



**UNIVERSIDAD DEL AZUAY**  
**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**  
**Y GERENCIA DE CONSTRUCCIONES**

**Hormigón reciclado reemplazando el árido grueso natural  
del área minera “Pirincay”, por ladrillo triturado.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERA CIVIL CON ÉNFASIS EN GERENCIA DE  
CONSTRUCCIONES**

**Autora:**

**ALBA ESTEFANÍA TORRES CABRERA**

**Director:**

**ROLANDO ARMAS NOVOA**

**CUENCA – ECUADOR**

**2020**

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a Dios, por ser mi padre y por regalarme cada maravilloso día para cumplir mis metas. A mi madre Evita, porque muchas veces sacrificó sus sueños para que yo pudiera hacer realidad el mío, ser una profesional. Gracias mamita, porque desde el cielo me ha cuidado y nunca me he sentido sola gracias a su recuerdo, el cual me ha dado la fortaleza para nunca desistir ante ninguna prueba. Hoy le estoy cumpliendo la promesa de culminar mi carrera universitaria; espero que me mire y se sienta orgullosa, porque todo se lo debo a usted.

Alba Estefanía Torres Cabrera.

## **AGRADECIMIENTO**

Gracias a la Universidad del Azuay y a mis profesores, por enseñarme que lo más importante es ser un profesional ético y un ser humano bondadoso.

Quisiera agradecer de manera especial al Ing. Rolando Armas Novoa, mi tutor de tesis, quien ha sabido guiarme durante este proyecto con mucha paciencia y comprensión. Dios le pague por sus consejos, sus conocimientos y su apoyo incondicional a lo largo de este tiempo.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	III
INDICE DE FIGURAS.....	VI
INDICE DE TABLAS .....	VIII
INDICE DE ANEXOS.....	X
RESUMEN.....	XI
INTRODUCCIÓN .....	XIII
CAPÍTULO I.....	14
INTRODUCCIÓN .....	14
1.1 Motivación de la investigación .....	14
1.2 Problemática.....	14
1.3 Estado del arte.....	15
1.4 Objetivos .....	16
1.4.1 Objetivo general.....	16
1.4.2 Objetivos específicos .....	17
1.5 Alcances y resultados esperados .....	17
CAPÍTULO II .....	18
MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Definición de hormigón hidráulico .....	18
2.2 Características y funciones de los componentes .....	18
2.2.1 Cemento hidráulico .....	18
2.2.2 Agua .....	21
2.2.3 Agregados o áridos.....	21
2.2.3.1 Propiedades de los agregados.....	22
2.2.3.1.1 Granulometría .....	22
2.2.3.1.2 Módulo de finura de las arenas .....	22
2.2.3.1.3 Tamaño máximo de los agregados.....	23
2.2.3.1.4 Tamaño máximo nominal de los agregados.....	23
2.2.3.1.5 Forma de los agregados.....	23
2.2.3.1.6 Textura superficial .....	24

2.2.3.1.7	Peso volumétrico o peso unitario .....	24
2.2.3.1.8	Peso específico .....	25
2.2.3.1.9	Porosidad y absorción .....	26
2.3	Propiedades del hormigón hidráulico.....	27
2.3.1	Propiedades del hormigón en estado fresco .....	27
2.3.1.1	Trabajabilidad .....	27
2.3.2	Propiedades del hormigón en estado endurecido .....	28
2.3.2.1	Resistencia a la compresión del hormigón.....	28
CAPÍTULO III.....		29
PROCEDIMIENTO Y MATERIALES.....		29
3.1	Metodología .....	29
3.2	Materiales.....	30
3.2.1	Elaboración del agregado reciclado .....	30
3.3	Determinación de las propiedades físico-mecánicas de los agregados .....	31
3.3.1	Muestreo de los agregados .....	32
3.3.2	Granulometría de los agregados para hormigones y determinación del porcentaje de material menor que 75 $\mu\text{m}$ .....	33
3.3.3	Determinación del contenido total de humedad.....	38
3.3.4	Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino y grueso .....	40
3.3.5	Determinación de la masa unitaria y el porcentaje de vacíos .....	49
3.3.6	Procedimiento del diseño de la mezcla de hormigón.....	51
CAPÍTULO IV.....		53
RESULTADOS.....		53
4.1	Determinación de las propiedades de los agregados.....	53
4.1.1	Granulometría .....	53
4.1.1.1	Agregado grueso natural .....	53
4.1.1.2	Agregado grueso reciclado.....	57
4.1.1.3	Agregado fino natural .....	64
4.1.2	Humedad .....	67
4.1.3	Absorción .....	68
4.1.4	Gravedad específica de los agregados.....	69
4.1.5	Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados .....	70

4.2	Diseño de mezclas.....	70
4.3	Propiedades del hormigón en estado fresco .....	71
4.4	Elaboración de las mezclas de hormigón .....	72
4.5	Propiedades del hormigón en estado endurecido .....	73
4.4.1	Densidad seca.....	73
4.4.2	Absorción .....	74
4.4.3	Resistencia a la compresión .....	75
CAPÍTULO V .....		79
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		79
5.1	Conclusiones .....	79
5.2	Recomendaciones.....	80
ANEXOS.....		82
BIBLIOGRAFÍA.....		111

## INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Esquema de peso volumétrico o peso unitario .....	25
Figura 3.1 Ladrillo triturado proveniente de demolición.....	31
Figura 3.2 Tamices normados por la astm necesarios para el ensayo granulométrico. .....	34
Figura 3.3 Secado de la muestra de agregado en el horno a temperatura controlada por 24 horas. ....	35
Figura 3.4 Separación de las partículas para alcanzar la suspensión de las partículas más finas que 75 $\mu\text{m}$ . ....	36
Figura 3.5 Vertido de agua para eliminar las partículas en suspensión. ....	36
Figura 3.6 Proceso de tamizado mecánico.....	37
Figura 3.7 Determinación de masa retenida en los tamices.....	37
Figura 3.8 Canasta de alambre para el ensayo de gravedad específica para el agregado grueso. ....	41
Figura 3.9 Matraz para el ensayo de gravedad específica para el agregado fino.....	41
Figura 3.10 Molde compactador para el ensayo de humedad superficial en el agregado fino. ....	42
Figura 3.11 Muestra de agregado grueso sumergida en agua. ....	42
Figura 3.12 Eliminación de lámina visible de agua empleando un paño absorbente	43
Figura 3.13 Sumersión del agregado grueso saturado superficialmente seco (sss) de la canasta en el taque de agua. ....	43
Figura 3.14 Secado de la muestra de agregado grueso en el horno a temperatura controlada.....	44
Figura 3.15 Muestra de agregado fino sumergida en agua para lograr la saturación.	46
Figura 3.16 Compactación del agregado en el cono truncado. ....	46
Figura 3.17 Determinación de la masa del matraz con agua hasta la marca de calibración.....	47
Figura 3.18 Adición de agua en el matraz previo a la agitación para eliminar burbujas de aire.....	47
Figura 3.19 Matraz lleno de agregado fino y agua hasta la marca de calibración. ....	48
Figura 3.20 Equipo necesario para realizar el ensayo de peso volumétrico de los agregados.....	50

Figura 3.21 Molde relleno con la última capa de material previo a la compactación. .....	51
Figura 4.1 Curva granulométrica para la muestra no.1 del agregado grueso natural.	54
Figura 4.2 Curva granulométrica para la muestra no.2 del agregado grueso natural.	55
Figura 4.3 Curva granulométrica para la muestra no. 3 del agregado grueso natural. .....	56
Figura 4.4 Curva granulométrica de la muestra no. 1 del agregado grueso reciclado. .....	58
Figura 4.5 Curva granulométrica de la muestra no. 2 del agregado grueso reciclado. .....	59
Figura 4.6 Curva granulométrica de la muestra no. 3 del agregado grueso reciclado. .....	60
Figura 4.7 Curva granulométrica de la muestra no. 1 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso. ....	62
Figura 4.8 Curva granulométrica de la muestra no. 2 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso. ....	63
Figura 4.9 Curva granulométrica de la muestra no. 3 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso. ....	64
Figura 4.10 Curva granulométrica de la muestra no. 1 del agregado fino natural.....	65
Figura 4.11 Curva granulométrica de la muestra no. 2 del agregado fino natural.....	66
Figura 4.12 Curva granulométrica de la muestra no. 3 del agregado fino natural.....	67
Figura 4.13 Cilindros de hormigón después de ser desmoldados.....	73
Figura 4.14 Ensayo de compresión de un cilindro de hormigón.....	77
Figura 4.15 Tipo de fractura del cilindro de hormigón con agregado natural (A) y fractura del hormigón con agregado reciclado (B). ....	78



## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.2 Volúmenes anuales promedio receptados por la EMAC EP.....	14
Tabla 4.1 Ensayo de granulometría para la muestra no.1 del agregado grueso natural. .....	54
Tabla 4.2 Ensayo de granulometría para la muestra no.2 del agregado grueso natural. .....	55
Tabla 4.3 Ensayo de granulometría para la muestra no. 3 del agregado grueso natural. .....	56
Tabla 4.4 Ensayo de granulometría de la muestra no. 1 del agregado grueso reciclado. .....	58
Tabla 4.5 Ensayo de granulometría de la muestra no. 2 del agregado grueso reciclado. .....	59
Tabla 4.6 Ensayo de granulometría de la muestra no. 3 del agregado grueso reciclado. .....	60
Tabla 4.7 Ensayo de granulometría de la muestra no. 1 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso. ....	61
Tabla 4.8 Ensayo de granulometría de la muestra no. 2 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso. ....	62
Tabla 4.9 Ensayo de granulometría de la muestra no. 3 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso. ....	63
Tabla 4.10 Ensayo de granulometría de la muestra no. 1 del agregado fino natural. ....	64
Tabla 4.11 Ensayo de granulometría de la muestra no. 2 del agregado fino natural. ....	65
Tabla 4.12 Ensayo de granulometría de la muestra no. 3 del agregado fino natural. ....	66
Tabla 4.13 Humedad promedio de los agregados. ....	68
Tabla 4.14 Absorción de los agregados fino y grueso naturales y el agregado grueso reciclado. ....	68
Tabla 4.15 Gravedad específica de los agregados naturales y reciclados.....	69
Tabla 4.16 Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados. ....	70
Tabla 4.17 Resumen de la dosificación de la mezcla de hormigón base incluyendo el ajuste por humedad de los agregados.....	71
Tabla 4.18 Asentamiento de las mezclas de hormigón. ....	72
Tabla 4.19 Densidad seca del hormigón a los 28 días. ....	73

Tabla 4.20 Porcentaje de absorción del hormigón. ....	74
Tabla 4.21 Criterios de evaluación de la porosidad de acuerdo al manual proporcionado por la cyted.....	75
Tabla 4.22 Resistencia a la compresión a los 7 días de elaborada la mezcla de hormigón. ....	75
Tabla 4.23 Resistencia a la compresión a los 14 días de elaborada la mezcla de hormigón. ....	76
Tabla 4.24 Resistencia a la compresión a los 28 días de elaborada la mezcla de hormigón. ....	76
Tabla 4.25 Resistencia promedio a la compresión de las mezclas de hormigón. ....	77

