

UNIVERSIDAD CATOLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION  
Facultad de Ingeniería  
Ingeniería Civil



# **EFECTO DE LA PERLITA EXPANDIDA EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL HORMIGÓN**

**ERICK A. VEGA ANDRADE**

**INFORME DE PROYECTO DE TÍTULO PARA OPTAR AL TITULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**Profesor Guía:**

Sr. Felipe González M.

**Profesor Informante:**

Sr. José Montenegro C.

Concepción, Marzo de 2017

*“En definitiva, después de este largo caminar quiero darte las gracias hijo querido, pues ha sido por tu aporte incansable que hoy vivo este hermoso momento junto a ti, donde todos los honores se quedan pequeño ante lo que realmente mereces”.*

## **Agradecimientos.**

Primeramente a mis profesores que me dieron los conocimientos para enfrentarme al mundo laboral. A mi profesor guía que me oriento, creyó en mí y me dio esta oportunidad que leerán a continuación para convertirme en ingeniero civil.

A mis amigos - colegas – compañeros que siempre estuvieron ahí para ayudarme tanto en la carrera, como en la elaboración de esta tesis.

A mis padres que fueron un pilar fundamental en mi formación y siempre estuvieron allí, para apoyarme y darme una palabra de aliento en los momentos difíciles.

Finalmente a mi pareja y mi hijo que son la razón por la cual me levanto cada día y trato de salir adelante.

## Resumen.

El objetivo de esta investigación es utilizar la perlita expandida en la fabricación del hormigón como reemplazo de parte de la arena convencional, para reducir su densidad sin afectar significativamente sus propiedades mecánicas. La idea específicamente es diseñar dosificaciones de prueba para los distintos tipos de hormigones, utilizando la perlita expandida como árido, en variadas dosis. Luego determinar la resistencia mecánica a la compresión de las distintas dosificaciones de hormigones alivianados con perlita y por último identificar el efecto mecánico de la perlita en el hormigón liviano, se analizó la granulometría de la perlita y se calculó su densidad, para conocer su distribución como árido. Lo mismo se realizó a la arena y la gravilla.

Se confeccionaron curvas granulométricas combinadas para encontrar la mejor distribución porcentual de los áridos. Para la dosificación H25 patrón arrojó un 41% de arena y un 59% de gravilla del volumen total. Para la dosificación con 10% de perlita arrojó 4,1% de perlita, 36,9% de arena y 59% de gravilla del volumen total de áridos. Para la dosificación con 30% de perlita arrojó 12,3% de perlita, 28,7% de arena y 59% de gravilla del volumen total de áridos. Para la dosificación con 50% de perlita arrojó 20,5% de perlita, 20,5% de arena y 59% de gravilla del volumen total de áridos.

Se calcularon dosificaciones para un hormigón H25 con distintas dosis de perlita expandida, 10%, 30% y 50% del volumen de arena que ocupa la mezcla.

Se confeccionaron probetas cúbicas de 20x20x20 cm<sup>3</sup> de hormigón, para cada dosificación, una para los 7 días y 3 para los 28 días, para cada caso.

Las resistencias a la compresión promedio alcanzadas a los 28 días corresponden a: 28,27 MPa para la dosificación H25 patrón, 26,2 MPa para la dosificación con 10% de perlita, 23,8 MPa para la dosificación con 30% de perlita y 21,85 MPa para la dosificación con 50% de perlita.

Las densidades promedio obtenidas de las probetas ensayadas a los 28 días son: 2381,3 Kg/m<sup>3</sup> para la dosificación H25 patrón, 2364,4 Kg/m<sup>3</sup> para la dosificación con 10% de perlita, 2338,8 Kg/m<sup>3</sup> para la dosificación con 30% de perlita y 2328,1 Kg/m<sup>3</sup> para la dosificación con 50% de perlita.

Se realizó una evaluación estadística a las probetas ensayadas a los 28 días entregando los siguientes resultados: para el caso de la dosificación H25 patrón la hipótesis de H25 se acepta, para el caso de la dosificación con 10% de perlita la hipótesis de H25 se acepta, para el caso de la dosificación 30% de perlita la hipótesis de H25 se rechaza, pero se acepta la hipótesis de H20, para el caso de la

dosificación 50% de perlita la hipótesis de H25 se rechaza, pero se acepta la hipótesis de H20.

Se analizaron los resultados de los ensayos de resistencia y densidad, notando que a medida que se le adiciona perlita a la mezcla el hormigón va perdiendo resistencia y disminuyendo su densidad. Siendo esta última la que disminuye con mayor magnitud que la resistencia.

Por lo tanto el hormigón con perlita NO califico como hormigón liviano que era la hipótesis establecida desde un principio. Si bien la resistencia no disminuyo tanto, la densidad no alcanzo un valor para ser considerado liviano (menor a  $2000 \text{ Kg/m}^3$ ).

## **Abstract.**

The objective of this research is to use expanded perlite in the manufacture of concrete as a replacement of part of the conventional sand, which allows to reduce its density without significantly affecting its mechanical properties. The idea is specifically to design test dosages for the different types of concrete, using perlite expanded as arid, in varied doses. Then determine the mechanical strength to compression of the different dosages of concretes alleviated with perlite and finally identify the mechanical effect of perlite in lightweight concrete.

The granulometry of the perlite was analyzed and its density was calculated, to know its distribution as arid. The same was done to sand and gravel.

Combined granulometric curves were made to find the best percentage distribution of aggregates. For the dosing H25 pattern yields 41% of sand and 59% of gravel of the total volume. For the dosage with 10% of perlite yield 4.1% of perlite, 36.9% of sand and 59% of gravel of the total volume of aggregates. For the dosage with 30% of perlite yield 12.3% of perlite, 28.7% of sand and 59% of gravel of the total volume of aggregates. For the dosage with 50% of perlite, 20.5% of perlite, 20.5% of sand and 59% of gravel of the total volume of aggregates were used.

Dosages were calculated for an H25 concrete with different doses of expanded perlite, 10%, 30% and 50% of the volume of sand that the mixture occupies.

Cubic specimens of 20x20x20 cm<sup>3</sup> of concrete were prepared for each dosage, one for 7 days and 3 for 28 days, for each case.

The average compressive strength at 28 days corresponded to: 28.27 MPa for standard H25 dosing, 26.2 MPa for dosing with 10% perlite, 23.8 MPa for dosing with 30% perlite and 21.85 MPa for dosing with 50% perlite.

The average densities obtained from the test specimens tested at 28 days were: 2381.3 kg / m<sup>3</sup> for standard H25 dosing, 2364.4 kg / m<sup>3</sup> for dosing with 10% perlite, 2338.8 kg / m<sup>3</sup> for dosing With 30% of perlite and 2328.1 kg / m<sup>3</sup> for the dosing with 50% of perlite.

A statistical evaluation was performed on the test specimens tested at 28 days giving the following results: for the case of H25 standard the H25 hypothesis is accepted, in the case of the dosing with 10% perlite the H25 hypothesis is accepted , For the 30% dosing of perlite the H25 hypothesis is rejected, but the H20 hypothesis is accepted, in the case of dosing 50% perlite the H25 hypothesis is rejected but the H20 hypothesis is accepted .

The results of the resistance and density tests were analyzed, noting that as perlite is added to the mixture, the concrete loses its resistance and decreases its density. The latter being the one that decreases with greater magnitude than the resistance.

Therefore the concrete with perlite does NOT qualify as lightweight concrete which was the hypothesis established from the beginning. Although the resistance did not decrease so much, the density did not reach a value to be considered light (less than 2000 kg / m<sup>3</sup>).

# Índice de Contenido.

Resumen .....	III
Abstract .....	V
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Motivación .....	1
1.2. Hipótesis.....	3
1.3. Objetivos .....	3
1.3.1. Objetivo General.....	3
1.3.2. Objetivos Específicos. ....	3
1.4. Perlita Expandida .....	4
2 RECOPIACION.....	6
3 METODOLOGÍA.....	7
3.1 Determinación de densidad de partículas sólidas (NCh1532.Of80).....	7
3.2 Determinación de las densidades máxima, mínima y cálculo de la densidad relativa de suelos NO cohesivos. (Nch1726.Of80).....	8
3.3 Granulometría .....	9
3.4 Dosificación del hormigón .....	12
3.5 Estimación de la resistencia requerida. ....	15
3.6 Dosificación de hormigones según método de Faury – Joisiel (FJ). ....	17
3.7 Densidad real, Neta y absorción según NCh 1239. ....	21
3.8 Preparación de la mezcla. ....	23
3.9 Ensayo de Compresión. ....	25
3.10 Evaluación Estadística .....	26
4 RESULTADOS .....	28
4.1 Ensayos Perlita .....	28
4.1.1 Granulometría.....	28
4.1.2 Densidad máxima y mínima de la perlita.....	29
4.2 Ensayos Arena y Gravilla. ....	31
4.2.1 Granulometría. ....	31
4.2.2 Densidades de los áridos.....	33
4.3 Dosificación según Nch170.Of85. ....	35
4.4 Dosificación según Fairy – Joisiel.....	37

4.5 Granulometría combinada .....	40
4.5.1 Caso 1: Patrón.....	40
4.5.2 Caso 2: Perlita 10%.....	40
4.5.3 Caso 3: Perlita 30%.....	41
4.5.4 Caso 4: Perlita 50%.....	42
4.6 Dosificación Final .....	43
4.7 Corrección del volumen de agua por efecto de la absorción y la humedad de los áridos.....	44
4.7.1 Humedad de áridos previa a confección de probetas.....	45
4.8 Cono de Abrams .....	46
4.9 Resultados de los Ensayos a Compresión.....	48
4.9.1 Densidades de los hormigones.....	48
4.9.2 Resistencia a los 7 días .....	49
4.9.3 Resistencia a los 28 días .....	50
4.10 Resultados Evaluación Estadística.....	52
4.10.1 Evaluación estadística probeta H25 patrón.....	52
4.10.2 Evaluación estadística probeta con 10% de perlita.....	53
4.10.3 Evaluación estadística probeta con 30% de perlita.....	54
4.10.4 Evaluación estadística probeta con 50% de perlita.....	56
4.10.5 Resumen .....	58
5 CONCLUSIÓN.....	59
6 REFERENCIAS .....	64
7 ANEXOS.....	66

## Índice de Tablas.

Tabla 1: Densidad del agua según su temperatura.....	8
Tabla 2: Granulometría de la arena .....	9
Tabla 3: Granulometría de la grava .....	10
Tabla 4: Árido Combinado. Granulometrías recomendadas para dosificación. $D_a=D_n=20\text{mm}$ .....	12
Tabla 5: Razón agua/cemento para resistencia media de dosificación. ....	13
Tabla 6: Volumen estimado de agua de amasado ( $\text{m}^3$ ).....	14
Tabla 7: Aire promedio atrapado ( $\text{m}^3$ ). ....	14
Tabla 8: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión. ....	15
Tabla 9: Factor estadístico t.....	15
Tabla 10: Valor estimado. ....	16
Tabla 11: Factor $f_d$ .....	18
Tabla 12: Factor E .....	19
Tabla 13: Razón A/C. ....	19
Tabla 14: Aire atrapado. ....	20
Tabla 15: Factor estadístico t.....	26
Tabla 16: Factor $k_2$ según fracción defectuosa y grado de hormigón. ....	27
Tabla 17: Granulometría perlita .....	28
Tabla 18: Pesajes y volúmenes. ....	30
Tabla 19: Granulometría arena. ....	31
Tabla 20: Granulometría gravilla. ....	32
Tabla 21: Cuadro resumen dosificación para $1\text{m}^3$ de hormigón. ....	36
Tabla 22: Cuadro resumen dosificación para una probeta cúbica ( $d=20\text{mm} \wedge v=8\text{Lt}$ ). ....	36
Tabla 23: Datos Curva Y.....	37
Tabla 24: Granulometría combinada de 41% arena + 59% gravilla.....	40
Tabla 25: Granulometría combinada de 4,1% perlita + 36,9% arena + 59% gravilla. ....	41
Tabla 26: Granulometría combinada de 12,3% perlita + 28,7% arena + 59% gravilla. ....	41
Tabla 27: Granulometría combinada de 20,5% perlita + 20,5% arena + 59% gravilla. ....	42
Tabla 28: Dosificación para $1\text{ m}^3$ de hormigón.....	43
Tabla 29: Dosificación para una probeta cúbica de 8 Lt. de hormigón. ....	44
Tabla 30: Densidad, absorción y humedad de los áridos. ....	45
Tabla 31: Variación de la cantidad de agua por efecto de la humedad y la absorción de los áridos.....	46
Tabla 32: Dosificación final a ensayar.....	46
Tabla 33: Cono de Abrams, fecha de fabricación, y edad de ensayo de las distintas dosificaciones. ....	47
Tabla 34: Densidad promedio según dosificación. ....	48
Tabla 35: Resistencia del hormigón a los 7 días. ....	49
Tabla 36: Resistencia del hormigón a los 28 días. ....	50
Tabla 37: Factores s, t, $k_2$ para la dosificación patrón. ....	52
Tabla 38: Factores s, t, $k_2$ para la dosificación 10% de perlita. ....	53
Tabla 39: Factores s, t, $k_2$ para la dosificación 30% de perlita. ....	54

Tabla 40: Factores $s$ , $t$ , $k_2$ para la dosificación 50% de perlita. ....	56
Tabla 41: Resumen Hipótesis con sus respectivas dosificaciones. ....	58
Tabla 42: Resumen de la resistencia media y densidades para cada dosificación.....	59
Tabla 43: Variación de la resistencia y la densidad respecto a la probeta patrón.....	61

## Índice de Ilustraciones.

Ilustración 1: perlita expandida .....	5
Ilustración 2: Bandas granulométricas recomendadas para dosificación. $D_a=D_n=20\text{mm}$ . .	11
Ilustración 3: Gráfico de curva Y, método de Faury- Josiel. ....	18
Ilustración 4: Prensa utilizada para los ensayos. ....	25
Ilustración 5: Curva granulométrica de la perlita. ....	29
Ilustración 6: Molde + perlita, ensayo de densidad máxima y mínima. ....	29
Ilustración 7: Curva granulométrica de la arena. ....	32
Ilustración 8: Curva granulométrica de la gravilla. ....	33
Ilustración 9: Gráfica de distribución de áridos según Fairy – Josiel .....	38
Ilustración 10: Granulometrías combinadas, todos los casos.....	43
Ilustración 11: Gráfico densidad promedio vs porcentaje de perlita. ....	49
Ilustración 12: Gráfico resistencia 7 días vs porcentaje de perlita. ....	50
Ilustración 13: Gráfico resistencia media 28 días vs porcentaje de perlita.....	51
Ilustración 14: Resistencia vs porcentaje de perlita.....	59
Ilustración 15: Densidad vs porcentaje de perlita. ....	60
Ilustración 16: Resistencia vs Densidad.....	60
Ilustración 17: Grafico de la variación de la resistencia y la densidad respecto a la probeta patrón. ....	61

# 1 INTRODUCCIÓN.

## 1.1. Motivación.

Los hormigones livianos se designan en la norma ACI 213R (1987) como aquellos que poseen una densidad en estado seco al aire menor a  $1850 \text{ Kg/m}^3$ .

Se designa convencionalmente como hormigones livianos a aquellos que poseen características propias, que mediante métodos en el proceso de su elaboración se ha hecho más ligero que el hormigón convencional de cemento, grava, gravilla y arena, el cual durante muchos años ha sido empleado como material principal en el área de la construcción.

El hormigón liviano fue clasificado e identificado durante mucho tiempo por la densidad que este presenta, debido a que esta es inferior a  $2400 \text{ Kg/m}^3$  que es la densidad con la que fluctúa el hormigón normal. La característica más evidente del hormigón liviano es su densidad, la cual es considerablemente menor que la del hormigón normal.

