 indica que se debe usar para este ensayo un recipiente de capacidad de 14 litros (1/2 pies cúbicos).
- Se llena con una pala hasta rebosar a una altura que no exceda los 5cm por encima de la parte superior del recipiente.
- Se elimina el agregado sobrante con una regla.
- Se procede a pesar el recipiente más el agregado.
- Previamente se debe calcular el volumen del molde, determinando con exactitud el peso del agua necesario para llenarlo.
- Se calculará utilizando la siguiente formula:

$$PUS = f \times Ws$$

Donde:

Ws = Peso de la muestra suelta

f = Factor de calibración (1000/Peso del agua)

Procedimientos para calcular el peso compactado del agregado:

- Se llena con la muestra hasta la tercera parte del recipiente, luego se nivela con la yema de los dedos.
- Se procede a apisonar con la varilla compactadora con 25 golpes.
- Se llena hasta los 2/3 y se procede a apisonar con 25 golpes más.
- Se llena hasta que el recipiente este rebosando, y se procede a apisonar con 25 golpes más.
- Se elimina el agregado sobrante con la regla.
- Se procede a pesar el recipiente más el agregado.
- Previamente se debe calcular el volumen del molde, determinando con exactitud el peso del agua necesario para llenarlo.
- Se calculará utilizando la siguiente formula:

$$PUC = f \times Wc$$

Donde:

Wc = Peso de la muestra compactada

f = Factor de calibración (1000/Peso del agua)



Figura 23. Ensayo de peso unitario suelto y compactado del agregado fino ligero (puzolana natural).
Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.3 *Procedimientos previos a los diseños de mezclas finales*

Como se explicó anteriormente, fue necesario triturar la puzolana natural de la cantera Raqchi, con el fin de usarla como agregado fino, por lo que previamente se tuvo que pasar el material por la malla N° 3/8”, para posteriormente aquel material que fue retenido en esta malla, fuera triturado.

Una vez que se contó con todos los materiales, se procedió a realizar la caracterización de los agregados, contada con esta información, indispensable para nuestros diseños, se tenía pensado inicialmente realizar los siguientes diseños, para posteriormente elegir 3 de los mejores diseños.

El porcentaje de puzolana y piedra estaba en relación al volumen total de agregados.

Tabla 42

Diseños iniciales a realizar en la investigación

| CEMENTO | A/C | % PUZOLANA O ARENA |
|---------|------|--------------------|
| 300 | 0.45 | 50% |
| | | 60% |
| | 0.5 | 50% |
| | | 60% |
| 350 | 0.45 | 50% |
| | | 60% |
| | 0.5 | 50% |
| | | 60% |
| 400 | 0.45 | 50% |
| | | 60% |
| | 0.5 | 50% |
| | | 60% |
| 450 | 0.45 | 50% |
| | | 60% |
| | 0.5 | 50% |
| | | 60% |

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, al realizar el diseño más favorable en cuestiones de resistencia ($a/c = 0.45$; contenido de cemento de 450 kg/m³ y un porcentaje de puzolana de 60% - piedra 40%), con las dosificaciones como se observa en la Tabla N°43, considerando un 1.6 % de aditivo, se observó que teníamos una mezcla nada trabajable con una excesiva presencia de agregado grueso, lo que nos obligó a buscar el porcentaje óptimo de piedra – puzolana natural a utilizar, con el fin de hacer trabajable nuestro diseño; Así también, es importante mencionar que se realizaron dos probetas, las cuales la primera se desencofró a las 20 horas, probeta que se partió en dos por no haber

fraguado completamente y por la gran presencia de cangrejas. La segunda se desencofró a las 40 horas, la cual salió uniforme, con una mayor rigidez y en teoría mejor acabado. Tras este incidente, se llegó a la conclusión de que nuestras probetas de concreto con puzolana natural, deberían ser desencofradas pasadas las 36 horas, y no a las 24 horas, debido a que la puzolana retarda el proceso de fraguado de las mezclas.

Tabla 43

Diseño de mezcla con relación a/c = 0.45; contenido de cemento = 450 kg/m³ y un porcentaje de puzolana de 60% - piedra 40%

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|-------------------|--|-------------------|
| Cemento Tipo I | 450.00 | kg/m ³ |
| Agua | 269.64 | kg/m ³ |
| Puzolana | 582.68 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 667.20 | kg/m ³ |
| Aditivo | 7.20 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.



Figura 24. Probetas del diseño de mezcla con relación a/c = 0.45; contenido de cemento = 450 kg/m³ y un porcentaje de puzolana de 60% - piedra 40%. Fuente. Elaboración propia.

Con el fin de elaborar una mezcla trabajable se procede a realizar el diseño con 63.5 % de puzolana y 36.5 % de piedra; manteniendo las mismas relaciones del diseño anterior; sin embargo,

como se puede apreciar en la figura N° 25, se obtuvo una mezcla seca con una gran presencia de piedra, por lo que era necesario bajar más aún el porcentaje de piedra en nuestros diseños.



Figura 25. Diseño de mezcla con relación a/c = 0.45; contenido de cemento = 450 kg/m³ y un porcentaje de puzolana de 63.5% - piedra 36.5%. Fuente. Elaboración propia.

Se procedió a realizar diseños de mezcla con diferentes porcentaje de relación puzolana – Piedra, manteniendo constante la relación a/c de 0.45 y el contenido de cemento de 450 kg/m³; hasta que se encontró que un porcentaje adecuado, más no el óptimo, para las mezclas fue de 78 % de puzolana y 22% de piedra, el diseño se observa en la Tabla N° 44 ; sin embargo, con esto no se había solucionado el problema, pues las mezclas aún no contaban con la adherencia ni cohesión que caracteriza al concreto. Es importante mencionar que se sacaron dos probetas de concreto los cuales fueron sometidas al ensayo de densidad seca, encontrándose valores muy satisfactorios, 1600 y 1665 kg/m³.

Tabla 44

Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m^3 y un porcentaje de puzolana de 78% - piedra 22%

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|----------------|---|-------------------|
| Cemento Tipo I | 450.00 | kg/m ³ |
| Agua | 289.85 | kg/m ³ |
| Puzolana | 758.92 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 367.30 | kg/m ³ |
| Aditivo | 5.85 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.



Figura 26. Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.45$; contenido de cemento = 450 kg/m^3 y un porcentaje de puzolana de 78% - piedra 22%. Fuente. Elaboración propia.

Frente a la interrogante de cómo lograr que nuestras mezclas de concreto tengan la adherencia y cohesión necesaria, es que leyendo bibliografía se encuentra que el cemento y una mayor de cantidad de finos, contribuían a mejorar esta propiedad, por lo que se decide incrementar la cantidad de cemento a utilizar en nuestros diseños. Esto se demuestra, debido a que a uno de nuestros diseños realizados, se le agregó cemento adicional; teniendo al final una cantidad de cemento de 570 kg/m^3 y una relación a/c de 0.39. Con este diseño se pudo observar cosas importantes; como que al haber agregado una mayor cantidad de cemento, aparte de ganar adherencia (cabe indicar que aún no era la óptima), a comparación de las probetas con un contenido inferior, esta lograba exudar menos que nuestros otros diseños; a la vez el proceso de fraguado, pese a que no se realizó dicho ensayo, se observó que dicho proceso era mejor y más rápido. De

igual manera para cada diseño se realizó el ensayo de densidad seca, los cuales fueron muy satisfactorios, estando en el rango de 1500 a 1600kg/m³.



Figura 27. A la izquierda una probeta con contenido de cemento de 450, al centro una con 475 kg/m³ y a la derecha una con 570 kg/m³. Fuente. Elaboración propia.

Es importante mencionar que luego de habernos dado cuenta de que nuestros diseños requerían de una mayor cantidad de cemento, es que comenzamos a observar el porcentaje en volumen de pasta y agregados existentes en nuestros diseños, encontrándose que, el volumen de pasta de nuestros diseños debería ser mayor al 45 % del volumen total.

Es así que sabiendo que existía una necesidad de finos en nuestros diseños; es que se procede a realizar mezclas con relaciones agua/cemento de 0.5, 0.45, 0.4 y contenidos de cemento constante de 500, 550 y 600 kg/m³ y con porcentaje de agregados constante de 84 % puzolana y 16 % piedra (relación óptima encontrada de agregados); obteniéndose mezclas muy acuosas para aquellos diseños con contenido de cemento bajo y relación a/c alta; y para aquellos diseños con contenido de cemento entre 500 y 600 kg/m³ y relaciones a/c de 0.4, se obtuvo diseños con un slump muy bajo (1''); es así que de esta experiencia se deduce que la proporción mínima de porcentaje de

volumen de agua entre el porcentaje de volumen del contenido de cemento (% vol. Agua / % vol. Cemento) tendría que ser menor a 1.20; de lo contrario tu mezcla te salía demasiado suelta y sin trabajabilidad (fluidez). Es importante mencionar que uno de los diseños elegidos tiene una relación de 1.17 (% vol. Agua / % vol. Cemento), no es una mezcla del todo idónea, en teoría se debería haber descartado; sin embargo se vio la manera de poder encontrar un diseño con la menor cantidad de cemento y pese a su bajo slump; se vio que el uso que se podría dar a este diseño es en la elaboración de prefabricados.



Figura 28. Diseño de mezcla con relación a/c = 0.55; contenido de cemento = 500 kg/m³ y un porcentaje de puzolana de 84% - piedra 16%. Fuente. Elaboración propia.

Ya teniendo la certeza de nuestro valor límite de % vol. Agua / % vol. Cemento, se realizaron diseños con contenidos de cemento mayores a 500 kg/m³; llegando al diseño cuyos pesos se observan en la tabla N° 45 , en el cual se infiere que pese a tener una relación % vol. Agua / % vol. Cemento, igual 1.20 ; nos encontramos con una mezcla distinta a los diseños anteriores, debido a que esta mezcla si tenía una buena trabajabilidad, por lo que analizando, llegamos a la conclusión de que el porcentaje mínimo a utilizar en volumen de cemento, para nuestros diseños debe ser mayor al 19 %; siendo conscientes de que el uso que se dará al concreto con este mínimo contenido de cemento será el de la elaboración de prefabricados.

Tabla 45

Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.40$; contenido de cemento = 667.32 kg/m^3 y un porcentaje de puzolana de 84% - piedra 16%

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|----------------|---|-------------------|
| Cemento Tipo I | 667.32 | kg/m ³ |
| Agua | 343.97 | kg/m ³ |
| Puzolana | 632.40 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 208.04 | kg/m ³ |
| Aditivo | 6.01 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 46

Porcentajes en función de volumen del diseño de mezcla con relación $a/c = 0.4$; contenido de cemento = 667.32 kg/m^3 y un porcentaje de puzolana de 84 % - piedra 16%

| | | | |
|---------------|----------|--------|--------|
| Vol Pasta | Cemento | 22.13% | 51.89% |
| | Agua | 26.69% | |
| | Otros | 3.07% | |
| Vol Agregados | Puzolana | 40.40% | 48.10% |
| | Piedra | 7.70% | |

Fuente: Elaboración propia



Figura 29. Diseño de mezcla con relación $a/c = 0.40$; contenido de cemento = 667.32 kg/m^3 y un porcentaje de puzolana de 84% - piedra 16%. Fuente. Elaboración propia.

Es así, que luego de haber realizado varios diseños con diferentes contenidos de cemento, se llegó a encontrar un diseño adecuado, el cual tenía una relación a/c de 0.32; 84% de puzolana y 16% de piedra; y un contenido de cemento de 744 kg/m^3 . Se hace mención que una vez que se

encontró este diseño, se procedió a encontrar el porcentaje de aditivo adecuado para poder obtener un slump de 3 a 5 pulgadas.

Encontrado nuestros dos diseños de concreto estructural ligero, se procedió a elaborar los diseños de mezcla de nuestro concreto patrón de control, el cual cuenta con agregados convencionales (arena gruesa y piedra chancada), para posteriormente hacer la comparativa de estos 4 diseños.

Por último es importante mencionar que se sacaron probetas de todos los diseños realizados, los cuales al tener un contenido de cemento alto, lograron obtener valores que sobrepasaron a los 3 y 7 días los 175 kg/m³ exigidos por el ACI 213R -03.

3.6.2.4 *Diseños de mezcla*

Como se observó en los antecedentes de esta investigación, no existe un método adecuado para el diseño de este tipo de concretos, esto debido a la gran variedad de materiales ligeros, cada uno con diferentes características, utilizados en los concretos estructurales ligeros.

Es así que en esta investigación se decide utilizar un método más empírico, basado en tener como datos iniciales el contenido de cemento a utilizar, relación agua/cemento y porcentaje de puzolana natural en relación al volumen total de agregados. Para por iteraciones encontrar las proporciones adecuadas para cumplir con los objetivos de esta investigación. Por lo que los pasos para nuestros diseños finales elegidos se describen a continuación.

3.6.2.4.1 *Procedimiento para los diseños de mezcla finales realizados*

3.6.2.4.1.1 *Diseño N° 01 de concreto estructural ligero*

Paso 01: Obtener la caracterización de los materiales.

Tabla 47
Resumen de características físicas de los agregados

| Ensayos | Agregado grueso | Puzolana natural | Unidad |
|----------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|
| Módulo de fineza | 6.96 | 3.04 | Adim. |
| Material que pasa la malla N°200 | 0.49 | 11.48 | % |
| Contenido de humedad | 0.48 | 1.63 | % |
| Peso específico | 2.69 | 1.55 | gr/cm ³ |
| Absorción | 0.74 | 13.22 | % |
| Peso unitario suelto | 1442 | 704 | kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1584 | 801 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que el contenido de humedad se calculaba todos los días que procedíamos a realizar un diseño de mezcla, los cuales se calcularon el día que se elaboró este diseño, por lo que estos difieren del contenido de humedad hallado para nuestra caracterización de materiales.

Paso 02: Selección de resistencia de diseño.

En este caso al ser un diseño experimental, no se está considerando una resistencia de diseño; no obstante, se considera una resistencia mínima de 175 kg/cm para cumplir con los requisitos de resistencia establecidos en el ACI 213R-03.

Paso 03: Selección del asentamiento.

Para este diseño se está considerando un asentamiento de 3 a 5 pulgadas, los cuales según recomendaciones del ACI 213R-03 son los adecuados para este tipo de concretos.

Paso 04: Definir el contenido de cemento a utilizar, relación a/c, proporción de agregado grueso/fino y porcentaje de aditivo según recomendaciones de la ficha técnica.

Contenido de cemento = 744 kg/m³

Proporción de agregados: 84 % puzolana – 16 % piedra

Relación a/c = 0.32.

Paso 05: Cálculo del contenido de agua

Teniendo el contenido de cemento a utilizar y la relación a/c, se determinará el contenido de agua multiplicando ambos valores.

$$\text{Contenido de agua} = (a/c) \times \text{Contenido de cemento}$$

$$\text{Contenido de agua} = 0.32 \times 744 \text{ kg/m}^3 = 238.08 \text{ kg/m}^3$$

Paso 06: Cálculo del contenido de aire y el peso del aditivo.

Según las recomendaciones del ACI 211.2 para un TMN de 3/4 de pulgada, se debe considerar un porcentaje de aire de 2 %.

Tabla 48

Cantidad aproximada de contenido de aire

| Según ACI 211.2 | Cantidad aproximada de contenido de aire | | |
|--|--|-------|------|
| | 3/8 " | 1/2" | 3/4" |
| Tamaño máximo nominal | 3/8 " | 1/2" | 3/4" |
| Cantidad aproximada de contenido de aire | 3% | 2.50% | 2% |

Fuente: Elaboración propia.

Para el peso del aditivo se multiplicará el porcentaje de aditivo dividido entre 100 por el contenido de cemento.

$$\text{Peso aditivo} = (1.2 / 100) \times 744 = 8.93 \text{ kg/m}^3$$

Paso 07: Se calcula el volumen de los materiales ya obtenidos.

Se calcula el volumen de cemento sabiendo que el peso específico del cemento Sol Tipo I es de 3015 kg/m³.

$$\text{Volumen de Cemento} = \text{Peso Cemento} / \text{Peso específico Cemento}$$

$$\text{Volumen de cemento} = 744 / 3015 = 0.24677 \text{ m}^3$$

Se calcula el volumen de agua.

$$\text{Volumen de agua} = \frac{238.08}{1000} = 0.23808 \text{ m}^3$$

Se calcula el volumen de aditivo.

$$\text{Volumen de aditivo} = 8.928 / 1046 = 0.00854 \text{ m}^3$$

Se calcula el volumen de aire en la mezcla.

$$\text{Volumen de aire} = 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

Tabla 49

Resumen del volumen de materiales obtenidos

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUMEN m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 744 | 0.24677 |
| Agua | 1000 | 238.08 | 0.23808 |
| Aditivo | 1046 | 8.93 | 0.00854 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 0.51339 |

Fuente: Elaboración propia

Paso 08: Cálculo del volumen de agregado grueso y agregado fino.

Sabiendo que se diseña para 1 m³, por diferencia se puede obtener el Vol de agregados Total.

$$\text{Vol. agregado total} = 1 \text{ m}^3 - (\text{Vol. Cemento} + \text{Vol. Agua} + \text{Vol. Aditivo} + \text{Vol. Aire})$$

$$\text{Vol. agregado total} = 1 - 0.51339 = 0.48661 \text{ m}^3$$

Por lo tanto sabiendo la relación de porcentajes a utilizar en nuestro diseño, se calcula el volumen de los agregados.

$$\text{Vol. Ag. fino} = 84 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{84}{100}\right) \times 0.48661 = 0.40875 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Ag. grueso} = 16 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{16}{100}\right) \times 0.48661 = 0.07786 \text{ m}^3$$

Paso 09: Cálculo del peso de agregado fino y agregado grueso

$$\text{Peso Ag. Fino} = \text{Peso específico Ag. Fino} \times \text{Vol. Ag. Fino}$$

$$\text{Peso Ag. Fino} = 1550 \times 0.40875 = 633.56 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso Ag. Grueso} = \text{Peso específico Ag. Grueso} \times \text{Vol. Ag. Grueso}$$

$$\text{Peso Ag. Grueso} = 2690 \times 0.07786 = 209.44 \text{ kg/m}^3$$

Paso 10. Resumen del diseño no corregido

Tabla 50

Resumen del diseño de mezcla sin corregir

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUMEN m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 744 | 0.24677 |
| Agua | 1000 | 238.08 | 0.23808 |
| Puzolana | 1550 | 633.56 | 0.40875 |
| Piedra #6 | 2690 | 209.44 | 0.07786 |
| Aditivo | 1046 | 8.93 | 0.00854 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 1.0 |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 11: Corrección del diseño de mezcla por contenido de humedad de los agregados

Para la corrección por humedad de los agregados se utilizará las siguientes formulas:

$$\text{Peso del Ag. Grueso húmedo} = (\text{Peso seco Ag. Grueso}) \times [\% \text{ humedad Ag. Grueso} + 1]$$

$$\text{Peso del Ag. Fino húmedo} = (\text{Peso seco Ag. Fino}) \times [\% \text{ humedad Ag. Fino} + 1]$$

Para la corrección del agua de diseño

$$\text{Agua Ag. Grueso} = (\text{Peso seco A. G}) \times (\% \text{ hum. A. G.} - \% \text{ abso. A. G.}) = X$$

$$\text{Agua Ag. Fino} = (\text{Peso seco A. F}) \times (\% \text{ hum. A. F.} - \% \text{ abso. A. F.}) = Y$$

$$\text{Agua efectiva} = \text{Agua de diseño} - (X + Y)$$

Por lo que se procede a calcular el peso húmedo de los agregados.

$$\text{Peso del Ag. Grueso húmedo} = (209.44) \times \left(\frac{0.48}{100} + 1 \right) = 210.45 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Ag. Fino húmedo} = (633.56) \times \left(\frac{1.63}{100} + 1 \right) = 643.89 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo del agua efectiva en la mezcla.

$$\text{Agua efectiva} = 238.08 - \left\{ \left[(209.44) \times \left(\frac{0.48 - 0.74}{100} \right) \right] + \left[(633.56) \times \left(\frac{1.63 - 13.2}{100} \right) \right] \right\}$$

$$\text{Agua efectiva} = 311.93 \text{ kg/m}^3$$

Paso 12: Resumen de pesos de diseño de mezcla final

Tabla 51

Diseño N° 01 de concreto estructural ligero

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|-------------------|--|-------------------|
| Cemento Tipo I | 744.00 | kg/m ³ |
| Agua | 311.93 | kg/m ³ |
| Puzolana | 643.89 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 210.45 | kg/m ³ |
| Aditivo | 8.93 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.4.1.2 *Diseño N° 02 de concreto estructural ligero***Paso 01:** Obtener la caracterización de los materiales.

Tabla 52

Resumen de características físicas de los agregados

| Ensayos | Agregado grueso | Puzolana natural | Unidad |
|----------------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------|
| Módulo de fineza | 6.96 | 3.04 | Adim. |
| Material que pasa la malla N°200 | 0.49 | 11.48 | % |
| Contenido de humedad | 0.47 | 1.04 | % |
| Peso específico | 2.69 | 1.55 | gr/cm ³ |
| Absorción | 0.74 | 13.22 | % |
| Peso unitario suelto | 1442 | 704 | kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1584 | 801 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 02: Selección de resistencia de diseño.

En este caso al ser un diseño experimental, no se está considerando una resistencia de diseño; no obstante, se considera una resistencia mínima de 175 kg/cm para cumplir con los requisitos de resistencia establecidos en el ACI 213R-03.

Paso 03: Selección del asentamiento.

Por las condiciones del diseño antes mencionada, se tomará como asentamiento de 1 a 2 pulgadas.

Paso 04: Definir el contenido de cemento a utilizar, relación a/c, proporción de agregado grueso/fino y porcentaje de aditivo según recomendaciones de la ficha técnica.

Contenido de cemento = 579 kg/m³

Proporción de agregados: 84 % puzolana – 16 % piedra

Relación a/c = 0.39.

Paso 05: Cálculo del contenido de agua

$$\text{Contenido de agua} = 0.39 \times 579 \text{ kg/m}^3 = 225.81 \text{ kg/m}^3$$

Paso 06: Cálculo del contenido de aire y el peso del aditivo.

Según las recomendaciones del ACI 211.2 para un TMN de 3/4 de pulgada, se debe considerar un porcentaje de aire de 2 %.

$$\text{Peso aditivo} = (0.90 / 100) \times 579 = 5.21 \text{ kg/m}^3$$

Paso 07: Se calcula el volumen de los materiales ya obtenidos.

$$\text{Volumen de cemento} = 579 / 3015 = 0.19204 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agua} = \frac{225.81}{1000} = 0.22581 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aditivo} = 5.21 / 1046 = 0.00498 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire} = 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

Resumen de los volúmenes obtenidos hasta el momento.

Tabla 53

Resumen del volumen de materiales obtenidos

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUMEN N m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 579 | 0.19204 |
| Agua | 1000 | 225.81 | 0.22581 |
| Aditivo | 1046 | 5.21 | 0.00498 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 0.44283 |

Fuente: Elaboración propia

Paso 08: Cálculo del volumen de agregado grueso y agregado fino.

$$\text{Vol. agregado total} = 1 - 0.44283 = 0.55717 \text{ m}^3$$

Por lo tanto sabiendo la relación de porcentajes a utilizar en nuestro diseño, se calcula el volumen de los agregados.

$$\text{Vol. Ag. fino} = 84 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{84}{100}\right) \times 0.55717 = 0.46802 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Ag. grueso} = 16 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{16}{100}\right) \times 0.55717 = 0.08915 \text{ m}^3$$

Paso 09: Cálculo del peso de agregado fino y agregado grueso

$$\text{Peso Ag. Fino} = 1550 \times 0.46802 = 725.43 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{eso Ag. Grueso} = 2690 \times 0.08915 = 239.81 \text{ kg/m}^3$$

Paso 10. Resumen del diseño no corregido

Tabla 54

Resumen del diseño de mezcla sin corregir

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUMEN m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 579 | 0.19204 |
| Agua | 1000 | 225.81 | 0.22581 |
| Puzolana | 1550 | 725.43 | 0.46802 |
| Piedra #6 | 2690 | 239.81 | 0.08915 |
| Aditivo | 1046 | 5.21 | 0.00498 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 1 |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 11: Corrección del diseño de mezcla por contenido de humedad de los agregados

$$\text{Peso del Ag. Grueso húmedo} = (239.81) \times \left(\frac{0.47}{100} + 1\right) = 240.94 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Ag. Fino húmedo} = (725.43) \times \left(\frac{1.04}{100} + 1\right) = 732.97 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 225.81 - \left\{ \left[(239.81) \times \left(\frac{0.47 - 0.74}{100}\right) \right] + \left[(725.43) \times \left(\frac{1.04 - 13.2}{100}\right) \right] \right\}$$

$$\text{Agua efectiva} = 314.67 \text{ kg/m}^3$$

Paso 12: Resumen de pesos de diseño de mezcla final

Tabla 55

Diseño N° 02 de concreto estructural ligero

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|----------------|---|-------------------|
| Cemento Tipo I | 579.00 | kg/m ³ |
| Agua | 314.67 | kg/m ³ |
| Puzolana | 732.97 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 240.94 | kg/m ³ |
| Aditivo | 5.21 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.4.1.3 Diseño N° 01 de concreto patrón de control

Para motivos de comparación, se realizará el mismo método para el concreto patrón de control.

Paso 01: Obtener la caracterización de los materiales.

Tabla 56

Resumen de características físicas de los agregados

| Ensayos | Agregado grueso | Arena Gruesa | Unidad |
|----------------------------------|-----------------|--------------|--------------------|
| Módulo de fineza | 6.96 | 3 | Adim. |
| Material que pasa la malla N°200 | 0.49 | 3.22 | % |
| Contenido de humedad | 0.5 | 6.5 | % |
| Peso específico | 2.69 | 2.65 | gr/cm ³ |
| Absorción | 0.74 | 1.39 | % |
| Peso unitario suelto | 1442 | 1491 | kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1584 | 1710 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 02: Selección de resistencia de diseño.

Al ser un diseño para compararlo con nuestro diseño de concreto estructural ligero N°01, se considerará una resistencia mínima de 175 kg/cm².

Paso 03: Selección del asentamiento.

Se considera un asentamiento de 3 a 5 pulgadas.

Paso 04: Definir el contenido de cemento a utilizar, relación a/c, proporción de agregado grueso/fino y porcentaje de aditivo según recomendaciones de la ficha técnica.

$$\text{Contenido de cemento} = 744 \text{ kg/m}^3$$

Proporción de agregados: 84 % puzolana – 16 % piedra

$$\text{Relación a/c} = 0.32.$$

Paso 05: Cálculo del contenido de agua

$$\text{Contenido de agua} = 0.32 \times 744 \text{ kg/m}^3 = 238.08 \text{ kg/m}^3$$

Paso 06: Cálculo del contenido de aire y el peso del aditivo.

Porcentaje de contenido de aire de 2%.

$$\text{Peso aditivo} = (1.6 / 100) \times 744 = 11.90 \text{ kg/m}^3$$

Paso 07: Se calcula el volumen de los materiales ya obtenidos.

$$\text{Volumen de cemento} = 744 / 3015 = 0.24677 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agua} = \frac{238.08}{1000} = 0.23808 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aditivo} = 11.90 / 1046 = 0.01138 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire} = 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

Tabla 57

Resumen del volumen de materiales obtenidos

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUME N m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 744 | 0.24677 |
| Agua | 1000 | 238.08 | 0.23808 |
| Aditivo | 1046 | 11.90 | 0.01138 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 0.51623 |

Fuente: Elaboración propia

Paso 08: Cálculo del volumen de agregado grueso y agregado fino

$$\text{Vol. agregado total} = 1 - 0.51623 = 0.48377 \text{ m}^3$$

Por lo tanto sabiendo la relación de porcentajes a utilizar en nuestro diseño, se calcula el volumen de los agregados.

$$\text{Vol. Ag. fino} = 84 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{84}{100}\right) \times 0.48377 = 0.40637 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Ag. grueso} = 16 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{16}{100}\right) \times 0.48377 = 0.07740 \text{ m}^3$$

Paso 09: Cálculo del peso de agregado fino y agregado grueso

$$\text{Peso Ag. Fino} = 2650 \times 0.40637 = 1076.88 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso Ag. Grueso} = 2690 \times 0.07740 = 208.21 \text{ kg/m}^3$$

Paso 10. Resumen del diseño no corregido

Tabla 58

Resumen del diseño de mezcla sin corregir

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUME N m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 744 | 0.24677 |
| Agua | 1000 | 238.08 | 0.23808 |
| Arena Gruesa | 2650 | 1076.88 | 0.40637 |
| Piedra #6 | 2690 | 208.21 | 0.07740 |
| Aditivo | 1046 | 11.9 | 0.01138 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 1.00000 |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 11: Corrección del diseño de mezcla por contenido de humedad de los agregados

Por lo que se procede a calcular el peso húmedo de los agregados.

$$\text{Peso del Ag. Grueso húmedo} = (208.21) \times \left(\frac{0.50}{100} + 1\right) = 209.25 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Ag. Fino húmedo} = (1076.88) \times \left(\frac{6.5}{100} + 1\right) = 1146.88 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 238.08 - \left\{ \left[(208.21) \times \left(\frac{0.50 - 0.74}{100}\right) \right] + \left[(1076.88) \times \left(\frac{6.5 - 1.39}{100}\right) \right] \right\}$$

$$\text{Agua efectiva} = 183.55 \text{ kg/m}^3$$

Paso 12: Resumen de pesos de diseño de mezcla final.

Tabla 59

Diseño N° 01 de concreto patrón de control

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|-------------------|--|-------------------|
| Cemento Tipo I | 744.00 | kg/m ³ |
| Agua | 183.55 | kg/m ³ |
| Arena Gruesa | 1146.88 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 209.25 | kg/m ³ |
| Aditivo | 11.90 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.4.1.4 *Diseño N° 02 de concreto patrón de control*

Paso 01: Obtener la caracterización de los materiales.