**INDICE DE ANEXOS**

Anexo 1. Ensayo de granulometría del agregado grueso natural.....	82
Anexo 2. Ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado .....	85
Anexo 3. Ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado después de lavado .....	88
Anexo 4. Ensayo de granulometría del agregado fino natural.....	91
Anexo 5. Ensayo de humedad del agregado grueso natural.....	94
Anexo 6. Ensayo de humedad del agregado grueso reciclado .....	95
Anexo 7. Ensayo de humedad del agregado fino natural.....	96
Anexo 8. Ensayo de gravedad específica y peso unitario del agregado grueso natural .....	97
Anexo 9. Ensayo de gravedad específica y peso unitario del agregado grueso reciclado .....	98
Anexo 10. Ensayo de gravedad específica y peso unitario del agregado fino natural .....	99
Anexo 11. Diseño de mezclas de hormigón.....	100
Anexo 12. Ensayo de compresión de los cilindros de hormigón a los 7 días .....	108
Anexo 13. Ensayo de compresión de los cilindros de hormigón a los 14 días .....	109
Anexo 14. Ensayo de compresión de los cilindros de hormigón a los 28 días .....	110

## RESUMEN

### **Hormigón reciclado reemplazando el árido grueso natural del área minera “Pirincay”, por ladrillo triturado**


En el presente trabajo se compara el comportamiento del hormigón con agregado grueso reciclado, el cual consiste en ladrillo triturado proveniente de una demolición con respecto a un hormigón elaborado con agregado grueso tradicional proveniente de cantera. Se realizaron los ensayos normalizados para determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados naturales y reciclados. Se diseñó una mezcla de hormigón empleando agregado grueso y agregado fino proveniente de cantera para alcanzar una resistencia a la compresión  $f_c$  de  $240 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días. Posteriormente se reemplazó el agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en un porcentaje de 20%, 40% y 60%. Finalmente se comparó el resultado de la resistencia a la compresión a los 28 días de los diferentes hormigones.

**Palabras clave:** hormigón hidráulico, agregado o árido, agregado reciclado, resistencia a la compresión.



Rolando Armas Nova

**Director del Trabajo de Titulación**



José Fernando Vázquez Calero

**Director de Escuela**



Alba Estefanía Torres Cabrera

**Autor**

## ABSTRACT

### **Recycled concrete replacing the natural coarse aggregate of the “Pirincay” mining area with crushed brick**

In the present work, the behavior of concrete with recycled coarse aggregate, which consists of crushed brick from demolition, is compared to concrete made with traditional coarse aggregate from quarry. Standardized tests were performed to determine the physical and mechanical properties of natural and recycled aggregates. A concrete mix was designed using coarse aggregate and fine aggregate from quarries to achieve a compressive strength  $f'_c$  of 240 kg / cm<sup>2</sup> at 28 days. Subsequently, the natural coarse aggregate was replaced by recycled coarse aggregate in a percentage of 20%, 40% and 60%. Finally, the result of the compressive strength at 28 days of the different concretes was compared.

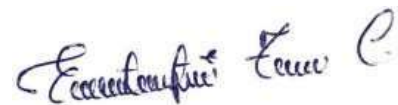
**Keywords:** hydraulic concrete, aggregate, recycled aggregate, compressive strength.

Rolando Armas Novoa  
**Thesis Director**

José Fernando Vázquez Calero  
**Faculty Coordinator**

Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Author**

Translated by



Alba Torres

Torres Cabrera Alba Estefanía

Trabajo de Titulación

Ing. Rolando Armas Novoa MSc.

Noviembre, 2020.

**Hormigón reciclado reemplazando el árido grueso natural del área minera  
“Pirincay”, por ladrillo triturado**

**INTRODUCCIÓN**

La industria de la construcción tiene un gran impacto sobre el medio ambiente; de hecho, es responsable del 50% del consumo de recursos naturales no renovables, del 40% de la energía consumida y del 50% de los desechos sólidos, producto de la construcción, remodelación y demolición de infraestructuras (Arenas, 2007). Es por esto que resulta necesario buscar alternativas que permitan mitigar los efectos del sector constructivo sobre la naturaleza.

Este trabajo plantea la utilización del ladrillo triturado para producir hormigones a utilizarse en estructuras de nuevas edificaciones, que satisfagan los requerimientos exigidos por las normas en cuanto a resistencia a la compresión.

Para ello, se estudiará el comportamiento del hormigón con árido grueso natural y proporciones del ladrillo triturado proveniente de la demolición de una obra y se comparará con respecto a un hormigón que emplea árido grueso natural procedente de la cantera de piedra del área minera de “Pirincay”. El árido fino (arena) y cemento, así como la dosificación permanecerán constantes para ambos tipos de hormigones. Todo esto permitirá concluir sobre la posible reutilización de ladrillo triturado en la producción de hormigones.

## CAPÍTULO I

### INTRODUCCIÓN

#### 1.1 Motivación de la investigación

Aprovechar los residuos de construcción y demolición (RCD) en la elaboración de mezclas de hormigón, para disminuir la cantidad de residuos que afecta al medio ambiente, obtener materiales de construcción eco amigables y reducir la extracción de recursos no renovables, que producen el agotamiento de las reservas de áridos.

De esta forma, la idea del aprovechamiento y utilización de RCD, genera la posibilidad real de reciclaje y re-uso de los residuos de construcción en países en vías de desarrollo, que experimentan la necesidad de preservar los recursos naturales, en beneficio del medio ambiente, la economía y futuras generaciones.

#### 1.2 Problemática

La construcción es uno de los sectores productivos más importantes en nuestra sociedad, debido a que dinamiza la economía, permitiendo de esta manera el crecimiento y desarrollo económico de las naciones (López & Gentile, 2008).

Sin embargo, este sector genera grandes cantidades de residuos, provenientes de la construcción, remodelación y demolición de edificaciones. En la ciudad de Cuenca, según los datos presentados por la Empresa Pública Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP), en las escombreras de la ciudad se han receptado los siguientes volúmenes:

Tabla 1.2 Volúmenes anuales promedio receptados por la EMAC EP.