Existen muchas ventajas al tener materiales con una densidad baja, como por ejemplo se reduce la carga muerta, mayor rapidez de construcción, menores costos de transporte. Se ha demostrado que utilizando hormigón liviano en la construcción se logra menos tiempo de ejecución en la obra, que si se utilizaran materiales convencionales.

Otra característica importante es que poseen una conductividad térmica relativamente baja, la cual se mejora mientras se reduce su densidad, como por ejemplo la necesidad de reducir el consumo de energía de los acondicionadores de aire de edificios, el hormigón liviano por su baja conductividad térmica mejora el ambiente y mantienen una temperatura confortable dentro de ellos.

Estructuralmente el uso fundamental del hormigón liviano busca reducir la carga muerta de una estructura de hormigón, lo que permite a su vez que el diseñador estructural reduzca el tamaño de columnas, zapatas y otros elementos de cargas en la cimentación particularmente, considerando que el hormigón mantiene su resistencia.

Este sería un beneficio financiero directo capaz de cuantificarse con bastante aproximación al reducirse el consumo de acero y el peso de la estructura en sí, debido a un ahorro en el diseño de la cimentación y de la estructura de soporte, ofreciendo al arquitecto o ingeniero una mayor libertad de planeación, debido a un mayor espaciamiento entre columnas y mayores luces.

El hormigón estructural liviano posee una densidad en el orden de  $1440 \text{ Kg/m}^3$  a  $1840 \text{ Kg/m}^3$ , en comparación con el hormigón de peso normal que presenta una densidad en el rango de  $2240 \text{ Kg/m}^3$  a  $2400 \text{ Kg/m}^3$ . Para aplicaciones estructurales la resistencia del hormigón deberá ser mayor a  $17 \text{ MPa}$ .

En la actualidad existen varios tipos de aditivos y áridos especiales que se le aplican al hormigón con el fin de obtener un hormigón liviano, como el poliestireno expandido, la piedra de pómez, virutas de madera, cenizas de cascara de arroz, arcilla expandida y la incorporación de aire.

Sin embargo siempre existe la necesidad de innovar en este campo en busca de materiales nuevos y más económicos.

Es por eso que se ha considerado el estudio de un mineral llamado perlita expandida, un mineral de origen volcánico que contiene agua molecular y con la propiedad de expandirse al exponerse a altas temperaturas, adquiriendo gran capacidad aislante. En estado expandido la perlita tiene una densidad aproximada entre  $30\text{--}150 \text{ kg/m}^3$  y en estado no expandido crudo cerca  $1100 \text{ kg/m}^3$ .

Para entender su comportamiento se llevarán a cabo algunos ensayos, para luego confeccionar probetas de hormigón con perlita expandida en distintas dosificaciones, para este caso un hormigón tipo H25 normal.

Para llevar a cabo este estudio se consideró la perlita expandida como árido, la cual tomará parte del porcentaje de la arena que lleva la mezcla.

Se analizará como varía la resistencia y la densidad a medida que se adiciona perlita expandida a la mezcla, para saber la factibilidad de construir estructuras de hormigón con este material.

## **1.2. Hipótesis.**

La perlita expandida puede ser utilizada como árido dentro de la mezcla de hormigón. Esta reemplazará un cierto porcentaje de la arena, reduciendo la densidad aparente del hormigón, sin afectar significativamente sus propiedades mecánicas, como la resistencia a compresión del hormigón.

## **1.3. Objetivos.**

### **1.3.1. Objetivo General.**

Determinar el efecto de la perlita expandida como árido, en el comportamiento mecánico de hormigones livianos.

### **1.3.2. Objetivos Específicos.**

- Diseñar dosificaciones de prueba para los distintos tipos de hormigones, utilizando la perlita expandida como árido, en variadas dosis.
- Determinar la resistencia mecánica a la compresión de las distintas dosificaciones de hormigones alivianados con perlita.
- Identificar el efecto mecánico de la perlita en el hormigón liviano.

#### 1.4. Perlita Expandida.

El Material geológico.

La perlita es un vidrio volcánico amorfo que tiene un contenido de agua relativamente alto. Es un mineral que aparece en la naturaleza, y tiene la propiedad poco común de expandirse muchísimo cuando se la calienta lo suficiente.

Propiedades y usos.

Cuando alcanza temperaturas de 850–900 °C, la perlita se ablanda (dado que es un vidrio). El agua atrapada en la estructura del material escapa y se vaporiza, y esto causa la expansión del material hasta 7–16 veces su volumen original. El material expandido es de un color blanco brillante, debido a la reflectividad de las burbujas atrapadas.

La perlita no expandida ("cruda") tiene una densidad cercana a 1100 kg/m<sup>3</sup> (1,1 g/cm<sup>3</sup>).

La perlita expandida tiene típicamente una densidad de 30–150 kg/m<sup>3</sup>.

Las propiedades más comunes son la alta resistencia al fuego, baja transmisión de sonido (aislante acústico), dado a que es producto de un material crudo su estructura está conformada por celdas de aire que lo convierten en un excelente aislante térmico y acústico.

Los usos más comunes de la perlita son:

- Perlita cruda uso de perlita cruda en fundiciones de hierro, como escoria aglutinante basado en un proceso químico físico.
- Filterperlite tiene una amplia aplicación en la industria de efluentes: azúcar, jugos de fruta, aceite y otros fluidos como auxiliar filtrante.
- Perlita en horticultura usada para modificar los suelos reduciendo su firmeza y facilitando el drenaje de agua y la retención de humedad, también para propagación de plantas de semilla y almacenamiento de bulbos y plantas.
- Perlita para construcción losa de cielo raso acústicas aislamiento de tuberías tablas de techo aislante, carga aislante en pisos y cavidades de pared.
- Otros usos vidrio explosivos producción de cementos y concretos, manufactura de electrodos, minería, operaciones metalúrgicas.

Composición típica de la perlita.

70-75% dióxido de silicio:  $\text{SiO}_2$

12-15% óxido de aluminio:  $\text{Al}_2\text{O}_3$

3-4% óxido de sodio:  $\text{Na}_2\text{O}$

3-5% óxido de potasio:  $\text{K}_2\text{O}$

0,5-2% óxido de hierro:  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

0,2-0.7% óxido de magnesio:  $\text{MgO}$

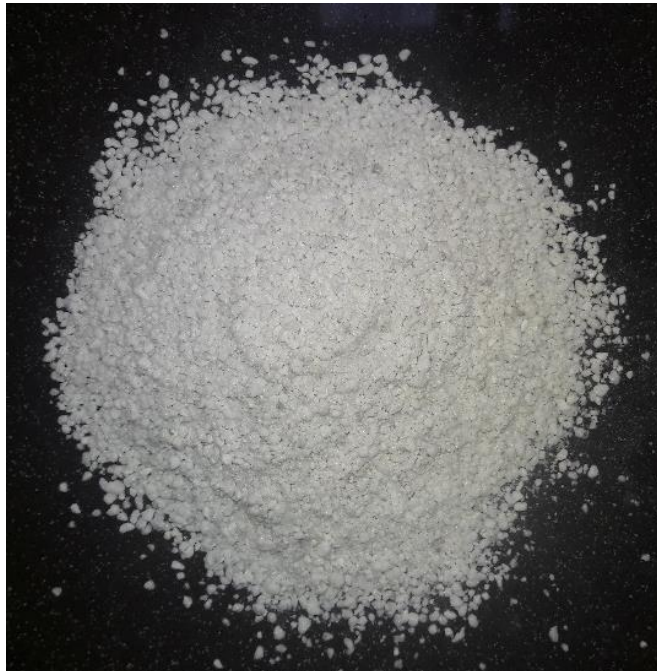
0,5-1,5% óxido de calcio:  $\text{CaO}$

3-5% pérdida en el horno (agua químicamente combinada)

Lugares de Extracción.

En la República Argentina existen yacimientos de perlita en las provincias de Catamarca, Jujuy, Mendoza, Río Negro, Chubut y Salta, siendo esta última provincia la que posee los yacimientos más productivos del país.

En México existen varios yacimientos, como en Durango. Termolita es una de las principales empresas procesadoras en México, exportando al mundo.



*Ilustración 1: perlita expandida*

## **2 RECOPIACION.**

La información que se utilizó en este proyecto de investigación está relacionada con las normas chilenas aplicadas a la confección y ensayos de probetas de hormigón.

Los ensayos y cálculos aplicados a la perlita son los mismos que están estandarizados para las arenas.

El cálculo de la densidad máxima y mínima realizado a la perlita se hizo a través de la norma NCh1726.Of80.

El cálculo de las densidades real, neta y absorción de la arena se hizo a través de la norma NCh1239, en cambio para la gravilla se utilizó la norma NCh1117.

La granulometría que se realizó a la perlita y la arena se efectuó siguiendo la norma NCh163 Of79 y para la gravilla se realizó siguiendo la norma NCh165. Of79.

Las dosificaciones de los hormigones se realizó mediante la norma NCh170 Of85 y se realizó un análisis comparativo con el método del “Manual de carreteras” (Fairy-Joisiel). Además de este último se obtuvieron los porcentajes de arena y gravilla de la mezcla.

Se realizó una corrección del volumen de agua por efecto de la absorción y la humedad de los áridos, a través de la corrección de humedad.

El ensayo de compresión de las probetas se llevó a cabo según la norma, NCh1037. Of77, “Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.”

Para realizar la evaluación estadística, para las distintas dosificaciones se utilizó la norma NCh 1998. Of89.

## 3 METODOLOGÍA.

### 3.1 Determinación de densidad de partículas sólidas (NCh1532.Of80).

Esta norma establece el procedimiento para determinar la densidad de partículas sólidas de los suelos que se componen de partículas menores que 5 mm, mediante un picnómetro. Para realizar este ensayo se necesita un picnómetro, balanza, reductor de presión, recipientes para muestra, brochas poruña, embudo, termómetro, estufa, secador etc. además agua destilada.

Procedimiento del ensayo.

La muestra se debe colocar en un horno a 110°C para ser secada.

Una vez seca, colocar la muestra en el picnómetro, cuidando de evitar pérdidas del material cuando ya se ha determinado su masa seca. Agregar agua destilada cuidadosamente, evitando la formación de burbujas, hasta alcanzar aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de la capacidad del frasco, o la mitad de la capacidad de la botella.

Luego remover el aire atrapado, para agregar agua destilada hasta llenar el picnómetro. Limpiar y secar el exterior con un paño limpio y seco. Determinar y registrar la masa del picnómetro con la muestra y el agua (Mm). Determinar y registrar la temperatura de ensayo del contenido (tx).

$$G_s = \frac{M_s}{(M_s + M_m) - M_a} \cdot \rho w_{tx}$$

Donde

$M_s$  = masa suelo seco.

$M_a$  = masa del picnómetro más agua.

$M_m$  = masa del picnómetro más la muestra y agua.

$\rho w_{tx}$  = densidad del agua según temperatura.

Tabla 1: Densidad del agua según su temperatura.

Temperatura °C	Densidad		K	
	g/cm <sup>3</sup>	Kg/l	(Adimensional)	
16	0.999	0.9	1.000	9
18	0.998	59	1.000	4
20	0.998	20	1.000	0
23	0.997	54	0.999	3
26	0.996	78	0.998	6
29	0.995	94	0.997	7

Fuente: Nch1532.Of80

### 3.2 Determinación de las densidades máxima, mínima y cálculo de la densidad relativa de suelos NO cohesivos. (Nch1726.Of80).

Esta norma establece un procedimiento para determinar las densidades secas máxima y mínima de los suelos no cohesivos, no cementados, de flujo libre, con un tamaño máximo nominal hasta 80 mm y que contienen hasta un 12 % en masa de partículas menores que 0.08 mm.

Esta norma determina la densidad máxima mediante compactación por vibrado y la densidad mínima mediante vaciado. Además indica el procedimiento para calcular la densidad relativa.

Para realizar este ensayo se necesita una mesa vibratoria de acero, moldes metálicos, con capacidad de 2.8 y 14.2 litros respectivamente, tubos guía metálicos, ajustables a cada tipo de molde, una placa base, sobrecargas para cada molde (14kPa), una manilla para cada molde,

#### Densidad mínima

Se llena el molde con el material utilizando un embudo normalizado dejándolo caer lentamente en forma circular hasta llenar el molde luego se enrasa y se pesa. Este procedimiento se repite 3 veces. Luego se calcula la masa de material dentro del molde y se divide por el volumen de este.

#### Densidad máxima

El molde se llena como se explicó anteriormente y se pesa. Se lleva hasta la mesa vibratoria y se instala con una carga vertical sobre el material, para luego vibrar todo este sistema, durante 10 minutos aproximadamente. Al finalizar se mide el descenso del material dentro del molde por efecto del vibrado y compactado, obteniendo un nuevo volumen. Como el peso es conocido se divide por este nuevo volumen.

### 3.3 Granulometría

Requisitos granulométricos de la arena.

La granulometría de la arena, determinada según NCh163 of. 79, debe cumplir con los límites especificados en la tabla 2.

Para evaluar el cumplimiento de la granulometría en el caso de arenas cuyo tamaño máximo nominal exceda los 5 mm se debe efectuar una conversión de la granulometría original considerando como 100% el material que pasa por el tamiz de 5 mm de abertura nominal.

*Tabla 2: Granulometría de la arena*

<b>Tamices, mm</b>	<b>% acumulado que pasa</b>
<b>10</b>	100
<b>5</b>	95 – 100
<b>2.5</b>	80 – 100
<b>1.25</b>	50 – 85
<b>0.630</b>	25 – 60
<b>0.315</b>	10 – 30
<b>0.160</b>	2 – 10

*Fuente: NCh163. Of79*

Las arenas que no cumplan con los requisitos granulométricos pueden ser utilizadas siempre que las mezclas de prueba preparadas con estas arenas cumplan con los requisitos de las especificaciones particulares de la obra.

Requisitos granulométricos de la grava.

La granulometría de los áridos gruesos, determinada según NCh165. Of79, debe cumplir con los límites especificados en la tabla 3.

*Tabla 3: Granulometría de la grava*

Tamices, mm	% acumulado que pasa para los siguientes grados (definidos por tamaños límites en mm)								
	63-40	50-25	50-5	40-20	40-5	25-5	20-5	12.5-5	10-2.5
80	100	-	*)	-	*)	-	-	-	-
63	90-100	100	100	-	-	-	-	-	-
50	35-70	90-100	90-100	100	100	-	-	-	-
40	0-15	33-70	-	90-100	90-100	100	-	-	-
25	-	0-15	35-70	20-55	-	90-100	100	-	-
20	0-5	-	-	0-15	35-70	-	90-100	100	-
12.5	-	0-5	10-30	-	-	25-60	-	90-100	100
10	-	-	-	0-5	10-30	-	20-55	40-70	90-100
5	-	-	0-5	-	0-5	0-10	0-10	0-15	10-30
2.5	-	-	-	-	-	0-5	0-5	0-5	0-10
1.25	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5

*Fuente: NCh163. Of79*

Las gravas que no corresponden a ninguno de los grados especificados en la tabla 2 pueden ser empleadas siempre que las mezclas de prueba preparadas con estas gravas cumplan con los requisitos de las especificaciones particulares de la obra.

El árido combinado

Para cumplir con las condiciones de compacidad, docilidad y otras del hormigón, pueden recomendarse las zonas que se muestran en la ilustración 2 cuyas curvas límites se indican en la tabla 3.

Una adecuada proporción de las arenas y gravas especificadas en las tablas 2 y 3 permite en la gran mayoría de los casos obtener áridos combinados que cumplen con estas bandas.