Tabla 60

Resumen de características físicas de los agregados

| Ensayos | Agregado grueso | Arena Gruesa | Unidad |
|----------------------------------|------------------------|---------------------|--------------------|
| Módulo de fineza | 6.96 | 3 | Adim. |
| Material que pasa la malla N°200 | 0.49 | 3.22 | % |
| Contenido de humedad | 0.47 | 6.18 | % |
| Peso específico | 2.69 | 2.65 | gr/cm ³ |
| Absorción | 0.74 | 1.39 | % |
| Peso unitario suelto | 1442 | 1491 | kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1584 | 1710 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 02: Selección de resistencia de diseño.

Al ser un diseño para compararlo con nuestro diseño de concreto estructural ligero N°02, se considerará una resistencia mínima de 175 kg/cm².

Paso 03: Selección del asentamiento.

Asentamiento de 1 a 2 pulgadas.

Paso 04: Definir el contenido de cemento a utilizar, relación a/c, proporción de agregado grueso/fino y porcentaje de aditivo según recomendaciones de la ficha técnica.

Contenido de cemento = 579 kg/m³

Proporción de agregados: 84 % puzolana – 16 % piedra

Relación a/c = 0.39.

Paso 05: Cálculo del contenido de agua

$$\text{Contenido de agua} = 0.39 \times 579 \text{ kg/m}^3 = 225.81 \text{ kg/m}^3$$

Paso 06: Cálculo del contenido de aire y el peso del aditivo.

Porcentaje de contenido de aire de 2%.

$$\text{Peso aditivo} = (1.3 / 100) \times 579 = 7.53 \text{ kg/m}^3$$

Paso 07: Se calcula el volumen de los materiales ya obtenidos.

$$\text{Volumen de cemento} = 579 / 3015 = 0.19204 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agua} = \frac{225.81}{1000} = 0.22581 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aditivo} = 7.53 / 1046 = 0.0072 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de aire} = 2 / 100 = 0.02 \text{ m}^3$$

Resumen de los volúmenes obtenidos hasta el momento.

Tabla 61

Resumen del volumen de materiales obtenidos

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUME N m ³ |
|-------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 579 | 0.19204 |
| Agua | 1000 | 225.81 | 0.22581 |
| Aditivo | 1046 | 7.53 | 0.00720 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 0.44505 |

Fuente: Elaboración propia

Paso 08: Cálculo del volumen de agregado grueso y agregado fino.

$$\text{Vol. agregado total} = 1 - 0.44505 = 0.55495 \text{ m}^3$$

Por lo tanto sabiendo la relación de porcentajes a utilizar en nuestro diseño, se calcula el volumen de los agregados.

$$\text{Vol. Ag. fino} = 84 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{84}{100}\right) \times 0.55495 = 0.46616 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Ag. grueso} = 16 \% (\text{Vol. Total de agregados}) = \left(\frac{16}{100}\right) \times 0.55495 = 0.08879 \text{ m}^3$$

Paso 09: Cálculo del peso de agregado fino y agregado grueso

$$\text{Peso Ag. Fino} = 2650 \times 0.46616 = 1235.32 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{eso Ag. Grueso} = 2690 \times 0.08879 = 238.85 \text{ kg/m}^3$$

Paso 10. Resumen del diseño no corregido

Tabla 62

Resumen del diseño de mezcla sin corregir

| MATERIALES | P.ESP kg/m ³ | PESO kg/m ³ | VOLUMEN N m ³ |
|----------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| Cemento Tipo I | 3015 | 579 | 0.19204 |
| Agua | 1000 | 225.81 | 0.22581 |
| Arena gruesa | 2650 | 1235.32 | 0.46616 |
| Piedra #6 | 2690 | 238.85 | 0.08879 |
| Aditivo | 1046 | 7.53 | 0.00720 |
| Aire | | 2.00 | 0.02000 |
| TOTAL | | | 1.00000 |

Fuente: Elaboración propia.

Paso 11: Corrección del diseño de mezcla por contenido de humedad de los agregados

$$\text{Peso del Ag. Grueso húmedo} = (238.85) \times \left(\frac{0.47}{100} + 1\right) = 239.97 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Ag. Fino húmedo} = (1235.32) \times \left(\frac{6.18}{100} + 1\right) = 1311.66 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Agua efectiva} = 225.81 - \left\{ \left[(238.85) \times \left(\frac{0.47 - 0.74}{100}\right) \right] + \left[(1235.32) \times \left(\frac{6.18 - 1.39}{100}\right) \right] \right\}$$

$$\text{Agua efectiva} = 167.28 \text{ kg/m}^3$$

Paso 12: Resumen de pesos de diseño de mezcla final

Tabla 63

Diseño N° 02 de concreto patrón de control

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|-------------------|--|-------------------|
| Cemento Tipo I | 579.00 | kg/m ³ |
| Agua | 167.28 | kg/m ³ |
| Arena Gruesa | 1311.66 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 239.97 | kg/m ³ |
| Aditivo | 7.53 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.5 *Fabricación, conformación de testigos y curado del concreto*

Para la elaboración del concreto se utilizó una mezcladora tipo trompo; se verificó que los equipos estén operativos, limpios y sin la presencia de restos de concreto adheridos en el interior de estos. Se procedió a humedecer todos los equipos que estarían en contacto con el concreto, con el fin de no restarle agua al diseño de mezcla.

El proceso de mezclado fue de la siguiente manera:

- Se pesó los materiales a utilizar según cada diseño de mezclas.
- Se pre-saturan los agregados, empezando con la puzolana natural, el cual se mezcla con la cantidad de agua correspondiente a su absorción, para posteriormente colocar el agregado grueso. Se hace mención que el vertido del agua de pre-saturación se hace de manera progresiva, con el fin de mezclar homogéneamente con el material. La pre-saturación se realizó aproximadamente por un tiempo de 3 minutos.
- Se procede a mezclar el agua con el aditivo.
- Se adiciona el contenido de cemento de diseño a la mezcla de manera progresiva (secuencial); es decir, se agrega la tercera parte del cemento y la tercera parte del

agua restante y se procede a mezclar; se continúa con la tercera parte del cemento y agua y se realiza el mezclado, una vez que se observa que el mezclado ha sido uniforme, se procede a colocar en el trompo el cemento restante, para posteriormente finalizar mezclando con el agua sobrante de diseño. Se realiza la adición de cemento y agua de manera secuencial, debido a que el agregar todo el contenido de cemento y agua de un solo golpe, ocasiona la formación de grumos, realizándose un mezclado no homogéneo y conllevando a tiempos de mezclado mayores a los requeridos.

- Se hace la observación que el proceso de mezclado del concreto ligero estructural es mucho mayor que al proceso de mezclado del concreto convencional, aproximadamente cada mezcla en el trompo duraba 20 minutos.

Para la elaboración de probetas cilíndricas y vigas de nuestros diseños de mezclas, se aplicó los procedimientos estipulados en la NTP 339.033; de la misma manera, se aplicó dicha normativa para el curado del concreto.



Figura 30. Preparación de las mezclas de concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.6 *Ensayos del concreto en estado fresco*

3.6.2.6.1 *Asentamiento del concreto*

El asentamiento del concreto o consistencia del concreto en estado fresco se mide siguiendo los procedimientos explicados en la NTP 339.035.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar el asentamiento del concreto.

- Se coloca el cono de abrams húmedo en una base plana, húmeda y no absorbente.
- Se humedece todos los instrumentos a utilizar en el ensayo.
- Se mantiene firme el cono con la base, pisando sus dos aletas; para posteriormente mezclar en 3 capas (cada capa, la tercera parte del volumen). Se compacta cada capa con la varilla aplicando 25 golpes en forma en espiral.
- Enseguida se levanta el cono a una altura de 300 mm y a una velocidad de $5 \text{ s} \pm 2 \text{ s}$.
- Se mide la diferencia de alturas del molde y del centro desplazado de la cara superior de la mezcla de concreto.



Figura 31. Asentamiento del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.6.2 *Temperatura del concreto*

La temperatura del concreto se realizó siguiendo los procedimientos estipulado en la NTP 339.184.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar la temperatura del concreto fresco.

- Introducir el dispositivo de medir la temperatura en la mezcla de concreto fresco, de tal manera que el dispositivo este sumergido en todas sus direcciones en 3 pulgadas.
- Se deja el dispositivo de medida por al menos 2 minutos o hasta que la lectura se estabilice.
- Se procede a anotar la temperatura con una aproximación de 5° C.



Figura 32. Temperatura del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.6.3 *Peso unitario del concreto*

El peso unitario y rendimiento del concreto se determina siguiendo los procedimientos de la NTP 339.046.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar el peso unitario del concreto fresco.

- Previamente se procede a calcular el volumen del recipiente; en este caso nosotros calculamos el volumen y el factor de calibración).
- Colocar el concreto en 3 capas de igual volumen.
- Se procede a compactar cada capa con 25 golpes con la barra compactadora, los cuales deben estar distribuidos uniformemente; apisonar en forma de una espiral, empezando desde los perímetros hasta llegar al centro del recipiente. Para la segunda y tercera capa, la barra compactadora debe penetrar la capa subyacente al menos 1 pulgada.

- Finalmente se enrasa y terminar suavemente la superficie del concreto, para posteriormente limpiarlo y pesar.
- Se calculará utilizando la siguiente formula:

$$PU = f \times Wc$$

Donde:

Wc = Peso de la muestra compactada.

f = Factor de calibración (1000/Peso del agua).



Figura 33. Peso unitario del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.7 *Ensayos de concreto en estado endurecido*

3.6.2.7.1 *Resistencia a compresión*

La ASTM C 330 recomienda que para determinar la resistencia a compresión de las probetas de concreto se sigan los procedimientos estipulados en el ASTM C39.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar la resistencia a compresión del concreto.

- Retirar de la poza de curado las probetas a ensayar.

- Se procede a medir el promedio de 2 diámetros perpendiculares de la probeta de concreto con aproximación al 0.25 mm.
- Se colocan las almohadillas de neopreno con cabezas de acero a la máquina para mayor agarre del testigo de concreto y se procede a colocar la probeta.
- Se aplica una carga a una velocidad constante de 0.25 ± 0.05 Mpa/s, hasta que se produzca la rotura de la probeta.
- Se aplicó la siguiente fórmula para determinar la resistencia a compresión del concreto.

$$R_c = \frac{4P}{\pi \times D^2}$$

Donde;

R_c = Resistencia a la compresión en kg/cm²

P = Carga axial aplicada al testigo en kg

D = Promedio de diámetros del testigo de concreto en cm.



Figura 34. Resistencia a la compresión del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.7.2 Resistencia a la tracción indirecta del concreto

La ASTM C 330 recomienda que para determinar la resistencia a compresión de las probetas de concreto se sigan los procedimientos estipulados en el ASTM C 496.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar la resistencia a la tracción indirecta del concreto.

- Se procede a retirar las probetas de concreto de su ciclo de curado siguiendo las recomendaciones del ASTM C496.
- Sobre los extremos de las probetas de concreto se dibuja con un marcador las líneas diametrales, se debe asegurar que estas sean axiales.
- Se mide el promedio de 3 diámetros siguiendo las recomendaciones del ASTM C496 y el promedio de dos medidas de longitudes siguiendo las recomendaciones de la norma mencionada.
- Se procede a preparar y colocar el espécimen de concreto en la máquina de ensayo de acuerdo a las recomendaciones de la ASTM C496.
- Se aplica una carga a velocidad constante de 0.7 a 1.4 Mpa/minuto hasta la falla del espécimen.
- Se determina la resistencia a la tracción indirecta de acuerdo a la siguiente fórmula.

$$T = \frac{2P}{\pi \times l \times D}$$

Donde:

T = Resistencia a la tracción indirecta en kg/cm².

l = Longitud en cm

D = Diámetro en cm.

P = Carga aplicada en kg.



Figura 35. Resistencia a la tracción indirecta del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.8 Resistencia a la flexión del concreto

Se realizó bajo las recomendaciones de la ASTM C 78.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar la resistencia a la flexión del concreto.

- Se retiran la viga de la poza de curado y se procede a dividir en tres partes de 15 centímetros, dejando de manera simétrica lo restante a cada extremo de la viga de concreto.
- Si se utiliza testigos moldeadas, estas deben girarse con respecto a la posición en la que fue moldeada, para luego colocar centralmente sobre los elementos de apoyo.
- Proceda a aplicar la carga a una velocidad constante hasta el punto de rotura. Aplique la carga a una velocidad que aumente constantemente la tensión de las fibras extremas, entre 0.86 y 1.21 Mpa, hasta que ocurra la ruptura.
- Se determinará el módulo de rotura de la siguiente manera si la fractura se inicia en la superficie de tensión dentro del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos.

$$R = \frac{P \times L}{b \times d^2}$$

Donde:

R = Módulo de rotura en kg/cm²

P = Carga máxima aplicada en kg

L = Longitud de separación de apoyos en mm

b = Ancho promedio del espécimen en la fractura en mm

d = Espesor promedio del espécimen en la fractura en mm

- Se determinará el módulo de rotura de la siguiente manera si la fractura se inicia en la superficie de tensión fuera del tercio medio de la luz o longitud de separación entre apoyos por no más de 5% de la luz.

$$R = \frac{3Pxa}{b \times d^2}$$

Donde:

R = Módulo de rotura en kg/cm²

a = Distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medido en la superficie de tensión de la viga en mm.

P = Carga máxima aplicada en kg

b = Ancho promedio del espécimen en la fractura en mm

d = Espesor promedio del espécimen en la fractura en mm



Figura 36. Resistencia a la flexión del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.2.9 *Densidad en equilibrio del concreto*

Como se explicó anteriormente, para poder hallar la densidad en equilibrio del concreto se hallará la densidad en estado seco; para posteriormente proceder a calcular la densidad en equilibrio teórica; el que se halle la densidad en equilibrio teórica no altera la objetividad de la investigación ya que como se explica en los diversos capítulos, la ASTM C 567 (2005) menciona que se ha realizado una numerosa cantidad de ensayos que pueden demostrar que pese a la existencia de diferentes contenidos de humedad inicial que presentan los agregados ligeros, aproximadamente la densidad en estado de equilibrio será mayor en 50 kg/m³ respecto a su densidad seca al horno.

A continuación se describen los pasos a seguir para determinar la densidad en estado seco y la densidad en equilibrio del concreto:

- Se retira las probetas de sus moldes después de 24 horas pero sin exceder las 32 horas.
- Se mide la masa aparente de las probetas mientras están sumergidas en agua, la cual registraremos como “G”.

- Se saca las probetas del agua y se deja drenar el agua por un minuto, para posteriormente con una tela húmeda sacar el agua visible, se determina la masa y se registra como “F”.
- Luego se ponen a secar en el horno las probetas de concreto a una temperatura constante de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 120 horas, tiempo en el que encontramos que el cambio de masa no es mayor al 0.5 %.
- Se saca las muestras del horno, y se procede a dejar enfriar por 30 minutos y no más de 1 hora y se determina la masa, la cual se registrará como “D”.
- Se determina la densidad seca aplicando la siguiente formula.

$$Om = \frac{(D \times 997)}{(F - G)}$$

Donde:

Om = Densidad seca al horno en kg/m³

D = Masa del cilindro secado al horno en kg

F = Masa del cilindro saturado con superficie seca en kg

G = Masa aparente del cilindro suspendido-sumergido en kg

- Se determinará la densidad en equilibrio aplicando la siguiente fórmula.

$$Ec = Om + 50\text{kg}/\text{m}^3$$

Donde:

Ec = Densidad en equilibrio calculada en kg/m³

Om = Densidad seca al horno en kg/m³



Figura 37. Densidad en estado seco y densidad de equilibrio del concreto. Fuente. Elaboración propia.

3.6.3 Procesamiento de datos

Se aplica técnicas que tienen como fin el procesamiento de datos obtenidos de los trabajos de investigación en el laboratorio, con el objetivo de generar resultados. Es así, que en esta investigación, luego de haber realizado una correcta recolección de datos y siendo del tipo, análisis cuantitativo, el procesamiento de datos se desarrollará mediante hojas de cálculo Excel, en las cuales se realizaron tabulaciones de resultados y formulación de organizadores visuales tales como, tablas, cuadros, listas y gráficos; los cuales servirán para el análisis e interpretación de los resultados, permitiéndonos comprobar las hipótesis planteadas y obtener las conclusiones. Siendo importante mencionar que se deberá cumplir con las Normas Técnicas Peruanas y la ASTM, según sea la normativa adoptada para cada ensayo.

3.7 Análisis de datos

Para la siguiente investigación, se utilizará la estadística descriptiva como técnica de análisis e interpretación de la información, el cual se realizará mediante los análisis de contenido descriptivo de los gráficos y tablas generados en el procesamiento de la información. Es así que mediante estos gráficos y tablas, en hojas de cálculo Excel, se logrará analizar el desempeño del concreto estructural ligero realizado en base a los ensayos de control de calidad más representativos; y a su vez comparar dicho concreto estructural ligero en base a su concreto patrón de control realizado.

Siendo así posible la comprobación de la hipótesis planteada, para obtener las conclusiones y recomendaciones de esta investigación.

CAPÍTULO IV

IV. Resultados

4.1 Caracterización de los materiales

4.1.1 Granulometría del agregado fino (arena gruesa)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las dos muestras representativas realizadas:

- **Muestra 01**

Tabla 64.

Granulometría del agregado fino- Muestra 01

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|--------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) QUE PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1/2" | 12.700 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | 14.00 | 1.85 | 1.85 | 98.15 | 100 | 95 |
| N° 8 | 2.36 | 128.00 | 16.95 | 18.81 | 81.19 | 100 | 80 |
| N° 16 | 1.18 | 172.50 | 22.85 | 41.66 | 58.34 | 85 | 50 |
| N° 30 | 0.59 | 139.50 | 18.48 | 60.13 | 39.87 | 60 | 25 |
| N° 50 | 0.297 | 158.00 | 20.93 | 81.06 | 18.94 | 30 | 5 |
| N° 100 | 0.149 | 113.00 | 14.97 | 96.03 | 3.97 | 10 | 0 |
| FONDO | 0.000 | 30.00 | 3.97 | 100.00 | 0.00 | | |
| | SUMA | 755.00 | 100.00 | | | | |

| | |
|------------|-------------|
| MF= | 3.00 |
|------------|-------------|

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de fineza está dentro de los límites establecidos por la NTP 400.037, el cual según esta norma debe estar entre 2.3 y 3.1.

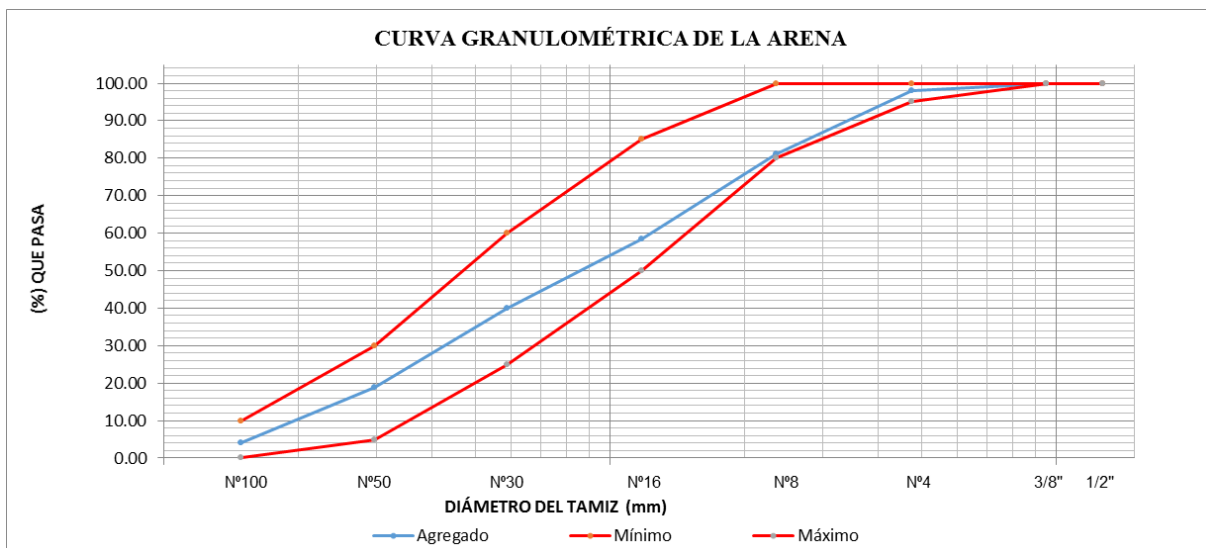


Figura 38. Curva granulométrica del agregado fino - Muestra 01. Fuente. Elaboración Propia.

Se observa que la muestra 01 está dentro de los límites establecidos por la NTP 400.037.

- **Muestra 02**

Tabla 65.

Granulometría del agregado fino - Muestra 02

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|--------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) QUE PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1/2" | 12.700 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | 14.00 | 1.82 | 1.82 | 98.18 | 100 | 95 |
| N° 8 | 2.36 | 132.00 | 17.19 | 19.01 | 80.99 | 100 | 80 |
| N° 16 | 1.18 | 176.00 | 22.92 | 41.93 | 58.07 | 85 | 50 |
| N° 30 | 0.59 | 147.00 | 19.14 | 61.07 | 38.93 | 60 | 25 |
| N° 50 | 0.297 | 136.00 | 17.71 | 78.78 | 21.22 | 30 | 5 |
| N° 100 | 0.149 | 133.00 | 17.32 | 96.09 | 3.91 | 10 | 0 |
| FONDO | 0.000 | 30.00 | 3.91 | 100.00 | 0.00 | | |
| | SUMA | 768.00 | 100.00 | | | | |
| | MF= | 2.99 | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de fineza está dentro de los límites establecidos por la NTP 400.037, el cual según esta norma debe estar entre 2.3 y 3.1.

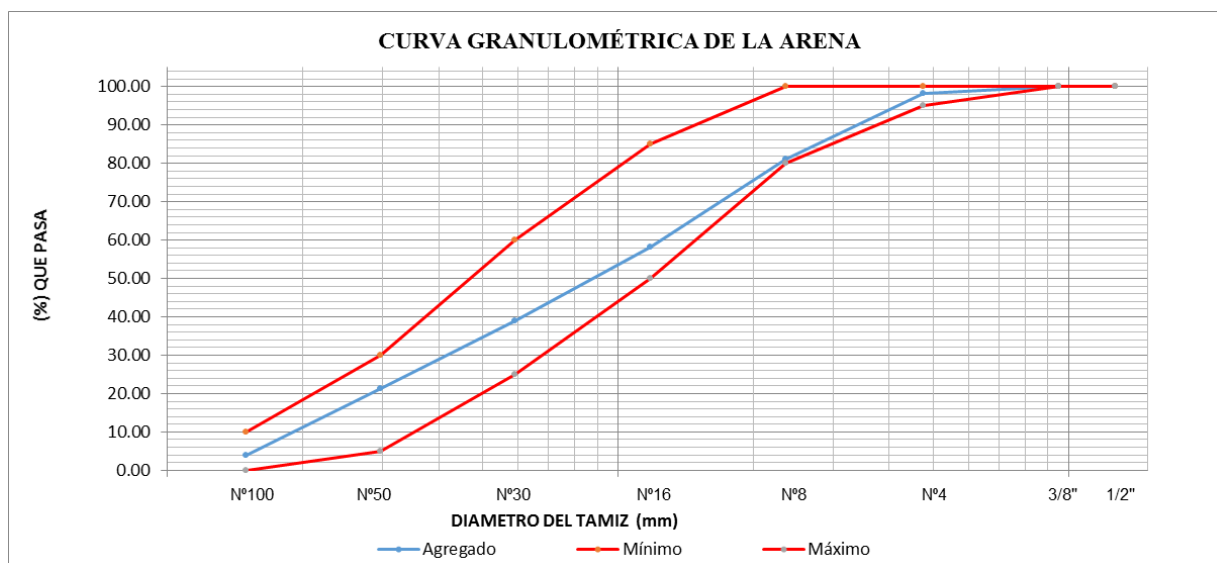


Figura 39. Curva granulométrica del agregado fino - Muestra 02. Fuente. Elaboración Propia.

Se observa que la muestra 02 está dentro de los límites establecidos por la NTP 400.037.

Finalmente se observa que el módulo de fineza promedio de la arena gruesa es de 3.

4.1.2 Granulometría del agregado grueso

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las dos muestras representativas realizadas:

- **Muestra 01**

Tabla 66.

Granulometría del agregado grueso- Muestra 01

| GRANULOMETRÍA | | | | | | HUSO: | 6 |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 2" | 50.800 | | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 1 1/2" | 38.1 | | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 1" | 25.4 | | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19.05 | 177.40 | 3.4 | 3.4 | 96.6 | 100 | 90 |
| 1/2" | 12.700 | 3994.30 | 75.4 | 78.8 | 21.2 | 55 | 20 |
| 3/8" | 9.525 | 961.50 | 18.2 | 96.9 | 3.1 | 15 | 0 |
| N° 4 | 4.75 | 134.20 | 2.5 | 99.5 | 0.5 | 5 | 0 |
| N° 8 | 2.36 | 0.60 | 0.0 | 99.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| N° 16 | 1.18 | 0.40 | 0.0 | 99.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| N° 30 | 0.59 | | 0.0 | 99.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| N° 50 | 0.297 | | 0.0 | 99.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| N° 100 | 0.149 | | 0.0 | 99.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| FONDO | 0.000 | 27.10 | 0.5 | 100.0 | 0.0 | | |
| | SUMA | 5295.50 | 100.00 | | | | |
| | MF= | 6.97 | | | | | |

Fuente: Elaboración propia

El módulo de fineza que presentó este material fue de 6.97.

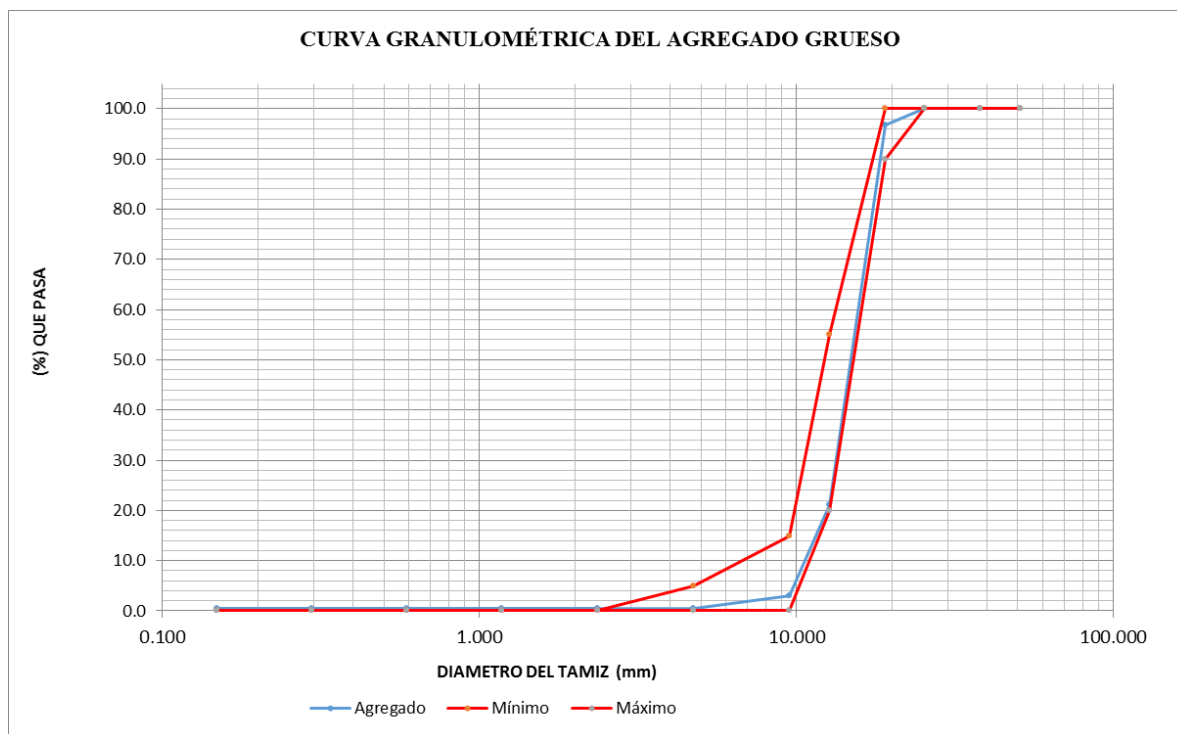


Figura 40. Curva granulométrica del agregado grueso - Muestra 01. Fuente. Elaboración propia.

- **Muestra 02**

Tabla 67.

Granulometría del agregado grueso - Muestra 02

| GRANULOMETRÍA | | | | | | HUSO: 6 | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|---------|--------|
| TAMIZ | DIAMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 2" | 50.800 | | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 1 1/2" | 38.1 | | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 1" | 25.4 | | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19.05 | 92.50 | 1.7 | 1.7 | 98.3 | 100 | 90 |
| 1/2" | 12.700 | 4252.50 | 76.7 | 78.4 | 21.6 | 55 | 20 |
| 3/8" | 9.525 | 992.00 | 17.9 | 96.3 | 3.7 | 15 | 0 |
| Nº 4 | 4.75 | 167.00 | 3.0 | 99.3 | 0.7 | 5 | 0 |
| Nº 8 | 2.36 | 1.00 | 0.0 | 99.4 | 0.6 | 0 | 0 |
| Nº 16 | 1.18 | 0.50 | 0.0 | 99.4 | 0.6 | 0 | 0 |
| Nº 30 | 0.59 | | 0.0 | 99.4 | 0.6 | 0 | 0 |
| Nº 50 | 0.297 | | 0.0 | 99.4 | 0.6 | 0 | 0 |
| Nº 100 | 0.149 | | 0.0 | 99.4 | 0.6 | 0 | 0 |
| FONDO | 0.000 | 35.40 | 0.6 | 100.0 | 0.0 | | |
| SUMA | | 5540.90 | 100.00 | | | | |
| MF= | | 6.94 | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de fineza que presentó este material fue de 6.94.