Volúmenes anuales		
Año	Volumen promedio	
2014	334.436,80	m <sup>3</sup>

2015	300.598,03	m <sup>3</sup>
2016	234.812,59	m <sup>3</sup>
2017	256.093,15	m <sup>3</sup>
2018	134.477,69	m <sup>3</sup>
<b>TOTAL</b>	<b>1.125.940,57</b>	<b>m<sup>3</sup></b>

Fuente: (EMAC EP, 2018)

Esta gran cantidad de volúmenes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), produce una rápida colmatación de los vertederos destinados a su gestión y dificultad para localizar nuevos, incrementando los costos de transporte.

En adición a ello, en la actividad de construcción se requiere de la extracción de materiales pétreos mediante la minería a cielo abierto; causando la emisión de partículas a la atmósfera y la degradación del ecosistema con la pérdida de vegetación.

### **1.3 Estado del Arte**

Los residuos de construcción y demolición de las ciudades se evacuaban junto con los residuos de desechos sólidos hasta mediados del siglo XX y después de esta época, Europa y el resto de países que quedaron devastados por la Segunda Guerra Mundial, empezaron a reconstruir sus naciones utilizando los residuos de las demoliciones (Lund, 1996).

En países europeos, como Reino Unido, se ha demostrado que el hormigón estructural no pierde sus propiedades sustancialmente, si se reemplaza un 20% de árido natural por agregado reciclado (AR), obtenido a partir de la trituración del hormigón (Poon et al., 2002). En España, un grupo de investigadores determinó que se puede incorporar un 25% de árido reciclado en sustitución del árido grueso en la dosificación del hormigón, sin que se evidencie pérdidas sustanciales en sus prestaciones; además, no se requiere de aditivos, ni mayor cantidad de cemento (Vegas et al., 2009).



En América Latina, existen ciertos países que han realizado investigaciones en este campo, en Chile por ejemplo, se concluyó que existe una pérdida de resistencia a la compresión poco significativa al reemplazar el árido natural con árido reciclado en un porcentaje inferior al 50%, para evitar problemas de trabajabilidad (Valdés & Rapimán, 2007).

En Cuba, se compararon las propiedades del hormigón base con respecto a hormigones que utilizan el 100% del árido grueso como árido reciclado. Se pudo evidenciar que estos últimos presentaban una reducida resistencia mecánica y mayor absorción capilar; sin embargo, alcanzaron los límites establecidos en la normativa de Cuba (Martínez et al., 2016). En Argelia, se examinó la posibilidad de utilizar ladrillo triturado como agregado grueso y fino; se sustituyó parcialmente el material al 25, 50, 75 y 100%. El estudio concluyó que, es posible fabricar hormigón con este material siempre que, el porcentaje de agregado reciclado se limite al 25% para agregado grueso y 50% para agregado fino (Debieb & Kenai, 2008)

En la ciudad de Cuenca, se elaboraron mezclas con el 20, 40, 60 , 80 y 100% de sustitución del árido grueso con árido reciclado proveniente de residuos de construcción, concluyendo que el hormigón elaborado en sus distintas proporciones con árido reciclado cumple con la resistencia pronosticada de  $210 \text{ kg/cm}^2$  (Contreras, 2012).

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar la variación de las propiedades físicas (absorción) y mecánicas (resistencia a la compresión) de un hormigón elaborado con proporciones de ladrillo triturado

proveniente de la remodelación de una edificación, con respecto a una mezcla base elaborada con árido grueso proveniente de cantera.

#### **1.4.2 Objetivos específicos**

Determinar las propiedades físicas de los agregados y del ladrillo triturado mediante ensayos normalizados para áridos convencionales.

Determinar la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón, dosificadas para una resistencia,  $f'c$  de  $240 \text{ kg/cm}^2$ , empleando ladrillo triturado.

#### **1.5 Alcances y resultados esperados**

1. Realizar ensayo de granulometría y módulo de finura.
2. Determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.
3. Determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
4. Determinación de la humedad superficial en el árido fino.
5. Determinación del asentamiento
6. Determinación de la densidad (peso unitario) del concreto.
7. Determinación de la resistencia a la compresión del hormigón hidráulico a los 28 días.

## CAPÍTULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Definición de hormigón hidráulico

Se define como hormigón al producto que resulta, fundamentalmente, de la mezcla de áridos con una graduación convenida y un aglomerante. En el caso de los hormigones hidráulicos el aglomerante utilizado es cemento tipo Portland, incluyendo además agua. En esta definición se incluyen los denominados morteros hidráulicos (Acevedo et al., 1985).

#### 2.2 Características y funciones de los componentes

El hormigón hidráulico es una piedra artificial producto del endurecimiento de la mezcla de aglomerante hidráulico (cemento tipo Portland), áridos o agregados y agua; estos materiales constituyentes deben ser seleccionados adecuadamente y dosificados en proporciones convenientes. Esta mezcla puede estar compuesta, eventualmente, por un cuarto material, que recibe el nombre de aditivo (Acevedo et al., 1985).

##### 2.2.1 Cemento hidráulico

El cemento es un material aglomerante que tiene propiedades adhesivas y cohesivas, que permiten aglutinar los agregados o áridos para formar el hormigón. Estas propiedades dependen de su composición química, grado de hidratación, finura de las partículas, velocidad de fraguado, calor de hidratación y resistencia mecánica (Sánchez de Guzmán, 2001).

#### Fabricación del cemento hidráulico

El cemento Portland se fabrica, generalmente, a partir de minerales calcáreos, tales como la caliza, además de alúmina y sílice, los cuales se encuentran como arcilla en la naturaleza. El proceso de fabricación del cemento comprende las siguientes etapas:

##### a. Explotación de las materias primas

Las materias primas se extraen de las canteras; las calizas pueden ser de una elevada dureza, de tal manera que se requiera incluso el empleo de explosivos y de trituración

o pueden ser suficientemente blandas como para poder ser explotadas sin el empleo de esta técnica (Sánchez de Guzmán, 2001).

### **b. Preparación, dosificación y molienda**

Una vez se ha explotado la caliza, se transporta de la cantera a una planta de trituración primaria, proceso del cual se obtienen partículas de aproximadamente 1" (25mm).