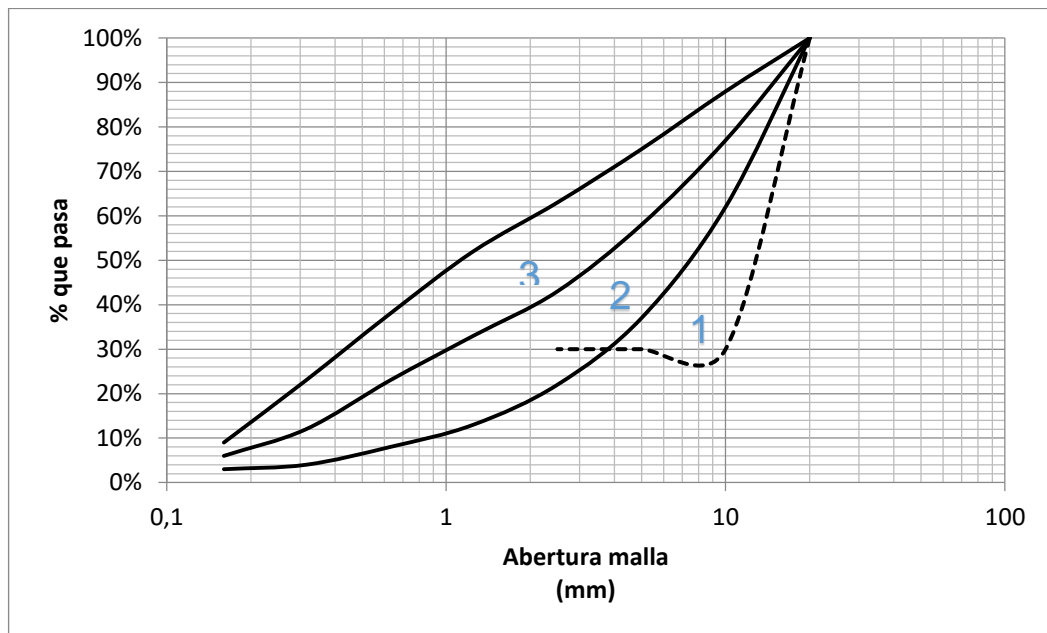
Las zonas tienen el siguiente significado:

Zona 1: Aceptable para granulometrías discontinuas. Curvas límites: C y D.

Zona 2: Preferida. Curvas límites: A y B.

Zona 3: Aceptable. Con mayor necesidad de cemento y agua. Curvas límites: B y C.

La curva de árido combinado debe tener en lo posible una formación similar (paralela) a las curvas límites, y no debe cruzar de una zona a otra.



*Ilustración 2: Bandas granulométricas recomendadas para dosificación.  
 $D_a=D_n=20mm$ .*

*Fuente: NCh163. Of79*

Tabla 4: Árido Combinado. Granulometrías recomendadas para dosificación.  
 $D_a=D_n=20\text{mm}$ .

Abertura (mm)	A	B	C	D
20	100%	100%	100%	100%
10	62%	77%	88%	30%
5	37%	58%	75%	30%
2,5	22%	43%	63%	30%
1,25	13%	33%	52%	-
0,63	8%	23%	38%	-
0,315	4%	12%	23%	-
0,16	3%	6%	9%	-

Fuente: NCh163. Of79

### 3.4 Dosificación del hormigón

El cálculo de la dosificación para cumplir con la norma debe basarse en la resistencia media de dosificación  $f_r$  considerando materiales disponibles, sea mediante muestras de prueba, relaciones empíricas o tablas.

La resistencia requerida o dosificación,  $f_r$ , es el valor medio estimado de los resultados de la resistencia mecánica que se necesita alcanzar para satisfacer la resistencia especificada.

Razón agua/cemento para resistencia media de dosificación.

La resistencia de compresión  $f_r$ , expresada en rotura de probetas cubicas de 200 mm de arista y 28 días de edad, permite estimar la proporción agua/cemento en peso y referida a la condición de áridos saturados de superficie seca de la tabla a continuación.

Tabla 5: Razón agua/cemento para resistencia media de dosificación.

Razón agua/cemento en masa	Resistencia media requerida $f_r$ Mpa	
	Cemento grado corriente	Cemento grado alta resistencia
0.45	34	43
0.50	29	36
0.55	25	31
0.60	21	26
0.65	18	23
0.70	16	20
0.75	14	17
0.80	12	15
0.85	10	13

Fuente: NCh170. Of85

#### Proporción de los materiales

El cálculo de las proporciones de los materiales componentes del hormigón se basa en que la suma de sus volúmenes reales es igual al volumen total del hormigón, según expresión:

$$C + W + u + G + A = 1 \text{ m}^3$$

En donde:

C = volumen real de cemento en  $\text{m}^3$  que es igual a la masa del cemento en kg dividido por la densidad del cemento en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

W = volumen de agua de amasado en  $\text{m}^3$  necesario para la docilidad requerida según tabla 6.

u = volumen de aire atrapado o intencionalmente incorporado en  $\text{m}^3$ , que puede ser estimado en tabla 7.

G = volumen real de grava en  $\text{m}^3$ , que es igual a la masa de la arena en kg dividida por la densidad real de la grava en  $\text{kg}/\text{m}^3$  con ambos valores correspondientes al estado saturado de superficie seca, o al estado seco.

A = volumen real de arena en  $\text{m}^3$ , que es igual a la masa de la arena en kg dividida por la densidad real de la arena en  $\text{kg}/\text{m}^3$  con ambos valores correspondientes al estado saturado de superficie seca, o al estado seco.

Tabla 6: Volumen estimado de agua de amasado ( $m^3$ ).

Tamaño máximo nominal, mm	Docilidad según descenso de cono, cm				
	0 - 2	3 - 5	6 - 9	10 - 15	16
63	0.135	0.145	0.155	0.165	0.170
50	0.145	0.155	0.165	0.175	0.180
40	0.150	0.160	0.170	0.180	0.185
25	0.170	0.180	0.190	0.200	0.205
20	0.175	0.185	0.195	0.205	0.210
12	0.185	0.200	0.210	0.220	0.230
10	0.190	0.205	0.215	0.230	0.240

Fuente: NCh 170. Of85

Tabla 7: Aire promedio atrapado ( $m^3$ ).

Tamaño máximo nominal, mm	Volumen medio de aire atrapado, $m^3$
63	0.003
50	0.005
40	0.010
25	0.015
20	0.020
12	0.025
10	0.030

Fuente: NCh170. Of85

### 3.5 Estimación de la resistencia requerida.

La resistencia media del hormigón, tiene que ser mayor que la resistencia especificada en el proyecto,  $f_c$ , para absorber la diferencia aleatoria que se origina en las variaciones propias del proceso de fabricación (equipos, materiales, etc.), del muestreo o de los ensayos.

*Tabla 8: Clasificación de los hormigones por resistencia a compresión.*

Grado	Resistencia especificada, $f_c$	
	Mpa	Kg/cm <sup>2</sup>
H5	5	50
H10	10	100
H15	15	150
H20	20	200
H25	25	250
H30	30	300
H35	35	350
H40	40	400
H45	45	450
H50	50	500

*Fuente: NCh170. Of85*

La resistencia media requerida se calcula según la expresión:

$$f_r = f_c + t \cdot s \left( \frac{kgf}{cm^2} \right)$$

Se recomienda adoptar el factor t, expresado en función del nivel de confianza especificado según tabla 9.

*Tabla 9: Factor estadístico t.*

Nivel de confianza, %	t
95	1.645
90	1.282
85	1.036
80	0.842

*Fuente: NCh170. Of85*

Se recomienda adoptar el valor  $s$  mediante uno de estos procedimientos según corresponda:

#### Procedimiento 1

Cuando se tienen antecedentes del mismo contratista, trabajando en condiciones similares a las de la obra que se inicia, elegir el valor  $s$  según tabla 10.

*Tabla 10: Valor estimado.*

Condiciones previstas para la ejecución de la obra	$s$ Mpa	
	$\leq H15$	$\geq H15$
<b>Regulares</b>	8.0	-
<b>Medias</b>	5.0	7.0
<b>Buenas</b>	4.0	5.0
<b>Muy buenas</b>	3.0	4.0

*Fuente: NCh170. Of85*

Para los efectos de esta recomendación se entiende que las condiciones previstas de ejecución quedan definidas por los siguientes aspectos generales:

Muy buenas: dosificación en peso; laboratorio de faena con personal especializado en la ejecución de los controles mencionados, en forma permanente y sistemática.

Buenas: dosificación en peso o en volumen controlado y aplicación de los controles mencionados, en forma permanente y sistemática.

Medias: dosificación en volumen controlado, controles de humedad y esponjamiento de áridos, control de asentamiento de cono y control del rendimiento de la dosis de cemento, en forma esporádica.

Regulares: cuando se realiza un control inferior a los mencionados, y solo en el caso de hormigones de grado  $\leq H15$ .

#### Procedimiento 2

Cuando no se disponga de resultados ni de antecedentes del contratista, para cualquier nivel de resistencia especificada del proyecto, adoptar valor:

$$s \geq 8.0 \text{ Mpa}$$

### 3.6 Dosificación de hormigones según método de Faury – Joisiel (FJ).

Este método es muy utilizado en vialidad, está basado en principios granulométricos. se trata de obtener una curva granulométrica de referencia ideal (L), combinando el cemento con los áridos disponibles, la cual está definida por el tamaño máximo nominal del árido grueso ( $D_n$ ) y la resistencia del hormigón que se desea obtener, llamada resistencia de diseño ( $f_d$ ), a 28 días.

La curva ideal L se representa colocando en el eje de las ordenadas el porcentaje en volumen absoluto de los materiales sólidos, a escala lineal, y en el eje de las abscisas las raíces quintas de la abertura de los tamices, en mm.

Se establece en forma simplificada la curva de referencia ideal como una mezcla, en proporciones variables, de dos clases de granos:

- i) Un conjunto de granos finos y medianos de 0 a  $D_n/2$  (curva OY).
- ii) Un conjunto de granos gruesos, de  $D_n/2$  a  $D_n$  (curva YZ). El punto O es fijo, y corresponde al menor tamaño de cemento.

El punto Z es variable de acuerdo a la elección del tamaño máximo nominal de árido grueso.

El punto Y, es ordenada de  $D_n/2$ , es también función de  $D_n$ , a través de la expresión:

$$Y\left(\frac{D_n}{2}\right) = M + N$$

Donde:

M = coeficiente que depende del tipo de partículas de los áridos, del grado de compactación a exigir y de la consistencia del hormigón.

N = coeficiente que depende del tamaño máximo nominal de árido a emplear.

La proporción de los sólidos está dada por la siguiente ecuación:

$$\text{Cemento (c) + árido fino (f) + árido grueso (g) = 1}$$

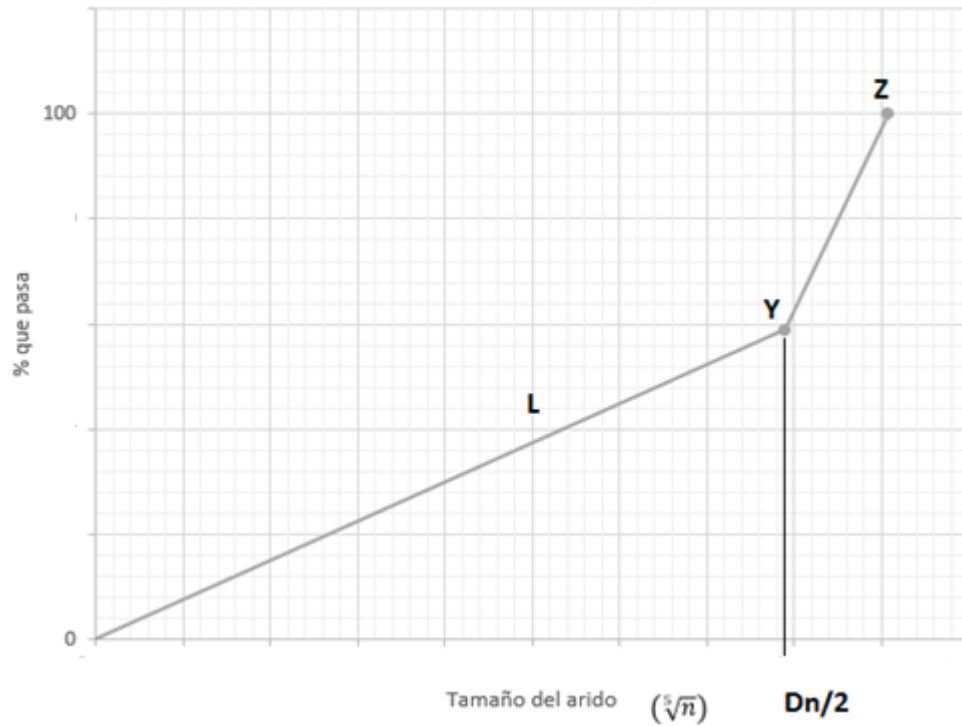


Ilustración 3: Gráfico de curva Y, método de Faury- Josiel.

Fuente: Curso de laboratorista vial, volumen VI.

La resistencia media del hormigón dependerá de las condiciones de la confección del mismo, las cuales pueden ser regulares, buenas o muy buenas. Cada condición equivale a un factor, el cual multiplica la resistencia del hormigón.

Tabla 11: Factor  $f_d$

Confección del hormigón	Resistencia media ( $f_d$ )
Muy buena	$f_p \cdot 1.092$
Buena	$f_p \cdot 1.144$
Regular	$f_p \cdot 1.202$

Fuente: Curso de laboratorista vial, volumen VI.

La cantidad de cemento (C) expresada en  $\text{Kg/m}^3$  se determina de acuerdo a la expresión:

$$C = f_d \cdot E$$

Donde E representa un valor que se ha establecido a través de la práctica, y que varía dependiendo del tipo de cemento a utilizar:

Tabla 12: Factor E

Tipo de cemento	E
Corriente	1.05
Alta resistencia	0.95

Fuente: Curso de laboratorista vial, volumen VI.

El porcentaje en volumen correspondiente a la cantidad de cemento C queda dado por la expresión:

$$c = \frac{C}{z \cdot \rho_{sc}}$$

Donde  $\rho_{sc}$  es la densidad de las partículas sólidas del cemento, que en este caso utilizaremos  $3000 \text{ kg/m}^3$ .

Por otra parte, la cantidad de agua de amasado ( $\text{L/m}^3$ ) está dada por la expresión:

$$A = C \cdot \left(\frac{A}{C}\right)$$

Donde está la razón agua cemento A/C está dada por:

Tabla 13: Razón A/C.

fd (Mpa)	Razón A/C
41	0.41
35	0.43
31	0.46
26	0.53
23	0.58
18	0.78
14	0.92
13	1.00

Fuente: Curso de laboratorista vial, volumen VI.

Si definimos la compactación (z), como aquel volumen de hormigón que está disponible para ser ocupado por los áridos y el cemento, queda dada por la expresión:

$$z = 1 - h$$

Donde h es el volumen que ocupa el agua de amasado (A) y el aire ocluido ( $h_a$ ), obtenido en función del tamaño máximo nominal.

Tabla 14: Aire atrapado.

Dn (mm)	10	12.5	20	25	40	50	80
Hormigón SIN aire atrapado	30	25	20	15	10	5	3
Hormigón CON aire atrapado	80	70	60	50	45	40	35

Fuente: Curso de laboratorista vial, volumen VI.

Este método gráfico nos permite determinar un punto  $x$  en la curva ideal  $L$ , tal que la ordenada en ese punto representa, en porcentaje, las proporciones de cemento más arena.