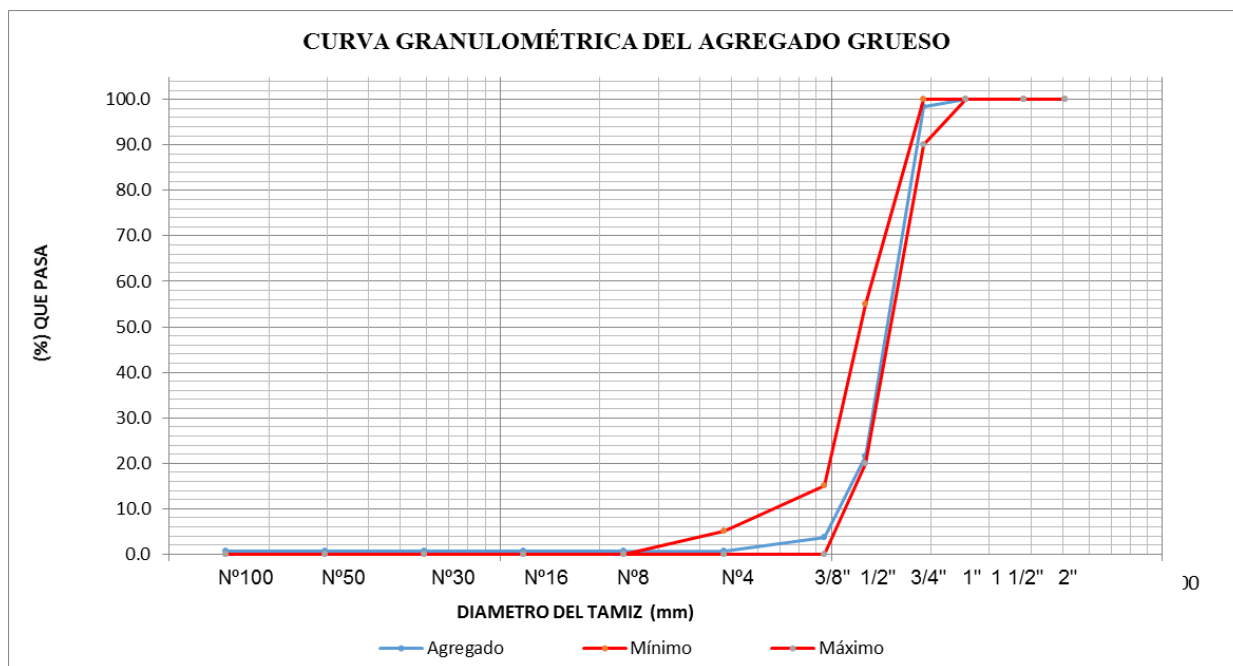


Figura 41. Curva granulométrica del agregado grueso - Muestra 02. Fuente. Elaboración propia.

Según las curvas granulométricas de nuestras dos muestras seleccionadas; se observa que sus granulometrías cumplen con los límites granulométricos del Huso N°6 establecidos en la ASTM C 33.

Finalmente se tiene un módulo de fineza promedio de 6.96 del agregado grueso.

4.1.3 Granulometría del agregado fino ligero (Puzolana natural)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las dos muestras representativas realizadas:

- **Muestra 01**

Tabla 68

Granulometría del agregado fino ligero - Muestra 01

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|--------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) QUE PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1/2" | 12.700 | 0 | 0.00 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | 0 | 0.00 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | 44.00 | 8.84 | 8.8 | 91.2 | 100 | 85 |
| N° 16 | 1.18 | 219.00 | 43.98 | 52.8 | 47.2 | 80 | 40 |
| N° 50 | 0.297 | 100.00 | 20.08 | 72.9 | 27.1 | 35 | 10 |
| N° 100 | 0.149 | 43.00 | 8.63 | 81.5 | 18.5 | 25 | 5 |
| FONDO | 0.000 | 92.00 | 18.47 | 100.0 | 0.0 | | |
| | SUMA | 498.00 | 100.00 | | | | |

| | |
|-----|------|
| MF= | 3.11 |
|-----|------|

Fuente: Elaboración propia.

El módulo de fineza es de 3.11, lo que evidencia tal cual se observa en la tabla N°68 la gran presencia de material retenida en las mallas N° 16 y N° 50.

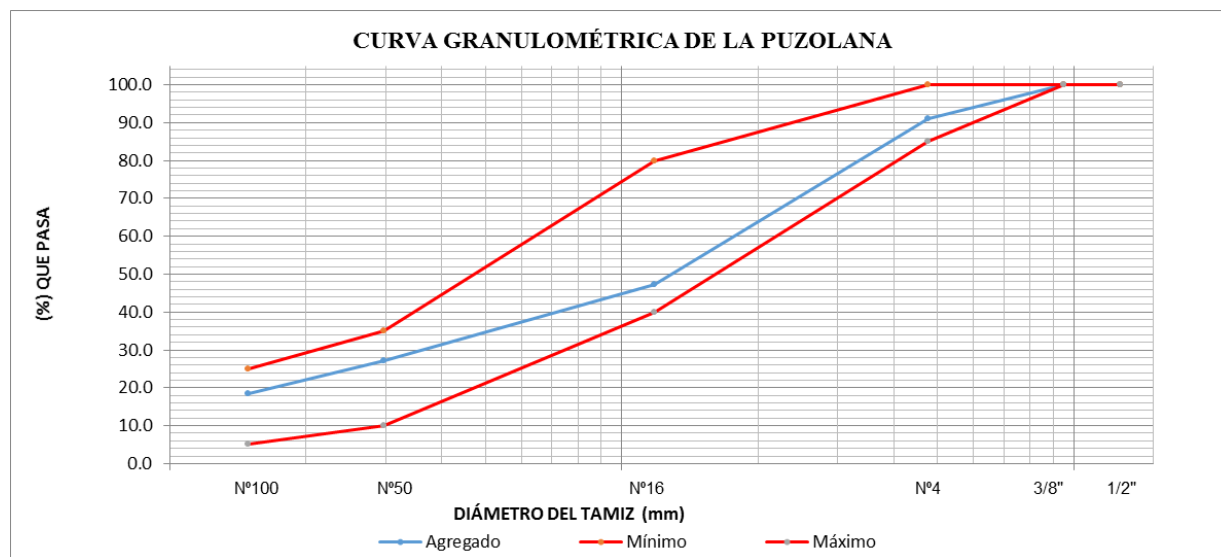


Figura 42. Curva granulométrica del agregado fino ligero - Muestra 01. Fuente. Elaboración Propia.

- **Muestra 02**

Tabla 69

Granulometría del agregado fino ligero - Muestra 02

| GRANULOMETRÍA | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1/2" | 12.700 | 0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | 0 | 0.0 | 0.0 | 100.0 | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | 29.50 | 5.9 | 5.9 | 94.1 | 100 | 85 |
| N° 16 | 1.18 | 219.00 | 43.5 | 49.4 | 50.6 | 80 | 40 |
| N° 50 | 0.297 | 112.50 | 22.4 | 71.8 | 28.2 | 35 | 10 |
| N° 100 | 0.149 | 48.50 | 9.6 | 81.4 | 18.6 | 25 | 5 |
| FONDO | 0.000 | 93.50 | 18.6 | 100.0 | 0.0 | | |
| | SUMA | 503.00 | 100.0 | | | | |

| | |
|-----|------|
| MF= | 2.97 |
|-----|------|

Fuente: Elaboración propia.

Nuevamente se puede observar que el módulo de fineza tiene 2.97 debido a la gran presencia de material retenido en las mallas N° 16 y N° 50.

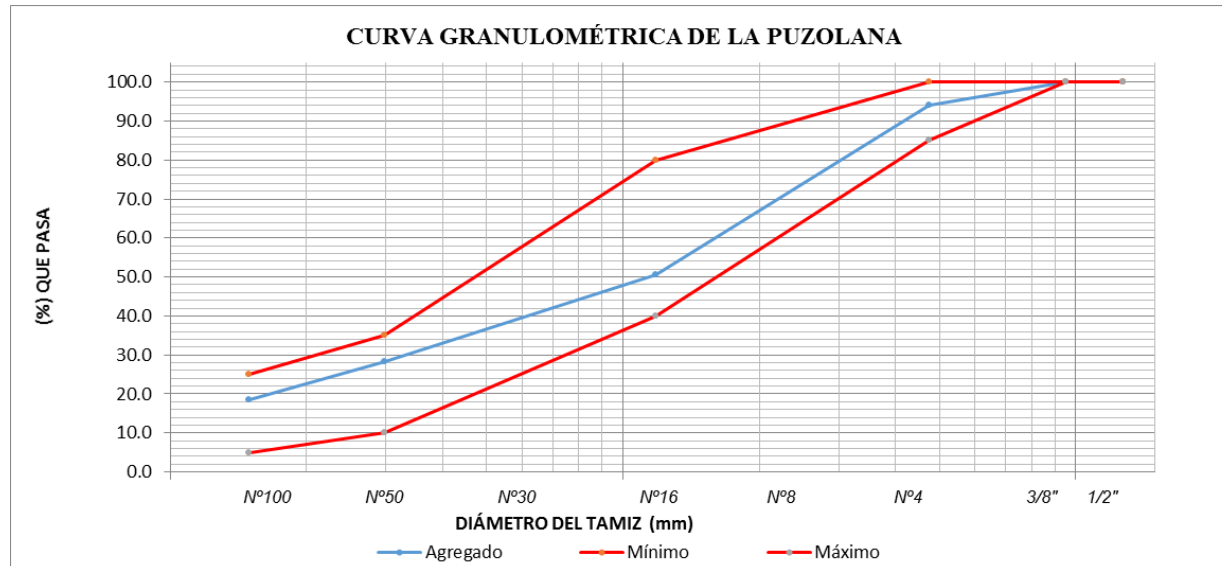


Figura 43. Curva granulométrica del agregado fino ligero - Muestra 02. Fuente. Elaboración propia.

Se observa de la granulometría de las dos muestras, que estas cumplen con los límites granulométricos establecidos por la ASTM C 330.

Finalmente se tiene un módulo de fineza promedio de 3.04 del agregado fino ligero.

4.1.4 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena gruesa)

- **Muestra 01**

Tabla 70

Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino - Muestra 01

| | |
|---------------------------------------|--------|
| (D) Peso de la tara(gr) | 319 |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | 1075.5 |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | 1050 |
| % pasante de M#200= $(E-F)*100/(E-D)$ | 3.37% |
| <5% | Cumple |

Fuente: Elaboración propia

- **Muestra 02**

Tabla 71

Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino - Muestra 02

| | |
|---------------------------------------|--------|
| (D) Peso de la tara(gr) | 767.5 |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | 1536.5 |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | 1513 |
| % pasante de M#200= $(E-F)*100/(E-D)$ | 3.06% |
| <5% | Cumple |

Fuente: Elaboración propia

Se observa que ambas muestras cumplen con el porcentaje máximo de fino pasantes la malla N° 200 según la NTP 400.037. Finalmente se tiene un porcentaje de material pasante la malla N° 200 promedio de 3.22%.

4.1.5 Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso

- **Muestra 01**

Tabla 72

Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso - Muestra 01

| | |
|---------------------------------------|---------|
| (D) Peso de la tara(gr) | 513.50 |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | 5809.00 |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | 5786.00 |
| % pasante de M#200= $(E-F)*100/(E-D)$ | 0.43% |
| <1% | Cumple |

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 02**

Tabla 73

Material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso - Muestra 02

| | |
|---|---------------|
| (D) Peso de la tara(gr) | 681 |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | 6221.9 |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | 6191.9 |
| % pasante de M#200=(E-F)*100/(E-D) | 0.54% |
| <1% | Cumple |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que nuestro material tiene porcentajes inferiores al 1 % de material pasante la malla N° 200, cumpliendo con lo estipulado en la NTP 400.037. Finalmente se tiene un porcentaje de material pasante la malla N° 200 promedio de 0.49%.

4.1.6 Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero (puzolana natural)

- **Muestra 01**

Tabla 74

Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero - Muestra 01

| | |
|---|--------|
| (D) Peso de la tara(gr) | 406 |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | 904.5 |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | 848.5 |
| % pasante de M#200=(E-F)*100/(E-D) | 11.23% |

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 02**

Tabla 75

Material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero - Muestra 02

| | |
|---|--------|
| (D) Peso de la tara(gr) | 356.5 |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | 859.5 |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | 800.5 |
| % pasante de M#200=(E-F)*100/(E-D) | 11.73% |

Fuente: Elaboración propia.

La ASTM C 330 en la tabla de requisitos granulométricos de agregados ligeros para concreto estructural, no menciona un límite para el material que pasa la malla N° 200, a diferencia del

agregado grueso ligero mostrado en dicha norma, que debe estar entre 0 a 10%, por lo que se asume como válido el 11.23 % y 11.73 % obtenido en estos ensayos.

Finalmente se tiene un porcentaje de material pasante la malla N° 200 promedio de 11.48%.

4.1.7 Contenido de humedad del agregado fino (arena gruesa)

- **Muestra 01**

Tabla 76

Contenido de humedad del agregado fino - Muestra 01

| | |
|--|--------|
| (A) Peso de la tara(gr) | 376 |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | 1216.8 |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | 1167.9 |
| %Humedad=(B-C)*100/(C-A) | 6.18 |

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 02**

Tabla 77

Contenido de humedad del agregado fino - Muestra 02

| | |
|--|--------|
| (A) Peso de la tara(gr) | 376 |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | 1062.3 |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | 1022.8 |
| %Humedad=(B-C)*100/(C-A) | 6.11 |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el contenido de humedad es relativamente alto debido a que el material fue lavado para poder disminuir la cantidad de finos ya mencionada capítulos atrás. No se tendrá ningún inconveniente debido a que por cada día donde se realizó mezclas de concreto, se halló el contenido de humedad del material, para poder calcular el agua que aporta este material.

Finalmente se tiene un porcentaje de contenido de humedad promedio de 6.15 %.

4.1.8 Contenido de humedad del agregado grueso

- **Muestra 01**

Tabla 78

Contenido de humedad del agregado grueso - Muestra 01

| | |
|--|-------------|
| (A) Peso de la tara(gr) | 513.50 |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | 5835.00 |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | 5809.00 |
| % Humedad=(B-C)*100/(C-A) | 0.49 |

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 02**

Tabla 79

Contenido de humedad del agregado grueso - Muestra 02

| | |
|--|-------------|
| (A) Peso de la tara(gr) | 681 |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | 6246.9 |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | 6221.9 |
| % Humedad=(B-C)*100/(C-A) | 0.45 |

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que los valores calculados son bajos, característicos de este tipo de agregados.

Finalmente se tiene un porcentaje de contenido de humedad promedio de 0.48 %.

4.1.9 Contenido de humedad del agregado fino ligero (puzolana natural)

- **Muestra 01**

Tabla 80

Contenido de humedad del agregado fino ligero - Muestra 01

| | |
|--|-------|
| (A) Peso de la tara(gr) | 406 |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | 911.5 |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | 904.5 |
| % Humedad=(B-C)*100/(C-A) | 1.40 |

Fuente: Elaboración propia.

- **Muestra 02**

Tabla 81

Contenido de humedad del agregado fino ligero - Muestra 02

| | |
|--|-------|
| (A) Peso de la tara(gr) | 356.5 |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | 867 |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | 859.5 |
| % Humedad=(B-C)*100/(C-A) | 1.49 |

Fuente: Elaboración propia.

Es importante mencionar que pese a que el material llegó húmedo a la ciudad de Lima por las lluvias que hubo en Cuzco, se colocó el material a secar frente al sol, es por eso, que el contenido de humedad tuvo resultados relativamente bajos.

Finalmente se tiene un porcentaje de contenido de humedad promedio de 1.45 %.

4.1.10 Peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las 4 sub muestras representativas realizadas:

Tabla 82

Peso específico y absorción del agregado fino (Arena gruesa)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | | MUESTRA 2 | | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-------|-----------|-------|--------|
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | S | 500 | 500 | 500 | 500 | gr |
| PESO DE LA FIOLA LLENADO DE AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | B | 643.7 | 642.8 | 651.3 | 675.5 | gr |
| PESO DE LA FIOLA LLENO DE LA MUESTRA Y EL AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | C | 957.1 | 956.4 | 965.8 | 990.1 | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO | A | 492.3 | 492.1 | 494.1 | 494 | gr |

| 1. PESO ESPECÍFICO DE LA MASA | | $\left(\frac{A}{B + S - C}\right)$ |
|-------------------------------|------|------------------------------------|
| M1 | 2.64 | g/cm ³ |
| | 2.64 | g/cm ³ |
| M2 | 2.66 | g/cm ³ |
| | 2.66 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | 2.65 | g/cm ³ |

| 2. P. ESPECÍFICO DE LA MASA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECO | | $\left(\frac{S}{B + S - C}\right)$ |
|--|------|------------------------------------|
| M1 | 2.68 | g/cm ³ |
| | 2.68 | g/cm ³ |
| M2 | 2.70 | g/cm ³ |
| | 2.70 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | 2.69 | g/cm ³ |

| 3. PESO ESPECÍFICO APARENTE | | $\left(\frac{A}{B + A - C}\right)$ |
|-----------------------------|------|------------------------------------|
| M1 | 2.75 | g/cm ³ |
| | 2.76 | g/cm ³ |
| M2 | 2.75 | g/cm ³ |
| | 2.75 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | 2.75 | g/cm ³ |

| 4. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN | | $\left(\frac{S-A}{A}\right) \times 100$ |
|----------------------------|------|---|
| M1 | 1.56 | % |
| | 1.61 | % |
| M2 | 1.19 | % |
| | 1.21 | % |
| PROMEDIO | 1.39 | % |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que el peso específico presenta un valor de 2.65 gr/cm³. De la misma manera el porcentaje de absorción está dentro de los límites de 0.2 a 2 %, ya que presenta un valor promedio de 1.39 %.

4.1.11 Peso específico y absorción del agregado grueso

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las 2 muestras representativas realizadas:

Tabla 83

Peso específico y absorción del agregado grueso

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|--------|
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | B | 5844 | 4946 | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA DENTRO DEL AGUA+CANASTILLA | | 3691 | 3124 | gr |
| PESO DE LA CANASTILLA DENTRO DEL AGUA | | 0 | 0 | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA | C | 3691 | 3124 | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SECA | A | 5798 | 4912 | gr |

| 1. PESO ESPECÍFICO DE LA MASA | | $\left(\frac{A}{B-C}\right)$ |
|-------------------------------|------|------------------------------|
| M1 | 2.69 | g/cm ³ |
| M2 | 2.70 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | 2.69 | g/cm ³ |

| 2. P. ESPECÍFICO DE LA MASA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | | $\left(\frac{B}{B-C}\right)$ |
|--|------|------------------------------|
| M1 | 2.71 | g/cm ³ |
| M2 | 2.71 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | 2.71 | g/cm ³ |

| 3. PESO ESPECÍFICO APARENTE | | $\left(\frac{A}{A-C}\right)$ |
|-----------------------------|------|------------------------------|
| M1 | 2.75 | g/cm ³ |
| M2 | 2.75 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | 2.75 | g/cm ³ |

| 4. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN | | $\left(\frac{B-A}{A}\right) \times 100$ |
|----------------------------|------|---|
| M1 | 0.79 | % |
| M2 | 0.69 | % |
| PROMEDIO | 0.74 | % |

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el peso específico presenta un valor de 2.69 gr/cm³. A la vez los valores de absorción están dentro del rango de valores aceptables para este material, 0.2 a 2%.

4.1.12 Peso específico y absorción del agregado fino ligero (Puzolana natural)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las 4 sub muestras representativas realizadas:

Tabla 84

Peso específico y absorción del agregado fino ligero (puzolana natural)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | | MUESTRA 2 | | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-------|-----------|-------|--------|
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | S | 200 | 200 | 250 | 250 | gr |
| PESO DE LA FIOLA LLENADO DE AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | B | 643.8 | 643 | 651.1 | 636.2 | gr |
| PESO DE LA FIOLA LLENO DE LA MUESTRA Y EL AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | C | 732.8 | 730.4 | 757.3 | 740.7 | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO | A | 179.9 | 179.7 | 217.4 | 216.6 | gr |

| 1. PESO ESPECÍFICO DE LA MASA | | $\left(\frac{A}{B + S - C}\right)$ |
|-------------------------------|------|------------------------------------|
| M1 | 1.62 | g/cm ³ |
| | 1.60 | g/cm ³ |
| M2 | 1.51 | g/cm ³ |
| | 1.49 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | 1.55 g/cm ³ |

| 2. P. ESPECÍFICO DE LA MASA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECO | | $\left(\frac{S}{B + S - C}\right)$ |
|--|------|------------------------------------|
| M1 | 1.80 | g/cm ³ |
| | 1.78 | g/cm ³ |
| M2 | 1.74 | g/cm ³ |
| | 1.72 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | 1.76 g/cm ³ |

| 3. PESO ESPECÍFICO APARENTE | | $\left(\frac{A}{B + A - C}\right)$ |
|-----------------------------|------|------------------------------------|
| M1 | 1.98 | g/cm ³ |
| | 1.95 | g/cm ³ |
| M2 | 1.96 | g/cm ³ |
| | 1.93 | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | 1.95 g/cm ³ |

| 4. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN | | $\left(\frac{S-A}{A}\right) \times 100$ |
|----------------------------|-------|---|
| M1 | 11.17 | % |
| | 11.30 | % |
| M2 | 15.00 | % |
| | 15.42 | % |
| PROMEDIO | | 13.22 % |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que a diferencia de los agregados convencionales, existe variabilidad en los resultados de este material, el cual es característico de este tipo de agregados. Por lo que debido a la variabilidad, es difícil calcular con exactitud la relación agua/cemento en los diseños de mezcla que utilicen este tipo de materiales. Así también es importante mencionar que este agregado cuenta con un porcentaje de absorción elevado, y una densidad baja, a comparación de la de los agregados convencionales, por lo que será útil para reducir el peso del concreto de nuestros diseños.

4.1.13 Peso unitario del agregado fino (Arena natural)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las 3 muestras representativas realizadas:

Tabla 85

Peso unitario suelto del agregado fino (Arena gruesa)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|----------------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA + RECIPIENTE | | 6.934 | 6.978 | 6.966 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 2.835 | 2.835 | 2.835 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA | W _s | 4.099 | 4.143 | 4.131 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 5.601 | 5.601 | 5.601 | Kg |
| PESO DEL AGUA | W _a | 2.766 | 2.766 | 2.766 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 361.53 | 361.53 | 361.53 | m ³ -3 |
| PESO UNITARIO SUELTO | PUS | 1481.92 | 1497.83 | 1493.49 | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | 1491.08 | | | Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 86

Peso unitario compactado del agregado fino (Arena gruesa)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|----------------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 7.554 | 7.557 | 7.583 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 2.835 | 2.835 | 2.835 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | W _c | 4.719 | 4.722 | 4.748 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 5.601 | 5.601 | 5.601 | Kg |
| PESO DEL AGUA | W _a | 2.766 | 2.766 | 2.766 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 361.53 | 361.53 | 361.53 | m ³ -3 |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PUS | 1706.07 | 1707.16 | 1716.56 | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | 1709.93 | | | Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa q los valores están dentro de los límites normales para el agregado fino.

4.1.14 Peso unitario del agregado grueso

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las 3 muestras representativas realizadas:

Tabla 87
Peso unitario suelto del agregado grueso

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA + RECIPIENTE | | 6.83 | 6.784 | 6.859 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 2.835 | 2.835 | 2.835 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA | Ws | 3.995 | 3.949 | 4.024 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 5.601 | 5.601 | 5.601 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 2.766 | 2.766 | 2.766 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 361.53 | 361.53 | 361.53 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO SUELTO | PUS | 1444.32 | 1427.69 | 1454.81 | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | 1442.28 | | | Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 88
Peso unitario compactado del agregado grueso

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 7.218 | 7.23 | 7.2 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 2.835 | 2.835 | 2.835 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | Wc | 4.383 | 4.395 | 4.365 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 5.601 | 5.601 | 5.601 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 2.766 | 2.766 | 2.766 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 361.53 | 361.53 | 361.53 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PUS | 1584.60 | 1588.94 | 1578.09 | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | 1583.88 | | | Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que los valores obtenidos están dentro del rango normal que tiene el agregado grueso.

4.1.15 Peso unitario del agregado fino ligero (Puzolana natural)

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las 3 muestras representativas realizadas:

Tabla 89

Peso unitario suelto del agregado fino ligero (puzolana natural)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA + RECIPIENTE | | 4.681 | 4.684 | 4.65 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 2.639 | 2.639 | 2.639 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA | Ws | 2.042 | 2.045 | 2.011 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 5.525 | 5.525 | 5.525 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 2.886 | 2.886 | 2.886 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 346.50 | 346.50 | 346.50 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO SUELTO | PUS | 707.55 | 708.59 | 696.81 | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | 704.32 | | | Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 90

Peso unitario compactado del agregado fino ligero (puzolana natural)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 4.966 | 4.93 | 4.96 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 2.639 | 2.639 | 2.639 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | Wc | 2.327 | 2.291 | 2.321 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 5.525 | 5.525 | 5.525 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 2.886 | 2.886 | 2.886 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 346.50 | 346.50 | 346.50 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PUS | 806.31 | 793.83 | 804.23 | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | 801.46 | | | Kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Se observa que a comparación de los agregados convencionales, la puzolana natural cuenta con casi el 50 % del valor de pesos unitarios de estos. Es importante mencionar que nuestro material está dentro de la máxima densidad aparente suelta establecida en la ASTM C330, ya que nuestro material cuenta con un peso unitario suelto de 704.32 kg/m³, mucho menor que el máximo de 1120 kg/m³, como se aprecia en la siguiente Tabla.

Tabla 91

Requisitos de máxima densidad aparente seca suelta de agregados ligeros para concreto estructural

| Designación del tamaño | Máxima densidad aparente seca suelta (kg/m ³) |
|-------------------------------------|---|
| Agregado fino | 1120 |
| Agregado grueso | 880 |
| Agregado combinado de fino y grueso | 1040 |

Fuente: ASTM C 330 (2005).

Finalmente, se presenta el resumen de los resultados de la caracterización del agregado grueso, agregado fino convencional y el agregado fino ligero (puzolana natural).

Tabla 92

Resumen de la caracterización de los materiales

| Ensayos | Agregado grueso | Arena gruesa | Puzolana natural | Unidad |
|----------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|
| Módulo de fineza | 6.96 | 3 | 3.04 | Adim. |
| Material que pasa la malla | 0.49 | 3.22 | 11.48 | % |
| Contenido de humedad | 0.48 | 6.15 | 1.45 | % |
| Peso específico | 2.69 | 2.65 | 1.55 | gr/cm ³ |
| Absorción | 0.74 | 1.39 | 13.22 | % |
| Peso unitario suelto | 1442 | 1491 | 704 | kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1584 | 1710 | 801 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Diseños de mezcla

4.2.1 Diseño N° 01 de concreto estructural ligero

A continuación se muestra la dosificación en peso de los materiales húmedos del diseño N° 01 de concreto estructural ligero.

Tabla 93

Diseño N° 01 de concreto estructural ligero

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|-------------------|--|-------------------|
| Cemento Tipo I | 744.00 | kg/m ³ |
| Agua | 311.93 | kg/m ³ |
| Puzolana | 643.89 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 210.45 | kg/m ³ |
| Aditivo | 8.93 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto las proporciones en peso (cemento: puzolana: piedra / agua), serán:

$$1 : 0.87 : 0.28 / 0.42$$

4.2.2 Diseño N° 02 de concreto estructural ligero

A continuación se muestra la dosificación en peso de los materiales húmedos del diseño N° 02 de concreto estructural ligero.

Tabla 94

Diseño N° 02 de concreto estructural ligero

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|----------------|---|-------------------|
| Cemento Tipo I | 579.00 | kg/m ³ |
| Agua | 314.67 | kg/m ³ |
| Puzolana | 732.97 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 240.94 | kg/m ³ |
| Aditivo | 5.21 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto las proporciones en peso (cemento: puzolana: piedra / agua), serán:

$$1 : 1.27 : 0.42 / 0.54$$

4.2.3 Diseño N° 01 de concreto patrón de control

A continuación se muestra la dosificación en peso de los materiales húmedos del diseño N° 01 de concreto patrón de control.

Tabla 95

Diseño N° 01 de concreto patrón de control

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|----------------|---|-------------------|
| Cemento Tipo I | 744.00 | kg/m ³ |
| Agua | 183.55 | kg/m ³ |
| Arena Gruesa | 1146.88 | kg/m ³ |
| Piedra #6 | 209.25 | kg/m ³ |
| Aditivo | 11.90 | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto las proporciones en peso (cemento: arena: piedra / agua), serán:

$$1 : 1.54 : 0.28 / 0.25$$

4.2.4 Diseño N° 02 de concreto patrón de control

A continuación se muestra la dosificación en peso de los materiales húmedos del diseño N° 02 de concreto patrón de control.

Tabla 96

Diseño N° 02 de concreto patrón de control

| MATERIALES | Dosificación de materiales en peso húmedo | Unidad |
|----------------|---|--------|
| Cemento Tipo I | 579.00 | kg/m3 |
| Agua | 167.28 | kg/m3 |
| Arena Gruesa | 1311.66 | kg/m3 |
| Piedra #6 | 239.97 | kg/m3 |
| Aditivo | 7.53 | kg/m3 |

Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto las proporciones en peso (cemento: arena: piedra / agua), serán:

$$1 : 2.27 : 0.41 / 0.29$$

4.3 Ensayos del concreto en estado fresco

4.3.1 Asentamiento del concreto

Resultados de los asentamientos obtenidos para cada uno de los diseños realizados.

Tabla 97

Asentamiento del concreto

| ASENTAMIENTO | Ensayo 01 | Ensayo 02 | Variación | Promedio |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | pulg. | pulg. | | pulg. |
| Diseño N°01 de C.E.L | 3.25 | 4.5 | 1.25 | 3.88 |
| Diseño N°01 Patrón | 4.25 | 4.5 | 0.25 | 4.38 |
| Diseño N°02 de C.E.L | 1 | 1.5 | 0.5 | 1.25 |
| Diseño N°02 Patrón | 1.5 | 2 | 0.5 | 1.75 |

Fuente: Elaboración propia.

4.3.2 Temperatura del concreto

A continuación se presentan los resultados de temperatura del concreto obtenidos de los dos ensayos realizados por cada diseño de mezcla.

Tabla 98
Temperatura del concreto

| TEMPERATURA DEL CONCRETO | TEMPERATURA °C | | | |
|-----------------------------|----------------|------|----------|------|
| | Ambiente | | Concreto | |
| Diseño N°01 de C.E.L | 18.7 | 18.7 | 22.4 | 22.8 |
| Diseño N°01 Patrón | 18.8 | 18.8 | 22.1 | 22.6 |
| Diseño N°02 de C.E.L | 18.8 | 18.8 | 21 | 21.6 |
| Diseño N°02 Patrón | 18.6 | 18.6 | 21.1 | 21.1 |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta el resultado promedio y gradiente térmica de nuestros diseños de mezcla realizados.