En el procedimiento por vía húmeda, si la arcilla es bastante húmeda y tiene la propiedad de desleírse en el agua, debe ser sometida a la acción de mezcladores para formar la lechada en un molino de lavado; pozo circular dentro del cual los brazos radiales con rastrillos, rompen los aglomerados de la materia sólida.

La mezcla de caliza triturada y lechada de arcilla se lleva a un molino de cuerpos moledores, que pueden ser de bolas o barras, denominado molino de crudo, que pulveriza los materiales hasta un tamaño medio de 0,05mm. El producto que se obtiene a través de este proceso, contiene entre 35% y 50% de agua y se conoce con el nombre de "pasta".

En el procedimiento por vía seca o semiseca, la materia prima se tritura y adiciona en el molino de crudo, donde se secan hasta que contenga entre 1% y 2% de agua y se reduce su tamaño a un polvo fino denominado crudo o "harina".

### **c. Homogeneización**

En el proceso por vía húmeda, la pasta es bombeada a tanques de homogeneización, los cuales poseen una serie de aspas que giran suspendidas del soporte principal con el objeto de impedir la sedimentación de los sólidos mediante agitación mecánica. La pasta permanece en estos tanques durante varias horas, mientras se controla su homogeneidad química.

En el proceso por vía seca, el grano molido se transporta mediante neumáticos a unos silos de homogeneización que son tanques cilíndricos de gran altura, dentro de los cuales se realizan los ajustes necesarios a la mezcla y se homogeneiza inyectando aire a presión por la parte inferior del silo.

Después de las balsas o silos de homogeneización, la mezcla pasa a tanques o silos de almacenamiento, donde está lista para ir a la siguiente etapa.

#### **d. Elaboración del Clinker**

La mezcla homogeneizada, se somete a continuación a un tratamiento térmico en hornos rotatorios de forma cilíndrica. En el procedimiento por vía húmeda, la pasta se bombea al horno, por el cual desciende, encontrando progresivamente mayores temperaturas. Primero se elimina el agua mediante evaporación a una temperatura de 100°C; después se produce una deshidratación de los minerales arcillosos a una temperatura superior a los 500°C y una liberación de CO<sub>2</sub> a 800°C. Posteriormente, a una temperatura que supera los 900°C, los productos minerales se cristalizan y se produce una reacción del carbonato (CaO) con los silicoaluminatos, hasta que finalmente, en la parte inferior del horno, un 20 a 30% del material se vuelve líquido y la cal, sílice y alúmina vuelven a combinarse a una temperatura del horno entre los 1250°C y 1280°C . A continuación, la masa se funde en bolas cuyo diámetro varía entre 3 y 30 mm conocidas como Clinker, el cual se pasa del horno a un enfriador, en donde su temperatura baja a 70°C por medio de aire, el cual intensamente calentado, se emplea como aire de combustión del horno.

En el procedimiento por vía seca, el horno está conformado por un parte fija y una móvil. Esta última es un cilindro rotatorio igual al del proceso húmedo y la parte móvil, que está constituida por un precalentador conectado a un ventilados que extrae los gases calientes originados en la parte móvil. La materia pulverizada desciende hasta penetrar en el horno, encaminándose a la zona de cocción bajo el efecto de rotación del horno. Las reacciones que se producen son las mismas que en el proceso por vía húmeda, es decir, que se elimina el agua y libera CO<sub>2</sub>, posteriormente existe una cristalización de productos minerales, formación de líquidos y combinación de la cal, sílice y alúmina para finalmente formar el Clinker.

#### **e. Enfriamiento**

El Clinker, sale del horno a una temperatura cercana a los 1200°C o 1300°C, ya que en la parte final de este proceso se presenta un principio de la etapa de enfriamiento. El descenso de temperatura hasta 50°C o 70°C debe ocurrir de manera brusca, puesto que si se enfría lentamente se presenta óxido de magnesio en forma cristalina, el que podría hidratarse en presencia de humedad; aumentando su volumen y posiblemente desintegrando el hormigón elaborado con este cemento. Este proceso de enfriamiento se logra al aplicar aire frío al Clinker en enfriadores de tipo parrilla.

#### **f. Adiciones finales y molienda**

El Clinker frío, que por lo general es de color negro, reluciente y duro, se lleva a un molino de cuerpos, que posee bolas de acero cada vez más pequeñas. En él se pulveriza con una pequeña adición de yeso (2 al 5%), que sirve para evitar el fraguado relámpago del cemento y regular la velocidad de endurecimiento del mismo. El producto así obtenido es lo que se conoce como cemento Portland.

#### **g. Empaque y distribución**

El cemento resultante del molino se transporta en forma mecánica o neumática a silos de almacenamiento; es empacado en el momento de despacharlo al consumo. Es oportuno mencionar que, en la operación de empacado, se llenan sacos para obtener un peso de 50 kg, el cual es el peso por saco estandarizado en Ecuador.

### **2.2.2 Agua**

El agua se puede definir como aquel componente del hormigón debido al cual, el cemento experimenta reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados.

Los hormigones hidráulicos fraguan y endurecen mediante las reacciones químicas que se producen cuando el agua entra en contacto con las partículas de cemento (hidratación), produciendo la pasta cementante. Esta pasta cementante lubrica los agregados, otorgando fluidez a la mezcla, facilitando la colocación y compactación del hormigón, con lo que se logra una mayor densidad y por ende una mayor resistencia al endurecerse.

### **2.2.3 Agregados o áridos**

Son las partículas de distintos tamaños que podemos encontrar en la naturaleza, en forma de finos, arenas y gravas o también pueden ser el resultado de la trituración de las rocas. Se denomina agregado natural cuando proviene de la desintegración de las rocas por agentes naturales y agregado triturado si su desintegración se debe a la intervención del hombre. Para clasificarlos se pasa el material a través de un conjunto de tamices y el material que pasa a través del tamiz No. 4 (4.75 mm) abertura se conoce

como agregado fino, mientras que el material que se retiene en el tamiz No. 4 se denomina agregado grueso (Sánchez de Guzmán, 2001).