Es decir  $x = c + f$

Como  $c$  es conocido, entonces  $f = x - c$ , obviamente:  $g = 1 - (c+f) = 1 - x$

Para determinar en forma gráfica las proporciones de  $f$  y  $g$ , se debe primeramente dibujar las curvas, porcentaje que pasa del agregado fino ( $F$ ) y grueso ( $G$ ), en el mismo gráfico que se ha trazado la curva ideal de referencia ( $L$ ). Se pueden presentar los siguientes casos:

**Caso A:** granulometría continua: El tamaño máximo del árido fino coincide con el tamaño mínimo del grueso.

**Caso B:** granulometría discontinua: no existen granos de ciertos tamaños.

**Caso C:** ambas curvas granulométricas ( $F$  y  $G$ ) presentan tamaños comunes.

**Caso D:** empleo de 2 o más áridos.

Una vez obtenidas las proporciones  $f$  y  $g$ , podemos fácilmente determinar las cantidades de árido grueso  $G$  (gravilla) y árido fino (arena) a través de la expresión:

$$F = f \cdot z \cdot \rho_{rsf} \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

$$G = g \cdot z \cdot \rho_{rsg} \left( \frac{Kg}{m^3} \right)$$

Donde

$\rho_{rsf}$  = densidad real de la arena seca.

$\rho_{rsg}$  = densidad real de la gravilla seca.

### 3.7 Densidad real, Neta y absorción según NCh 1239.

#### Arena

Para determinar la densidad real, densidad neta y absorción de agua para los pétreos finos, en este caso de la arena Biobío, se utiliza la norma NCh 1239.

La determinación de la densidad real en los áridos finos es importante al momento de dosificar, ya que gracias a este dato se obtiene el valor que aporta la arena en una dosificación.

La densidad del Hormigón dependerá de la densidad real y la proporción en que participen cada uno de los diferentes materiales que lo constituyen.

#### Terminología

- a) Densidad Real ( $\delta_R$ ): densidad en que se considera el volumen de macizo de las partículas del pétreo, más el volumen de los poros accesibles e inaccesibles de esas partículas.  
Densidad Real del Pétreo Seco ( $\delta_{RS}$ ): Densidad real en que se considera solamente la masa del pétreo seco.  
Densidad Real del Pétreo Saturado Superficialmente Seco ( $\delta_{RT}$ ): Densidad real en que se considera la masa del pétreo seco más la masa del agua que llena los poros accesibles.
- b) Densidad Neta ( $\delta_N$ ): densidad en que se considera el volumen macizo de las partículas más el volumen de los poros inaccesibles.
- c) Absorción de Agua ( $\alpha$ ): Masa de agua necesaria para llevar un pétreo de estado seco a estado saturado superficialmente seco (sss). Se expresa como porcentaje del pétreo secado en horno hasta masa constante.

#### Acondicionamiento de la muestra

En primer lugar es necesario separar por cuarteo la muestra de arena previamente lavada y registrar la cantidad que pasa por el tamiz 5 mm, lo que queda retenido se desecha si es que el porcentaje es menor a un 15% de la muestra. En este caso registró un 1,8 %; por lo tanto fue desechado.

Se secó por 24 horas a 110°C la muestra obtenida, la masa seca antes de sumergir al agua registró 300 gr. Luego de esto, fue necesario sumergir la muestra en agua por 24 horas, para luego secar superficialmente con la ayuda de un secador de pelo en una superficie lisa.

El estado saturado superficialmente seco se obtiene cuando, luego de secar superficialmente con el secador, se introduce el material en un molde tronco-cónico apisonándolo con 25 golpes. Al retirar el molde de la muestra éste debe presentar un asentamiento en el cuál no se desmorona completamente la forma del molde. Luego de ocurrido esto, se dice que la muestra presenta un estado saturado superficialmente seco, esto se registra la masa como  $M_{SSS}$ .

Procedente a esto, se debe sumergir nuevamente el árido en condición saturada superficialmente seca a  $500\text{ cm}^3$  del matraz, con la ayuda de unos pequeños golpes con la palma de la mano, evitando la creación de burbujas. Se deja reposar por una hora y se llena nuevamente hasta alcanzar la marca de calibración del matraz ( $500\text{ cm}^3$ ). La masa registrada por el agua y la muestra dentro del matraz condiciona el nombre de  $M_M$ .

Sacar el agua del matraz evitando pérdidas del material para luego dejarlo secar a  $110^\circ\text{C}$ . Es necesario dejar enfriar la muestra luego de su secado. La muestra seca condiciona el nombre de  $M_s$ .

Llenar de agua el matraz hasta la marca de calibración y verificar su masa como  $M_a$ .

#### Gravilla

Para determinar la densidad real, densidad neta y absorción de agua para los pétreos gruesos, en este caso gravilla de  $\frac{3}{4}$ " , se utiliza la norma Nch 1117.

#### Acondicionamiento de la muestra

Igual que en el capítulo anterior, es necesario separar por cuarteo la muestra de grava previamente lavada. Se ocuparon 4 kg de gravilla de  $\frac{3}{4}$ " para realizar el ensayo.

Se deja calentando la muestra al horno a una temperatura de  $110^\circ\text{C}$  hasta que se seque completamente, luego de esto se deja enfriar por 24 horas. Se deja saturando en agua 24 horas más con el fin de llenar los poros de agua luego de sus secado completo.

Luego de esto, se coloca en un canastillo colador de agua y se procede a sumergir este en un balde con agua. Registrar como  $M_1$ , a la masa de la muestra menos la masa del agua desplazada, aproximando a 1 g.

Se retira la muestra del canastillo y se procede a secar superficialmente las partículas cuidando de eliminar las partículas visibles de agua con la ayuda de paños absorbentes, registrar la masa como  $M_2$ .

Se deja secando la muestra por 24 horas a una temperatura de 110°C, se deja enfriar y se registra la masa seca.

### **3.8 Preparación de la mezcla.**

Se fabricaron probetas con 4 dosificaciones para un hormigón H25 distintas, una patrón y las otras 3 la perlita reemplazo parte de la arena en 10%, 30% y 50%.

Para las probetas fabricadas con perlita se tuvieron en cuenta los siguientes las siguientes variables:

- Igual relación agua/cemento (A/C).
- Igual trabajabilidad, variando la cantidad de agua de amasado se mantuvo constante esta variable con los diferentes porcentajes de adición de perlita para identificar la plasticidad que ofrece la perlita en el hormigón.

Se confeccionaron 4 probetas por dosificación, en donde 1 probeta se ensayó a los 7 días y las 3 restantes a los 28 días.

Se efectuaron ensayos de compresión mediante una prensa.

Procedimiento de la elaboración de la mezcla.

Efectuadas ya las correcciones, se procede a medir los materiales, según cantidad corregida.

Reunidos todos los materiales se procedió a confeccionar la mezcla de la siguiente forma:

- Se humedeció la betonera, para que ésta no absorbiera el agua de amasado.
- En primer lugar se introdujo la arena.
- En seguida se adicionó el cemento, y se mezclaron con la arena hasta quedar de apariencia homogénea.
- Luego de esto se adicionó la gravilla y se volvió a mezclar nuevamente hasta quedar de apariencia homogénea.
- Se agregó el volumen calculado de perlita.
- Por último se le agregó el agua.

Terminada la mezcla de todos los materiales se procede a medir la docilidad, esto se realiza mediante el método del cono de Abrams y siguiendo el procedimiento de la norma NCh 1019 of. 74.

## Procedimiento Cono de Abrams.

El procedimiento se puede resumir de la siguiente manera:

- Se colocó el molde sobre la plancha de apoyo horizontal, ambos limpios y humedecidos sólo con agua.
- Se procedió a pararse sobre las pisaderas evitando el movimiento del molde durante el llenado.
- Se llenó el molde con 3 capas de aproximadamente igual volumen, apisonadas con 25 golpes de varilla pisón distribuidos uniformemente.
- Terminado el llenado se enrasa la última capa y se procede a limpiar el hormigón derramado alrededor del cono.
- Se carga el cono con las manos sobre las asas y se procede a retirar los pies de las pisaderas.
- Se levantó el cono y se midió el descenso, la medición se hizo sobre el eje central del molde en su posición original.

## Procedimiento Llenado de Probetas

Se procedió a llenar las probetas de ensayo según lo establece la norma NCh 1017. Of75.

En este caso se confeccionaron probetas cúbicas de 20 x 20 en moldes metálicos, de superficie interior lisa, libres de saltaduras, hendiduras o resaltes, previamente lubricados con desmoldante.

El procedimiento se efectuó de la siguiente forma:

- Se colocó hormigón en dos capas de espesor similar y se procedió a apisonar con la varilla pisón con 25 golpes por capa distribuidos uniformemente.
- Luego de compactados los moldes se enrasa la superficie y finalmente se le da la terminación final con una llana.
- Las muestras se dejan en un lugar seguro protegidas del sol y se identifican provisoriamente hasta su desmolde, donde se marcarán definitivamente.
- Luego de 48 hrs. se procede a desmoldar las probetas, teniendo especial cuidado de no dañarlas y se trasladan a la cámara de curado, donde se mantienen sumergidas en agua a una temperatura controlada entre 17°C y 23°C hasta las fechas de ensayo. En la piscina las probetas están a salvo de sufrir cargas o impactos que puedan dañar el hormigón.

### 3.9 Ensayo de Compresión.

Este ensayo se llevó a cabo según la norma, NCh 1037. Of77, “Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.”

Para la realización del ensayo se utilizó la prensa marca “Control’s”, la cual tendrá una rigidez suficiente para resistir los esfuerzos del ensayo sin alterar las condiciones de distribución y ubicación de la carga y lectura de los resultados.

Las probetas fueron retiradas de la cámara de curado y se registraron sus dimensiones y su peso.

Realización del ensayo

Los pasos para realizar el ensayo fueron los siguientes:

- Se limpió la superficie de contacto de las placas de carga de la prensa y de las caras de ensayo de las probetas.
- Se colocó la probeta alineada y centrada en la máquina de ensayo con la cara de llenado frente al operador.
- Se aplicó la carga en forma uniforme y se registró la carga máxima expresada en Mpa.



*Ilustración 4: Prensa utilizada para los ensayos.*

### 3.10 Evaluación Estadística

Para realizar la evaluación estadística se utilizó la norma NCh 1998. Of89. La finalidad de esta es determinar la conformidad de los resultados de la resistencia a la compresión con respecto a la especificada y evaluar el control de ensayos.

Para la evaluación estadística que se muestra a continuación, se consideraron las resistencias a los 28 días y se consideró una fracción defectuosa de 10%.

Donde:

$s$ : Desviación normal de las resistencias individuales, MPa.

$t$ : factor estadístico según la fracción defectuosa y el número de muestras.

$k_2$ : Constante de evaluación para  $f_i$

$f_m$ : Resistencia media del lote, MPa

$f_i$ : Resistencia individual de cada muestra, MPa

$N$ : Número total de muestras que representan al lote.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (f_i - f_m)^2}{N - 1}}$$

Tabla 15: Factor estadístico  $t$ .

Numero de muestras	Fracción defectuosa %		
	5	10	20
3	2,920	1,886	1,061
4	2,353	1,638	0,978
5	2,132	1,533	0,941
6	1,015	1,476	0,920
7	1,943	1,440	0,906
8	1,895	1,415	0,896
9	1,860	1,397	0,889
10	1,833	1,383	0,883
11	1,812	1,372	0,879
12	1,796	1,363	0,876
13	1,782	1,356	0,873
14	1,771	1,350	0,870
15	1,761	1,345	0,868
16	1,753	1,341	0,866
17	1,746	1,337	0,865
18	1,740	1,333	0,863
19	1,734	1,330	0,862
20	1,729	1,328	0,861

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16: Factor  $k_2$  según fracción defectuosa y grado de hormigón.

Fracción defectuosa aceptada		Grado de Hormigón			
		H5	H10	H15	H20 o mayor
5	$k_1$	0,3	0,5	0,8	1
	$k_2$	0,6	1,2	1,9	2,5
10	$k_1$	0	0	0	0
	$k_2$	0,9	1,7	2,6	3,5
20	$k_1$	0,4	0,7	1,1	1,5
	$k_2$	1,4	2,7	4,1	5,5

Fuente: Elaboración propia

Se considera que la resistencia de un determinado lote de hormigón es satisfactoria, si se cumplen las siguientes condiciones simultáneamente:

a)  $f_m \geq f_c + s^*t$

b)  $f_i \geq f_c - k_2$

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Ensayos Perlita

#### 4.1.1 Granulometría

Se hizo un ensayo de granulometría de la perlita tomando una muestra representativa de esta, para luego pasarla por tamices y obtener así una curva que determina los tamaños de la muestra. La perlita contiene una cantidad de finos considerable, que fue posible separar gracias a la granulometría.

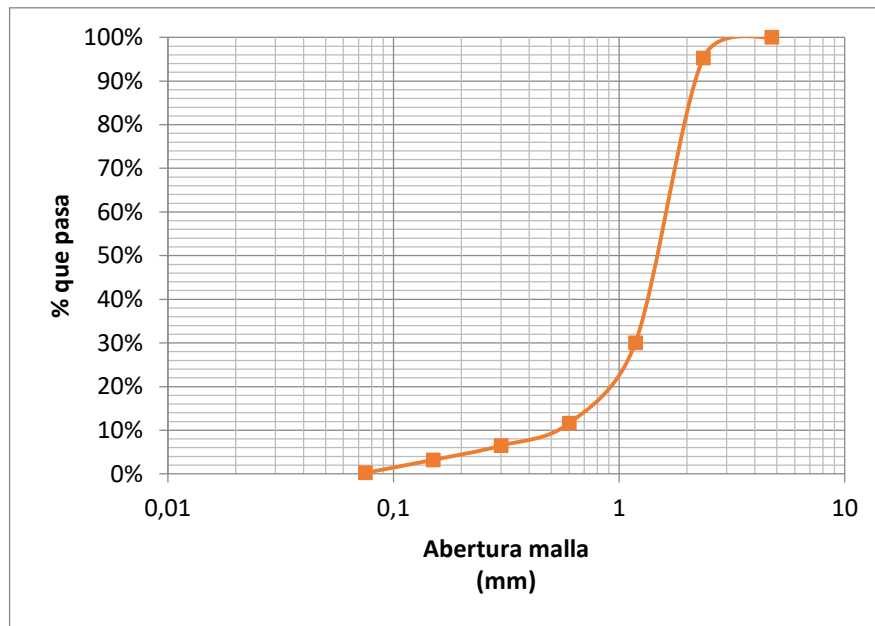
Este ensayo tiene la finalidad de determinar en forma cuantitativa la distribución de partículas de perlita de acuerdo a su tamaño.

La norma NCh163 of. 79 indica utilizar una masa de 500 gr en arenas, en vista de que la perlita tiene una densidad mucho menor se utilizó una masa de 144 gr. Ahora el volumen de 500 gr de arena es equivalente a 144 gr de perlita.

*Tabla 17: Granulometría perlita*

<b>Malla N°</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido (gr)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que pasa</b>
<b>4</b>	4,75	0	0%	100%
<b>10</b>	2,36	6,85	5%	95%
<b>16</b>	1,18	93,95	65%	30%
<b>30</b>	0,6	26,52	18%	12%
<b>50</b>	0,3	7,36	5%	7%
<b>100</b>	0,15	4,7	3%	3%
<b>200</b>	0,075	4,27	3%	0%

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 5: Curva granulométrica de la perlita.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.1.2 Densidad máxima y mínima de la perlita.**

Se sabe que la perlita reemplazará en un porcentaje a la arena para la fabricación de hormigones, por lo que es necesario verificar la densidad de este material. La norma NCh 1726 establece la determinación de densidades máximas y mínimas para suelos no cohesivos.