Tabla 99
Temperatura promedio y gradiente térmica

| TEMPERATURA DEL CONCRETO | TEMPERATURA °C | | Gradiente Térmico °C |
|-----------------------------|----------------|----------|----------------------|
| | Ambiente | Concreto | |
| Diseño N°01 de C.E.L | 18.7 | 22.6 | 3.9 |
| Diseño N°01 Patrón | 18.8 | 22.4 | 3.6 |
| Diseño N°02 de C.E.L | 18.8 | 21.3 | 2.5 |
| Diseño N°02 Patrón | 18.7 | 21.1 | 2.4 |

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3 Peso unitario del concreto

A continuación se presentan los resultados obtenidos de peso unitario del concreto por cada diseño realizado.

4.3.3.1 Diseño N°01 de concreto estructural ligero

Tabla 100
Peso unitario del diseño N° 01 de concreto estructural ligero

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-------------|-----------|------------|-------------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 18100 | 18430 | 18008 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 4760 | 4760 | 4760 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | Wc | 13340 | 13670 | 13248 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 11960 | 11960 | 11960 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 7200 | 7200 | 7200 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 0.14 | 0.14 | 0.14 | m⁻³ |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PU | 1853 | 1899 | 1840 | Kg/m³ |
| P. Unitario promedio | | 1864 | | | Kg/m³ |
| P. Unitario Teórico | | 1919 | | | Kg/m³ |

Fuente: Elaboración propia

4.3.3.2 Diseño N°01 patrón de control

Tabla 101

Peso unitario del diseño N° 01 de concreto patrón de control

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-------------|-----------|------------|-------------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 21720 | 21680 | 21710 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 4760 | 4760 | 4760 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | Wc | 16960 | 16920 | 16950 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 11960 | 11960 | 11960 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 7200 | 7200 | 7200 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 0.14 | 0.14 | 0.14 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO | PU | 2356 | 2350 | 2354 | Kg/m ³ |
| Peso Unitario promedio | | 2353 | | | Kg/m³ |
| Peso Unitario Teórico | | 2296 | | | Kg/m³ |

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.3 Diseño N°02 de concreto estructural ligero

Tabla 102

Peso unitario del diseño N° 02 de concreto estructural ligero

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-------------|-----------|------------|-------------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 17440 | 17670 | 17550 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 4760 | 4760 | 4760 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | Wc | 12680 | 12910 | 12790 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | 11960 | 11960 | 11960 | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 7200 | 7200 | 7200 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 0.14 | 0.14 | 0.14 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PU | 1761.00 | 1793.00 | 1776.00 | Kg/m ³ |
| P. Unitario promedio | | 1777 | | | Kg/m³ |
| P. Unitario Teórico | | 1873 | | | Kg/m³ |

Fuente: Elaboración propia.

4.3.3.3.1 Diseño N°02 patrón de control

Tabla 103

Peso unitario del diseño N° 02 de concreto patrón de control

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|---------|-------------|-----------|------------|-------------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | 21650 | 21700 | 21680 | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | 4760 | 4760 | 4760 | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | Wc | 16890 | 16940 | 16920 | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DEL AGUA | Wa | 7200 | 7200 | 7200 | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | 0.14 | 0.14 | 0.14 | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PU | 2346 | 2353 | 2350 | Kg/m ³ |
| P. Unitario promedio | | 2350 | | | Kg/m³ |
| P. Unitario Teórico | | 2305 | | | Kg/m³ |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta el cuadro resumen de resultados obtenidos del peso unitario y rendimientos de nuestros diseños de mezcla obtenidos.

Tabla 104

Peso unitario y rendimiento del concreto

| PESO UNITARIO DEL CONCRETO | Peso unitario kg/m ³ | | |
|----------------------------|---------------------------------|---------|-------------|
| | Real | Teórico | Rendimiento |
| Diseño N°01 de C.E.L | 1864 | 1919 | 1.030 |
| Diseño N°01 Patrón | 2353 | 2296 | 0.976 |
| Diseño N°02 de C.E.L | 1777 | 1873 | 1.054 |
| Diseño N°02 Patrón | 2350 | 2305 | 0.981 |

Fuente: Elaboración propia

4.4 Ensayos de concreto en estado endurecido

4.4.1 Resistencia a compresión

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de los diseños de concreto a 3 días de ensayo.

Tabla 105

Resistencia a compresión a 3 días de ensayo

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Área (cm ²) | Fuerza (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | 102 | 101.5 | 101.75 | 81.31 | 32350 | 398 | 434 |
| | M2 | 102 | 101.5 | 101.75 | 81.31 | 34540 | 425 | |
| | M3 | 101.5 | 101.5 | 101.5 | 80.91 | 38830 | 480 | |
| Diseño N°01 Patrón | M1 | 101.25 | 101.5 | 101.375 | 80.71 | 44740 | 554 | 573 |
| | M2 | 101.75 | 101.25 | 101.5 | 80.91 | 47830 | 591 | |
| | M3 | 101 | 100.75 | 100.875 | 79.92 | 45940 | 575 | |
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | 101.5 | 102 | 101.75 | 81.31 | 20730 | 255 | 233 |
| | M2 | 101.5 | 101.75 | 101.625 | 81.11 | 16890 | 208 | |
| | M3 | 101 | 101.5 | 101.25 | 80.52 | 18930 | 235 | |
| Diseño N°02 Patrón | M1 | 101.25 | 102.25 | 101.75 | 81.31 | 33270 | 409 | 411 |
| | M2 | 101.75 | 102.25 | 102 | 81.71 | 33480 | 410 | |
| | M3 | 101.25 | 101 | 101.125 | 80.32 | 33180 | 413 | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de los diseños de concreto a 7 días de ensayo.

Tabla 106
Resistencia a compresión a 7 días de ensayo

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Área (cm ²) | Fuerza (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | 102.25 | 101.5 | 101.875 | 81.51 | 38300 | 470 | 472 |
| | M2 | 101.25 | 101.5 | 101.375 | 80.71 | 39980 | 495 | |
| | M3 | 102 | 101.75 | 101.875 | 81.51 | 36830 | 452 | |
| Diseño N°01 Patrón | M1 | 102 | 101.5 | 101.75 | 81.31 | 50340 | 619 | 648 |
| | M2 | 101.75 | 101.5 | 101.625 | 81.11 | 52950 | 653 | |
| | M3 | 101.5 | 102 | 101.75 | 81.31 | 54550 | 671 | |
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | 102 | 102.25 | 102.125 | 81.91 | 23120 | 282 | 266 |
| | M2 | 102 | 101.25 | 101.625 | 81.11 | 18420 | 227 | |
| | M3 | 101.5 | 102 | 101.75 | 81.31 | 23560 | 290 | |
| Diseño N°02 Patrón | M1 | 101.5 | 102 | 101.75 | 81.31 | 40330 | 496 | 499 |
| | M2 | 101.75 | 101.5 | 101.625 | 81.11 | 40290 | 497 | |
| | M3 | 101.25 | 101 | 101.125 | 80.32 | 40400 | 503 | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a compresión de los diseños de concreto a 14 días de ensayo.

Tabla 107
Resistencia a compresión a 14 días de ensayo

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Área (cm ²) | Fuerza (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | 102.1 | 102.2 | 102.15 | 81.95 | 37781 | 461 | 529 |
| | M2 | 101.6 | 102.2 | 101.9 | 81.55 | 43566 | 534 | |
| | M3 | 101.5 | 101.8 | 101.65 | 81.15 | 47955 | 591 | |
| Diseño N°01 Patrón | M1 | 102 | 101.1 | 101.55 | 80.99 | 59729 | 737 | 723 |
| | M2 | 101.6 | 101.8 | 101.7 | 81.23 | 63507 | 782 | |
| | M3 | 101.9 | 101.4 | 101.65 | 81.15 | 52623 | 648 | |
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | 102.25 | 102 | 102.125 | 81.91 | 24030 | 293 | 291 |
| | M2 | 101.5 | 102 | 101.75 | 81.31 | 22260 | 274 | |
| | M3 | 101.5 | 101.25 | 101.375 | 80.71 | 24650 | 305 | |
| Diseño N°02 Patrón | M1 | 101.25 | 102 | 101.625 | 81.11 | 42150 | 520 | 521 |
| | M2 | 102.25 | 102.5 | 102.375 | 82.31 | 42520 | 517 | |
| | M3 | 102 | 102.25 | 102.125 | 81.91 | 43210 | 528 | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos a compresión de los diseños de concreto a 28 días de ensayo.

Tabla 108
Resistencia a compresión a 28 días de ensayo

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Área (cm ²) | Fuerza (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | 101 | 101.4 | 101.2 | 80.44 | 44229 | 550 | 567 |
| | M2 | 100.9 | 101 | 100.95 | 80.04 | 48887 | 611 | |
| | M3 | 101.25 | 101.2 | 101.225 | 80.48 | 43591 | 542 | |
| Diseño N°01 Patrón | M1 | 101 | 101.2 | 101.1 | 80.28 | 61323 | 764 | 762 |
| | M2 | 101.2 | 101.5 | 101.35 | 80.67 | 60765 | 753 | |
| | M3 | 101.1 | 101.3 | 101.2 | 80.44 | 61791 | 768 | |
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | 101.25 | 101.5 | 101.375 | 80.71 | 25260 | 313 | 321 |
| | M2 | 102 | 101.75 | 101.875 | 81.51 | 25420 | 312 | |
| | M3 | 101.5 | 101.95 | 101.725 | 81.27 | 27560 | 339 | |
| Diseño N°02 Patrón | M1 | 102.25 | 101.25 | 101.75 | 81.31 | 48380 | 595 | 582 |
| | M2 | 101.95 | 101.75 | 101.85 | 81.47 | 47240 | 580 | |
| | M3 | 101.5 | 102 | 101.75 | 81.31 | 46530 | 572 | |

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro resumen de resultados de la resistencia promedio a compresión del concreto ensayados a los 3, 7, 14 y 28 días.

Tabla 109
Resistencia a compresión del concreto

| Diseño | Resistencia a compresión promedio a 3d (Kg/cm ²) | % fc 28d | Resistencia a compresión promedio a 7d (Kg/cm ²) | % fc 28d | Resistencia a compresión promedio a 14d (Kg/cm ²) | % fc 28d | Resistencia a compresión promedio a 28d (Kg/cm ²) | % fc 28d |
|----------------------|--|----------|--|----------|---|----------|---|----------|
| Diseño N°01 de C.E.L | 434 | 77% | 472 | 83% | 529 | 93% | 567 | 100% |
| Diseño N°01 Patrón | 573 | 75% | 648 | 85% | 723 | 95% | 762 | 100% |
| Diseño N°02 de C.E.L | 233 | 72% | 266 | 83% | 291 | 91% | 321 | 100% |
| Diseño N°02 Patrón | 411 | 71% | 499 | 86% | 521 | 90% | 582 | 100% |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se presenta el porcentaje de resistencia a la compresión alcanzada por cada uno de nuestros diseños ligeros en función de su diseño patrón de control:

Tabla 110

Porcentaje de resistencia a la compresión alcanzada en función de su diseño patrón de control

| Resistencia a compresión | Diseño N°01 de C.E.L | Porcentaje en relación al diseño patrón de | Diseño N°01 Patrón | Diseño N°02 de C.E.L | Porcentaje en relación al diseño patrón de control | Diseño N°02 Patrón |
|--------------------------|----------------------|--|--------------------|----------------------|--|--------------------|
| 3días | 434 | 76% | 573 | 233 | 57% | 411 |
| 7días | 472 | 73% | 648 | 266 | 53% | 499 |
| 14días | 529 | 73% | 723 | 291 | 56% | 521 |
| 28días | 567 | 74% | 762 | 321 | 55% | 582 |

Fuente: Elaboración propia.

4.4.2 Resistencia a la tracción indirecta del concreto

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la tracción indirecta a 28 días del diseño N°01 de concreto estructural ligero.

Tabla 111

Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°01 de concreto estructural ligero

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro N°03 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Longitud N°01 (mm) | Longitud N°02 (mm) | Longitud promedio (mm) | Fuerza (kg) | Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm2) | Resistencia promedio (Kg/cm2) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------|--|-------------------------------|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | 102.55 | 101.7 | 102 | 102.08 | 203.85 | 202.95 | 203.4 | 13940 | 42.7 | 43.0 |
| | M2 | 102 | 101.7 | 101.85 | 101.85 | 202.3 | 201.7 | 202 | 13200 | 40.8 | |
| | M3 | 101.55 | 102 | 101.85 | 101.8 | 201.15 | 201.45 | 201.3 | 12680 | 39.4 | |
| | M4 | 101.75 | 101.5 | 101.7 | 101.65 | 203.15 | 202.8 | 202.975 | 14200 | 43.8 | |
| | M5 | 101.4 | 101.9 | 101.65 | 101.65 | 204.35 | 204.2 | 204.275 | 15270 | 46.8 | |
| | M6 | 101.55 | 102.1 | 101.75 | 101.8 | 205.4 | 203.75 | 204.575 | 15090 | 46.1 | |
| | M7 | 101.85 | 101.75 | 101.8 | 101.8 | 201.95 | 202.15 | 202.05 | 13100 | 40.5 | |
| | M8 | 101.5 | 101.6 | 101.4 | 101.5 | 200.2 | 200.35 | 200.275 | 13860 | 43.4 | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la tracción indirecta a 28 días del diseño N°01 de concreto patrón de control.

Tabla 112

Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°01 de concreto patrón de control

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro N°03 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Longitud N°01 (mm) | Longitud N°02 (mm) | Longitud promedio (mm) | Fuerza (kg) | Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------|---|--|
| Diseño N°01 Patrón | M1 | 101.05 | 101.7 | 102.5 | 101.75 | 201.9 | 201.9 | 201.9 | 15980 | 49.5 | 49.1 |
| | M2 | 102.45 | 101.9 | 101.2 | 101.85 | 201.85 | 200.75 | 201.3 | 16060 | 49.9 | |
| | M3 | 101.85 | 101.9 | 101.95 | 101.9 | 201.35 | 200.55 | 200.95 | 16240 | 50.5 | |
| | M4 | 101.45 | 101.65 | 101.7 | 101.6 | 200.15 | 201.05 | 200.6 | 14980 | 46.8 | |
| | M5 | 101.7 | 101.5 | 101.6 | 101.6 | 200.7 | 200.65 | 200.675 | 14480 | 45.2 | |
| | M6 | 101.75 | 101.85 | 101.95 | 101.85 | 199.6 | 200.5 | 200.05 | 15740 | 49.2 | |
| | M7 | 101.65 | 101.8 | 101.8 | 101.75 | 200.15 | 200.4 | 200.275 | 16270 | 50.8 | |
| | M8 | 101.4 | 101.5 | 101.45 | 101.45 | 200.25 | 200.1 | 200.175 | 16180 | 50.7 | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la tracción indirecta a 28 días del diseño N°02 de concreto estructural ligero.

Tabla 113

Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°02 de concreto estructural ligero

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro N°03 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Longitud N°01 (mm) | Longitud N°02 (mm) | Longitud promedio (mm) | Fuerza (kg) | Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------|---|--|
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | 101.75 | 101.5 | 101.5 | 101.58 | 202.75 | 202.5 | 202.625 | 10300 | 31.9 | 33.3 |
| | M2 | 101 | 101.95 | 101.25 | 101.40 | 202 | 202.5 | 202.25 | 11760 | 36.5 | |
| | M3 | 101.25 | 102.25 | 101.4 | 101.63 | 199 | 198.5 | 198.75 | 10400 | 32.8 | |
| | M4 | 101.25 | 102 | 102 | 101.75 | 201 | 200.25 | 200.625 | 10000 | 31.2 | |
| | M5 | 101.6 | 101.8 | 101.7 | 101.70 | 200.25 | 200.1 | 200.175 | 10350 | 32.4 | |
| | M6 | 102.15 | 102 | 102.1 | 102.08 | 200.4 | 200.2 | 200.3 | 11300 | 35.2 | |
| | M7 | 101.1 | 100.95 | 101 | 101.02 | 202.8 | 202.5 | 202.65 | 10500 | 32.7 | |
| | M8 | 101.1 | 101.6 | 101.5 | 101.40 | 201.8 | 201.9 | 201.85 | 10850 | 33.7 | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la tracción indirecta a 28 días del diseño N°02 de concreto patrón de control.

Tabla 114

Resistencia a la tracción indirecta del diseño N°02 de concreto patrón de control

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro N°03 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Longitud N°01 (mm) | Longitud N°02 (mm) | Longitud promedio (mm) | Fuerza (kg) | Resistencia a la tracción indirecta (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|--------------------|---------|--------------------|--------------------|--------------------|------------------------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------|---|--|
| Diseño N°02 Patrón | M1 | 101.4 | 102 | 101.3 | 101.57 | 203 | 202 | 202.5 | 13550 | 41.9 | 43.6 |
| | M2 | 101 | 101.6 | 101.5 | 101.37 | 202.8 | 202.9 | 202.85 | 14700 | 45.5 | |
| | M3 | 101.1 | 101.5 | 101.2 | 101.27 | 203 | 203 | 203 | 12710 | 39.4 | |
| | M4 | 101.4 | 101.15 | 101.2 | 101.25 | 202.2 | 203 | 202.6 | 14980 | 46.5 | |
| | M5 | 102.1 | 101.9 | 101.8 | 101.93 | 202.1 | 202.5 | 202.3 | 14300 | 44.1 | |
| | M6 | 101.1 | 101.5 | 101.4 | 101.33 | 201.8 | 202 | 201.9 | 13850 | 43.1 | |
| | M7 | 101.5 | 101.7 | 101.6 | 101.60 | 202.4 | 202.6 | 202.5 | 14500 | 44.9 | |
| | M8 | 102 | 102.1 | 102.2 | 102.10 | 202.6 | 202.8 | 202.7 | 14210 | 43.7 | |

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se muestran los resultados promedio a la tracción indirecta alcanzados por cada uno de nuestros diseños y su porcentaje en función a la resistencia a compresión alcanzada de cada diseño.

Tabla 115
Resistencia a la tracción indirecta del concreto

| Diseño | Resistencia a la tracción indirecta promedio a 28d (Kg/cm ²) | Porcentaje en relación a la resistencia a compresión a 28 d | Resistencia a compresión promedio a 28d (Kg/cm ²) |
|----------------------|--|---|---|
| Diseño N°01 de C.E.L | 43 | 7.6% | 567 |
| Diseño N°01 Patrón | 49 | 6.4% | 762 |
| Diseño N°02 de C.E.L | 33 | 10.4% | 321 |
| Diseño N°02 Patrón | 44 | 7.5% | 582 |

Fuente: Elaboración propia.

4.4.3 Resistencia a la flexión del concreto

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la flexión a 28 días del diseño N°01 de concreto estructural ligero.

Tabla 116
Resistencia a la flexión del diseño N°01 de concreto estructural ligero

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | 154 | 154.17 | 154.5 | 154.50 | 470 | 8350 | 3787 | 48 | 48 |
| | | 155.25 | | 154 | | | | | | |
| | | 153.25 | | 155 | | | | | | |
| | M2 | 153.75 | 153.92 | 155.5 | 156.75 | 472 | 8250 | 3742 | 47 | |
| | | 154 | | 156.5 | | | | | | |
| | | 154 | | 158.25 | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la flexión a 28 días del diseño N°01 de concreto patrón de control.

Tabla 117

Resistencia a la flexión del diseño N°01 de concreto patrón de control

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|--------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°01 Patrón | M1 | 153 | 153.33 | 154.5 | 153.33 | 468 | 11120 | 5044 | 65 | 65 |
| | | 154 | | 152.75 | | | | | | |
| | | 153 | | 152.75 | | | | | | |
| | M2 | 155 | 154.83 | 156.5 | 156.30 | 468 | 11500 | 5216 | 65 | |
| | | 155 | | 156 | | | | | | |
| | | 154.5 | | 156.4 | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la flexión a 28 días del diseño N°02 de concreto estructural ligero.

Tabla 118

Resistencia a la flexión del diseño N°02 de concreto estructural ligero

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | 154 | 154.75 | 154 | 155.25 | 468 | 6200 | 2812 | 35 | 35 |
| | | 155.25 | | 155 | | | | | | |
| | | 155 | | 156.75 | | | | | | |
| | M2 | 153.9 | 154.05 | 156.75 | 156.17 | 468 | 5980 | 2712 | 34 | |
| | | 155 | | 155 | | | | | | |
| | | 153.25 | | 156.75 | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos a la flexión a 28 días del diseño N°02 de concreto patrón de control.

Tabla 119

Resistencia a la flexión del diseño N°02 de concreto patrón de control

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|--------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°02 Patrón | M1 | 153.5 | 154.00 | 158.25 | 158.33 | 468 | 8950 | 4060 | 49 | 50 |
| | | 154.5 | | 158.25 | | | | | | |
| | | 154 | | 158.5 | | | | | | |
| | M2 | 153 | 153.72 | 155.2 | 155.40 | 469 | 8850 | 4014 | 51 | |
| | | 154.9 | | 155 | | | | | | |
| | | 153.25 | | 156 | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se muestran los resultados promedio a la flexión alcanzados por cada uno de nuestros diseños y su porcentaje en función a la resistencia a compresión alcanzada de cada diseño.

Tabla 120
Resistencia a la flexión alcanzada por el concreto

| Diseño | Módulo de Rotura (Kg/cm²) | Porcentaje en relación a la resistencia a compresión a 28 d | Resistencia a compresión promedio a 28d (Kg/cm²) |
|----------------------|---|--|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | 48 | 8.4% | 567 |
| Diseño N°01 Patrón | 65 | 8.5% | 762 |
| Diseño N°02 de C.E.L | 35 | 10.7% | 321 |
| Diseño N°02 Patrón | 50 | 8.6% | 582 |

Fuente: Elaboración propia.

4.4.4 Densidad en equilibrio del concreto

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de densidad en estado seco y en equilibrio a 120 horas (5 días) del diseño N°01 de concreto estructural ligero.

Tabla 121
Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 01 de concreto estructural ligero

| DESCRIPCIÓN | M1 | M2 | M3 | Unidad |
|---|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Densidad del concreto Fresco | 1864 | 1864 | 1864 | kg/m ³ |
| Masa aparente del cilindro suspendido sumergido (G) | 1389 | 1386 | 1391 | kg |
| Masa del cilindro saturado con superficie seca(F) | 3003 | 3004 | 2998 | kg |
| Masa del Cilindro Seca al Horno(D) | 2702 | 2680 | 2700 | kg |
| Densidad Seca al Horno(Om) | 1669 | 1651 | 1675 | kg/m ³ |
| Densidad en estado seco promedio | 1665 | | | kg/m ³ |
| Densidad de Equilibrio Calculada(Ec) | 1719 | 1701 | 1725 | kg/m ³ |
| Densidad en equilibrio promedio | 1715 | | | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de densidad en estado seco y en equilibrio a 120 horas (5 días) del diseño N°01 de concreto patrón de control.

Tabla 122

Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 01 de concreto patrón de control

| DESCRIPCIÓN | M1 | M2 | M3 | Unidad |
|---|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Densidad del concreto Fresco | 2353 | 2353 | 2353 | kg/m ³ |
| Masa aparente del cilindro suspendido sumergido (G) | 2162 | 2189 | 2187 | kg |
| Masa del cilindro saturado con superficie seca(F) | 3771 | 3807 | 3813 | kg |
| Masa del Cilindro Seca al Horno(D) | 3518 | 3560 | 3555 | kg |
| Densidad Seca al Horno(Om) | 2180 | 2194 | 2180 | kg/m ³ |
| Densidad en estado seco promedio | 2184 | | | kg/m ³ |
| Densidad de Equilibrio Calculada(Ec) | 2230 | 2244 | 2230 | kg/m ³ |
| Densidad en equilibrio promedio | 2234 | | | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de densidad en estado seco y en equilibrio a 120 horas (5 días) del diseño N°02 de concreto estructural ligero.

Tabla 123

Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 02 de concreto estructural ligero

| DESCRIPCIÓN | M1 | M2 | M3 | Unidad |
|---|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Densidad del concreto Fresco | 1777 | 1777 | 1777 | kg/m ³ |
| Masa aparente del cilindro suspendido sumergido (G) | 1272 | 1287 | 1236 | kg |
| Masa del cilindro saturado con superficie seca(F) | 2902 | 2911 | 2859 | kg |
| Masa del Cilindro Seca al Horno(D) | 2570 | 2600 | 2523 | kg |
| Densidad Seca al Horno(Om) | 1572 | 1596 | 1550 | kg/m ³ |
| Densidad en estado seco promedio | 1573 | | | kg/m ³ |
| Densidad de Equilibrio Calculada(Ec) | 1622 | 1646 | 1600 | kg/m ³ |
| Densidad en equilibrio promedio | 1623 | | | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de los ensayos de densidad en estado seco y en equilibrio a 120 horas (5 días) del diseño N°02 de concreto patrón de control.

Tabla 124

Densidad en estado seco y en equilibrio del diseño N° 02 de concreto patrón de control

| DESCRIPCIÓN | M1 | M2 | M3 | Unidad |
|---|-----------|-----------|-----------|-------------------|
| Densidad del concreto Fresco | 2350 | 2350 | 2350 | kg/m ³ |
| Masa aparente del cilindro suspendido sumergido (G) | 2400 | 2340 | 2349 | kg |
| Masa del cilindro saturado con superficie seca(F) | 4212 | 4110 | 4121 | kg |
| Masa del Cilindro Seca al Horno(D) | 3932 | 3839 | 3847 | kg |
| Densidad Seca al Horno(Om) | 2163 | 2162 | 2164 | kg/m ³ |
| Densidad seca promedio | 2163 | | | kg/m ³ |
| Densidad de Equilibrio Calculada(Ec) | 2213 | 2212 | 2214 | kg/m ³ |
| Densidad en equilibrio promedio | 2213 | | | kg/m ³ |

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se presenta el resumen de los resultados promedio obtenidos de la densidad en estado seco, y la densidad en estado de equilibrio de los diseños realizados.

Tabla 125

Densidad en estado seco y en equilibrio del concreto

| Diseños | Densidad seca al horno kg/m³ | Densidad de equilibrio kg/m³ |
|----------------------|--|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | 1665 | 1715 |
| Diseño N°01 Patrón | 2184 | 2234 |
| Diseño N°02 de C.E:L | 1573 | 1623 |
| Diseño N°02 Patrón | 2163 | 2213 |

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO V

V. Discusión de resultados

A continuación se discutirá los resultados obtenidos en esta investigación, confirmando o negando las hipótesis planteadas; así mismo, también se confirmará si se cumplieron o no los objetivos de esta investigación.

Como se mencionó en capítulos anteriores, se realizaron dos diseños de concreto estructural ligero con sus respectivos diseños de mezcla patrón de control, a los cuales se les sometió a los ensayos más representativos de control de calidad, los cuales se discutirán en el presente capítulo.

Los diversos ensayos se realizaron siguiendo las recomendaciones de la NTP y ASTM. En relación a las granulometrías obtenidas, como se observó en las Tablas N° 64 y N° 65, la granulometría que presenta nuestras muestras de arena gruesa (agregado fino convencional), cumplen con los límites granulométricos de acuerdo a la NTP 400.037, garantizando una buena gradación de nuestro material. El agregado grueso como se observa en las Tablas N° 66 y N° 67, sus límites granulométricos se encuentran dentro del Huso N° 06 según la ASTM C33, por lo que al igual que nuestra arena, presenta una granulometría de adecuada gradación. Por último la granulometría que presenta el agregado fino ligero (puzolana natural) como se observa en las tablas N° 68 y N° 69 presenta una mayor cantidad de retenido en la malla N° 16; sin embargo se cumple con los límites granulométricos establecidos en la ASTM C 330.

En referencia a los módulos de fineza de los materiales, como se observa en la Tabla N° 92, la Arena Gruesa cuenta con un módulo de fineza de 3, el cual se encuentra dentro del rango de 2.3 y 3.1 recomendados por la ASTM C33. De la misma manera, el agregado grueso con un módulo de fineza de 6.96. En referencia a la puzolana natural, se obtuvo un módulo de fineza de 3.04, esto debido a la gran presencia de material N° 16 en su granulometría.

En relación al porcentaje de material fino que pasa la malla N° 200, se observa que nuestra muestra de Arena gruesa, presenta un valor de 3.22 %, el cual es inferior al máximo de 5 % de acuerdo a la NTP 400.037. De la misma manera, para el agregado grueso, el porcentaje de material que pasa la malla N° 200 es de 0.49%, lo que es inferior al máximo de 1 % de acuerdo a la NTP 400.037. Sin embargo, como se observa en la figura N° 44, existe una gran diferencia entre el porcentaje de la puzolana natural y el de los agregados convencionales, esto debido a que al momento de triturar la puzolana, este, al ser un material frágil, generó una gran cantidad de finos (gran presencia de polvo), por lo que incrementó el porcentaje de material pasante la malla N° 200 de este agregado ligero. La ASTM C 330, no restringe el valor máximo de este ensayo para el agregado fino ligero, a diferencia del agregado grueso, el cual debe estar entre 0 a 10 %.

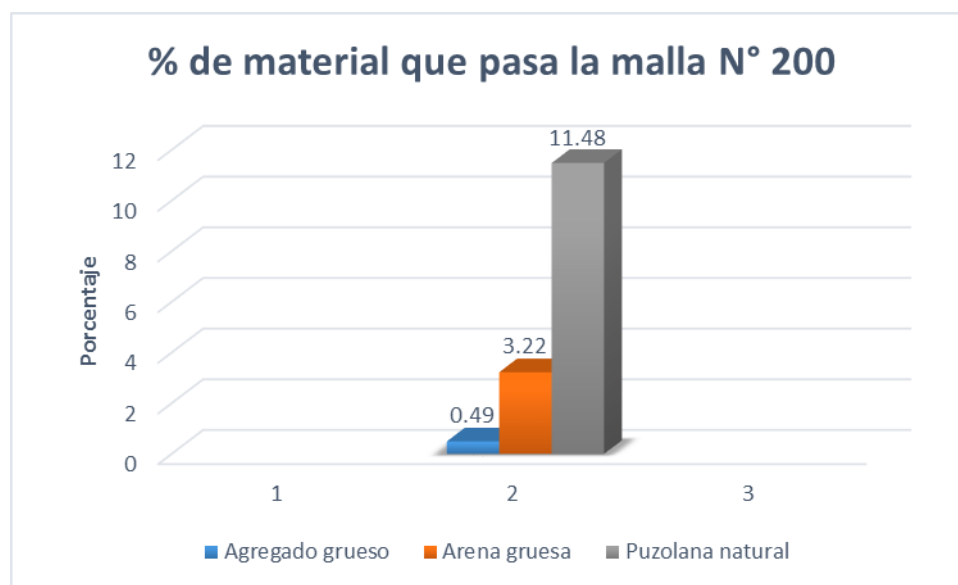


Figura 44. Porcentaje de material que pasa la malla N° 200 de los agregados. Fuente. Elaboración propia.