Los agregados son muy importantes en el hormigón porque constituyen generalmente el 75% del volumen total y para que el hormigón sea de buena calidad, el agregado tiene que ser denso, rugoso y libre de limos, arcillas, materias orgánicas, aceites y azúcares (Neville, 2013).

### **2.2.3.1 Propiedades de los Agregados**

#### **2.2.3.1.1 Granulometría**

Es la distribución del tamaño de las partículas de los áridos. Se lo determina mediante un análisis granulométrico, a través de tamices. En Ecuador, este ensayo se realiza según la norma NTE INEN 696. A partir de este estudio, se obtiene una curva granulométrica, que es una representación gráfica semi logarítmica del porcentaje de material que queda retenido o que pasa por cada uno de los tamices, siendo este último el más usado (Neville, 2013). A partir de esta curva se puede determinar si existe un exceso de fracción fina o gruesa.

Como se mencionó anteriormente, los agregados son importantes en el hormigón ya que si el agregado tiene granulometría continua, es decir si existen partículas de todos los tamaños, el hormigón tendrá una adecuada trabajabilidad; en consecuencia una mayor compactación, haciendo que disminuya la cantidad de vacíos (Gómez, 2000).

Sin embargo, es conveniente mencionar que en la práctica no existen granulometrías ideales, sino una aproximación que contempla dos curvas límites permisibles; una inferior y una superior, dentro de las cuales cualquier granulometría es buena. Para ello se empleará la especificación de la norma NTE INEN 872 en la que se detallan los límites superior e inferior de gradación tanto para el agregado grueso cuanto para el agregado fino (INEN 872, 2011).

#### **2.2.3.1.2 Módulo de finura de las arenas**

El módulo de finura es un valor que permite estimar qué tan fino o tan grueso es un material (Sánchez, 2001). En las arenas, es decir el material que pasa el tamiz No. 4,

se calcula sumando los porcentajes retenidos acumulados en las mallas No. 4, No.8, No.16, No. 30, No.50 y No. 100 y luego dividiendo esta cantidad por 100. Si el valor del módulo de finura es alto (sobre 3.00), indica arenas gruesas y un valor bajo (cerca de 2.00) indica arenas finas (Gómez, 2000).

$$\text{Módulo de finura de las arenas} = \frac{\sum \% \text{retenidos acumulados en los tamices } N^{\circ}4, N^{\circ}8, N^{\circ}16, N^{\circ}30, N^{\circ}50 \text{ y } N^{\circ}100}{100} \quad \text{Ecu 1.}$$

De acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001), el módulo de finura de las arenas, varía entre 0 y 10 o más; sin embargo, un valor considerado adecuado, se encuentra entre 2.5 a 3.

### **2.2.3.1.3 Tamaño máximo de los agregados**

Se define como la abertura más pequeña del tamiz a través de la cual pasa la totalidad del árido; sin embargo, de acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001), en la vida práctica, aquello que indica el tamaño máximo de un agregado es el tamaño de la partícula más grande que hay en la masa.

### **2.2.3.1.4 Tamaño máximo nominal de los agregados**

Este tercer factor se puede establecer a partir del análisis granulométrico, se define como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado sea el 15% o más (Sánchez de Guzmán, 2001).

De acuerdo al Diseño de Mezclas ACI 211, proporcionado por el American Concrete Institute, a medida que disminuye el tamaño máximo del árido, aumenta la superficie de contacto del árido y la pasta de cemento, incrementando la resistencia del hormigón (Neville, 2013).

### **2.2.3.1.5 Forma de los agregados**

De acuerdo con (Gómez, 2000), el uso de partículas redondeadas facilita su acomodo y proporcionan altas densidades con poca energía de compactación, a diferencia de los agregados triturados que requieren más energía de compactación debido a su angulosidad, razón por la cual oponen mayor resistencia friccionante. Sin embargo,



cuando estos agregados se han compactado bien, proporcionan gran estabilidad y capacidad de soporte.

La forma de las partículas es muy importante para la trabajabilidad del hormigón, ya que, al trabarse, reducen la trabajabilidad (Neville, 2013). La norma NTE INEN 872: Agregados para Hormigón, Requisitos, no establece el porcentaje de partículas alargadas o planas máximas permitidas.

#### **2.2.3.1.6 Textura superficial**

La textura de las partículas tiene influencia en el rozamiento interno, afectando a su adherencia con la pasta de cemento, puesto que una textura áspera produce mayor fuerza de adherencia entre partículas y la pasta cementante.

#### **2.2.3.1.7 Peso volumétrico o peso unitario**

Se define como peso volumétrico a la relación entre el peso de una muestra de agregado compuesta de varias partículas y el volumen que estas ocupan al agruparse dentro de un recipiente cuyo volumen es conocido, para lo cual se emplea la siguiente expresión:

$$Y = \frac{P}{V} \text{ Ecu 2.}$$

En donde:

P = Peso seco del material

V = Volumen del recipiente

Esta propiedad depende de la granulometría, tamaño, forma y textura de los agregados, puesto que las partículas del material sufren un acomodamiento dentro del recipiente, dejando el menor espacio entre ellas; es así que, el mayor peso unitario se obtiene cuando quepa mayor cantidad de material dentro del mismo volumen. A continuación, se puede apreciar un esquema del acomodamiento de las partículas.