*Ilustración 6: Molde + perlita, ensayo de densidad máxima y mínima.*

## Resultados

Densidad mínima

Tabla 18: Pesajes y volúmenes.

	<b>Peso Molde (Kg)</b>	<b>Peso Molde +Material (Kg)</b>	<b>Peso Material (Kg)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Pesaje 1</b>	3,592	3,85	0,258	2,833E-03
<b>Pesaje 2</b>	3,592	3,83	0,238	2,833E-03
<b>Pesaje 3</b>	3,592	3,82	0,228	2,833E-03
<b>Promedio</b>	3,592	3,833	0,241	2,833E-03

Fuente: Elaboración propia.

$$\delta_{min} = \frac{0,241}{2,83 \cdot 10^{-3}} = 85,2 \frac{Kg}{m^3}$$

Densidad máxima

<b>Volumen inicial (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Asentamiento (cm)</b>	<b>Volumen Final (m<sup>3</sup>)</b>
2,833E-03	5	2,480E-03

Fuente: Elaboración propia.

$$\delta_{max} = \frac{0,241}{2,48 \cdot 10^{-3}} = 97,33 \frac{Kg}{m^3}$$



Imagen 3: Molde + perlita, descenso del volumen de perlita.

Los resultados de este ensayo determinaron una densidad máxima de la perlita de 97,33 kg/m<sup>3</sup> y una densidad mínima de 85,2 kg/m<sup>3</sup>. Estos resultados no son lejanos a los especificados en la norma de acondicionamiento térmica (Nch 853 of 2007), que indica una densidad aparente de 90 kg/m<sup>3</sup>.

## 4.2 Ensayos Arena y Gravilla.

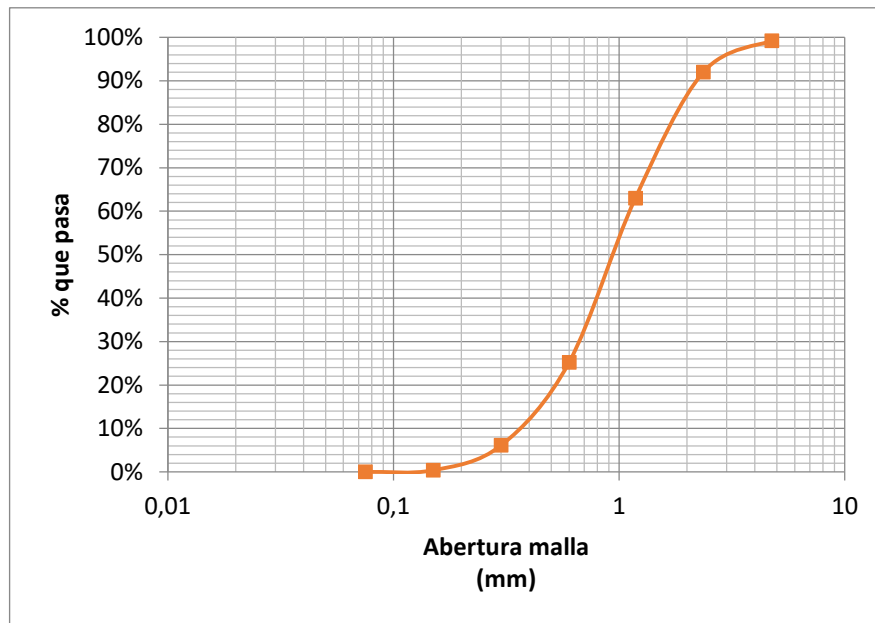
### 4.2.1 Granulometría.

Arena

*Tabla 19: Granulometría arena.*

<b>Malla N°</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso retenido (gr)</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que pasa</b>
<b>3/8"</b>	9,5	0	0	100%
<b>4</b>	4,75	4	1%	99%
<b>10</b>	2,36	38	7%	92%
<b>16</b>	1,18	152	29%	63%
<b>30</b>	0,6	198	38%	25%
<b>50</b>	0,3	100	19%	6%
<b>100</b>	0,15	30	6%	0%
<b>200</b>	0,075	2	0%	0%
<b>Pasa N°200</b>		0	0%	0%

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 7: Curva granulométrica de la arena.*

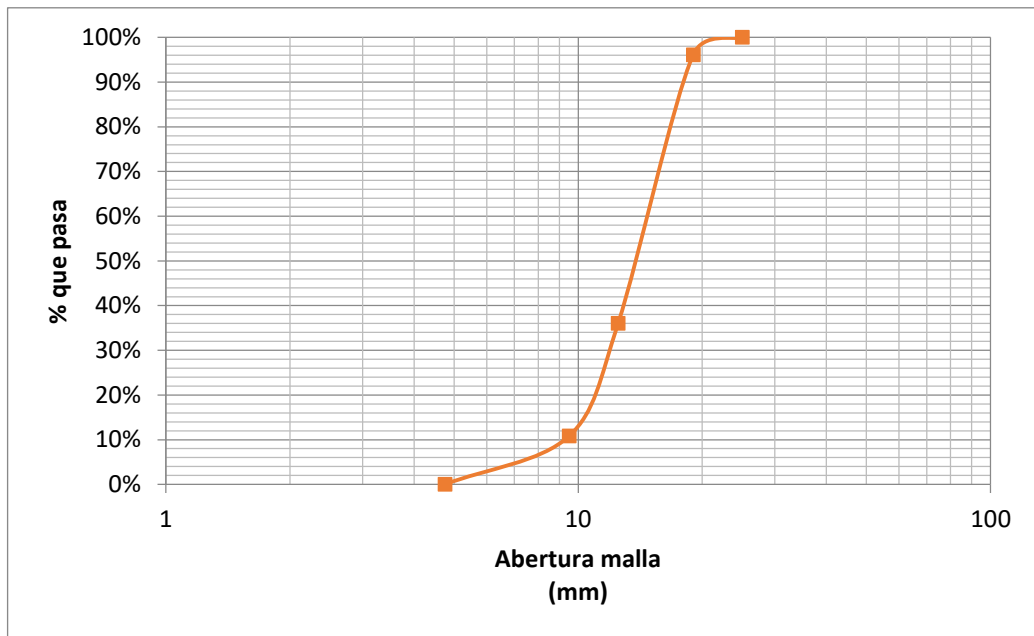
*Fuente: Elaboración propia.*

## Gravilla

*Tabla 20: Granulometría gravilla.*

Malla N°	Abertura (mm)	Peso retenido (Kg)	% Retenido	% Que pasa
1"	20	0	0%	100%
3/4"	19	0,26	4%	96%
1/2"	12,5	4	60%	36%
3/8"	9,5	1,68	25%	11%
4	4,75	0,72	11%	0%

*Fuente: Elaboración propia.*



*Ilustración 8: Curva granulométrica de la gravilla.*

*Fuente: Elaboración propia.*

#### **4.2.2 Densidades de los áridos.**

Arena

De los ensayos realizados se obtenidos los siguientes resultados:

$$M_{SSS} = 270 \text{ gr}$$

$$M_M = 735 \text{ gr}$$

$$M_S = 265 \text{ gr}$$

$$M_a = 578 \text{ gr}$$

Donde, la densidad real saturada superficialmente seca, Densidad neta, densidad real del árido seco y absorción corresponden a las siguientes expresiones respectivamente:

$$\rho_{RT} = \frac{M_{SSS}}{M_a + M_{SSS} - M_M} \cdot 1000 = 2389 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_N = \frac{M_s}{M_a + M_s - M_M} \cdot 1000 = 2454 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{M_a + M_{SSS} - M_M} \cdot 1000 = 2345 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\alpha = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \cdot 100 = 1,89 \%$$

Gravilla

Los valores obtenidos en el ensayo fueron los siguientes:

$$M_1 = 2305 \text{ gr}$$

$$M_2 = 3640 \text{ gr}$$

$$M_3 = 3600 \text{ gr}$$

Donde, la densidad real saturada superficialmente seca, densidad neta, densidad real del árido seco y absorción corresponden a las siguientes expresiones respectivamente:

$$\rho_{RT} = \frac{M_2}{M_2 - M_1} \cdot 1000 = 2727 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_N = \frac{M_3}{M_3 - M_1} \cdot 1000 = 2780 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\rho_s = \frac{M_3}{M_2 - M_1} \cdot 1000 = 2697 \frac{Kg}{m^3}$$

$$\alpha = \frac{M_2 - M_3}{M_3} \cdot 100 = 1,1 \%$$

### 4.3 Dosificación según Nch170.Of85.

#### Resistencia requerida

Se sabe que:

$$f_r = f_c + t \cdot s$$

Se tiene que:

$$f_c = 250 \frac{kg}{cm^2}, \text{ según tabla N}^\circ 7$$

El Nivel de confianza a utilizar es de 95%, por lo que:

$$t = 1.645, \text{ según tabla N}^\circ 8$$

Las condiciones de trabajo serán consideradas de tipo “medias”, por lo que:

$$s = 7.0, \text{ según tabla N}^\circ 9$$

Luego:

$$f_r = f_c + t \cdot s = 250 + 1.645 \cdot 7 = 261.52 \frac{kg}{cm^2} = 26 \text{ Mpa}$$

#### Determinación agua-cemento

Se sabe que

$$f_{r25} = 26 \text{ Mpa}$$

Además  $R_{A/C} = 0.55$  ( $f_r = 25$ ) y  $R_{A/C} = 0.5$  ( $f_r = 29$ ), por lo que  $R_{A/C}$  para  $f_r = 26$  se resuelve como sigue a continuación:

$$R_{A/C25} = \left( \frac{0.55-0.5}{29-26} \right) \cdot (26 - 29) + 0.55 = 0.513, \text{ según tabla N}^\circ 4$$

#### Determinación del volumen de agua

Suponemos una docilidad de descenso de cono de Abrams entre 10 a 15 cm y un tamaño máximo nominal de árido de 20 mm. Entonces según tabla N°5 se tiene que el volumen de agua de amasado es de  $W=0.205 \text{ m}^3$ .

### Cantidad de Cemento

Se sabe  $R_{A/C} = \frac{Ag}{C_e}$ , despejando "Ce" se tiene que  $C_e = \frac{Ag}{R_{A/C}}$ , donde Ag es el volumen de agua de amasado en Lt y Ce es la cantidad de cemento en kg.

$$C_e = \frac{Ag}{R_{A/C}} = \frac{205}{0.513} = 400 \text{ kg}$$

### Determinación de aire atrapado

Se sabe que el tamaño máximo nominal del árido es de 20mm aprox. Por lo que el aire atrapado es de 0.02 m<sup>3</sup>, según tabla N°6.

### Determinación del árido combinado.

Se sabe que:

$$C + W + u + G + A = 1 \text{ m}^3$$

Se sabe que Ce=400 kg y la densidad del cemento es de 3000kg/m<sup>3</sup>. Entonces el volumen de cemento "C" se calcula como sigue:

$$C = \frac{400 \text{ kg}}{3000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.133 \text{ m}^3 = 133 \text{ Lt}$$

Además se sabe que:

$$W=0.205 \text{ m}^3$$

$$u=0.02 \text{ m}^3$$

Entonces despejando de la formula G+A se tiene que:

$$(G + A) = 1 - C - W - u = 1 - 0.133 - 0.205 - 0.02 = 0.642 \text{ m}^3 = 642 \text{ Lt}$$

*Tabla 21: Cuadro resumen dosificación para 1m<sup>3</sup> de hormigón.*

Dosificación n	f <sub>c</sub> (Mpa)	t	s	f <sub>r</sub> (Mpa)	R <sub>A/C</sub>	u (Lt)	W (Lt)	C (Lt)	G+A (Lt)
H25	25	1.645	7	26	0.513	20	205	133	642

*Fuente: Elaboración propia*

*Tabla 22: Cuadro resumen dosificación para una probeta cúbica (d=20mm ∧ v=8Lt).*

Dosificación	u (Lt)	W (Lt)	C (Lt)	G+A (Lt)
H25	0,16	1,64	1,064	5,136

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 4.4 Dosificación según Fairy – Josiel

Para realizar este método consideraremos que la confección será de calidad “Buena”, debido a que trabajaremos dentro de un laboratorio, por lo que el valor de la constante que amplifica el valor de fp será de 1.144.

El tipo de cemento a utilizar será de carácter corriente por lo que “E” será de 1.05.

Para la combinación de arena más gravilla

Se sabe que la gravilla a utilizar tiene un diámetro máximo nominal de  $\frac{3}{4}$  in, aproximadamente 20 mm, por lo que  $D_n = 20$  mm. Entonces la curva y  $(D_n/2)$  queda como sigue:

Tabla 23: Datos Curva Y.

X	Y
0.005	0
$D_n/2$	Y
$D_n$	100

Fuente: Elaboración propia

Se sabe que:

$$Y\left(\frac{D_n}{2}\right) = M + N$$

Para este caso usaremos una consistencia del hormigón plástica y una compactación cuidadosa. La arena será considerada rodada y la gravilla chancada, por lo que el valor de M será de 27.

Además se sabe que el tamaño máximo nominal del árido es de 20 mm, entonces se tiene que N será 32.04.

Luego:

$$Y(10) = 27 + 32.04 = 59.04$$

*Nota:* el diámetro nominal debe quedar expresado en la raíz quinta (absisas).

Del método gráfico de Fairy–Josiel (FJ), además considerando la granulometría anteriormente mostrada, se puede obtener el siguiente gráfico:

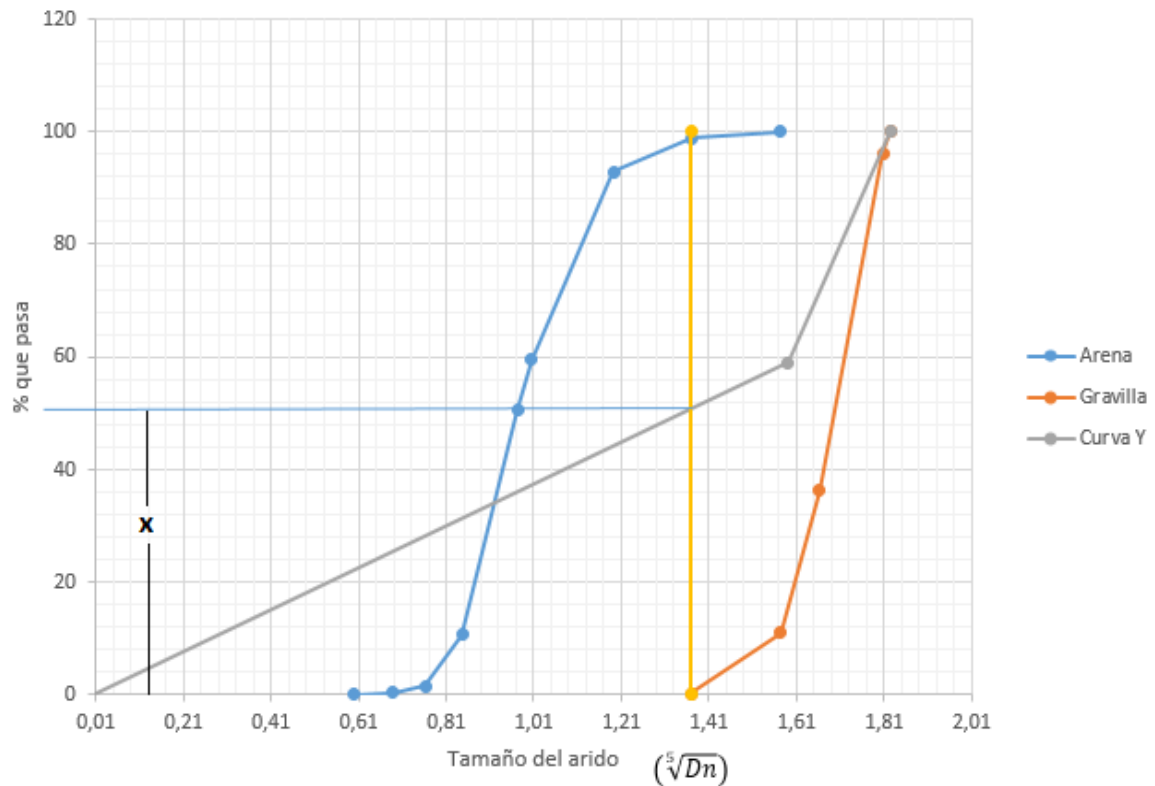


Ilustración 9: Gráfica de distribución de áridos según Fairy – Josiel

Fuente: Elaboración propia

Es posible a través del gráfico determinar el valor de x:

$$x = 0,51$$

Se sabe que:

$$fd = fp \cdot 1.144 = 250 \cdot 1.144 = 286 \frac{Kg}{cm^2} \cong 28.6 Mpa$$

Razón agua cemento (A/C)

Se obtiene al interpolar entre los valores:

31	0.46
28.6	A/C
26	0.53

Por lo que A/C = 0.494.