El contenido de humedad de los agregados convencionales es de 0.48 % y 6.15 % para el agregado grueso y el agregado fino convencional respectivamente. Mientras que para la puzolana natural es de 1.45 %. Como se puede apreciar en la figura N° 45, la arena gruesa presenta un contenido de humedad superior a los otros agregados, esto debido a que como se explicó

anteriormente, se lavó el material para poder eliminar el exceso de material pasante la malla N° 200 y así cumplir con la NTP 400.037; sin embargo, este contenido no afectó los diseños realizados, ya que el contenido de humedad de los agregados se determinaba diariamente, para un mejor cálculo del aporte de agua de los materiales.

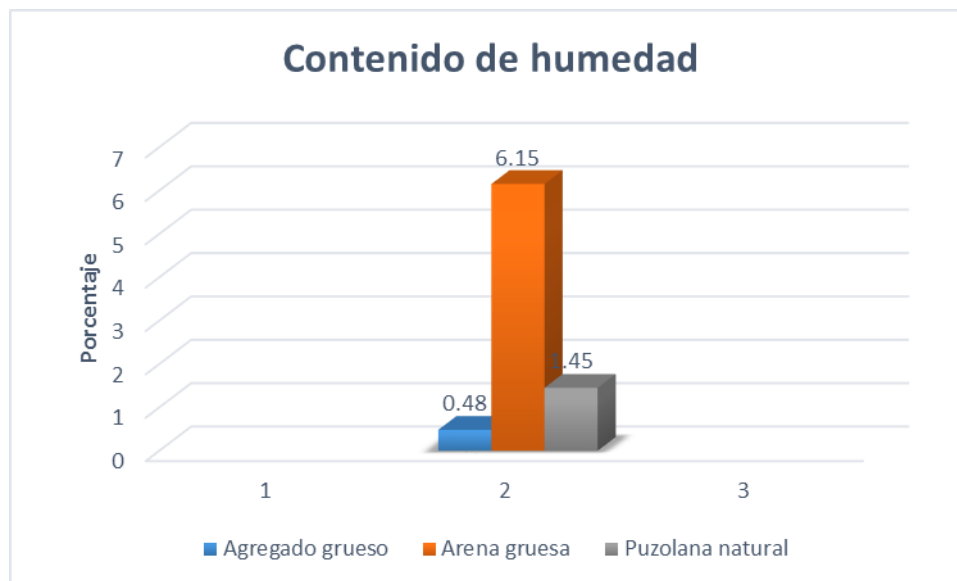


Figura 45. Contenido de humedad de los agregados. Fuente. Elaboración propia.

En relación al peso específico de los materiales se tiene un valor de 2650 kg/m³ y 2690 kg/m³ para la arena gruesa y el agregado grueso respectivamente. Estos valores están de acorde a lo dicho por Kosmatka, Kerkhoff, Panarese y Tanesi (2004), los cuales mencionan que el peso específico de la mayoría de agregados naturales convencionales varía entre 2400 a 2900kg/m³. Por otro lado, en la figura N° 46 se puede apreciar que el peso específico del agregado fino ligero (puzolana natural) es mucho menor que el de los agregados convencionales. Esta característica contribuyó para que nuestros diseños puedan obtener densidades bajas en comparación de sus diseños de concreto patrón de control. Sin embargo es importante mencionar que a diferencia de los agregados convencionales, que no existe diferencias significativas entre cada valor hallado para las muestras

realizadas; la puzolana natural si tuvo una diferencia mayor entre ensayos, esto debido a la gran variabilidad que tiene como característica los materiales naturales ligeros.

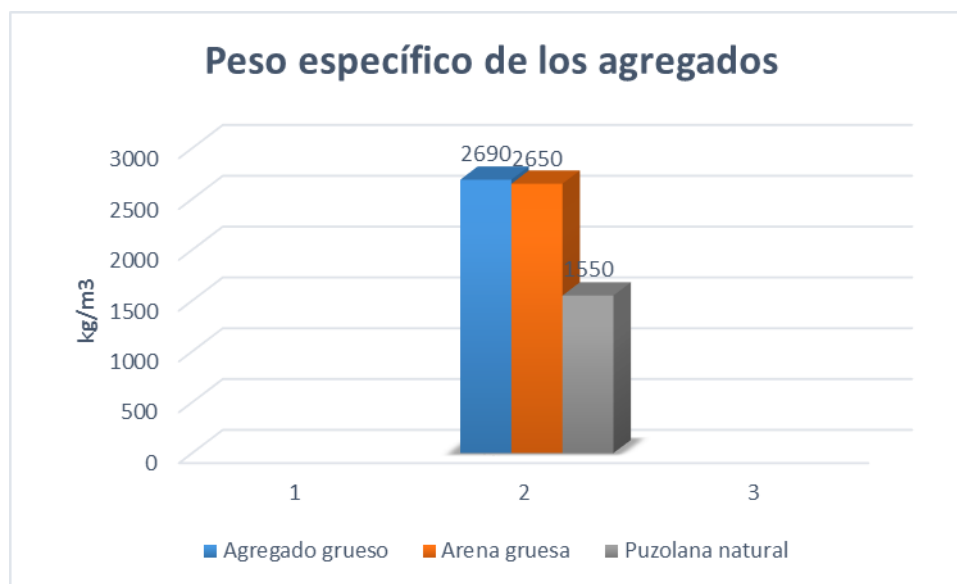


Figura 46. Peso específico de los agregados. Fuente. Elaboración propia.

El porcentaje de absorción del agregado fino ligero es de 13.22 %, la cual dista mucho de los agregados convencionales, los cuales tienen una absorción de 0.74 % y 1.39 % para el agregado grueso y la arena gruesa respectivamente. Kosmatka et al. (2004) menciona que la absorción de los agregados convencionales como el agregado grueso y el agregado fino, presentan una absorción que varía entre el 0.2 % al 4 % y del 0.2% al 2 % respectivamente; por lo que los porcentajes obtenidos de nuestros agregados convencionales están dentro de estos valores. Como se puede apreciar en la figura N° 47, la absorción de la puzolana natural es alta, esta es una característica de la mayoría de los agregados ligeros. Se menciona también que a diferencia de los agregados convencionales, existió variabilidad en la absorción de la puzolana; lo que dificultó calcular con exactitud la relación agua/cemento de nuestros diseños.

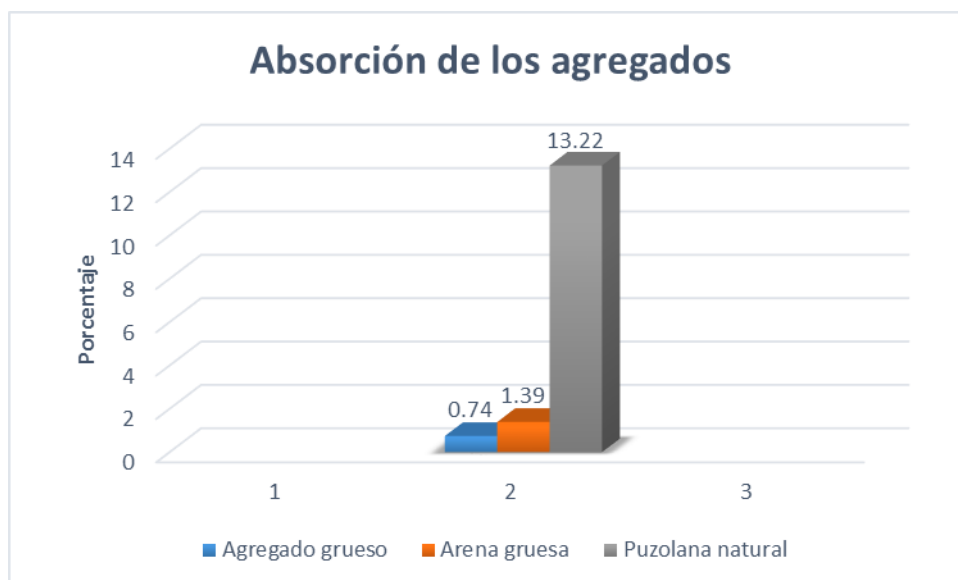


Figura 47. Absorción de los agregados. Fuente. Elaboración propia.

En referencia al peso unitario, la arena gruesa presentó un peso unitario suelto y compactado de 1491 kg/m³ y 1710 kg/m³ respectivamente. De igual manera el agregado grueso presentó un peso unitario de 1442 kg/m³ y 1584 kg/m³ respectivamente. Kosmatka et al. (2004) menciona que el peso unitario de los agregados de peso normal varían entre los 1200 kg/m³ a 1750 kg/m³, es así, que los valores obtenidos para el agregado grueso y agregado fino (arena gruesa) están dentro de los valores convencionales. Por otro lado se puede apreciar en la figura N° 48, que el valor del peso unitario suelto y compactado de la puzolana natural es de 704 kg/m³ y 801 kg/m³ respectivamente, valores que son aproximadamente el 50 % de los pesos unitarios obtenidos en los agregados convencionales. Lo cual es un indicador del bajo peso de la puzolana natural. El valor del peso unitario suelto (densidad aparente suelta) cumple con el límite establecido en la ASTM C330, la cual menciona que para el agregado fino ligero se debe tener como máximo un peso unitario suelto de 1120 kg/m³. Este valor es superior a los 704 kg/m³ obtenidos en la puzolana. Se observa también que el peso compactado de los agregados convencionales, aumentan en mayor proporción que el del agrega fino ligero; esto se debe a que la granulometría de este

material presenta una menor gradación entre sus partículas, presentando mayor cantidad en la malla N° 16; es así que el acomodo de estas partículas al no contar con tamaños bien gradados, generan vacíos entre estos, generando un menor peso unitario compactado.

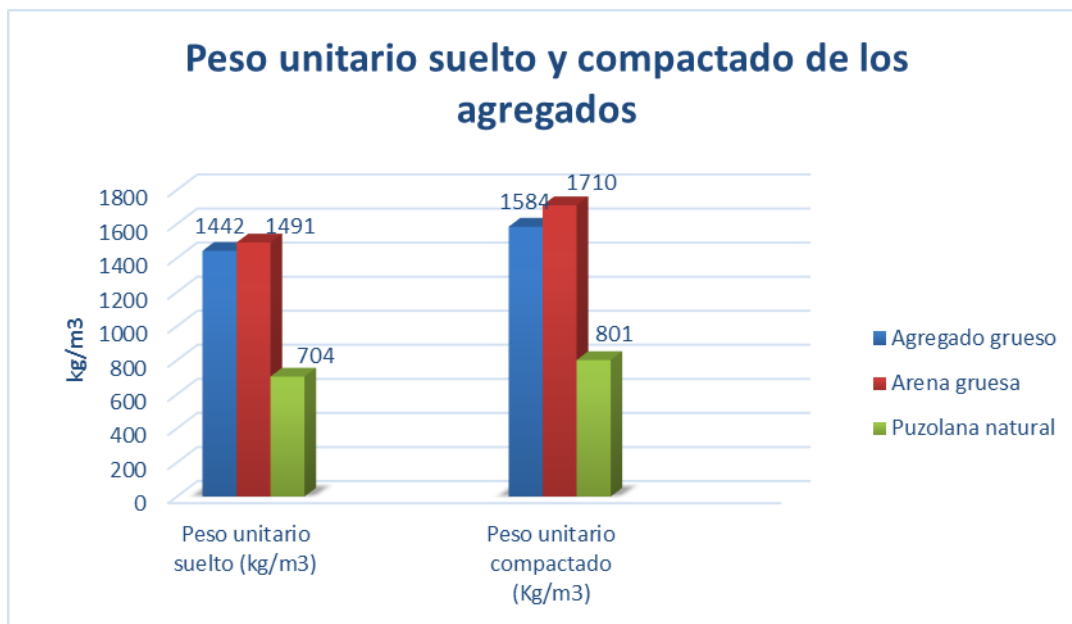


Figura 48. Peso unitario suelto y compactado de los agregados. Fuente. Elaboración propia.

Referente a los diseños de mezcla realizados, a lo largo de esta investigación, como se explicó en capítulos anteriores, de las mezclas iterativas realizadas con diferentes relaciones; se llegaron a encontrar puntos importantes a mencionar, manteniendo la premisa de que se usan los materiales utilizados en esta investigación, y el mismo método de diseño utilizado.

- El porcentaje de pasta de la mezcla debe ser mayor a 45 % del volumen total de la mezcla de concreto.
- La relación que debe tener el porcentaje de volumen del agua con el del contenido de cemento debe ser menor a 1.20.

$$\frac{\% \text{ vol. de agua}}{\% \text{ de vol. de cemento}} < 1.20$$

- El porcentaje de volumen de cemento a utilizar debe ser mayor a 19 %.

Es así que como se observa en la figura N° 49; el diseño N° 2 de concreto estructural ligero, es el límite que se encontró que cumple con los puntos antes mencionados. Siendo conscientes de que al ser una mezcla relativamente seca; el uso que se puede dar a este diseño es en la elaboración de prefabricados.

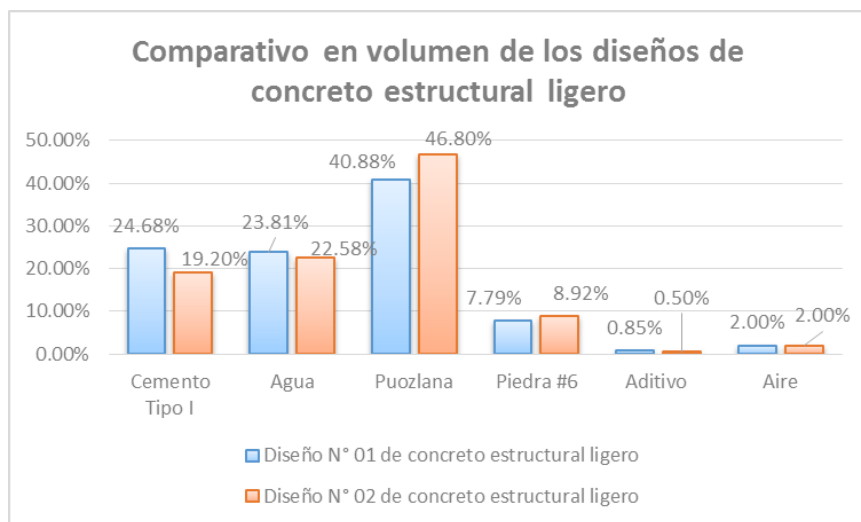


Figura 49. Porcentaje en volumen de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero. Fuente. Elaboración propia.

Referente al asentamiento de nuestros diseños de mezcla, en la figura N° 50 se puede observar los diversos asentamientos que se logró en nuestros diseños de mezclas, si bien el contenido de agua es un factor importante a analizar al momento de evaluar el asentamiento del concreto; para esta investigación, al contar con altos contenidos de cemento, relaciones bajas de a/c y altos contenidos de puzolana, el factor más importante y determinante para nuestros diseños fue el porcentaje de plastificante a utilizar. Por lo que luego de haber encontrado los diversos diseños de concreto estructural ligero, se procedía a probar la cantidad adecuada de plastificante para llegar a un slump determinado.

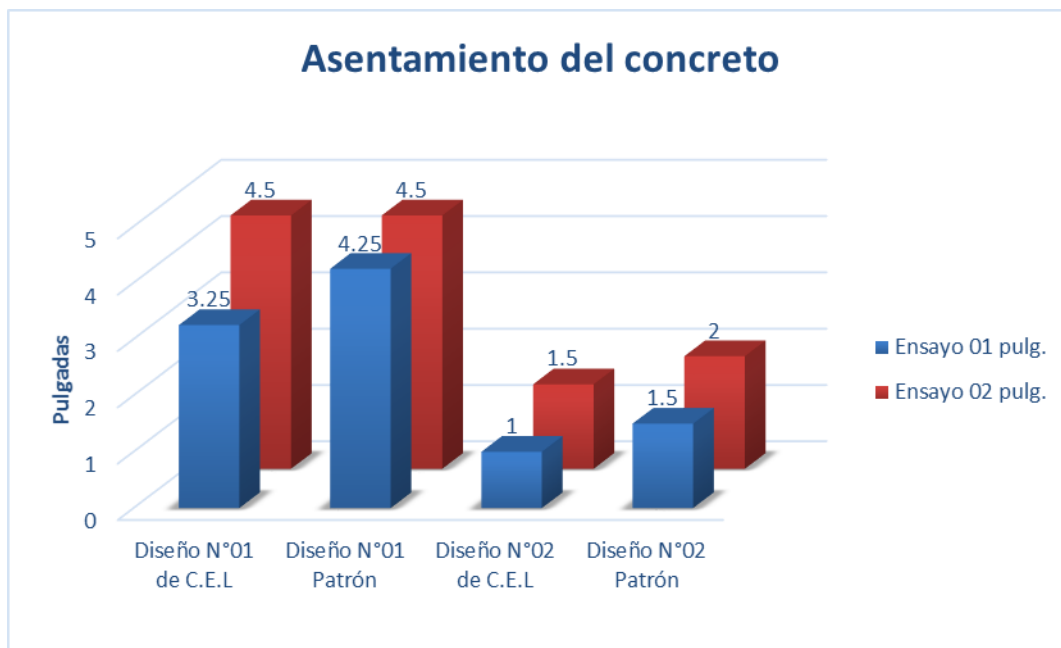


Figura 50. Asentamiento de los diseños de mezcla de concreto. Fuente. Elaboración propia.

Es así, que si bien el aditivo plastificante era el encargado de dar la consistencia deseada a nuestros diseños, se observa en la figura N° 50 que para el Diseño N° 01 de C.E.L, existe una diferencia significativa en nuestros dos ensayos realizados; esto debido en gran parte a la variabilidad de la absorción de los agregados; pues como se mencionó anteriormente, la puzolana es un material muy variable. Por otro lado se observa que el diseño N° 01 de concreto patrón de control presenta mayor uniformidad en los valores obtenidos. Sin embargo, para nuestro diseño N° 02 de C.E.L y su respectivo concreto patrón de control; al ser mezclas relativamente secas, no existió diferencias altas entre cada ensayo realizado.

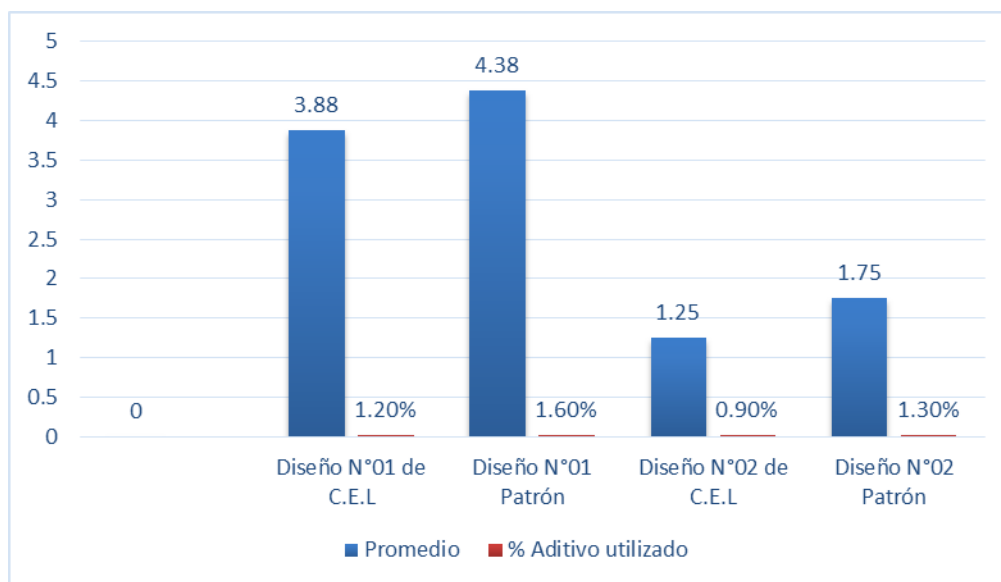


Figura 51. Porcentaje de aditivo utilizado en los diseños de mezcla del concreto. Fuente. Elaboración propia.

El porcentaje de aditivo utilizado en cada uno de nuestros diseños se muestra en la figura N° 51, cabe mencionar que dicho porcentaje está en función del contenido de cemento utilizado en cada diseño. Se observa que si se compara el % de aditivo utilizado en el diseño N°01 de C.E.L y su diseño de concreto patrón de control; este último necesita una mayor cantidad de plastificante, ya que al tener ambos un mismo volumen en la mezcla, la arena gruesa al presentar un mayor peso específico, ocupará un mismo espacio, pero con mayor cantidad en peso del material. De la misma manera se puede apreciar para el diseño N°02 de C.E.L y su diseño de concreto patrón de control.

Referente a la temperatura de nuestros diseños de mezcla, como se puede apreciar en la Tabla N° 99, la temperatura del concreto está dentro de los límites dados por la NTP 339.114, el cual indica que de acuerdo al tamaño de la sección, tendrá diferentes Temperaturas mínimas, teniendo valores desde los 5 °C hasta los 13 °C y una temperatura máxima de 32 °C. Es así que los valores de 22.6 °C y 22.4 °C para el diseño N° 01 de C.E.L y su diseño de concreto patrón de control respectivamente, y los valores de 21.3 °C y 21.1 °C para el diseño N° 02 de C.E.L y su diseño de

concreto patrón de control respectivamente, estarían dentro del rango normal de temperatura del concreto, lo que no afectaría el desarrollo normal de otras propiedades del concreto.

Así mismo, Leandro (2010) menciona que la experiencia y algunos estudios han probado que con el objetivo de reducir el agrietamiento superficiales e internos, la diferencia máxima entre la temperatura del concreto y la del ambiente no debe ser mayor a 20°C ; por lo que al observar la tabla N° 99, vemos que la gradiente térmica de todos nuestros diseños es inferior a los 20°C ; por lo que no se verían afectados nuestros diseños realizados por la temperatura de ambiente.

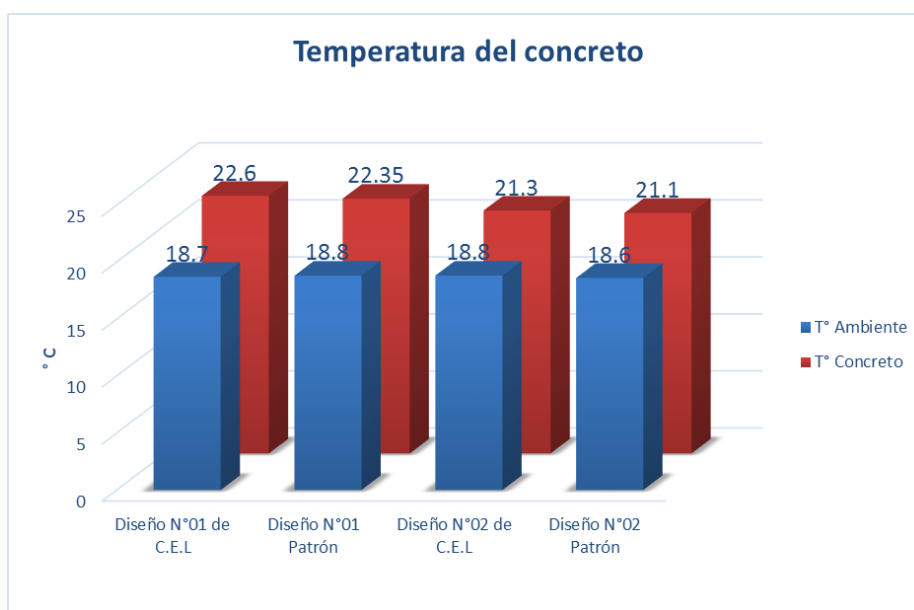


Figura 52. Temperatura del concreto y temperatura de ambiente. Fuente. Elaboración propia.

Finalmente se puede apreciar en la figura N° 52 que la temperatura de nuestros diseños de concreto estructural ligero, tienen un valor muy cercano a las que se obtuvieron para sus diseños de concreto patrón de control. Por otro lado, se observa que la temperatura del diseño N°01 de C.E.L es mayor a la temperatura de diseño N°2 de C.E.L; por lo que sabiendo que en un diseño de mezcla convencional, los agregados son los que tienen un aporte calorífico mayor por su gran presencia en la mezcla a comparación de los otros materiales; en este caso se puede deducir que el aporte calorífico que mayor presencia tiene en nuestros diseños de mezcla sería el del contenido

de cemento. Por lo que se puede decir que para nuestros diseños existe una relación directamente proporcional entre el contenido de cemento y la temperatura, pues a mayor contenido de este, se obtendrá una mayor temperatura del concreto.

Respecto al peso unitario de nuestros diseños de mezcla, como se aprecia en la Tabla N°104, el peso unitario del concreto en estado fresco del Diseño N° 01 de C.E.L y su diseño de concreto patrón de control es de 1864 kg/m³ y 2353 kg/m³ respectivamente, siendo el primero 21 % menos pesado que su diseño patrón de control. De la misma manera, el peso unitario del diseño N° 02 de C.E.L y su diseño de control es de 1777 kg/m³ y 2350 kg/m³ respectivamente, evidenciando una disminución en el peso unitario de 24% menos en comparación con su diseño de control. Estos resultados evidencian el gran aporte que brinda el utilizar la puzolana natural como parte de los agregados en el aligeramiento del concreto. Así mismo se observa que nuestro peso unitario de los diseños de concreto patrón de control, están dentro del límite de 2300 a 2400 kg/m³ que presentan los concretos con agregados convencionales. El porcentaje de cada diseño de C.E.L en función de su diseño de concreto patrón de control se muestra en la Figura N° 53.

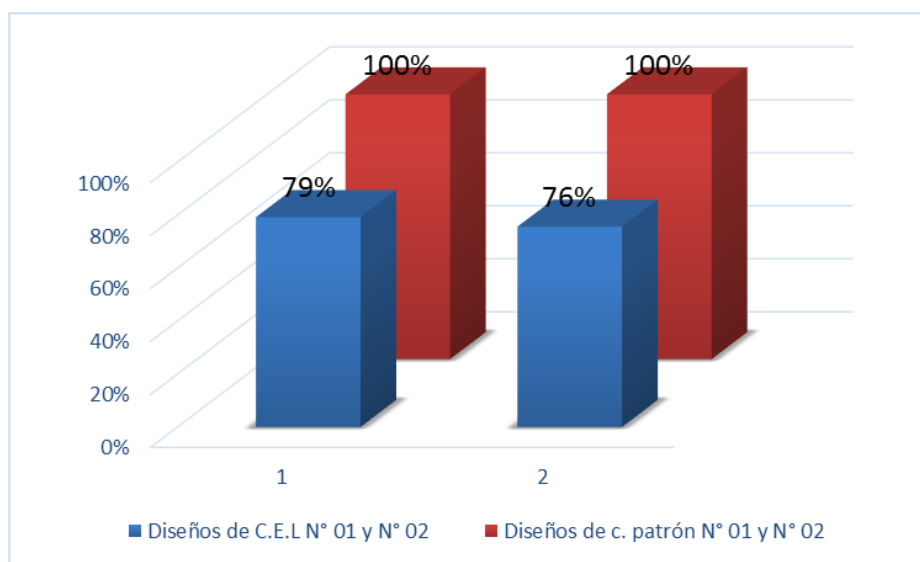


Figura 53. Porcentaje de P.U del Concreto estructural ligero, en función de sus diseños de concreto patrón. Fuente. Elaboración propia.

De la Tabla N° 104 se observa que el rendimiento de los diseños de mezcla del C.E.L presenta valores de 1.030 y 1.054 para el primer y segundo diseño respectivamente; los cuales si bien no se puede afirmar con exactitud lo siguiente, es posible de que el rendimiento de estos diseños se hayan visto influenciado por el porcentaje de aire que existe en la mezcla y la variabilidad del peso específico y absorción del agregado ligero, ya que para nuestros diseños según las recomendaciones del ACI 211.2 se asumió un porcentaje de aire de 2%. Es por ello que las mezclas al tener un porcentaje de aire mayor, genera una reducción en la cantidad de materiales a utilizar en el diseño, por lo que el peso unitario teórico se vería afectado y se acercaría más al peso unitario real encontrado. De la misma manera funciona con el peso específico (puzolana natural), ya que si este valor fuera inferior al promedio calculado; este ocuparía un mismo espacio con una menor cantidad de puzolana, reduciendo el peso unitario teórico, y acercándolo más al real encontrado. Se puede apreciar también que el segundo diseño de C.E.L cuenta con un rendimiento mayor en relación al primer diseño de C.E.L, por lo que se puede inferir ya que este diseño presenta mayor cantidad de puzolana natural, que existe una relación entre la cantidad de puzolana utilizada y el incremento del rendimiento de las mezclas, asumiendo que a mayor cantidad de este material , mayor será el contenido de aire o mayor será la variabilidad presente en sus propiedades de absorción y peso específico.

En relación a los diseños de concreto patrón de control, se observa que presentan rendimientos de 0.976 y 0.981. De manera general se puede decir que esto se debió a que el porcentaje de aire de los diseños asumidos era superior al encontrado en las mezclas, pues un porcentaje de aire menor al 2% considerado en nuestros diseños, permite que la cantidad de agregados a utilizar se incremente; acercándolo más al valor real encontrado en laboratorio. Se justifica una reducción de aire en la mezcla por la gran cantidad de arena y cemento presente en el diseño, pues a mayor

cantidad de finos, menor será la cantidad de aire generada en las mezclas de concreto. Los valores de peso unitario de nuestros diseños se pueden observar en la figura N° 54.