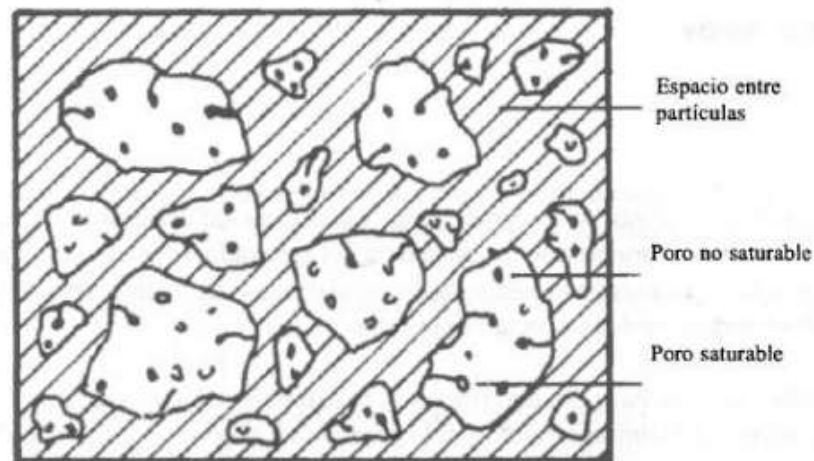


Figura 2.1. Esquema de peso volumétrico o peso unitario  
Fuente: (Sánchez de Guzmán, 2001, pág. 97)

Se deben distinguir dos tipos de masa unitaria:

### **Masa unitaria compacta**

Se define como masa unitaria compacta del agregado al acomodamiento de partículas cuando se ha sometido a vibración, debido a que este procedimiento mejora el acomodamiento entre ellas y aumenta la masa unitaria.

### **Masa unitaria suelta**

Se denomina masa unitaria suelta la del material en estado normal de reposo puesto que el volumen que ocupa es mayor y por tanto su masa unitaria es menor.

#### **2.2.3.1.8 Peso específico**

Se define como la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada. Sin embargo, en el caso de los agregados, es necesario definir el término densidad, ya que entre sus partículas existen cavidades o poros, los cuales pueden estar vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua, dependiendo de su permeabilidad interna.

### **Densidad absoluta**

Se define como la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupa la masa, excluyendo todos los poros, saturables y no saturables.

$$Densidad\ absoluta = \frac{P}{V_m - V_p} \text{ Ecu 3.}$$

En donde:

- $P$  = Peso seco de la masa
- $V_m$  = Volumen ocupado por la masa
- $V_p$  = Volumen de los poros (saturables y no saturables)

### **Densidad nominal**

Se define como la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos los poros no saturables.

$$Densidad\ nominal = \frac{P}{V_m - V_{p_s}} \text{ Ecu 4.}$$

En donde:

- $P$  = Peso seco de la masa
- $V_m$  = Volumen ocupado por la masa
- $V_{p_s}$  = Volumen de los poros saturables

### **Densidad aparente**

Se define como la relación entre el peso de la masa del material y el volumen que ocupan las partículas de ese material, incluidos todos los poros, saturables y no saturables.

$$Densidad\ aparente = \frac{P_s}{V_m} \text{ Ecu 5.}$$

En donde:

- $P_s$  = Peso seco de la masa
- $V_m$  = Volumen ocupado por la masa

#### **2.2.3.1.9 Porosidad y absorción**

La porosidad está relacionada con la capacidad de absorción de agua u otro líquido dentro de los agregados según el tamaño de los poros, permeabilidad y volumen total.

De acuerdo con lo antes expuesto, la capacidad de absorción de las partículas se puede determinar por diferencia de pesos, entre el peso saturado y superficialmente seco y el peso seco, expresada como un porcentaje del peso seco.

$$\%Absorción = \frac{P_{SSS}-P_S}{P_S} \times 100 \quad \text{Ecu 6.}$$

En donde:

$P_{SSS}$  = Peso de la muestra saturada y superficialmente seca

$P_S$  = Peso seco de la muestra

## **2.3 Propiedades del hormigón hidráulico**

Las proporciones del hormigón a diseñar deben ser seleccionadas de tal manera que, el resultado cumpla con los requisitos de resistencia, economía. El hormigón presenta dos estados: estado fresco o plástico, que permite ser manipulado para el encofrado y el estado endurecido o rígido, que impide su manipulación sin producir fracturas visibles o no irreversibles (Neville, 2013).

### **2.3.1 Propiedades del hormigón en estado fresco**

#### **2.3.1.1 Trabajabilidad**

Es la facilidad con la cual el hormigón recién preparado puede ser transportado, colocado y compactado. Es muy importante en la resistencia del hormigón endurecido, puesto que para que este cumpla con los requisitos, es necesario compactar el material a su máximo peso por unidad de volumen. Esta propiedad se ve principalmente afectada por el contenido de agua de la mezcla, del tamaño máximo, granulometría, forma y textura superficial de los agregados (Neville, 2013).

Dado que la trabajabilidad depende de varios factores, no se considera que una sola prueba sea suficiente para expresar esta propiedad del hormigón fresco; sin embargo, en este proyecto se empleará el ensayo del Cono de Abrams, de acuerdo a la norma ASTM C143 – NTE INEN 1578.

## **2.3.2 Propiedades del hormigón en estado endurecido**

### **2.3.2.1 Resistencia a la compresión del hormigón**

La resistencia a la compresión es la medida más común que se emplea respecto al desempeño del hormigón. Se mide fracturando probetas cilíndricas de hormigón en una máquina de ensayos de compresión simple; los cilindros más utilizados son los de  $\Phi= 15\text{cm}$  (6") y  $h=30\text{cm}$  (12") para hormigones con agregados hasta 38mm (1<sup>1/2</sup>"). Para calcular la resistencia a la compresión se divide la carga de ruptura entre el área de la sección que resiste dicha carga.

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizan de acuerdo a la norma ASTM C39 - NTE INEN 1573 denominada Método Estándar de Prueba de Resistencia la Compresión de Probetas Cilíndricas de Hormigón (INEN 1576, 2010). La elaboración de cilindros "in situ" se lo realiza siguiendo el procedimiento según la norma ASTM C31- NTE INEN 1576, denominada Práctica Estándar para Elaborar y Curar Probetas de Ensayo de Hormigón en Campo (INEN 1576, 2011).