Cantidad de cemento (C)

$$C = fd \cdot 1.05 = 286 \cdot 1.05 = 300.3 \frac{Kg}{m^3}$$

Agua de amasado (A)

$$A = C \cdot \left(\frac{A}{C}\right) = 300.3 \cdot 0.494 = 148.35 L = 0.148 m^3$$

Aire atrapado (ha)

Como el diámetro máximo nominal de árido es 20 mm se tiene que:

$$ha = 0.02 m^3$$

Resolviendo el valor de z se tiene que:

$$z = 1 - (ha + A) = 1 - (0.02 + 0.148) = 0.832$$

Volumen de cemento (c)

$$c = \frac{C}{z \cdot 3000} = \frac{300.3}{0.832 \cdot 3000} = 0.12 m^3$$

Áridos

$$f = x - c = 0.51 - 0.12 = 0.39$$

$$g = 1 - x = 1 - 0.51 = 0.49$$

$$F = \rho_f \cdot f \cdot z = 2345 \cdot 0.39 \cdot 0.8342 = 762.92 Kg$$

$$G = \rho_g \cdot g \cdot z = 2697 \cdot 0.49 \cdot 0.832 = 1099.51 Kg$$

$$\sum F, G = 1862.43 Kg$$

Luego si llevamos estos valores a porcentajes se tiene que:

$$\%F = \frac{811.52}{1862.43} = 0.409 = 41\%$$

$$\%G = \frac{1099.51}{1862.43} = 0.591 = 59\%$$

#### 4.5 Granulometría combinada.

Para este caso el tamaño máximo nominal corresponde a 20 mm aproximadamente. Entonces se utilizaran las curvas de este caso solamente.

##### 4.5.1 Caso 1: Patrón.

Para este caso se utilizó como árido arena y gravilla. En donde la arena consta de un 41% de la mezcla y la gravilla de un 59%.

*Tabla 24: Granulometría combinada de 41% arena + 59% gravilla.*

Malla N°	Abertura (mm)	% Que pasa		% que pasa total
		Arena 41%	Gravilla 59%	
1"	25	41%	59,0%	100%
3/4"	19	41%	56,7%	97,7%
1/2"	12,5	41%	21,3%	62,3%
3/8"	9,5	41%	6,4%	47,4%
4	4,75	40,69%	0%	40,7%
10	2,36	37,71%	0%	37,7%
16	1,18	12,30%	0%	12,3%
30	0,6	4,75%	0%	4,7%
50	0,3	2,65%	0%	2,7%
100	0,15	1,32%	0%	1,3%
200	0,075	0%	0%	0%

*Fuente: Elaboración propia.*

##### 4.5.2 Caso 2: Perlita 10%.

Para este caso se utilizó como árido perlita, arena y gravilla. En donde la perlita corresponde a un 10% de la arena, o sea un 4,1% de la mezcla, la arena consta de un 36,9% de la mezcla y la gravilla de un 59%.

Tabla 25: Granulometría combinada de 4,1% perlita + 36,9% arena + 59% gravilla.

Malla N°	Abertura (mm)	% Que pasa			% que pasa total
		Perlita 4,1%	Arena 36,9%	Gravilla 59%	
1"	25	4,1%	36,9%	59,0%	100%
3/4"	19	4,1%	36,9%	56,7%	97,7%
1/2"	12,5	4,1%	36,9%	21,3%	62,3%
3/8"	9,5	4,1%	36,9%	6,4%	47,4%
4	4,75	4,1%	36,6%	0%	40,7%
10	2,36	3,9%	33,9%	0%	37,8%
16	1,18	1,2%	23,2%	0%	24,5%
30	0,6	0,5%	9,3%	0%	9,8%
50	0,3	0,3%	2,3%	0%	2,5%
100	0,15	0,1%	0,1%	0%	0,3%
200	0,075	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.3 Caso 3: Perlita 30%.

Para este caso se utilizó como árido perlita, arena y gravilla. En donde la perlita corresponde a un 30% de la arena, o sea un 12,3% de la mezcla, la arena consta de un 28,7% de la mezcla y la gravilla de un 59%.

Tabla 26: Granulometría combinada de 12,3% perlita + 28,7% arena + 59% gravilla.

Malla N°	Abertura (mm)	% Que pasa			% que pasa total
		Perlita 12,3%	Arena 28,7%	Gravilla 59%	
1"	25	12,3%	28,7%	59,0%	100%
3/4"	19	12,3%	28,7%	56,7%	97,7%
1/2"	12,5	12,3%	28,7%	21,3%	62,3%
3/8"	9,5	12,3%	28,7%	6,4%	47,4%
4	4,75	12,3%	28,5%	0,0%	40,8%
10	2,36	11,7%	26,4%	0%	38,2%
16	1,18	3,7%	18,1%	0%	21,8%
30	0,6	1,4%	7,2%	0%	8,7%
50	0,3	0,8%	1,8%	0%	2,5%
100	0,15	0,4%	0,1%	0%	0,5%
200	0,075	0%	0%	0%	0%

Fuente: Elaboración propia

#### 4.5.4 Caso 4: Perlita 50%.

Para este caso se utilizó como árido perlita, arena y gravilla. En donde la perlita corresponde a un 50% de la arena, o sea un 20,5% de la mezcla, la arena consta de un 20,5% de la mezcla y la gravilla de un 59%.

*Tabla 27: Granulometría combinada de 20,5% perlita + 20,5% arena + 59% gravilla.*

Malla N°	Abertura (mm)	% Que pasa			% que pasa total
		Perlita 20,5%	Arena 20,5%	Gravilla 59%	
1"	25	20,5%	20,5%	59,0%	100%
3/4"	19	20,5%	20,5%	56,7%	97,7%
1/2"	12,5	20,5%	20,5%	21,3%	62,3%
3/8"	9,5	20,5%	20,5%	6,4%	47,4%
4	4,75	20,5%	20,3%	0%	40,8%
10	2,36	19,5%	18,9%	0%	38,4%
16	1,18	6,2%	12,9%	0%	19,1%
30	0,6	2,4%	5,2%	0%	7,5%
50	0,3	1,3%	1,3%	0%	2,6%
100	0,15	0,7%	0,1%	0%	0,7%
200	0,075	0%	0%	0%	0%

*Fuente: Elaboración propia*

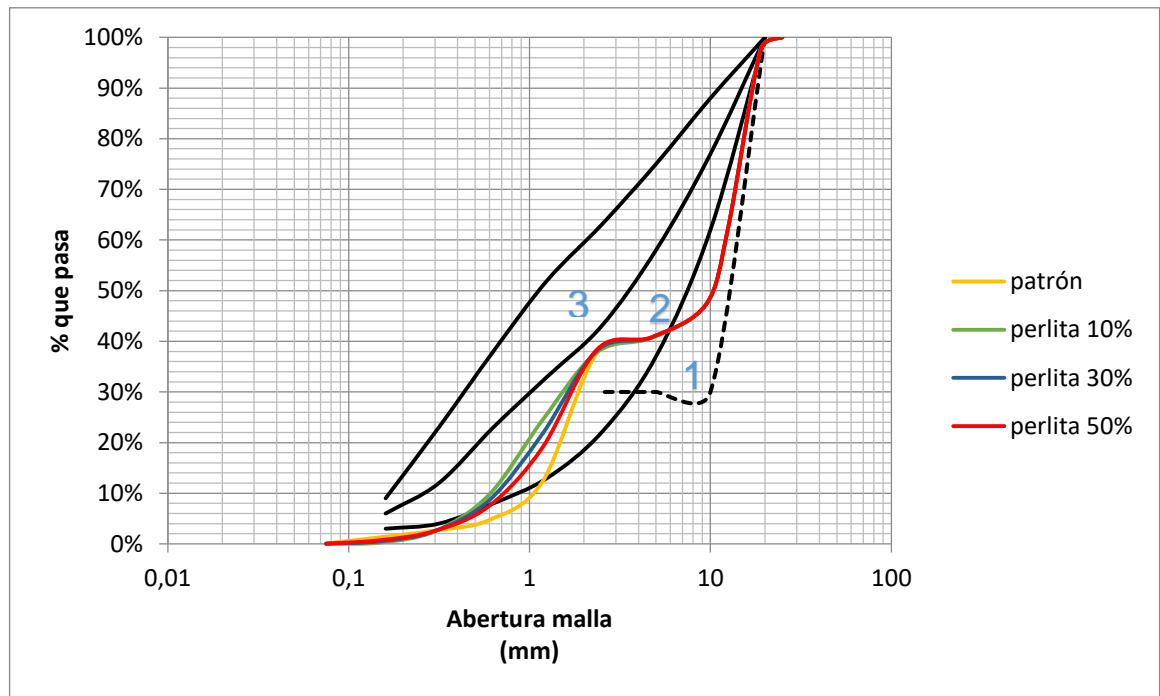


Ilustración 10: Granulometrías combinadas, todos los casos.

Fuente: Elaboración propia

Se puede apreciar que las curvas atraviesan las zonas 1 y 2. La zona 1 representa una granulometría discontinua, en cambio la zona 2 es la preferida para realizar dosificaciones.

#### 4.6 Dosificación Final

A continuación se muestra la dosificación para cada caso.

Tabla 28: Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón.

Dosificación	u (Lt)	W (Lt)	C (Kg)	Áridos (Kg)		
				Perlita (Kg)	Arena (Kg)	Gravilla (Kg)
H25 patrón	20	205	399	-	617,3	1021,6
Perlita 10%	20	205	399	2,4	540,5	1021,6
Perlita 30%	20	205	399	7,1	432,1	1021,6
Perlita 50%	20	205	399	11,8	308,6	1021,6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29: Dosificación para una probeta cúbica de 8 Lt. de hormigón.

Dosificación	u (Lt)	W (Lt)	C (Kg)	Áridos (Kg)		
				Perlita (Kg)	Arena (Kg)	Gravilla (Kg)
H25 patrón	0,160	1,640	3,192	-	4,938	8,173
Perlita 10%	0,160	1,640	3,192	0,019	4,444	8,173
Perlita 30%	0,160	1,640	3,192	0,057	3,457	8,173
Perlita 50%	0,160	1,640	3,192	0,095	2,469	8,173

Fuente: Elaboración propia

#### 4.7 Corrección del volumen de agua por efecto de la absorción y la humedad de los áridos.

Se sabe que los áridos se encuentran expuestos a las condiciones atmosféricas (intemperie), por lo que están expuestos a humedad, además estos poseen un cierto grado de absorción de agua, lo que resta agua al amasado. El Instituto del cemento y del hormigón en Chile ofrece tres tipos de correcciones en las dosificaciones, para una mayor rapidez se prefirió hacer la corrección del agua de amasado, la cual al agua total se le debe restar el agua aportada por los áridos; en este caso se refiere a la humedad que los áridos contienen. La forma en que se determinaron las correcciones se muestra a continuación:

$$w = w_t + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot m_i - \sum_{i=1}^n h_i \cdot m_i$$

Donde:

$w$  = agua total rectificada.

$w_t$  = agua teórica.

$\alpha$  = absorción de los áridos.

$h$  = humedad de los áridos.

$m$  = masa de los áridos.

#### 4.7.1 Humedad de áridos previa a confección de probetas

$$h = \frac{m_H - m_S}{m_S - m_R} \cdot 100\%$$

Donde:

$h$  = humedad de los áridos.

$m_H$  = masa del árido húmedo.

$m_S$  = masa del árido seco.

$m_R$  = masa del recipiente.

Arena

$$h = \frac{0.617 - 0.611}{0.611 - 0.117} \cdot 100\% = 1.21 \%$$

Gravilla

$$h = \frac{3.195 - 3.177}{3.177 - 1.95} \cdot 100\% = 1.47 \%$$

Perlita

$$h = \frac{0.262 - 0.261}{0.261 - 0.117} \cdot 100\% = 0.007\% \approx 0\%$$

Para el cálculo de corrección por humedad y absorción se consideraron las siguientes condiciones:

*Tabla 30: Densidad, absorción y humedad de los áridos.*

material	densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	$\alpha$	Humedad
arena	2345	1,89%	1,21%
gravilla	2697	1,10%	1,47%
perlita	90	7%	0%

*Fuente: Elaboración propia*

Reemplazando se tiene para cada caso, considerando 1m<sup>3</sup> de hormigón:

*Tabla 31: Variación de la cantidad de agua por efecto de la humedad y la absorción de los áridos.*

Dosificación	$W_{teorica}$ (Lt)	$\Delta W$ (Lt)	$W_{total}$ (Lt)
H25 patrón	205	0,42	205,42
Perlita 10%	205	0,07	205,07
Perlita 30%	205	-0,33	204,67
Perlita 50%	205	-0,84	204,16

*Fuente: Elaboración propia*

Entonces la tabla actualizada queda como sigue:

*Tabla 32: Dosificación final a ensayar.*

Dosificación	u (Lt)	W (Lt)	C (Kg)	Áridos (Kg)		
				Perlita (Kg)	Arena (Kg)	Gravilla (Kg)
H25 patrón	20	205,42	399	0	617,3	1021,6
Perlita 10%	20	205,07	399	2,4	540,5	1021,6
Perlita 30%	20	204,67	399	7,1	432,1	1021,6
Perlita 50%	20	204,16	399	11,8	308,6	1021,6

*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.8 Cono de Abrams

La docilidad es la facilidad que tiene el hormigón para ser transportado, colocado y compactado sin que se produzca segregación. El asentamiento del cono es directamente proporcional a la docilidad del hormigón, y esto es debido a la cantidad de agua que contenga la mezcla. Para cada amasada fue necesario determinar la docilidad por medio del asentamiento de cono, el cual debía dar entre valores de 10 a 15 cm, de acuerdo a la dosificación de agua y cemento dada por el capítulo anterior.