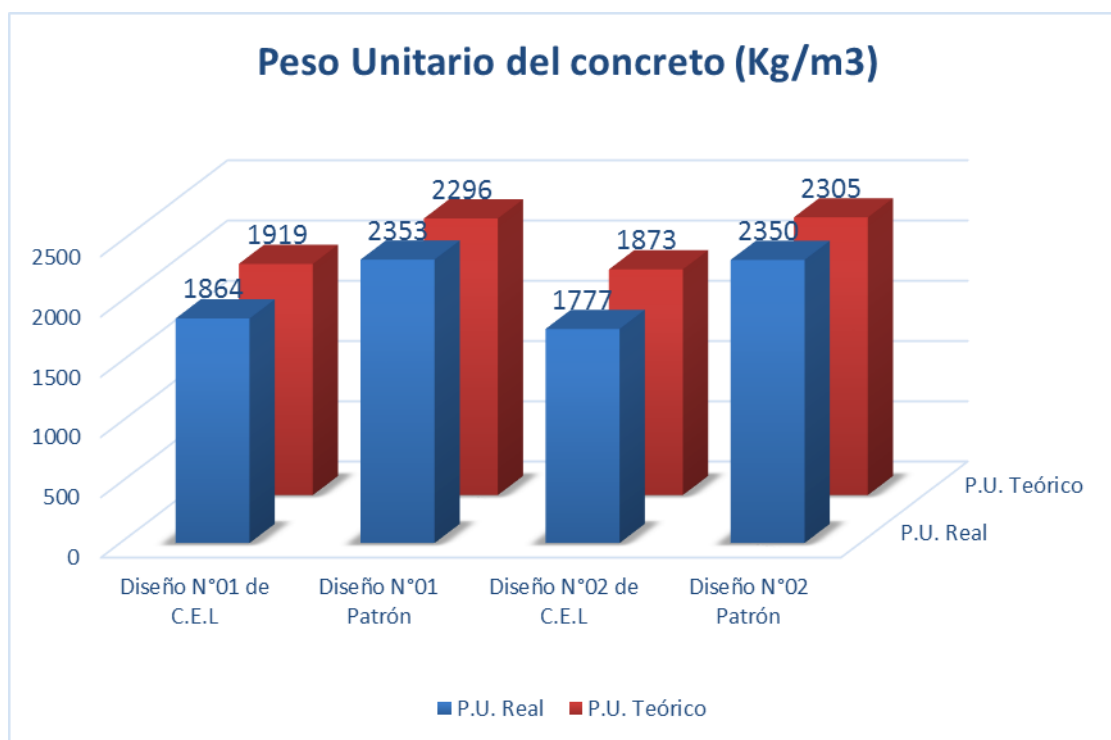


Figura 54. Peso unitario teórico y real de los diseños de mezcla del concreto. Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la resistencia a compresión de nuestros diseños de mezcla, se puede apreciar en la Tabla N° 109 que el diseño N° 01 de C.E.L y su diseño patrón de control presentan resistencias a los 28 días de 567 kg/m³ y 762 kg/m³ respectivamente. De la misma manera el diseño N° 02 de C.E.L y su diseño patrón de control cuentan con valores de resistencia a la compresión a los 28 días de 321 kg/m³ y 582 kg/m³ respectivamente. Es así que con los valores obtenidos, nuestros diseños de concreto estructural ligero estarían cumpliendo con el requerimiento de resistencia a la compresión del ACI 213R-03, el cual indica que para considerar al concreto como estructural, este debe presentar resistencias mayores a 17 Mpa (175 kg/cm²).

En la figura N° 55 se puede apreciar que la resistencia a la compresión tanto de los concretos estructurales ligeros como el de nuestros diseños de control, tienden a crecer conforme pasa el

tiempo; presentando un crecimiento exponencial. Kosmatka et al. (2004) muestra un gráfico en el que se observa la evolución en función del tiempo de la resistencia a compresión de los concretos de peso normal; apreciando que a 3 días de ensayo, presentan resistencias entre el 40 a 45 % (de la resistencia a 28 días); a 7 días entre el 65 % a 70 % y a 28 días alcanza un 100 %; sin embargo para nuestros diseños, en la Tabla N° 109 se puede apreciar que a una edad de 3 días, en todos nuestros diseños, presentan porcentajes que varían entre los 71 a 77% de la resistencia alcanzada a 28 días. Esto debido a la baja relación agua/cemento utilizada y por consiguiente a los altos contenidos de cemento presente en nuestros diseños, lo que repercute en una alta resistencia inicial del concreto. Se puede afirmar que nuestro primer diseño de C.E.L estaría dentro de los concretos de alto desempeño, pues cuenta con una resistencia mayor a los 400 kg/cm² y una baja densidad, la cual se observará líneas abajo.

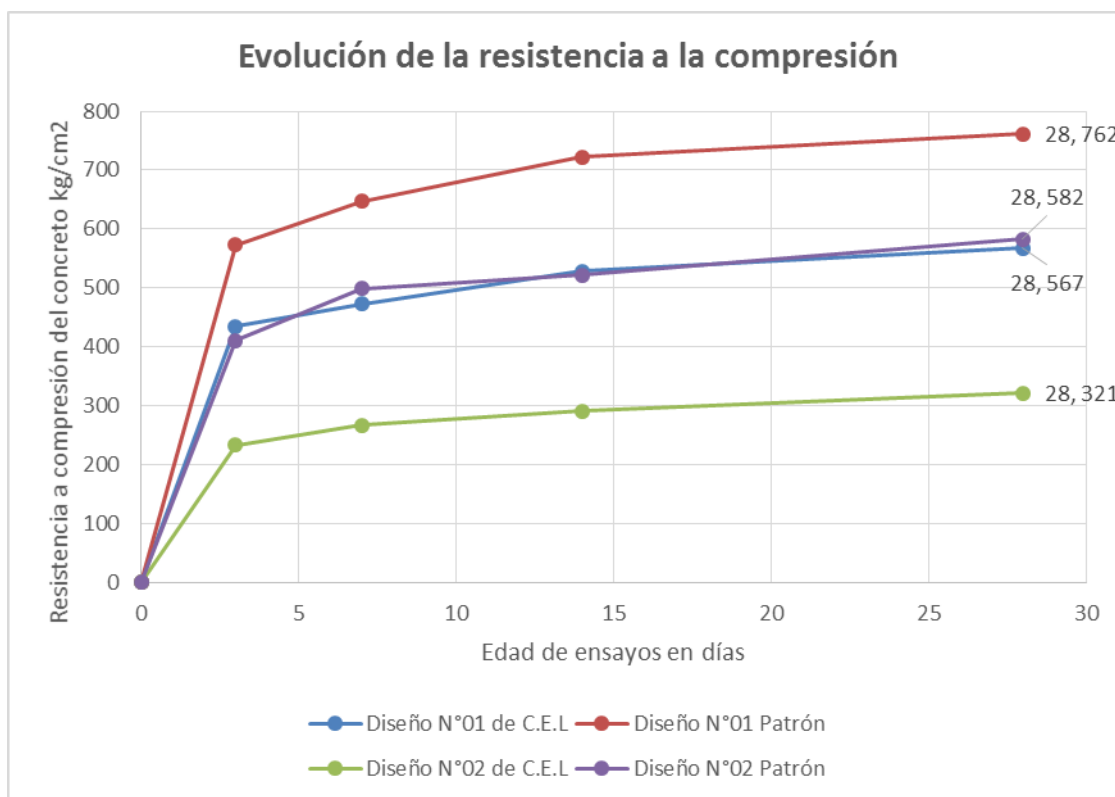


Figura 55. Evolución de la resistencia a la compresión del concreto. Fuente. Elaboración propia.

En la Tabla N° 110 se puede observar que el diseño N°01 de C.E.L alcanza a los 28 días el 74 % de la resistencia alcanzada por su diseño de control; de igual manera, el diseño N° 02 de C.E.L tiene una resistencia a 28 días del 55 % de su diseño de control. Se puede apreciar que el diseño N°02 de C.E.L presenta un menor porcentaje alcanzado a comparación del diseño N°01 de C.E.L, debido a que este diseño tiene un mayor presencia en volumen de agregado fino ligero, por lo que se puede afirmar que a una mayor presencia de agregados ligeros, menor será la resistencia a compresión alcanzada. Por otro lado el que los diseños de C.E.L no hayan alcanzado la resistencia a compresión obtenida por sus diseños de control, se puede justificar debido a que la presencia de agregado ligero aporta mayor porosidad a la mezcla, por lo que de acuerdo a lo mencionado por Rivva (2000) a mayor presencia de porosidad en la mezcla, menor será la resistencia obtenida.

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta de nuestros diseños, se puede apreciar que la resistencia a la tracción indirecta es de 43 kg/cm² y 49 kg/cm² para el diseño N° 01 de C.E.L y su diseño de control respectivamente; de igual manera de 33 kg/cm² y 44 kg/cm² para el diseño N°02 de C.E.L y su diseño de control. Si lo comparamos con respecto a su resistencia a la compresión a 28 días; se observa que en el caso del diseño N°01 de C.E.L alcanza el 7.6 % de la resistencia a compresión obtenida. Para el segundo diseño de C.E.L, se observa que este alcanza el 10.4 % de su resistencia a compresión obtenida. Kosmatka et al. (2004) Mencionan que la resistencia a la tracción de los concretos convencionales varía aproximadamente entre el 8 a 12 % de la resistencia a compresión; por lo que se puede decir que el comportamiento de la resistencia a la tracción en función a su resistencia a compresión del concreto estructural ligero utilizando puzolana natural

es muy similar a la obtenida por el concreto de peso normal. Por otro lado si observamos la resistencia a tracción alcanzada por los concretos de control en función de su resistencia a compresión a 28 días, se tiene que el diseño N°01 de control alcanzó el 6.4 % y el diseño N° 02 de control alcanzó el 7.5 %; valores que están por debajo de la media alcanzada por el concreto de peso normal. De manera general se puede asumir que esto se debe a la escasa presencia del agregado grueso presente en las mezclas; pues algunas investigaciones han encontrado que este influye en la resistencia a tracción del concreto; sin embargo, esto debe ser comprobado en laboratorio.

En la figura N° 56 se observa que el porcentaje de la resistencia alcanzada por los diseños de C.E.L respecto a sus diseños de control, son de 88 % y 76 % para el C.E.L N°01 y N°02 respectivamente. Se puede apreciar que el primero obtiene un valor más cercano a su concreto de control, debido a la mejor cohesión que presentó esta mezcla; por lo que el segundo al ser una mezcla relativamente seca; no existía una óptima cohesión en la mezcla, es decir, existía una menor adherencia entre la pasta y los agregados, pues Neville (1998) menciona que la resistencia a la tracción decaerá conforme la adherencia entre la pasta y los agregados disminuya.

Por otro lado, Neville (1998) menciona que en los concretos ligeros de alta resistencia (50 a 90 Mpa) existe una diferencia aproximada de 1 Mpa (10 kg/cm²) entre la resistencia a tracción alcanzada por el concreto ligero en comparación con la del concreto de peso normal de la misma resistencia; es así que se puede observar que la diferencia entre el diseño N° 01 de C.E.L y el diseño N°02 de control es de 1 kg/cm² ; ambos diseños alcanzaron una resistencia a compresión similar, por lo que se puede afirmar que se cumpliría lo dicho por el autor antes mencionado.

Finalmente se observa que la resistencia a la tracción mantiene una relación directamente proporcional con la resistencia a compresión, ya que a mayor resistencia a compresión obtenida por parte del concreto, mayor será la resistencia a tracción alcanzada.

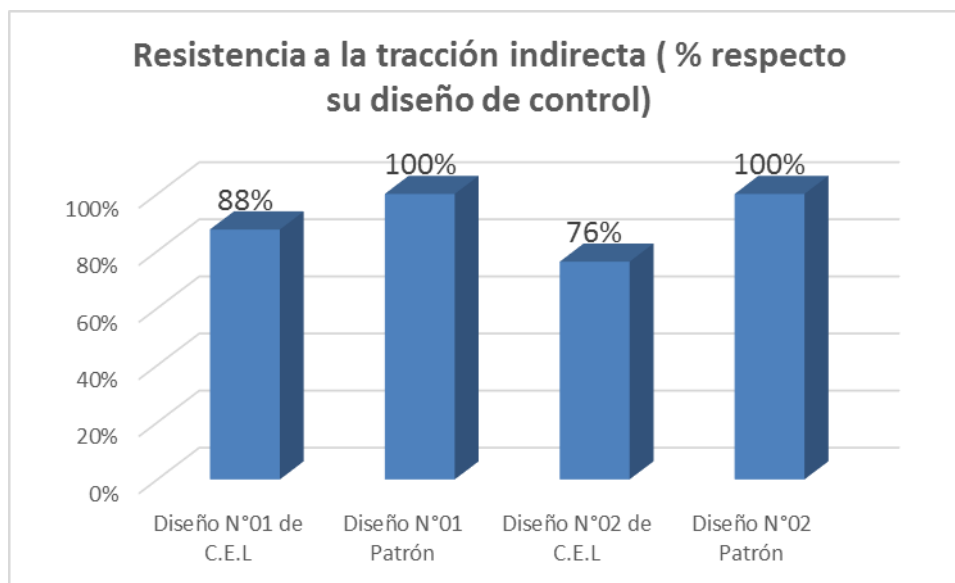


Figura 56. Porcentaje de resistencia a la tracción del C.E.L en función del concreto patrón de control. Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la resistencia a la flexión de nuestros diseños de mezcla, se puede apreciar que los módulos de rotura a 28 días (resistencia a la flexión) alcanzados por el diseño N° 01 de C.E.L y su diseño de control son de 48 kg/cm² y 65 kg/cm² respectivamente. De igual manera, para el diseño N°02 de C.E.L y su diseño de control son de 35 kg/cm² y 50 kg/cm² respectivamente. Por otro lado, si comparamos, podemos observar que el primer diseño de C.E.L tiene una resistencia a la flexión de 8.4 % respecto a su resistencia a compresión. Para el segundo diseño de C.E.L se observa que este alcanzó el 10.7 % de su resistencia a compresión. Rivera (s.f.) menciona que la resistencia a flexión del concreto de peso normal varía entre el 10% a 20 % de su resistencia a compresión; no obstante podemos observar que las resistencias alcanzadas por el C.E.L están por debajo de estos valores. Respecto a los diseños de control se puede apreciar que el diseño N° 01 y

N° 02 de control alcanzaron el 8.5 % y el 8.6 % de su resistencia a compresión respectivamente, valores que están por debajo de la media alcanzada de los concretos convencionales. Masías (2018) menciona que la resistencia a la flexión depende del tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso, por lo que se puede asumir que nuestros diseños de control, al tener poca presencia de agregado grueso en sus diseños; no tuvieron un buen desempeño respecto a la resistencia a la flexión, pese a haber alcanzado valores significativos, por lo que se debe evaluar la influencia del agregado grueso en el módulo de rotura en futuras investigaciones.

En la figura N° 57 se puede observar que el primer diseño de C.E.L alcanza el 73 % de la resistencia a flexión alcanzada por su diseño de control; de igual manera el segundo diseño de C.E.L alcanza el 69 % respecto a su diseño de control. Al igual que en la resistencia a la tracción, se observa que el primero obtiene un valor más cercano a lo alcanzado por su diseño de control debido a la mayor adherencia y cohesión que presentó esta mezcla; ya que el segundo diseño al ser una mezcla relativamente seca, tuvo una menor adherencia entre la pasta y el agregado, el cual se pudo apreciar en los diseños a simple vista. Es por ello que Neville (1998) menciona que la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento es un factor importante para la resistencia del concreto, especialmente para la resistencia a flexión.

Finalmente se puede apreciar que la resistencia a la flexión aumenta a medida que su resistencia a compresión se ve incrementada teniendo una relación directamente proporcional entre ambas resistencias.

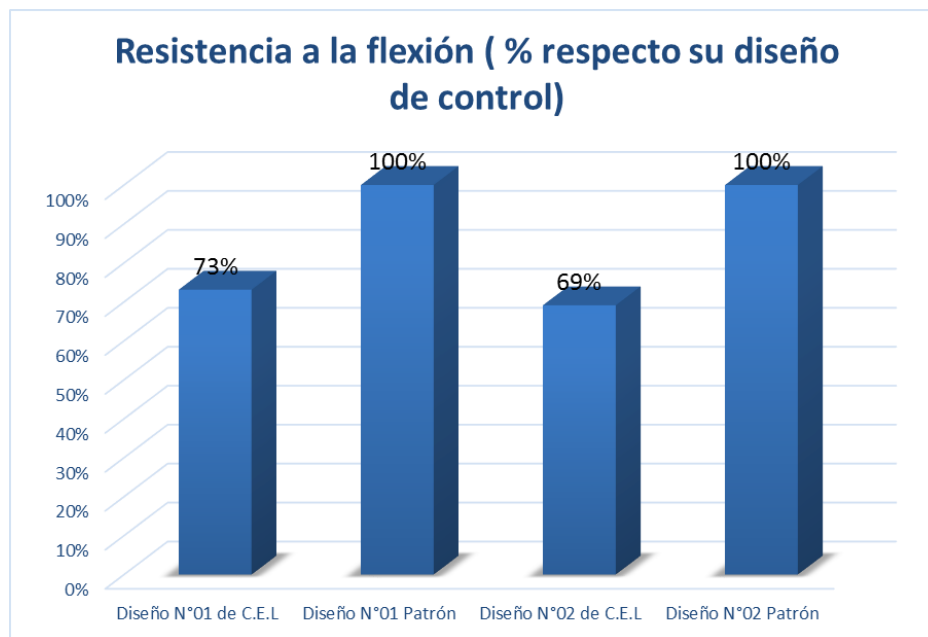


Figura 57. Porcentaje de resistencia a la flexión del C.E.L en función del concreto patrón de control. Fuente. Elaboración propia.

Respecto a la densidad de equilibrio de nuestros diseños de mezcla, se puede observar que las densidades en estado seco y en equilibrio alcanzadas por el diseño N°01 de C.E.L son de 1665 kg/m³ y 1715 kg/m³ respectivamente. Para el diseño N° 02 de C.E.L se observa que este alcanzó densidades de 1573 kg/m³ y 1623 kg/m³ en estado seco y en equilibrio respectivamente. Por otro lado, los diseños de control N° 01 y N° 02 alcanzaron densidades de 2184 kg/m³ y 2234; 2163 kg/m³ y 2213 kg/m³ en estado seco y en equilibrio respectivamente.

Con las densidades en equilibrio alcanzadas por nuestros diseños de C.E.L estaríamos cumpliendo con los requerimientos de densidad en equilibrio y resistencia a la compresión según el ACI 213 R-03, pues nuestros diseños alcanzaron resistencias superiores a los 175 kg/cm² y densidades en equilibrio inferiores a los 1920 kg/m³.

A lo largo de la investigación se pudo observar como era de esperarse que a mayor remplazo de agregado ligero en los diseños, menor era la densidad obtenida; sin embargo, la resistencia se veía afectada, encontrando una disminución en esta.

Finalmente en la figura N° 58 se puede apreciar que el diseño N° 01 de C.E.L reduce la densidad en equilibrio respecto a su diseño de concreto de control en 23 %, pues alcanza una diferencia de 519 kg/m³. Como se esperaba, el segundo diseño de C.E.L al tener una menor cantidad de cemento y mayor cantidad de agregados logró reducir en 27 % la densidad de equilibrio respecto a su diseño de control.

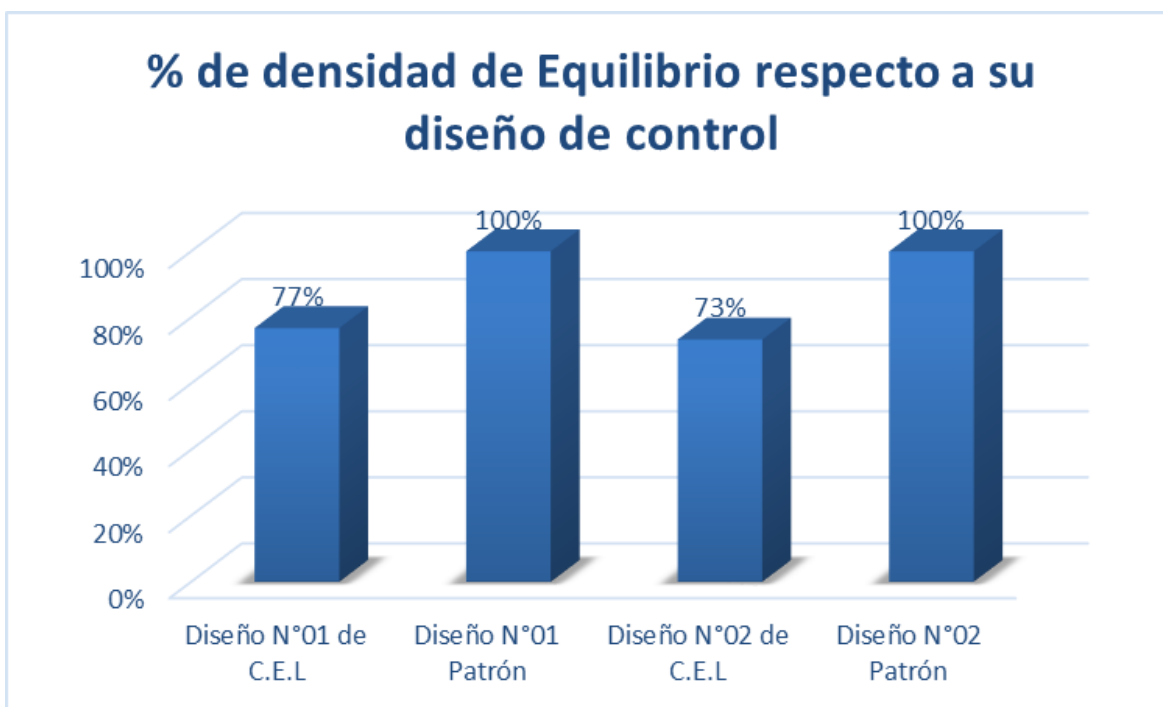


Figura 58. Porcentaje de la densidad en equilibrio de los C.E.L respecto a sus diseños de control. Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO VI

VI. CONCLUSIONES

- Respecto a la dosificación de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero que cumple con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03, utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino se concluye que:

- El método utilizado en esta investigación es viable para determinar las dosificaciones de los diseños de mezcla del concreto estructural ligero, tal cual se puede apreciar en las Tablas N° 93 y N° 94, los cuales cumplen con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03 utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, pues se obtuvo densidades inferiores a los 1920 kg/m³ y resistencias a la compresión mayores a 175 kg/cm². Las proporciones de los diseños de mezcla de C.E.L N° 01 y C.E.L N° 02 fueron los siguientes:

C. E. L N°01 : 1 : 0.87 : 0.28 / 0.42 (1.2 % de porcentaje de aditivo)

C. E. L N°02 : 1 : 1.27 : 0.42 / 0.54 (0.9 % de porcentaje de aditivo)

- Respecto al desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi como agregado fino, que cumplen con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión según ACI 213R-03 se concluye que:

- Los asentamientos de los diseños de C.E.L N° 01 y C.E.L N°02 presentaron una variación de 1.25 y 0.5 pulgadas, respecto a los 0.25 y 0.5 pulgadas alcanzados por sus diseños de control respectivamente, tal cual se puede apreciar en la Tabla N° 97; evidenciando una mayor variación en los diseños de C.E.L respecto a sus diseños de control, esto debido a la variabilidad que presenta el porcentaje de absorción de la puzolana natural de la cantera Raqchi.

- El C.E.L N° 01 y su diseño de control alcanzaron temperaturas promedio de 22.6 °C y 22.4 °C respectivamente; de igual manera el C.E.L N° 02 y su diseño de control alcanzaron temperaturas de 21.3 °C y 21.1 respectivamente, tal cual se puede apreciar en la Tabla N° 99; por lo que se infiere que la utilización de puzolana natural de la cantera Raqchi no afecta a la temperatura del concreto.
- El peso unitario del concreto estructural ligero se reduce en 489 kg/m³ (21%) y 573 kg/m³ (24%) para el diseño N° 01 y N°02 respectivamente, frente a sus diseños de control. Pues en la Tabla N° 104 se aprecia pesos unitarios de 1864 kg/m³ y 1777 kg/m³ para el diseño C.E.L N° 01 y N° 02 respectivamente, a comparación de los 2353 kg/m³ y 2350 kg/m³ alcanzados por sus diseños de control respectivamente. Respecto a los rendimientos, el C.E.L presenta un rendimiento superior a la unidad, concluyendo que el contenido de aire asumido en la mezcla no sería el correcto.
- La utilización de puzolana natural reduce la resistencia a compresión de nuestros diseños en 26% y 45%, pues el C.E.L N° 01 y N° 02 alcanzaron resistencias de 567 kg/cm² y 321 kg/cm² respectivamente, frente a los 762 kg/cm² y 582 kg/cm² alcanzados por sus diseños de control, tal cual se puede apreciar en las Tablas N° 109 y N° 110. Por otro lado, los valores obtenidos cumplen con los requisitos de resistencia a compresión según ACI 213R-03.
- La utilización de puzolana natural reduce la resistencia a la tracción indirecta de nuestros diseños en 12% y 24 %, pues se obtuvo resistencias de 43 kg/cm² y 33 kg/cm² para el C.E.L N° 01 y N° 02, frente a los 49 kg/cm² y 44 kg/cm² alcanzados por sus diseños de control respectivamente, tal cual se puede apreciar en la Tabla N°115 y la Figura N°56. Los porcentajes obtenidos de la tracción indirecta

alcanzadas por los diseños de C.E.L respecto a sus resistencias a compresión están dentro del rango de valores que tienen los concretos convencionales, del 8 al 12 %.

- La utilización de puzolana natural reduce la resistencia a la flexión en 27 % y 31 % de nuestros diseños de C.E.L frente a sus diseños de control, pues el C.E.L N° 01 y N° 02 alcanzaron valores de 48 kg/cm² y 35 kg/cm², frente a los 65 kg/cm² y 50 kg/cm² alcanzados respectivamente por sus diseños de control, tal cual se aprecia en la Tabla N°120 y Figura N° 57.
- La utilización de puzolana natural redujo la densidad en estado de equilibrio en 519 kg/m³ (23%) y en 590 kg/m³ (27%) para el C.E.L N° 01 y N° 02 frente a sus diseños de control respectivamente. Pues se alcanzó densidades de 1715 kg/m³ y 1623 kg/m³ para el C.E.L N° 01 y N°02 respectivamente, frente a los 2234 kg/m³ y 2213 kg/m³ alcanzados por sus diseños de control respectivamente, tal cual se puede apreciar en la Tabla N° 125 y Figura N° 58; por lo que se infiere que a mayor presencia de puzolana natural en la mezcla, menor será la densidad alcanzada, de igual manera con las densidades alcanzadas se cumple el requerimiento de densidad dado por el ACI 213R-03.

Finalmente se concluye que el desempeño de los diseños de mezcla de concreto estructural ligero fue adecuado, pues pese a que la resistencia en general disminuye, esta se ve compensada por la baja densidad obtenida por nuestros diseños.

CAPÍTULO VII

VII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar la caracterización química y físicas de los agregados bajo las recomendaciones del ASTM C 330, con el fin de tener mayor certeza al momento de utilizar la puzolana natural en la elaboración de concreto estructural ligero.
- Se recomienda reducir el contenido de cemento en los diseños utilizando las alternativas siguientes: Utilizando adición de minerales (humo de sílice, escorias de alto horno, cenizas volantes, etc) y/o aditivos súper plastificantes que incrementen la cohesión y resistencia en la mezcla.
- Se recomienda utilizar a la puzolana natural como agregado grueso, con el fin de evaluar la influencia en el desempeño del concreto estructural ligero.
- Se recomienda evaluar la influencia de la puzolana natural de la cantera Raqchi saturada por 72 horas, respecto a las variaciones existente en las resistencias alcanzadas.
- Se recomienda evaluar el contenido de aire alcanzado por el concreto estructural ligero que utiliza puzolana natural de la cantera Raqchi, bajo el método volumétrico, ya que es el único ensayo aplicable para la obtención del contenido de aire en concretos de estas características.
- Se recomienda evaluar la influencia del porcentaje de piedra presente en las mezclas, respecto al incremento de las propiedades como resistencia a la tracción indirecta y resistencia a la flexión del concreto.
- Se recomienda evaluar al concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi, frente a los ensayos de módulo de elasticidad, necesario para el

diseño estructural y la contracción por secado, característica que incrementa en este tipo de concretos especiales.

- Se recomienda evaluar la influencia del curado a 56 y 90 días respecto a las resistencias alcanzadas por el concreto estructural ligero utilizando puzolana natural de la cantera Raqchi.
- Se recomienda evaluar la adherencia entre el concreto estructural ligero elaborado con puzolana natural de la cantera Raqchi y el acero de refuerzo utilizado, con el fin de evaluar la necesidad de considerar un recubrimiento mayor para este tipo de concretos.
- Se recomienda realizar el análisis estructural de una edificación utilizando concreto estructural ligero elaborado con puzolana natural de la cantera Raqchi, con el fin de evaluar su desempeño frente a fuerzas sísmicas.

CAPÍTULO VIII

VIII. REFERENCIAS

- Abanto, F (2013). *Tecnología del Concreto, Teoría y Problemas*. Lima, Perú: Editorial San Marcos.
- Alexander, K. and Taplin, J. (1964). *The Structure of Concrete, Cement and Concrete Association*, London.
- Álvarez, G. y Saez, B. (2012). *Hormigón ligero: aspectos técnicos y estéticos*. Madrid, España: CEMEX.
- American Concrete Institute. (1998). *Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete* (ACI 211.2-98). Recuperado de http://www.bpesol.com/bachphuong/media/images/book/2112_98.pdf.
- American Concrete Institute. (2003). *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete* ACI 213R-03. Recuperado de <http://www.uomisan.edu.iq/library/admin/book/68340626265.pdf>.
- American Society for Testing and Materials. (1997). *Método de Prueba Estándar para Densidad de masa ("Peso unitario") y Vacíos en agregado* (C29-C29M). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/144753885/ASTM-C29-pdf>.
- American Society for Testing and Materials. (2002). *Especificaciones Normalizadas para la fabricación de los moldes para ensayos de hormigón* (C470-C470M). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/328614297/ASTM-C-470-02a>.
- American Society for Testing and Materials. (2002). *Método de Ensayo Normalizado para determinar la Resistencia a la Flexión del Hormigón* (C78). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/328614329/ASTM-C-78-02>.