Las mezclas dieron los siguientes valores de cono que se presentan en la siguiente tabla:

*Tabla 33: Cono de Abrams, fecha de fabricación, y edad de ensayo de las distintas dosificaciones.*

<b>Probeta N°</b>	<b>Fecha Fabricación</b>	<b>Dosificación</b>	<b>Edad de ensayo (días)</b>	<b>Cono de Abrams (cm)</b>
1	18-11-2016	H25 patrón	7	9
2	18-11-2016	H25 patrón	28	9
3	18-11-2016	H25 patrón	28	9
4	18-11-2016	H25 patrón	28	9
5	21-11-2016	10% perlita	7	10.5
6	21-11-2016	10% perlita	28	10.5
7	21-11-2016	10% perlita	28	10.5
8	21-11-2016	10% perlita	28	10.5
9	23-11-2016	30% perlita	7	11
10	23-11-2016	30% perlita	28	11
11	23-11-2016	30% perlita	28	11
12	23-11-2016	30% perlita	28	11
13	25-11-2016	50% perlita	7	11.5
14	25-11-2016	50% perlita	28	11.5
15	25-11-2016	50% perlita	28	11.5
16	25-11-2016	50% perlita	28	11.5

*Fuente: Elaboración propia*

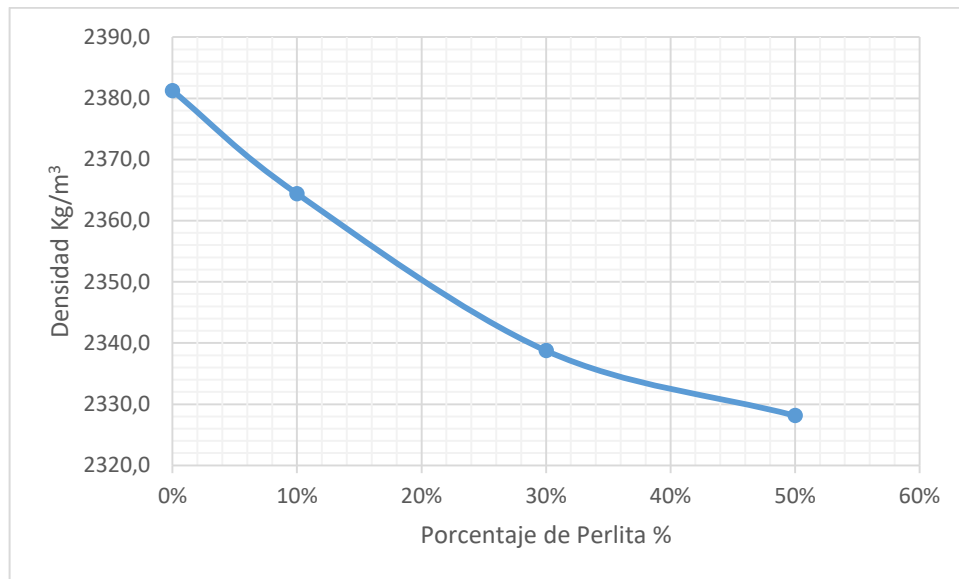
## 4.9 Resultados de los Ensayos a Compresión.

### 4.9.1 Densidades de los hormigones.

*Tabla 34: Densidad promedio según dosificación.*

Dosificación	Probeta	Peso	Volumen	Área	Densidad	Densidad promedio
	N°	Kg	m <sup>3</sup>	cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>
<b>H25 Patrón</b>	1	19,24	0,008	400	2405	2381,3
	2	19,08	0,008	400	2385	
	3	18,98	0,008	400	2372,5	
	4	18,9	0,008	400	2362,5	
<b>10% Perlita</b>	5	18,817	0,008	400	2352,13	2364,4
	6	18,994	0,008	400	2374,25	
	7	18,882	0,008	400	2360,25	
	8	18,968	0,008	400	2371	
<b>30% Perlita</b>	9	18,8	0,008	400	2350	2338,8
	10	18,7	0,008	400	2337,5	
	11	18,72	0,008	400	2340	
	12	18,62	0,008	400	2327,5	
<b>50% Perlita</b>	13	18,72	0,008	400	2340	2328,1
	14	18,62	0,008	400	2327,5	
	15	18,52	0,008	400	2315	
	16	18,64	0,008	400	2330	

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 11: Gráfico densidad promedio vs porcentaje de perlita.*

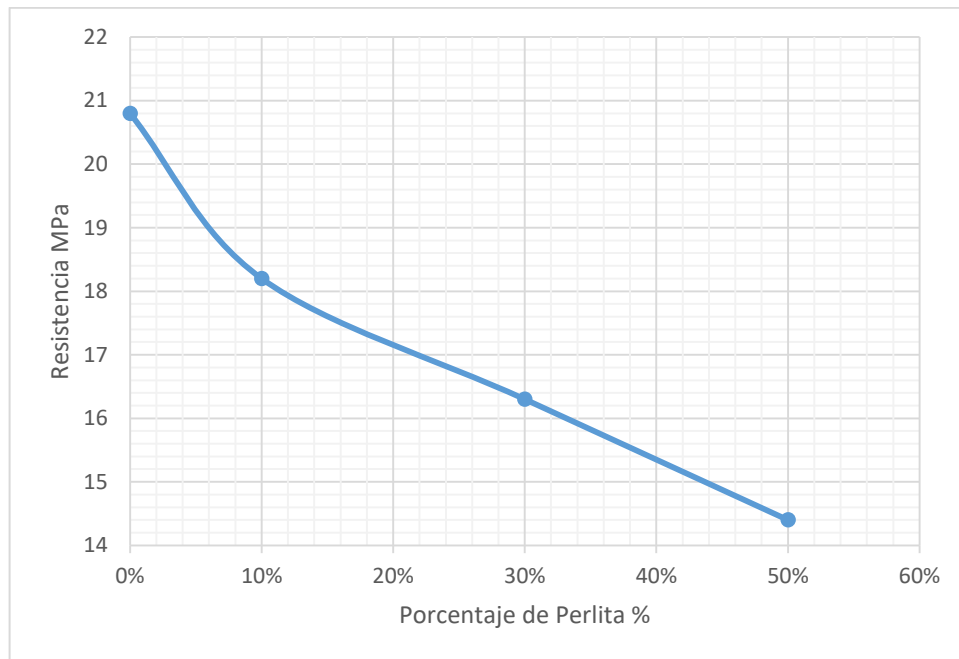
*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.9.2 Resistencia a los 7 días

*Tabla 35: Resistencia del hormigón a los 7 días.*

<b>Dosificación</b>	<b>Probeta N°</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>
<b>H25 patrón</b>	1	20,8
<b>10% perlita</b>	5	18,2
<b>30% perlita</b>	9	16,3
<b>50% perlita</b>	13	15,5

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 12: Gráfico resistencia 7 días vs porcentaje de perlita.*

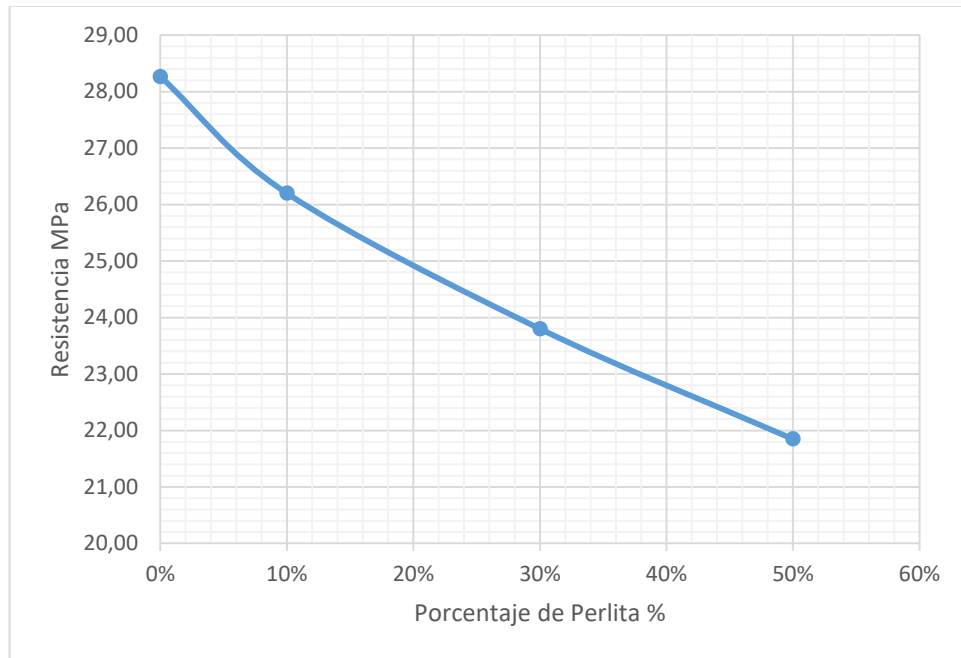
*Fuente: Elaboración propia*

#### 4.9.3 Resistencia a los 28 días

*Tabla 36: Resistencia del hormigón a los 28 días.*

Dosificación	Probeta N°	Resistencia (MPa)	Resistencia media (MPa)
<b>H25 patrón</b>	2	28,6	28,27
	3	28,2	
	4	28	
<b>10% perlita</b>	6	26,5	26,20
	7	25,8	
	8	26,3	
<b>30% perlita</b>	10	24,1	23,80
	11	24	
	12	23,3	
<b>50% perlita</b>	14	21,9	21,85
	15	22,1	
	16	21,6	

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 13: Gráfico resistencia media 28 días vs porcentaje de perlita.*

*Fuente: Elaboración propia*

## 4.10 Resultados Evaluación Estadística.

### 4.10.1 Evaluación estadística probeta H25 patrón.

A continuación se muestran los factores obtenidos de acuerdo a la dosificación:

*Tabla 37: Factores s, t, k<sub>2</sub> para la dosificación patrón.*

Dosificación	Probeta N°	Resistencia (Mpa)	f <sub>m</sub> (MPa)	s	t	k <sub>2</sub>
H25 patrón	2	28,6	28,27	0,09	1,886	3,5
	3	28,2				
	4	28				

*Fuente: Elaboración propia*

Ahora considerando  $f_c=25$  MPa

Revisando la 1° condición se tiene:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t$$

Reemplazando

$$28,27 \geq 25 + 0,09 \cdot 1,886 = 25,17$$

$$28,27 \geq 25,17$$

Por lo tanto cumple esta condición.

Revisando la 2° condición se tiene:

$$f_i \geq f_c - k_2$$

Probeta 2

$$28,6 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$28,6 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 3

$$28,2 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$28,2 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 4

$$28 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$28 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Como se cumplen ambas condiciones se acepta el hormigón H-25 patrón.

**4.10.2 Evaluación estadística probeta con 10% de perlita.**

A continuación se muestran los factores obtenidos de acuerdo a la dosificación:

*Tabla 38: Factores s, t, k<sub>2</sub> para la dosificación 10% de perlita.*

Dosificación	Probeta N°	Resistencia (Mpa)	f <sub>m</sub> (MPa)	s	t	k <sub>2</sub>
10% perlita	6	26,5	26,20	0,13	1,886	3,5
	7	25,8				
	8	26,3				

*Fuente: Elaboración propia*

Ahora considerando f<sub>c</sub>=25 MPa

Revisando la 1° condición se tiene:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t$$

Reemplazando

$$26,2 \geq 25 + 0,13 \cdot 1,886$$

$$26,2 \geq 25,25$$

Por lo tanto cumple esta condición.

Revisando la 2° condición se tiene:

$$f_i \geq f_c - k_2$$

Probeta 6

$$26,5 \geq 25 - 3,5$$

$$26,5 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 7

$$25,8 \geq 25 - 3,5$$

$$25,8 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 8

$$26,3 \geq 25 - 3,5$$

$$26,3 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Como se cumplen ambas condiciones se acepta el hormigón con 10% de perlita.

#### 4.10.3 Evaluación estadística probeta con 30% de perlita.

A continuación se muestran los factores obtenidos de acuerdo a la dosificación:

*Tabla 39: Factores s, t, k<sub>2</sub> para la dosificación 30% de perlita.*

Dosificación	Probeta N°	Resistencia (Mpa)	f <sub>m</sub> (MPa)	s	t	k <sub>2</sub>
30% perlita	10	24,1	23,80	0,19	1,886	3,5
	11	24				
	12	23,3				

*Fuente: Elaboración propia*

Ahora considerando  $f_c=25$  MPa

Revisando la 1° condición se tiene:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t$$

Reemplazando

$$23,8 \geq 25 + 0,19 \cdot 1,886$$

$$23,8 \geq 25,36$$

Por lo tanto NO cumple esta condición.

Revisando la 2° condición se tiene:

$$f_i \geq f_c - k_2$$

Probeta 10

$$24,1 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$24,1 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 11

$$24 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$24 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 12

$$23,3 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$23,3 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Como NO se cumplen ambas condiciones NO se acepta el hormigón con 30% de perlita.

Ahora considerando  $f_c=20$  MPa

Revisando la 1° condición se tiene:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t$$

Reemplazando

$$23,8 \geq 20 + 0,19 \cdot 1,886$$

$$23,8 \geq 20,36$$

Por lo tanto cumple esta condición.

Revisando la 2° condición se tiene:

$$f_i \geq f_c - k_2$$

Probeta 10

$$24,1 \geq 20 - 3,5 = 16,5$$

$$24,1 \geq 16,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 11

$$24 \geq 20 - 3,5 = 16,5$$

$$24 \geq 16,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 12

$$23,3 \geq 20 - 3,5 = 16,5$$

$$23,3 \geq 16,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Como se cumplen ambas condiciones se acepta el hormigón con 30% de perlita, pero para  $f_c = 20$  MPa.

**4.10.4 Evaluación estadística probeta con 50% de perlita.**

A continuación se muestran los factores obtenidos de acuerdo a la dosificación:

*Tabla 40: Factores s, t, k<sub>2</sub> para la dosificación 50% de perlita.*

Dosificación	Probeta N°	Resistencia (Mpa)	$f_m$ (MPa)	s	t	k <sub>2</sub>
50% perlita	14	21,9	21,85	0,07	1,886	3,5
	15	22,1				
	16	21,6				

*Fuente: Elaboración propia*

Ahora considerando  $f_c=25$  MPa

Revisando la 1° condición se tiene:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t$$

Reemplazando

$$21,85 \geq 25 + 0,07 \cdot 1,886$$

$$21,85 \geq 25,13$$

Por lo tanto NO cumple esta condición.

Revisando la 2° condición se tiene:

$$f_i \geq f_c - k_2$$

Probeta 14

$$21,9 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$21,9 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 15

$$22,1 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$22,1 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 16

$$21,6 \geq 25 - 3,5 = 21,5$$

$$21,6 \geq 21,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Como NO se cumplen ambas condiciones NO se acepta el hormigón con 50% de perlita.

Ahora considerando  $f_c=20$  Mpa

Revisando la 1° condición se tiene:

$$f_m \geq f_c + s \cdot t$$

Reemplazando

$$21,85 \geq 20 + 0,07 \cdot 1,886$$

$$21,85 \geq 20,13$$

Por lo tanto cumple esta condición.

Revisando la 2° condición se tiene:

$$f_i \geq f_c - k_2$$

Probeta 14

$$21,9 \geq 20 - 3,5 = 16,5$$

$$21,9 \geq 16,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 15

$$22,1 \geq 20 - 3,5 = 16,5$$

$$22,1 \geq 16,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Probeta 16

$$21,6 \geq 20 - 3,5 = 16,5$$

$$21,6 \geq 16,5$$

Por lo tanto cumple esta condición para esta probeta

Como se cumplen ambas condiciones se acepta el hormigón con 50% de perlita, pero para  $f_c = 20$  MPa.

#### 4.10.5 Resumen

De acuerdo a lo calculado anteriormente se puede mostrar un resumen de las hipótesis planteadas:

*Tabla 41: Resumen Hipótesis con sus respectivas dosificaciones.*

Dosificación	$f_m$ (MPa)	Hipótesis H25	Hipótesis H20
<b>H25 patrón</b>	28,27	Acepta	-
<b>10% perlita</b>	26,20	Acepta	-
<b>30% perlita</b>	23,80	Rechaza	Acepta
<b>50% perlita</b>	21,85	Rechaza	Acepta

*Fuente: Elaboración propia.*

## 5 CONCLUSIÓN

Se deja a continuación la Tabla 42 que relaciona las probetas fabricadas con y sin perlita, la resistencia media  $f_m$  y densidades que se obtuvo.

También se ve en la ilustración 14 que a mayor cantidad de perlita agregada como árido fino a la mezcla de hormigón va disminuyendo la resistencia del hormigón.

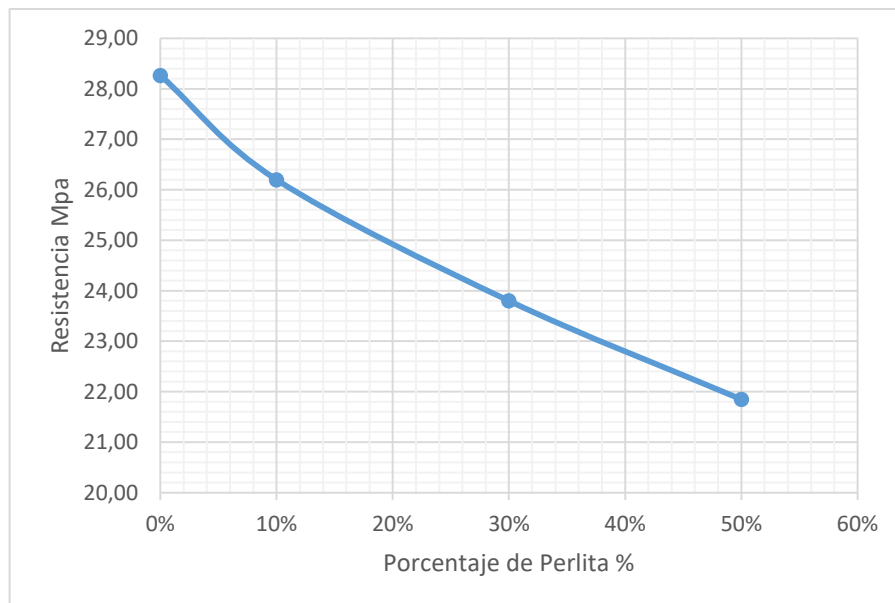
Algo similar ocurre con la densidad a medida que se le agrega perlita a la mezcla de hormigón según la ilustración 15.

Y finalmente la ilustración 16 representa que la resistencia y densidad son proporcionales, a mayor densidad, mayor resistencia.

*Tabla 42: Resumen de la resistencia media y densidades para cada dosificación.*

Dosificación	$f_m$ (MPa)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )
H25 patrón	28,27	2381,3
10% perlita	26,20	2364,4
30% perlita	23,80	2338,8
50% perlita	21,85	2328,1

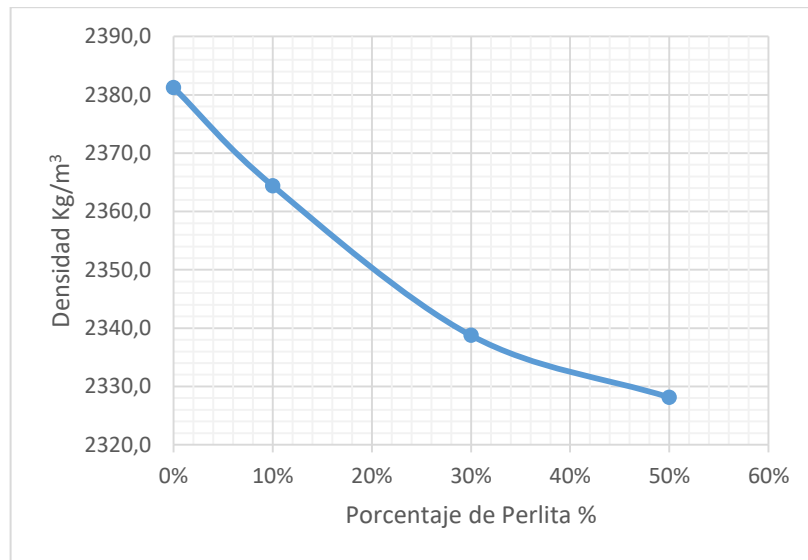
*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 14: Resistencia vs porcentaje de perlita.*

*Fuente: Elaboración propia*

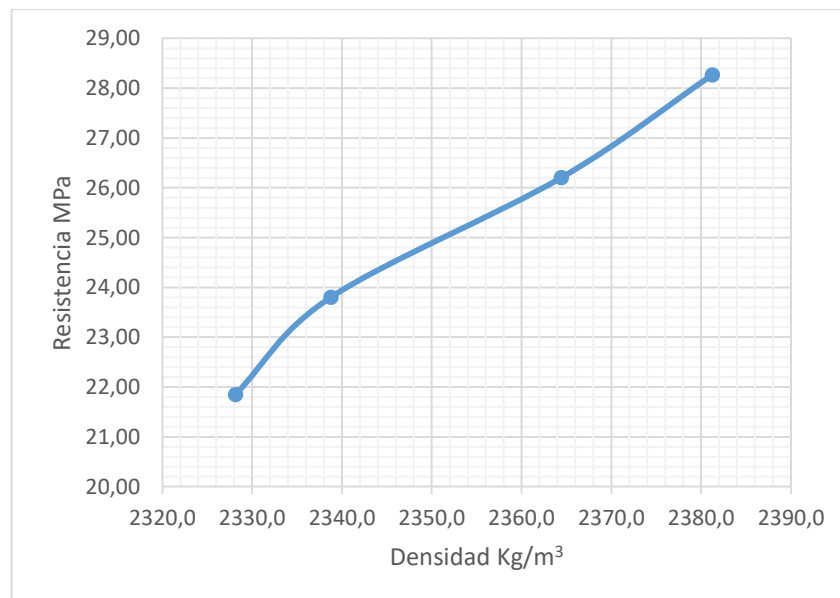
De la Ilustración se aprecia que a mayor cantidad de perlita que se le añade a la mezcla de hormigón, menor resistencia media a 28 días.



*Ilustración 15: Densidad vs porcentaje de perlita.*

*Fuente: Elaboración propia*

De la Ilustración se aprecia que a mayor cantidad de perlita que se le añade a la mezcla de hormigón, menor densidad.



*Ilustración 16: Resistencia vs Densidad.*

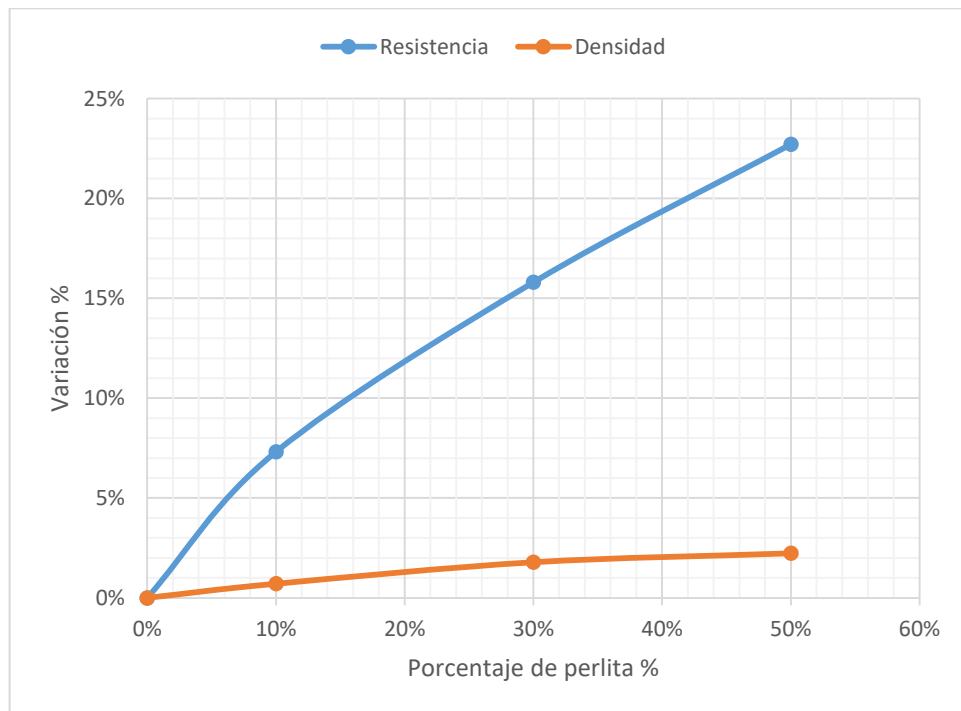
*Fuente: Elaboración propia*

De la Ilustración, se deduce que a menor densidad aparente de las probetas, es menor su resistencia.

*Tabla 43: Variación de la resistencia y la densidad respecto a la probeta patrón.*

Dosificación	Resistencia MPa	Variación R	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	Variación D
10% perlita	26,20	7%	2364,4	0,7%
30% perlita	23,80	16%	2338,8	1,8%
50% perlita	21,85	23%	2328,1	2,2%

*Fuente: Elaboración propia*



*Ilustración 17: Grafico de la variación de la resistencia y la densidad respecto a la probeta patrón.*

*Fuente: Elaboración propia*

La Ilustración 17 representa la variación de la resistencia y la densidad respecto al porcentaje de perlita añadido. Es evidente que la variación de la resistencia aumenta mucho más rápido que la densidad, contrario a lo que se buscaba.

La perlita es un mineral de origen volcánico que contiene agua molecular y se expande hasta 20 veces su volumen original, adquiere gran ligereza y capacidad aislante.

Analizando la granulometría de la perlita se aprecia que la mayor concentración de esta se encuentra en el tamiz #16 (65%), a diferencia de la arena que tiene una distribución más uniforme entre los tamices #16 (29%), #30 (38%), #50 (19%), esto puede ser una de las causas de las variaciones de las propiedades del hormigón, como variación volumétrica y resistencia.

La perlita expandida tiene una densidad de  $90 \text{ Kg/m}^3$  aproximadamente, un valor 26 veces menor que el de la arena que se de  $2345 \text{ Kg/m}^3$ , razón por la cual la hace atractiva, debido a su potencial como árido alivianador del hormigón.

La base de esta investigación se basó en adicionar perlita expandida en distintas cantidades (10%, 30%, 50%) como árido fino, fue ocupado por arena, por lo que se debió reemplazar estos porcentajes de perlita en la cantidad de arena añadida. Se sabe además que la arena ocupa un 41% de la mezcla total.

En lo que respecta a las probetas confeccionadas, existe una leve variación en la densidad, la cual fue decreciendo a medida que se le adiciono perlita a la mezcla. La densidad promedio de la probeta patrón fue de  $2381,3 \text{ Kg/m}^3$ . La probeta que contiene 10% de perlita adquirió una densidad de  $2364,4 \text{ Kg/m}^3$ , la cual se redujo en un 0,7% respecto a la probeta patrón. La probeta que contiene 30% de perlita adquirió una densidad de  $2338,8 \text{ Kg/m}^3$ , la cual se redujo en un 1,8% respecto a la probeta patrón. Finalmente la probeta que contiene 50% de perlita adquirió una densidad de  $2328,1 \text{ Kg/m}^3$ , la cual se redujo en un 2,2% respecto a la probeta patrón.

En las probetas ensayadas a los 28 días la resistencia ha decrecido mucho más al añadir perlita expandida en el hormigón. La muestra patrón entrego una resistencia promedio a la compresión de 28,27 MPa. La probeta que contiene 10% de perlita obtuvo una resistencia de 26,2 MPa, este valor es un 7% menor que la probeta patrón. La probeta que contiene 30% de perlita obtuvo una resistencia de 23,8 MPa, este valor es un 16% menor que la probeta patrón. Por último la probeta que contiene 50% de perlita obtuvo una resistencia de 21,85 MPa, este valor es un 23% menor que la probeta patrón.

Si comparamos los porcentajes de variación de la resistencia vs densidad (ver Ilustración 17). Se puede ver que la variación de resistencia aumenta mucho más que la densidad, algo inverso a lo que se esperaba.

Si se piensa en que la idea era obtener un hormigón liviano, o sea obtener densidades menores a  $2000 \text{ Kg/m}^3$ , el resultado no fue el esperado.

A decir verdad la resistencia disminuyo bastante en porcentaje respecto a la probeta patrón, sin embargo la resistencia más baja fue mayor a 20 MPa, por lo que se podría concluir que la perlita no debilita tanto la mezcla de hormigón.

En resumen la perlita es un elemento con una granulometría mal distribuida, para dosificaciones con hormigón, muy concentrada en un solo tamaño de árido.

No sirve como hormigón estructural liviano, debido a que la perlita no disminuye la densidad a niveles de hormigones livianos, o por lo menos no en las dosificaciones estudiadas, además la gravilla es un elemento con una densidad considerable, entonces eliminándola y realizar el análisis sin ella disminuiría bastante la densidad, por lo que el estudio como mortero sería interesante.

Una posible opción será realizar un estudio de esta en el uso de morteros o como aislante térmico en placas o paneles (No estructurales), para analizar su comportamiento y además realizar un análisis de resistencia al fuego, para ver si cumple como material ignifugo.

## 6 REFERENCIAS

NCh 170. Of85, “Hormigón – Requisitos generales”.

NCh 165. Of77, “Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría”.

NCh 1532.Of80, “Determinación de densidad de partículas sólidas”.

NCh 1726.Of80, “Determinación de las densidades máxima, mínima y cálculo de la densidad relativa de suelos NO cohesivos”.

NCh 1018. EOf77, “Hormigón – Preparación de mezclas de prueba en laboratorio”.

NCh 1017. EOf75, Hormigón – Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción.

NCh 163. Of79, “Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales”.

NCh 853 – 2007, “Acondicionamiento térmico – Envoltorio térmico de edificios - Cálculo de resistencias y transmitancias térmicas”.

NCh 1037. Of77, “Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas.”

NCh 1998. Of89, “Hormigón – Evaluación estadística de la resistencia mecánica”.

Laboratorio Nacional de vialidad, “Curso de laboratorista Vial – Volumen VI”.

Tesis Universidad Austral de Chile. Guillermo Edgardo Rivas Quezada Valdivia – Chile. “Determinación de la resistencia, densidad aparente y docilidad de un hormigón liviano con 10%, 20%, 30%, 40% y 50% en volumen de perlas de aislapol”.

Tesis Universidad Católica de la Santísima Concepción. Camila Belén Arriagada Pérez, “Variación de propiedades físicas y mecánicas del hormigón debido a la adición de alperujo de oliva”.

Tesis Universidad Católica de la Santísima Concepción. Patricio Eduardo Puga Lagos, “Estudio experimental del coeficiente de permeabilidad en arenas”.

ACI 213R-87, “Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete”.

Instituto del cemento y del hormigón en Chile

Tesis Universidad de Chile. Rafael Aldana. “Estudio experimental de resistencias a compresión del hormigón - Correlación entre resultados de probetas cúbicas y probetas cilíndricas”.

Termolita. Perlita mineral. [www.termolita.com/portal/index.php/nosotros/perlita-mineral?gclid=CKT6jc2SIdECFQMhKQodh0MOFg](http://www.termolita.com/portal/index.php/nosotros/perlita-mineral?gclid=CKT6jc2SIdECFQMhKQodh0MOFg)

Kaefer. Perlita mineral y expandida, aislante térmico.  
[www.cl.kaefer.com/Binaries/Binary3261/perlita.pdf](http://www.cl.kaefer.com/Binaries/Binary3261/perlita.pdf)

## 7 ANEXOS



Cono de Abrams (caso patrón)



Bloque a ensayar

Probetas ensayadas caso patrón.



Probeta ensayada a los 7 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días

Probetas ensayadas caso 10% de perlita.



Probeta ensayada a los 7 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días

Probetas ensayadas caso 30% de perlita.



Probeta ensayada a los 7 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días

Probetas ensayadas caso 50% de perlita.



Probeta ensayada a los 7 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días



Probeta ensayada a los 28 días