American Society for Testing and Materials. (2003). *Especificación Normalizada para Agregados para Concreto* (C33). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/351665743/C33-07-Agregados-Para-Concreto-pdf>.

American Society for Testing and Materials. (2004). *Método de Ensayo de la Densidad Normalizado para Resistencia a la Tracción indirecta de Especímenes Cilíndricos de Concreto* (C496). Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C496C496M-04.htm>.

American Society for Testing and Materials. (2005). *Especificación Normalizada para Agregados Livianos para Concreto Estructural* (C330). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/255722462/ASTM-C330-05-Castellano>.

American Society for Testing and Materials. (2005). *Método Normalizado de Ensayo de la Densidad de Concreto Estructural Liviano* (C567). Recuperado de <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/C567-05a-SP.htm>.

American Society for Testing and Materials. (2008). *Práctica Normalizada para Preparación y Curado de Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra* (C31-C31M). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/251078240/ASTM-C-31>.

American Society for Testing and Materials. (2017). *Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto* (C39-C39M). Recuperado de <https://www.astm.org/Standards/C39C39M-SP.htm>.

Bentur, A., Gray, R. and Mindess, S. (1986). *Cracking and Pull out Process in Fiber Reinforced Cementitious Materials, paper 6.2, Developments in Fiber Reinforced*

Cement and Concrete, RILEM, Vol. 2, (R. N. Swamy, R. L. Wagstaffe, and D. R. Oaklay, eds.)

Camino, R. y Camino, R. (2017). *Evaluación de la conductividad térmica, propiedades físico – mecánicas del ladrillo King – Kong 18 huecos adicionado con puzolana de la cantera Raqchi en diferentes porcentajes, con respecto a un ladrillo tradicional* (Tesis de pre grado). Universidad Andina del Cusco, Cusco, Perú.

Cañarte, G. (2016). *Estudio de aumento de resistencia a la compresión del hormigón liviano con piedra pómez* (Tesis de maestría). Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador.

Chandra, S. & Berntsson, L. (2002). *Lightweight Aggregate Concrete, Science, Technology and Applications*. Gotemburgo, Suecia: Noyes Publications.

Correa, J. y Ratti, G. (2015). *Evaluación del efecto de la variación de agregado ligero de arcilla expandida en las propiedades físicas y mecánicas de un concreto estructural aligerado* (Tesis de maestría). Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.

Días, A. & Ramírez, J. (2009). *Compendio de rocas y minerales industriales en el Perú*. INGEMMET, Boletín, series B: Geología Económica, 19, 482 p.

El American Concrete Institute Perú (2016). *Reparación de edificaciones de concreto*. *Concreto al día*. (5), 32-35.

Hou, D., Caicedo, J. y Falconí, A. (2009). *Hormigones Livianos de Alto Desempeño* (Tesis de pre grado). Universidad Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

- Ibarcená, A. (2013). *Uso de Concreto Ligero con Agregados de Roca Volcánica en la Fabricación de Unidades de Albañilería no Estructural* (Tesis de pre grado). Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto (2007). *Concreto sin finos* (18). Recuperado de <http://www.imcyc.com/ct2007/jul07/PROBLEMAS.pdf>.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Producción Nacional* (10). Recuperado de https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/10-informe-tecnico-n10_produccion-nacional-agosto2017.pdf.
- Iza, D. (2009). *Hormigón Liviano con Agregado de Origen Volcánico y Aditivo Incorporador de Aire* (Tesis de pre grado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
- Khokhorin, N. (1993). *The durability of lightweight concrete structure members*, KvibySlev, USSR.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, EE-UU.
- Langton, C. and Roy, D. (1980). *Morphology and Microstructure of Cement Paste/Rock Interfacial Regions*, Proc. 7th Int. Congress on the Chemistry of Cement, Editions Septima, Paris, VIII:VII. P. 127-132.
- Leandro, J. (2010). *Evaluación del uso de la diatomita como adición mineral en el concreto de alta resistencia* (Tesis de pre grado). Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.

- Masías, K. (2018). *Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso* (Tesis de pre grado). Universidad de Piura, Piura, Perú.
- Mehta, P. K. (1986). *Concrete Structures and Material*, p. 38, Prentice Hall, NJ.
- Menéndez, J. L. (s.f) Exfoliación, partición y fractura. *Asturnatura.com*. (En línea). Num. 0, (consultado el 21/3/2019). Recuperado de <https://www.asturnatura.com/articulos/minerales/propiedades-fisicas/exfoliacion-particion-fractura.php>.
- Ministerio de Energía y Minas (2015). *Anuario Minero 2015*. Recuperado de <http://www.minem.gob.pe/publicaSector.php?idSector=1&pagina=4>.
- Mohamed, M. & Khelafi, H. (2007). *Properties of lightweight concrete made with crushed natural pozzolana as coarse aggregate*. Technological and Economic Development of Econom. 13(4). 259-265.
- Neville, A. & Brooks, J. (1998). *Tecnología del Concreto*. U.S.A: San Diego.
- Neville, A. M. (1995). *Tecnología del Concreto*. México: Instituto Mexicano del cemento y el concreto, A.C.
- Norma Técnica Peruana. (2001). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global* (NTP 400.012). Recuperado de http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/publicacionez/norma_tecnica_peruana_dos.pdf.
- Norma Técnica Peruana. (2002). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más fino que pasan por el tamiz normalizado 75 um, N°*

200, por lavado en agregados (NTP 400.018). Recuperado de <https://edoc.site/ntp-400018-2002-pdf-free.html>.

Norma Técnica Peruana. (2002). AGREGADOS. *Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado fino* (NTP 400.022). Recuperado de https://kupdf.net/download/ntp-4000222013-agregados-metodo-peso-especifico-y-absorcion-del-agregado-fino_59c03df208bbc5f314686f9e_pdf.

Norma Técnica Peruana. (2002). AGREGADOS. *Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado grueso* (NTP 400.021). Recuperado de http://www.academia.edu/26938679/NORMA_T%C3%89CNICA_NTP_400.021_PERUANA_2002.

Norma Técnica Peruana. (2002). AGREGADOS. *Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso unitario”) y los vacíos en los agregados* (NTP 400.017). Recuperado de <https://es.scribd.com/document/343664826/NTP-400-017-2011-Agregados-Metodo-de-Ensayo-Para-Determinar-El-Peso-Unitario-Del-Agregado>.

Norma Técnica Peruana. (2002). *HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar la temperatura de mezclas de hormigón* (NTP 339.184). Recuperado de <https://edoc.site/ntp-339184pdf-pdf-free.html>.

Norma Técnica Peruana. (2008). *HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar la densidad (peso unitario), rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico) del hormigón* (NTP 339.046). Recuperado de <https://edoc.site/download/determinar-la-densidad-c-airentp-339046-pdf-free.html>.

- Norma Técnica Peruana. (2009). *HORMIGÓN (CONCRETO). Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de concreto en campo* (NTP 339.033). Recuperado de <https://edoc.site/download/ntp-339033-2009-2-pdf-free.html>.
- Norma Técnica Peruana. (2009). *Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento portland* (NTP 339.035). Recuperado de https://kupdf.com/download/339035pdf_59c0403c08bbc5f314686f9f_pdf.
- Norma Técnica Peruana. (2012). *HORMIGÓN (CONCRETO). Concreto premezclado* (NTP 339.114). Recuperado de <https://edoc.site/download/-concreto-premezclado-pdf-free.html>.
- Norma Técnica Peruana. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado* (NTP 339.185). Recuperado de https://kupdf.net/download/ntp-3391852013-agregados-metodo-contenido-de-humedad-total-evaporable-de-agregados-por-secado_59c03b5808bbc55813686f84_pdf.
- Norma Técnica Peruana. (2014). *AGREGADOS. Especificaciones para agregados en concreto* (NTP 400.037). Recuperado de https://kupdf.net/download/ntp-4000372014-agregados-especificaciones-para-agregados-en-concretopdf_5a4233e7e2b6f52b4b9a7232_pdf.
- Orus, F. (1985). *Materiales de la construcción*. Madrid: Editorial Dossat, 703p.
- Oshiro, F. (1979). *Concreto Ligero*. Lima, Perú: UNIVERSO S.A.
- Piña, R., Sánchez, N, y Fernández, L. (2014). Mineralogía I de Grado en Geología. Identificación de visu y microscopio de Filosilicatos. *Revista Reduca*. 6(3), p.62.

Reglamento Nacional de Edificaciones. (2010). *Norma E.60 Concreto Armado*.

Recuperado de <https://www.sencico.gob.pe/descargar.php?idFile=190>.

Rivera, G. (sf). *Concreto Simple*. Cauca, Colombia.

Rivva, E. (2000). *Naturaleza y Materiales del Concreto*. Lima, Perú: ACI PERÚ.

Rodríguez, H. (2017). *Concreto Liviano a base de poliestireno expandido para la prefabricación de unidades de albañilería no estructural - Cajamarca* (Tesis de pre grado). Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú.

Sarkar, S., Chandra, S. and Berntsson, L. (1992). *Interdependence of microstructure and strength of structural lightweight aggregate concrete, cement and concrete composite*, 14:239-248.

Short, A. y Kinniburgh, W. (1967). *Concreto ligero, cálculo, fabricación, diseño y aplicaciones*. México, México: Limusa, Wiley, S.A.

Solano, M. (2003). *Diseño de mezclas de concreto con agregado grueso del tajo Chopo* (Tesis de pre grado). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

Spanish Oxford Living Dictionaries. (s.f). *Incombustible*. Oxford, Reino Unido: OXFORD UNIVERSITY PRESS. Recuperado de <https://es.oxforddictionaries.com/definicion/incombustible>.

Suarez, G, y Valdez, L. (2015). *Hormigones livianos* (Tesina de pre grado). Escuela Superior Politecnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.

Súarez, M. (2012). *Descripción del uso de concretos especiales en Colombia desde el 2000 hasta el 2010* (Tesis de especialista en Gerencia e Inventoría de Obras Civiles). Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, Bucaramanga, Colombia.

- Tantaquilla, C. (2017). *Influencia de piedra pómez sobre asentamiento, densidad, absorción y resistencia a compresión en concreto ligero estructural, Perú* (Tesis de pre grado). Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.
- Torre, A. (2004). *Curso Básico de Tecnología del Concreto*. Lima, Perú: UNI.
- Tupa, A. (2018). *Concreto Estructural Liviano con Escoria y Ceniza Volcánicas del Distrito de Yura* (Tesis de pre grado). Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, Perú.
- Unión de Concreteras (UNICON). *Concreto Liviano Unicon*. Recuperado de <http://www.unicon.com.pe/repositorioaps/0/0/jer/comlivia/files/FichaTecnicaConcretoLivianoUNICON.pdf>.
- Ventura, C. (2015). *Propiedades Físicas y Mecánicas de la Roca Volcánica del Cerro Acuchimay para el Diseño de Concreto Liviano en la Ciudad de Ayacucho, Perú* (Tesis de pre grado). Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.
- Videla, C. y López, M. (2002). Efecto de la resistencia intrínseca del árido ligero en la resistencia a compresión y rigidez del hormigón ligero. *Materiales de la construcción*. 52(265), 23-37.
- 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 post grado). Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Yagual, D. y Villacís, D. (2015). *Hormigón Liviano de Alto Desempeño con Arcilla Expandida* (Tesis de pre grado). Universidad Estatal Península de Santa Elena, La Libertad, Ecuador.

Zhang, M. & Gjorv, O. (1990). *Microstructure of interfacial transition zone between lightweight aggregate and cement*, Cem. Conc. Res., 20:610-618.

CAPÍTULO IX

IX. ANEXOS

ANEXO 01

FICHA TÉCNICA DEL ADITIVO W73 DE LA EMPRESA ULMEN



Fabricación y Comercialización de Aditivos para Concretos

CERTIFICADO DE CALIDAD

El departamento técnico de INDUSTRIAS ULMEN S.A. Certifica que el producto que se indica cumple los requisitos de uniformidad indicados en la norma ASTM C494 y con nuestros estándares de calidad.

Producto : W-73
 Lote : 8480417
 Fabricado : 05/04/2017
 Vence : 05/10/2017

Los parámetros controlados se muestran a continuación

| ENSAYO | ESPECIFICACIÓN | RESULTADO |
|------------|-------------------|-----------|
| Densidad | 1,05 ±0,02 (g/mL) | 1,046 |
| Viscosidad | 14 ± 2 (seg) | 15,72 seg |
| pH | 6 ± 1 | 6,1 |

El presente aditivo tiene una vida útil de 6 meses almacenado en lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO 9001:2008

Encargado Control de Calidad
 Industrias Ulmen S.A.



www.ulmen.cl

ulmen@ulmen.cl



HOJA DE SEGURIDAD

W-73

Fecha de Emisión: Feb 17,15
 Revisión:
 Fecha de Revisión:
 Pagina 1 de 2

SECCION 1: IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y DEL PROVEEDOR

Nombre del producto : W-73
 Código del producto : 711-06
 Clasificación : Aditivo para Hormigón
 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 Emergencia :



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 polímeros y nano sílice en solución
 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 de inmediato 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
 Proced 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



HOJA DE SEGURIDAD

W-73

Fecha de Emisión: Feb 17,15
 Revisión:
 Fecha de Revisión:
 Pagina 2 de 2

SECCION 9: PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

| | | |
|------------------------------------|---|---|
| Estado físico | : | Líquido |
| Color | : | beige transparente |
| Olor | : | Característico |
| pH | : | 6 ± 1 |
| Densidad a 20° C | : | 1,050 ± 0,02 (g/mL) |
| Viscosidad (Copa Ford N°4) | : | 14 ± 2 (seg) |
| Sólidos | : | 20 ± 3 (%) |
| 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

| | | |
|--------------|---|---|
| Ley N° 28256 | : | No aplica |
| Código NFPA | : | Salud: 1/ Inflam: 0/ React: 0/ Riesgo Especial: 0 |
| N° UN | : | No clasificado |

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.

www.cognoscibletechnologies.com

www.ulmen.cl

atencionalcliente@ulmen.cl

ANEXO 02
PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 59. Recolección de la puzolana natural de la cantera Raqchi. Fuente. Elaboración propia.



Figura 60. Tamizado, trituración y secado de la puzolana natural de la cantera Raqchi. Fuente. Elaboración propia.



Figura 61. Muestra final de puzolana natural de la cantera Raqchi (Cuzco). Fuente. Elaboración propia.



Figura 62. Caracterización del agregado fino convencional (arena gruesa). Fuente. Elaboración propia.



Figura 63. Caracterización del agregado grueso. Fuente. Elaboración propia



Figura 64. Caracterización del agregado fino ligero (puzolana natural). Fuente. Elaboración propia.



Figura 65. Elaboración de probetas de plástico cumpliendo las normativas correspondientes. Fuente. Elaboración propia



Figura 66. Elaboración de los diseños de mezcla del concreto. Fuente. Elaboración propia.



Figura 67. Conformación de probetas y vigas de concreto. Fuente. Elaboración propia.



Figura 68. Desencofrado y curado de probetas y vigas de concreto. Fuente. Elaboración propia.



Figura 69. A la izquierda, asentamiento del C.E.L N°01 y a la derecha el asentamiento de su diseño de control.
Fuente. Elaboración propia.



Figura 70. A la izquierda, asentamiento del C.E.L N° 02 y a la derecha el asentamiento de su diseño de control.
Fuente. Elaboración propia.



Figura 71. A la izquierda, temperatura del diseño N°01 de C.E.L y a la derecha de su diseño de control. Fuente. Elaboración propia.



Figura 72. A la izquierda, temperatura del diseño N°02 de C.E.L y a la derecha de su diseño de control. Fuente. Elaboración propia.

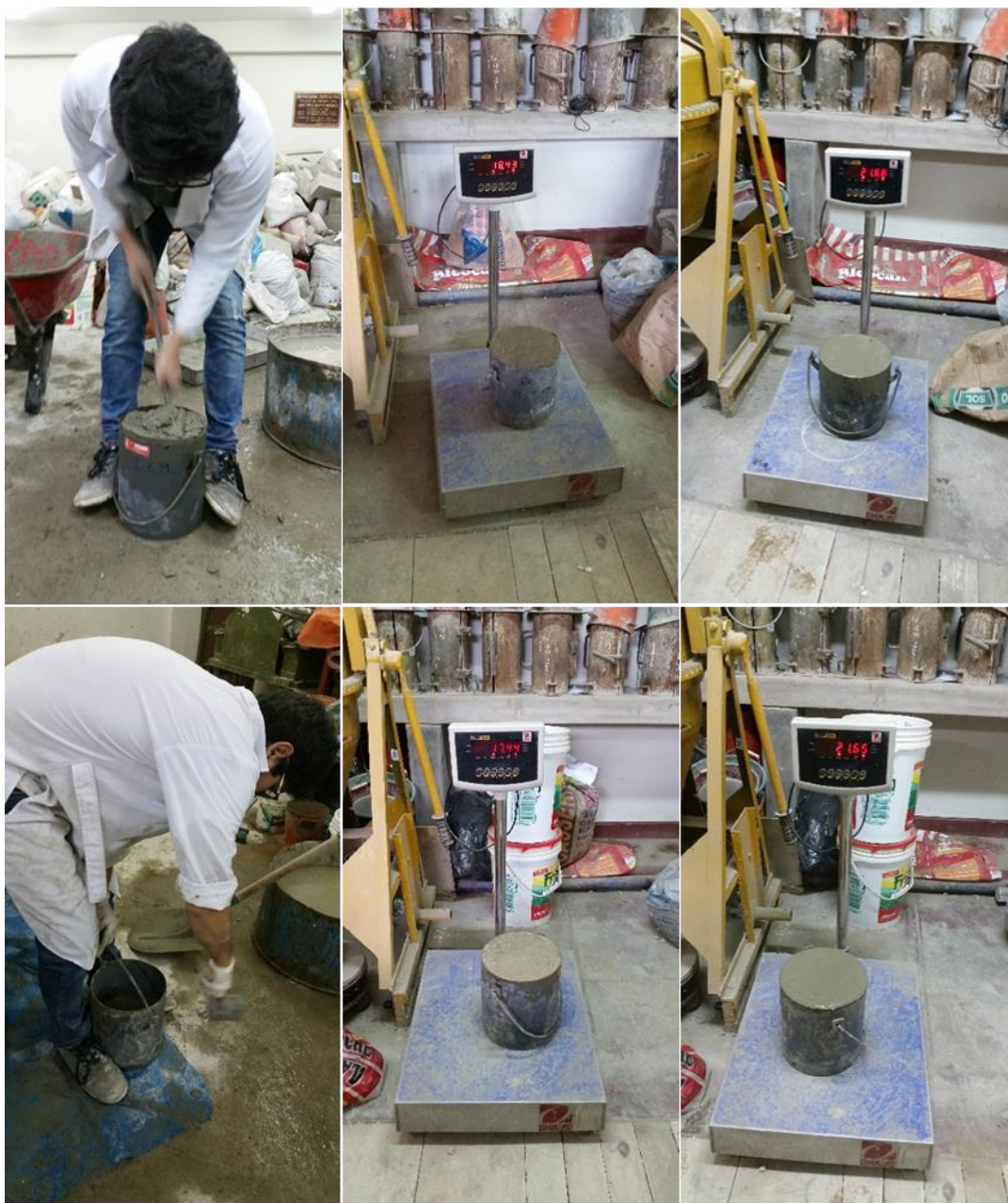


Figura 73. Peso Unitario del concreto. Fuente. Elaboración propia.



Figura 74. Resistencia a la compresión del concreto. Fuente. Elaboración propia.



Figura 75. Rotura de probetas del concreto. Fuente. Elaboración propia.



Figura 76. Resistencia a la tracción indirecta de los diseños de mezcla. Fuente. Elaboración propia.



Figura 77. Probetas ensayadas a la resistencia a la tracción indirecta, se observa homogeneidad en las mezclas. Fuente. Elaboración propia.



Figura 78. Resistencia a la flexión de los diseños realizados. Fuente. Elaboración propia.



Figura 79. Densidad en estado seco y en equilibrio de los diseños realizados. Fuente. Elaboración propia.

ANEXO 03
FICHAS DE LABORATORIO

- **Formato de granulometría del agregado fino (Arena natural)**

| GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO DE PESO NORMAL | | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------|----------------|--------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) QUE PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1/2" | 12.700 | | | | | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | | | | | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | | | | | 100 | 95 |
| N° 8 | 2.36 | | | | | 100 | 80 |
| N° 16 | 1.18 | | | | | 85 | 50 |
| N° 30 | 0.59 | | | | | 60 | 25 |
| N° 50 | 0.297 | | | | | 30 | 5 |
| N° 100 | 0.149 | | | | | 10 | 0 |
| FONDO | 0.000 | | | | | | |
| | SUMA | | | | | | |

MF= 0.00

- **Formato de granulometría del agregado grueso**

| GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO | | | | | | HUSO: | 6 |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 2" | 50.800 | | | | | 100 | 100 |
| 1 1/2" | 38.1 | | | | | 100 | 100 |
| 1" | 25.4 | | | | | 100 | 100 |
| 3/4" | 19.05 | | | | | 100 | 90 |
| 1/2" | 12.700 | | | | | 55 | 20 |
| 3/8" | 9.525 | | | | | 15 | 0 |
| N° 4 | 4.75 | | | | | 5 | 0 |
| N° 8 | 2.36 | | | | | 0 | 0 |
| N° 16 | 1.18 | | | | | 0 | 0 |
| N° 30 | 0.59 | | | | | 0 | 0 |
| N° 50 | 0.297 | | | | | 0 | 0 |
| N° 100 | 0.149 | | | | | 0 | 0 |
| FONDO | 0.000 | | | | | | |
| | SUMA | | | | | | |

MF=

- **Formato de granulometría del agregado fino ligero (Puzolana natural)**

| GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO FINO LIGERO | | | | | | | |
|--|--------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIÁMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MÍNIMO | MÁXIMO |
| 1/2" | 12.700 | | | | | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | | | | | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | | | | | 100 | 85 |
| N° 16 | 1.18 | | | | | 80 | 40 |
| N° 50 | 0.297 | | | | | 35 | 10 |
| N° 100 | 0.149 | | | | | 25 | 5 |
| FONDO | 0.000 | | | | | | |
| | SUMA | | | | | | |

| | |
|-----|--|
| MF= | |
|-----|--|

- **Formato de material que pasa la malla N° 200 del agregado fino (Arena natural)**

| | |
|------------------------------------|--|
| (D) Peso de la tara(gr) | |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | |
| % pasante de M#200=(E-F)*100/(E-D) | |
| <5% | |

- **Formato de material que pasa la malla N° 200 del agregado grueso**

| | |
|------------------------------------|--|
| (D) Peso de la tara(gr) | |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | |
| % pasante de M#200=(E-F)*100/(E-D) | |
| <1% | |

- **Formato de material que pasa la malla N° 200 del agregado fino ligero (Puzolana natural)**

| | |
|------------------------------------|--|
| (D) Peso de la tara(gr) | |
| (E) Peso de muestra seca (gr) | |
| (F) Peso de la muestra lavada (gr) | |
| % pasante de M#200=(E-F)*100/(E-D) | |

- **Formato de contenido de humedad del agregado fino (Arena natural), agregado grueso y agregado fino ligero (puzolana natural)**

| | |
|--|--|
| (A) Peso de la tara(gr) | |
| (B) Peso de muestra Original húmeda (gr) | |
| (C) Peso de muestra seca (gr) | |
| % Humedad =(B-C)*100/(C-A) | |

- Formato de peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino (Arena natural)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|--------|
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | S | | | |
| PESO DE LA FIOLA LLENADO DE AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | B | | | |
| PESO DE LA FIOLA LLENO DE LA MUESTRA Y EL AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | C | | | |
| PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO | A | | | |

| 1. PESO ESPECÍFICO DE LA MASA | | $\left(\frac{A}{B+S-C}\right)$ |
|-------------------------------|--|--------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 2. P. ESPECÍFICO DE LA MASA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECO | | $\left(\frac{S}{B+S-C}\right)$ |
|--|--|--------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 3. PESO ESPECÍFICO APARENTE | | $\left(\frac{A}{B+A-C}\right)$ |
|-----------------------------|--|--------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 4. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN | | $\left(\frac{S-A}{A}\right) \times 100$ |
|----------------------------|--|---|
| M1 | | % |
| | | % |
| M2 | | % |
| | | % |
| PROMEDIO | | % |

- Peso específico y porcentaje de absorción del agregado grueso

| DESCRIPCIÓN | SIMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|--------|
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | B | | | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA DENTRO DEL AGUA+CANASTILLA | | | | gr |
| PESO DE LA CANASTILLA DENTRO DEL AGUA | | | | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA DENTRO DEL AGUA | C | | | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SECA | A | | | gr |

| 1. PESO ESPECÍFICO DE LA MASA | | $\left(\frac{A}{B-C}\right)$ |
|-------------------------------|--|------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 2. P. ESPECÍFICO DE LA MASA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | | $\left(\frac{B}{B-C}\right)$ |
|--|--|------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 3. PESO ESPECÍFICO APARENTE | | $\left(\frac{A}{A-C}\right)$ |
|-----------------------------|--|------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 4. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN | | $\left(\frac{B-A}{A}\right) \times 100$ |
|----------------------------|--|---|
| M1 | | % |
| M2 | | % |
| PROMEDIO | | % |

- **Formato de peso específico y porcentaje de absorción del agregado fino ligero (puzolana natural)**

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | UNIDAD |
|--|---------|-----------|-----------|--------|
| PESO DE LA MUESTRA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA | S | | | gr |
| PESO DE LA FIOLA LLENADO DE AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | B | | | gr |
| PESO DE LA FIOLA LLENO DE LA MUESTRA Y EL AGUA HASTA LA MARCA DE CALIBRACIÓN | C | | | gr |
| PESO DE LA MUESTRA SECA AL HORNO | A | | | gr |

| 1. PESO ESPECÍFICO DE LA MASA | | $\left(\frac{A}{B+S-C}\right)$ | 2. P. ESPECÍFICO DE LA MASA SATURADA SUPERFICIALMENTE SECO | | $\left(\frac{S}{B+S-C}\right)$ |
|-------------------------------|--|--------------------------------|--|--|--------------------------------|
| M1 | | g/cm ³ | M1 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ | | | g/cm ³ |
| M2 | | g/cm ³ | M2 | | g/cm ³ |
| | | g/cm ³ | | | g/cm ³ |
| PROMEDIO | | g/cm ³ | PROMEDIO | | g/cm ³ |

| 3. PESO ESPECÍFICO APARENTE | | $\left(\frac{A}{B+A-C}\right)$ | 4. PORCENTAJE DE ABSORCIÓN | | $\left(\frac{S-A}{A}\right) \times 100$ |
|-----------------------------|--|--------------------------------|----------------------------|--|---|
| M1 | | g/cm ³ | M1 | | % |
| | | g/cm ³ | | | % |
| M2 | | g/cm ³ | M2 | | % |
| | | g/cm ³ | | | % |
| PROMEDIO | | g/cm ³ | PROMEDIO | | % |

- **Formato de peso unitario del agregado fino (arena gruesa), agregado grueso y del agregado fino ligero (puzolana natural).**

PESO UNITARIO SUELTO (PUS = f x W_s)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|----------------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA + RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA SUELTA | W _s | | | | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DEL AGUA | W _a | | | | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | | | | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO SUELTO | PUS | | | | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | | | | Kg/m ³ |

PESO UNITARIO COMPACTADO (f x W_c)

| DESCRIPCIÓN | SÍMBOLO | MUESTRA 1 | MUESTRA 2 | MUESTRA 03 | UNIDAD |
|--|----------------|-----------|-----------|------------|-------------------|
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA + RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DEL RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DE LA MUESTRA COMPACTADA | W _c | | | | Kg |
| PESO DEL AGUA + RECIPIENTE | | | | | Kg |
| PESO DEL AGUA | W _a | | | | Kg |
| PESO DE CALIBRACIÓN DEL RECIPIENTE | f | | | | m ⁻³ |
| PESO UNITARIO COMPACTADO | PUC | | | | Kg/m ³ |
| PROMEDIO | | | | | Kg/m ³ |

- Formato de diseño de mezclas

| UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL | | | | | | | | | | | |
|---|-------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------|--|----------------------|
| DISEÑO N° | | | | | | | | | | | |
| CÓDIGO DE MEZCLA | | : | | | <input type="text"/> | | | FECHA | | : | <input type="text"/> |
| DISEÑO | | : | | | <input type="text"/> | | | HECHO POR | | : | <input type="text"/> |
| PROCEDENCIA AGR. | | : | | | <input type="text"/> | | | | | | |
| Relación A/C | | <input type="text"/> | | | Volumen de prueba(m3) | | | <input type="text"/> | | | |
| Relación AF-AG | | <input type="text"/> | | | | | | | | | |
| Diseño Base | | <input type="text"/> | | | | | | | | | |
| CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y DE LA MEZCLA DE PRUEBA | | | | | | | | | | | |
| M.F. Arena | | <input type="text"/> | | | Vol. Agregados | | <input type="text"/> | | | Contenido de cemento <input type="text"/> kg | |
| M.F. Piedra # 6 | | <input type="text"/> | | | Arena | | <input type="text"/> | | | | |
| Puzolana | | <input type="text"/> | | | Piedra #6 | | <input type="text"/> | | | | |
| M.F. Global | | <input type="text"/> | | | Puzolana | | <input type="text"/> | | | | |
| DOSIFICACIÓN | | | | | | | | | | | |
| ADITIVO | | <input type="text"/> | | | % | | | | | | |
| MATERIALES | | PROCEDENCIA | P.ESP kg/m3 | HUM. % | ABS. % | PESO SECO kg/m3 | VOL. | CORRECCIÓN POR HUMEDAD | TANDA DE PRUEBA | | |
| | | | | | | | | | DOSIFICACIÓN | UNIDAD | |
| Cemento Tipo I | | | | | | | | | | | |
| Agua | | | | | | | | | | | |
| Arena | | | | | | | | | | | |
| Puzolana | | | | | | | | | | | |
| Piedra #6 | | | | | | | | | | | |
| Aditivo | | | | | | | | | | | |
| Aire | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | MODIFICACIONES | | | |
| | | | | | | | | A/C inicial | | <input type="text"/> | |
| | | | | | | | | Adición de Aditivo | | <input type="text"/> | |
| CONCRETO EN ESTADO FRESCO | | | | | | | | | | | |
| Temperatura | | SLUMP(pulg) | CONTENIDO DE AIRE (%) | P.U. TEÓRICO (kg/m3) | P.U. REAL (kg/m3) | RENDIMIENTO | MUESTREO | | | | |
| Amb. | Conc. | | | | | | N° DE PROBETAS | | | | |
| | | | | | | | N° DE VIGAS | | | | |
| OBSERVACIONES | | | | | | OTROS ENSAYOS | | | | | |
| Segregación? | | <input type="text"/> | | | | <input type="text"/> | | <input type="text"/> | | | |
| Efervecencia? | | <input type="text"/> | | | | <input type="text"/> | | <input type="text"/> | | | |
| Exudación excesiva? | | <input type="text"/> | | | | <input type="text"/> | | <input type="text"/> | | | |
| Apariencia | | <input type="text"/> | | | | <input type="text"/> | | <input type="text"/> | | | |
| Se muestrearon | | <input type="text"/> | | | | <input type="text"/> | | <input type="text"/> | | | |
| Otros | | <input type="text"/> | | | | <input type="text"/> | | <input type="text"/> | | | |
| NOTA: | | | | | | | | | | | |

- **Formato de asentamiento del concreto**

| ASENTAMIENTO | Ensayo 01 | Ensayo 02 | Variación | Promedio |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|----------|
| | pulg. | pulg. | | pulg. |
| Diseño N°01 de C.E.L | | | | |
| Diseño N°01 Patrón | | | | |
| Diseño N°02 de C.E.L | | | | |
| Diseño N°02 Patrón | | | | |

- **Formato de temperatura del concreto**

| TEMPERATURA DEL CONCRETO | TEMPERATURA °C | | | | Gradiente Térmico °C |
|--------------------------|----------------|--|----------|--|----------------------|
| | Ambiente | | Concreto | | |
| Diseño N°01 de C.E.L | | | | | |
| Diseño N°01 Patrón | | | | | |
| Diseño N°02 de C.E.L | | | | | |
| Diseño N°02 Patrón | | | | | |

- **Formato de peso unitario y rendimiento del concreto**

| PESO UNITARIO DEL CONCRETO | Peso unitario kg/m ³ | | |
|----------------------------|---------------------------------|---------|-------------|
| | Real | Teórico | Rendimiento |
| Diseño N°01 de C.E.L | | | |
| Diseño N°01 Patrón | | | |
| Diseño N°02 de C.E.L | | | |
| Diseño N°02 Patrón | | | |

- **Formato de resistencia a la compresión del concreto**

| Diseño | Muestra | Diámetro N°01 (mm) | Diámetro N°02 (mm) | Diámetro promedio (mm) | Área (cm ²) | Fuerza (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|--------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-----------------------------------|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | |
| | M3 | | | | | | | |
| Diseño N°01 Patrón | M1 | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | |
| | M3 | | | | | | | |
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | |
| | M3 | | | | | | | |
| Diseño N°02 Patrón | M1 | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | |
| | M3 | | | | | | | |

- **Formato de resistencia a la flexión del concreto**

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°01 de C.E.L | M1 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|--------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°01 Patrón | M1 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|----------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°02 de C.E.L | M1 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

| Diseño | Muestra | Ancho (b) (mm) | Ancho (b) promedio (mm) | Espesor (d) (mm) | Espesor (d) promedio (mm) | Long. Entre apoyos en mm | Fuerza (lb) | Fuerza (kg) | Resistencia a la flexión (Kg/cm ²) | Resistencia promedio (Kg/cm ²) |
|--------------------|---------|----------------|-------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|-------------|-------------|--|--|
| Diseño N°02 Patrón | M1 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | M2 | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | |

- **Formato de densidad en estado seco y de equilibrio del concreto**

| DESCRIPCIÓN | M1 | M2 | M3 | Unidad |
|---|----|----|----|-------------------|
| Densidad del concreto Fresco | | | | kg/m ³ |
| Masa aparente del cilindro suspendido sumergido (G) | | | | kg |
| Masa del cilindro saturado con superficie seca(F) | | | | kg |
| Masa del Cilindro Seca al Horno(D) | | | | kg |
| Densidad Seca al Horno(Om) | | | | kg/m ³ |
| Densidad en estado seco promedio | | | | kg/m ³ |
| Densidad de Equilibrio Calculada(Ec) | | | | kg/m ³ |
| Densidad en equilibrio promedio | | | | kg/m ³ |

ANEXO 04
CERTIFICADOS DE CALIBRACIÓN



CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CMC-147-2015

Peticionario : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Atención : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Lugar de Calibración : Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos - Jr. Yungay N° 206
Magdalena del Mar - Lima

Tipo de equipo : Maquina de Compresión Axial Hidráulica - Manual

Capacidad del equipo : 1,112 kN (250,000 lbf. ó 113 TN)

División de escala : 2 kN (500 lbf)

Marca : ELE - INTERNATIONAL

Modelo : CT-710A

N° de serie : 6738

Código UNFV : 45036

Tipo de dial indicador : Analógico tipo reloj modelo CT-728D con N° de serie 1903

Procedencia : USA

Método de Calibración : ASTM E-4 "Standard Practices for Force Verification of Testing Machines"

Temp.(°C) y H.R.(%) Inicial : 23,3°C / 83%

Temp.(°C) y H.R.(%) Final : 23,3°C / 81%

Patrón de Referencia : Trazabilidad NIST (United States National Institute of Standards & Technology), patrón utilizado Morehouse, N° de serie C-8294, clase A, calibrado de acuerdo a la norma ASTM E74-13a, certificado de calibración reporte N° C-8294F1314

Número de páginas : 2

Fecha de Calibración : 2015-12-23

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido sin modificaciones y en su totalidad.
Las modificaciones y extractos del certificado necesitan autorización de CELDA EIRL.
El presente certificado sin firmas y sellos carece de validez.

| Sello | Fecha | Hecho por | Revisado por |
|---|------------|---|--|
|  | 2015-12-28 |  Vladimir Tello Torres <small>TÉCNICO DE LABORATORIO</small> |  JORGE FRANCISCO RAMIREZ JAPAJA INGENIERO CIVIL <small>Reg. del CIP N° 84286</small> |

CMC-147-2015

Página 1 de 2



Resultados de Medición

Dirección de Carga : Compresión

| Indicación de fuerza de la máquina de ensayo | | Indicación de fuerza en la celda patrón | | | Promedio | Error | Incertidumbre K=2 |
|--|-------|---|------------|------------|----------|-------|-------------------|
| (%) | (kN) | 1° ascenso | 2° ascenso | 3° ascenso | | | |
| 0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,1 |
| 9 | 100,0 | 101,6 | 101,4 | 101,8 | 101,6 | -1,6 | 0,2 |
| 18 | 200,0 | 201,0 | 202,0 | 200,7 | 201,2 | -0,6 | 0,1 |
| 27 | 300,0 | 301,8 | 303,3 | 301,5 | 302,2 | -0,7 | 0,1 |
| 36 | 400,0 | 403,7 | 403,1 | 403,0 | 403,2 | -0,8 | 0,1 |
| 45 | 500,0 | 501,7 | 502,4 | 501,8 | 502,0 | -0,4 | 0,1 |
| 54 | 600,0 | 601,3 | 601,1 | 601,1 | 601,1 | -0,2 | 0,1 |
| 63 | 700,0 | 699,5 | 698,9 | 699,6 | 699,3 | 0,1 | 0,1 |
| 72 | 800,0 | 799,7 | 796,7 | 799,4 | 798,6 | 0,2 | 0,1 |
| 81 | 900,0 | 898,4 | 897,3 | 898,7 | 898,1 | 0,2 | 0,1 |

Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la Incertidumbre Expandida de medición, que resulta de multiplicar la Incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$ y ha sido determinada de acuerdo a la "Guía para la expresión de la Incertidumbre en la medición".

Notas

El usuario esta obligado a tener el equipo calibrado en intervalos apropiados de tiempo de acuerdo al uso, mantenimiento y conservación que este expuesto.

El equipo se encuentra calibrado.





CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CCB-210-2015

Peticionario : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Atención : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Lugar de calibración : Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos - Jr. Yungay N° 206
Magdalena del Mar - Lima

Instrumento de medición : Balanza de funcionamiento no automático

Marca : ADAM Clase : III

Número de serie : AE607147 Tipo : Digital

Código UNFV : 091139 Procedencia : China

Capacidad máxima : 16000 g Modelo : CBK35A

División de escala (d) : 0.5 g

División de verificación (e) : 5.0 g

Método de calibración : Procedimiento de calibración de balanzas de funcionamiento no
automático clase III y clase IIII - PC 001 - Indecopi - tercera edición

Temp.(°C) y H.R.(%) inicial : 23,9°C / 86%

Temp.(°C) y H.R.(%) final : 23,9°C / 86%

Patrones de referencia : Trazabilidad INDECOPI , 01 jgo. de pesas Mettler Toledo clase OIML F1 de 1 g
a 500g con certificado de calib. N° LM-C-507-2014, 01 pesas Mettler Toledo
clase OIML F1 de 1 kg con certificado de calib. N° LM-C-497-2014, 02 pesas
Mettler Toledo clase OIML F1 de 2 kg con certificados de calib. N° LM-1007-2014,
LM-1008-2014, 01 pesa Mettler Toledo clase OIML F1 de 5 kg con certificado de
calib. N° LM-1011-2014 y 02 pesas Mettler Toledo clase OIML F1 de 10 Kg con
certificados de calibración N° LM-1010-2014 y LM-1009-2014.

Número de páginas : 3

Fecha de calibración : 2015-12-23

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido sin modificaciones y en su totalidad.
Las modificaciones y extractos del certificado necesitan autorización de CELDA EIRL.
El presente certificado sin firmas y sellos carece de validez.

| Sello | Fecha | Hecho por | Revisado por |
|---|------------|--|---|
|  | 2015-12-28 |  Vladimir Tello Torre TÉCNICO DE LABORATORIO |   JORGE FRANCISCO RAMIREZ JARAMA INGENIERO CIVIL Reg. del CIP. N° 84286 |

CCB-210-2015

Página 1 de 3



CELDA EIRL

RESULTADOS DE MEDICIÓN

INSPECCIÓN VISUAL

| | |
|------------------|----|
| Ajuste a cero | Si |
| Oscilación Libre | Si |
| Plataforma | Si |
| Sistema de Traba | No |

| | |
|------------|----|
| Escala | No |
| Cursor | No |
| Nivelación | Si |

ENSAYO DE REPETIBILIDAD

| | | | | | |
|---------|---------|-------|-----------|---------|-------|
| T. (°C) | Inicial | Final | H. R. (%) | Inicial | Final |
| | 23,9 | 23,9 | | 86 | 86 |

| Medición N° | Carga L1 = 8000 g | | | Carga L2 = 16000 g | | |
|----------------|-------------------|--------|-------|--------------------|--------|-------|
| | I (g) | ΔL (g) | E (g) | I (g) | ΔL (g) | E (g) |
| 1 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 2 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 3 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 4 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 5 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 6 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 7 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 8 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 9 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |
| 10 | 7999,5 | 0,00 | 2,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 |

$$E = I + \frac{1}{2} e - \Delta L - L$$

ENSAYO DE EXCENTRICIDAD

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|---|------|------|----|----|----|------------------------|---------|---------|-------|-----------|---------|-------|
| <table border="1"> <tr><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td>4</td></tr> </table> | 2 | 1 | 3 | 5 | | 4 | Posición de las cargas | T. (°C) | Inicial | Final | H. R. (%) | Inicial | Final |
| 2 | 1 | 3 | | | | | | | | | | | |
| 5 | | 4 | | | | | | | | | | | |
| | | 23,9 | 23,9 | 86 | 86 | 86 | 86 | | | | | | |

| Posición de carga | carga en cero* (g) | Determinación de Eo | | | Determinación del error corregido Ec | | | | |
|-------------------|--------------------|---------------------|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|-------|--------|
| | | I (g) | ΔL (g) | Eo (g) | Carga L (g) | I (g) | ΔL (g) | E (g) | Ec (g) |
| 1 | 50 | 50 | 0,00 | 2,50 | 5000 | 4999,5 | 0,00 | 2,00 | -0,50 |
| 2 | 50 | 50 | 0,00 | 2,50 | 5000 | 5000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 |
| 3 | 50 | 50 | 0,00 | 2,50 | 5000 | 5000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 |
| 4 | 50 | 50 | 0,00 | 2,50 | 5000 | 5000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 |
| 5 | 50 | 50 | 0,00 | 2,50 | 5000 | 4999,5 | 0,00 | 2,00 | -0,50 |

* valor entre 0 y 10e

$$E = I + \frac{1}{2} e - \Delta L - L$$

$$E_c = E - E_o$$





ENSAYO DE PESAJE

| | Inicial | Final |
|---------|---------|-------|
| T. (°C) | 23,9 | 23,9 |

| | Inicial | Final |
|-----------|---------|-------|
| H. R. (%) | 86 | 86 |

| Carga L (g) | Crecientes | | | | Decrecientes | | | | E.M.P.* (g) |
|----------------|------------|----------------|-------|--------|--------------|----------------|-------|--------|----------------|
| | I (g) | ΔL (g) | E (g) | Ec (g) | I (g) | ΔL (g) | E (g) | Ec (g) | |
| 50,0 | 50,0 | 0,00 | 2,50 | (*) | | | | | |
| 100,0 | 100,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 100,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 5,00 |
| 200,0 | 200,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 200,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 5,00 |
| 500,0 | 500,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 500,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 5,00 |
| 1000,0 | 1000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 1000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 5,00 |
| 2000,0 | 2000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 2000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 10,00 |
| 5000,0 | 5000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 5000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 10,00 |
| 10000,0 | 9999,5 | 0,00 | 2,00 | -0,50 | 10000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 10,00 |
| 12000,0 | 12000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 12000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 15,00 |
| 16000,0 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 16000,0 | 0,00 | 2,50 | 0,00 | 15,00 |

(*) Carga para determinar Eo

$$E = I + \frac{1}{2} e - \Delta L - L$$

$$Ec = E - Eo$$

E.M.P.* = Error máximo permisible

| INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN | $U = 0.0028g + (0.000055)I$ |
|------------------------------|-----------------------------|
|------------------------------|-----------------------------|

I = Indicación de la balanza
Eo = Error en ceroE = Error de la balanza
Ec = Error corregido**Incertidumbre**

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la Incertidumbre Expandida de medición, que resulta de multiplicar la Incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$ y ha sido determinada de acuerdo a la "Guía para la expresión de la Incertidumbre en la medición".

Notas

El usuario esta obligado a tener el equipo calibrado en intervalos apropiados de tiempo de acuerdo al uso, mantenimiento y conservación al que este expuesto.





CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CCB-208-2015

Peticionario : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Atención : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Lugar de calibración : Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos - Jr. Yungay N° 206
Magdalena del Mar - Lima

Instrumento de medición : Balanza de funcionamiento no automático

Marca : AND Clase : III

Número de serie : P1837705 Tipo : Electrónica

Código UNFV : 076536 Modelo : EK-6100i

Capacidad máxima : 6000 g Procedencia : Japón

División de escala (d) : 0,1 g

División de verificación (e) : 1,0 g

Método de calibración : Procedimiento de calibración de balanzas de funcionamiento no automático clase III y clase IIII - PC 001 - Indecopi - tercera edición

Temp.(°C) y H.R.(%) inicial : 23,6 °C / 85%

Temp.(°C) y H.R.(%) final : 23,6 °C / 85%

Patrones de referencia : Trazabilidad INDECOPÍ , 01 jgo. de pesas Mettler Toledo clase OIML F1 de 1 g a 500g con certificado de calib. N° LM-C-507-2014, 01 pesas Mettler Toledo clase OIML F1 de 1 kg con certificado de calib. N° LM-C-497-2014, 02 pesas Mettler Toledo clase OIML F1 de 2 kg con certificados de calib. N° LM-1007-2014, LM-1008-2014, 01 pesa Mettler Toledo clase OIML F1 de 5 kg con certificado de calib. N° LM-1011-2014

Número de páginas : 3

Fecha de calibración : 2015-12-23

Este certificado de calibración sólo puede ser difundido sin modificaciones y en su totalidad.
Las modificaciones y extractos del certificado necesitan autorización de CELDA EIRL.
El presente certificado sin firmas y sellos carece de validez.

| Sello | Fecha | Hecho por | Revisado por |
|---|------------|--|--|
|  | 2015-12-28 |  Vladimir Tello Torre TÉCNICO DE LABORATORIO |   INGENIERO CIVIL Reg. del CIP N° 84286 |

CCB-208-2015

Página 1 de 3



RESULTADOS DE MEDICIÓN

INSPECCIÓN VISUAL

| | |
|------------------|----|
| Ajuste a cero | Si |
| Oscilación Libre | Si |
| Plataforma | Si |
| Sistema de Traba | No |

| | |
|------------|----|
| Escala | No |
| Cursor | No |
| Nivelación | Si |

ENSAYO DE REPETIBILIDAD

| | | | | | |
|---------|---------|-------|-----------|---------|-------|
| T. (°C) | Inicial | Final | H. R. (%) | Inicial | Final |
| | 23,6 | 23,6 | | 85 | 85 |

| Medición N° | Carga L1 = 3000 g | | | Carga L2 = 6000 g | | |
|----------------|-------------------|--------|-------|-------------------|--------|-------|
| | l (g) | ΔL (g) | E (g) | l (g) | ΔL (g) | E (g) |
| 1 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 2 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 3 | 3000,1 | 0,05 | 0,5 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 4 | 3000,1 | 0,05 | 0,5 | 5999,8 | 0,08 | 0,2 |
| 5 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 6 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,8 | 0,08 | 0,2 |
| 7 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 8 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 9 | 3000,1 | 0,05 | 0,5 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |
| 10 | 3000,0 | 0,05 | 0,4 | 5999,9 | 0,08 | 0,3 |

$$E = l + \frac{1}{2} e - \Delta L - L$$

ENSAYO DE EXCENTRICIDAD

| | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|----|----|---|--|---|------------------------|---------|---------|-------|-----------|---------|-------|
| <table border="1"> <tr><td>2</td><td>1</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td>4</td></tr> </table> | 2 | 1 | 3 | 5 | | 4 | Posición de las cargas | T. (°C) | Inicial | Final | H. R. (%) | Inicial | Final |
| | 2 | 1 | 3 | | | | | | | | | | |
| 5 | | 4 | | | | | | | | | | | |
| 23,7 | 23,7 | 84 | 84 | | | | | | | | | | |

| Posición de carga | Determinación de Eo | | | | Determinación del error corregido Ec | | | | |
|-------------------|---------------------|-------|--------|--------|--------------------------------------|--------|--------|-------|--------|
| | carga en cero* (g) | l (g) | ΔL (g) | Eo (g) | Carga L (g) | l (g) | ΔL (g) | E (g) | Ec (g) |
| 1 | 1,0 | 1,0 | 0,03 | 0,47 | 2000,0 | 2000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 |
| 2 | 1,0 | 1,0 | 0,03 | 0,47 | 2000,0 | 2000,1 | 0,05 | 0,55 | 0,08 |
| 3 | 1,0 | 1,0 | 0,03 | 0,47 | 2000,0 | 2000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 |
| 4 | 1,0 | 1,0 | 0,03 | 0,47 | 2000,0 | 2000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 |
| 5 | 1,0 | 1,0 | 0,03 | 0,47 | 2000,0 | 2000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 |

* valor entre 0 y 10e

$$E = l + \frac{1}{2} e - \Delta L - L$$

$$E_c = E - E_o$$





ENSAYO DE PESAJE

| | | | | | |
|---------|---------|-------|-----------|---------|-------|
| T. (°C) | Inicial | Final | H. R. (%) | Inicial | Final |
| | 23,6 | 23,6 | | 85 | 85 |

| Carga L (g) | Crecientes | | | | Decrecientes | | | | E.M.P.* (g) |
|----------------|------------|----------------|-------|--------|--------------|----------------|-------|--------|----------------|
| | I (g) | ΔL (g) | E (g) | Ec (g) | I (g) | ΔL (g) | E (g) | Ec (g) | |
| 1,0 | 1,0 | 0,03 | 0,47 | (*) | | | | | |
| 50,0 | 50,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 50,0 | 0,03 | 0,47 | 0,00 | 1,0 |
| 100,0 | 100,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 100,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 1,0 |
| 200,0 | 200,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 200,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 1,0 |
| 500,0 | 500,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 500,0 | 0,04 | 0,46 | -0,01 | 1,0 |
| 1000,0 | 1000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 | 1000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 | 2,0 |
| 1500,0 | 1500,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 | 1500,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 | 2,0 |
| 2000,0 | 2000,0 | 0,05 | 0,45 | -0,02 | 2000,0 | 0,06 | 0,44 | -0,03 | 2,0 |
| 3000,0 | 3000,0 | 0,06 | 0,44 | -0,03 | 3000,0 | 0,07 | 0,43 | -0,04 | 3,0 |
| 4000,0 | 4000,0 | 0,07 | 0,43 | -0,04 | 4000,0 | 0,07 | 0,43 | -0,04 | 3,0 |
| 6000,0 | 5999,9 | 0,08 | 0,32 | -0,15 | 5999,9 | 0,08 | 0,32 | -0,15 | 3,0 |

(*) Carga para determinar Eo

$$E = I + \frac{1}{2} e - \Delta L - L$$

$$E_c = E - E_o$$

E.M.P.* = Error máximo permisible

| | |
|------------------------------|-----------------------------|
| INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN | $U = 0,0039g + (0,000015)I$ |
|------------------------------|-----------------------------|

I = Indicación de la balanza

E = Error de la balanza

Eo = Error en cero

Ec = Error corregido

Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la Incertidumbre Expandida de medición, que resulta de multiplicar la Incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$ y ha sido determinada de acuerdo a la "Guía para la expresión de la Incertidumbre en la medición".

Notas

El usuario está obligado a tener el equipo calibrado en intervalos apropiados de tiempo de acuerdo al uso, mantenimiento y conservación al que este expuesto.





**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CMC-053-2011**

Peticionario : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Atención : Ing. Omar Tello Malpartida

Lugar de calibración : Laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos - Jr. Diego de Agüero
N° 206 - Magdalena del Mar - Lima

Tipo de equipo : Maquina de compresión axial eléctrico-hidráulica digital

Capacidad del equipo : 1,555 kN (350,000 lbf. ó 159 TN)

División de escala : 0,1 kN

Marca : ELE - INTERNATIONAL

Modelo : 36-3086/06 Código UNFV : 75123

N° de serie del equipo : 51100000001

Panel digital : ADR ELE-INTERNATIONAL

N° de serie panel digital : 1886-1-2082

Procedencia : USA

Método de calibración : ASTM E-4 "Standard Practices for Force Verification of Testing Machines"

Temp.(°C) y H.R.(%) Inicial : 19°C / 76%

Temp.(°C) y H.R.(%) Final : 19°C / 77%

Patrón de referencia : Trazabilidad Deutscher Kalibrierdienst DKD - Alemania
Patrón utilizado HBM C18/3MN, ML30B, AB22A clase 0.5, certificado de calibración 27700 DKD-K-00101 con fecha 2011-02-04

Numero de paginas : 2

Fecha de calibración : 2011-10-12

Este certificado de verificación sólo puede ser difundido sin modificaciones y en su totalidad.
Las modificaciones y extractos del certificado necesitan autorización de CELDA EIRL.
El presente certificado sin firmas y sellos carece de validez.

| Sello | Fecha | Hecho por | Revisado por |
|---|------------|---|---|
|  | 2011-10-13 |  Vladimir Tello Torre TÉCNICO DE LABORATORIO |  JOSEPH ARNALDO RUMICHE ORMENO INGENIERO CIVIL Reg. CIP N° 89945 |

CMC-053-2011

Página 1 de 2



Resultados de Medición

Dirección de carga : Compresión

| Indicación de fuerza de la máquina de ensayo | | Indicación de fuerza en la celda patrón | | | Promedio | Error | Incertidumbre K=2 |
|--|------|---|-----------------|-----------------|----------|-------|-------------------|
| (%) | (kN) | 1° ascenso (kN) | 2° ascenso (kN) | 3° ascenso (kN) | | | |
| 6 | 100 | 100.5 | 100.6 | 100.5 | 100.5 | -0.5 | 0.2 |
| 13 | 200 | 201.6 | 201.2 | 201.4 | 201.4 | -0.7 | 0.2 |
| 19 | 300 | 302.0 | 301.0 | 301.2 | 301.4 | -0.5 | 0.2 |
| 26 | 400 | 400.8 | 400.2 | 400.5 | 400.5 | -0.1 | 0.1 |
| 39 | 600 | 597.6 | 598.6 | 598.7 | 598.3 | 0.3 | 0.1 |
| 51 | 800 | 801.2 | 801.1 | 801.5 | 801.3 | -0.2 | 0.1 |
| 64 | 1000 | 1005.6 | 1005.5 | 1004.8 | 1005.3 | -0.5 | 0.2 |
| 77 | 1200 | 1209.4 | 1207.5 | 1207.9 | 1208.3 | -0.7 | 0.2 |
| 90 | 1400 | 1407.8 | 1405.9 | 1406.2 | 1406.6 | -0.5 | 0.2 |
| 100 | 1555 | 1561.8 | 1559.5 | 1559.9 | 1560.4 | -0.3 | 0.1 |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |

Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la Incertidumbre Expandida de medición, que resulta de multiplicar la Incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$ y ha sido determinada de acuerdo a la "Guía para la expresión de la Incertidumbre en la medición".

Notas

El usuario esta obligado a tener el equipo calibrado en intervalos apropiados de tiempo de acuerdo al uso, mantenimiento y conservación que este expuesto.

El equipo se encuentra calibrado y no necesita corrección alguna, ya que el error en todo el rango calibrado no supera el +/-1%.

El equipo cumple con la norma ASTM C-39.





**CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN
CMC-045-2010**

Peticionario : UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

Atención : Ing. Raúl Pumaricra Padilla

Lugar de calibración : Laboratorio de mecánica de suelos y pavimentos - Jr. Diego de Agüero
N° 206 - Magdalena del Mar - Lima

Tipo de equipo : Maquina de compresión axial eléctrico-hidráulica

Capacidad del equipo : 1,555 kN (350,000 lbf. ó 159 TN)

División de escala : 0,1 kN

Marca : ELE - INTERNATIONAL

Modelo : 36-3086/06 Código UNFV : 75123

N° de serie del equipo : 5110000001

Panel digital : ADR ELE-INTERNATIONAL

N° de serie panel digital : 1886-1-2082

Procedencia : USA

Método de calibración : ASTM E-74 "Estándar Practice of Calibration of Force-Measuring
Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines"

Temp.(°C) y H.R.(%) Inicial : 19°C / 72%

Temp.(°C) y H.R.(%) Final : 18°C / 74%

Patrón de referencia : Trazabilidad Deutscher Kalibrierdienst DKD - Alemania
Patrón utilizado HBM C18/1MN, ML30B, AB22A clase 0.5, certificado de
calibración DKD-K-00101 21975




Numero de paginas : 2

Fecha de calibración : 2010-10-15

Este certificado de verificación sólo puede ser difundido sin modificaciones y en su totalidad.

Las modificaciones y extractos del certificado necesitan autorización de CELDA EIRL.

El presente certificado sin firmas y sellos carece de validez.

| Sello | Fecha | Hecho por | Revisado por |
|---|------------|--|---|
|  | 2010-10-25 |  John Ore Torre TECNICO DE LABORATORIO |  JOSEPH ARNALDO RUMICHE ORMEÑO INGENIERO CIVIL Reg. CIP N° 89945 |

CMC-045-2010

Página 1 de 2



Resultados de Medición

Dirección de Carga : Compresión

| Indicación de fuerza de la máquina de ensayo | | Indicación de fuerza en la celda patrón | | | Promedio (kN) | Error (%) | Incertidumbre K=2 U (%) |
|--|------|---|--------------------|--------------------|------------------|--------------|-------------------------------|
| (%) | (kN) | 1º ascenso (kN) | 2º ascenso (kN) | 3º ascenso (kN) | | | |
| 6 | 100 | 99.9 | 99.8 | 99.9 | 99.9 | 0.1 | 0.1 |
| 13 | 200 | 199.1 | 199.5 | 199.4 | 199.3 | 0.3 | 0.1 |
| 19 | 300 | 299.5 | 299.6 | 299.7 | 299.6 | 0.1 | 0.1 |
| 26 | 400 | 400.4 | 400.4 | 400.4 | 400.4 | -0.1 | 0.1 |
| 32 | 500 | 500.8 | 500.7 | 500.6 | 500.7 | -0.1 | 0.1 |
| 39 | 600 | 601.2 | 600.9 | 601.1 | 601.1 | -0.2 | 0.1 |
| 45 | 700 | 701.2 | 700.8 | 701.2 | 701.1 | -0.2 | 0.1 |
| 51 | 800 | 800.9 | 800.6 | 800.7 | 800.7 | -0.1 | 0.1 |
| 58 | 900 | 900.1 | 900.1 | 900.3 | 900.2 | 0.0 | 0.1 |
| 64 | 1000 | 999.7 | 999.4 | 999.9 | 999.7 | 0.0 | 0.1 |
| 0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |

Incertidumbre

La incertidumbre reportada en el presente certificado es la Incertidumbre Expandida de medición, que resulta de multiplicar la Incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$ y ha sido determinada de acuerdo a la "Guía para la expresión de la Incertidumbre en la medición".

Notas

El usuario está obligado a tener el equipo calibrado en intervalos apropiados de tiempo de acuerdo al uso, mantenimiento y conservación que este expuesto.


John Ore Torre
 TÉCNICO DE LABORATORIO

CELDAS DE EQUIPOS DE LABORATORIO
 CELDA EIRL


**JOSEPH ARNALDO
 RUMICHE ORMENO**
 INGENIERO CIVIL
 Reg. CIP N° 89945

CELDAS DE EQUIPOS DE LABORATORIO
 CELDA EIRL