## CAPÍTULO III

### PROCEDIMIENTO Y MATERIALES

#### 3.1 Metodología

El plan de trabajo se divide en las siguientes etapas:

- I. En la primera fase, se obtiene e identifica la materia prima (desecho de ladrillo) que procede de la demolición de una vivienda en remodelación, ubicada en el Cantón Paute.
- II. En la segunda etapa se procesa la materia prima, es decir, se tritura y eliminan de forma manual, los restos de hormigón adheridos al mismo, a fin de tener un material lo más homogéneo posible.
- III. En la tercera fase se determinan las propiedades físico-mecánicas de los agregados naturales que provienen del área minera Pirincay, de acuerdo a las normas ASTM o su homóloga INEN.

Tabla 3.1 Propiedades físico-mecánicas determinadas en los agregados naturales

<b>Ensayo</b>	<b>Agregado grueso</b>	<b>Agregado fino</b>
Granulometría	NTE INEN 696	NTE INEN 695
Humedad	NTE INEN 862	NTE INEN 859
Absorción y gravedad específica	NTE INEN 857	NTE INEN 856
Peso volumétrico suelto y compactado	NTE INEN 858	

Fuente: La autora

- IV. En la cuarta fase se realiza la dosificación de la mezcla de hormigón base de acuerdo al método del ACI 211. 1-91.
- V. En la quinta fase se caracteriza el ladrillo triturado que desde ahora se tratará como un árido grueso. Es decir, se determinan las propiedades físico-mecánicas según las normas ASTM o su homóloga INEN.

Tabla 2.2 Propiedades físico-mecánicas determinadas en los agregados gruesos reciclados

<b>Ensayo</b>	<b>Agregado grueso</b>
Granulometría	NTE INEN 696
Humedad	NTE INEN 862
Absorción y gravedad específica	NTE INEN 857
Peso volumétrico suelto y compactado	NTE INEN 858

Fuente: La autora

- VI. En la última fase, se dosifica las mezclas de hormigón reemplazando el agregado grueso natural por ladrillo triturado en un 20%, 40% y 60%.
- VII. Se comparan los resultados obtenidas en la prueba de compresión en el hormigón que utiliza agregados naturales con los obtenidos en los hormigones dosificados con agregados gruesos reciclados.

### **3.2 Materiales**

Los agregados naturales, se diferencian en dos fracciones, la fracción fina pasante del tamiz 4 (4,75mm) y la fracción gruesa retenida en el tamiz 4 y cuyo tamaño máximo es de 1 ½ de pulgada (37.5mm); que es un canto rodado que proviene del área minera Pirincay que está ubicada en el Cantón Paute.

Para la fabricación del hormigón se empleó cemento Portland tipo I de la marca Atenas.

El agua potable empleada para la elaboración del hormigón es el agua potable de la Ciudad de Cuenca- Ecuador.

El agregado reciclado (ladrillo triturado), proviene de una vivienda ubicada en el Cantón Paute, cuyas paredes de ladrillo fueron originalmente construidas en el año 2014 y se han demolido para una remodelación que tiene objetivo la construcción de locales comerciales.

#### **3.2.1 Elaboración del agregado reciclado**

Con la finalidad de obtener el agregado reciclado con la granulometría acordada, se decidió triturar el ladrillo de demolición para obtener el tamaño de 38,1 mm (1 ½ ”); a continuación, se muestra el material después del proceso de trituración manual (Ver Figura 3.1).



Figura 3.1 Ladrillo triturado proveniente de demolición  
Fuente: La autora

Para su trituración fue necesario emplear un combo metálico y un cincel, debido a que no se contaba con trituradora. El proceso manual lo realizó la misma persona para evitar la mayor variación posible en cuanto a la fuerza aplicada para obtener por inspección visual, el tamaño aproximado a 4 cm en las piezas más grandes.

Debido a que en el proceso de trituración manual se obtiene también material fino, se procedió a eliminar el material pasante el tamiz No. 4, ya que, este proyecto únicamente contempla el reemplazo del agregado grueso. De igual manera, se procede a eliminar cualquier resto de hormigón adherido al ladrillo triturado, para obtener un material lo más homogéneo posible.

### **3.3 Determinación de las propiedades físico-mecánicas de los agregados**



Las propiedades físicas estudiadas para los agregados gruesos naturales fueron: granulometría, humedad, absorción, peso volumétrico y gravedad específica.

Las propiedades físicas estudiadas para el agregado fino natural fueron: granulometría, humedad, absorción, peso volumétrico, peso específico y adicionalmente se determinó el módulo de finura, puesto que todos estos resultados se emplean para la dosificación de acuerdo al método ACI.

La granulometría es un factor muy importante para realizar una dosificación por este método puesto que, debe cumplir con los límites superior e inferior establecidos por la norma ASTM C33; caso contrario se debe emplear otro método de diseño (Sánchez de Guzmán, 2001).

Para determinar las propiedades antes mencionadas en los agregados naturales que provienen de la Compañía Minera Pirincay ubicada en el cantón Paute, se realizó la limpieza y lavado del material, para eliminar las impurezas orgánicas que como es común, se encuentran en el material, puesto que el mismo está expuesto a la intemperie en la zona de almacenamiento de la cantera.

### **3.3.1 Muestreo de los Agregados**

#### **Método de muestreo**

En el muestreo de material desde una pila es muy difícil asegurar muestras homogéneas, debido a una segregación frecuente cuando el material proviene de una pila, con las partículas más gruesas rodando hacia fuera de la base.

Se deben obtener tres porciones aproximadamente iguales tomadas en el tercio superior, en el punto medio y en el tercio inferior de la altura de la pila. En las normas INEN para aceptación y control de ensayos normalizados se especifica la masa de la muestra “in situ” necesaria para cada ensayo específico. Sin embargo, la norma NTE INEN 695 establece la cantidad de material adecuada para los análisis rutinarios de

calidad, tales como granulometría, peso unitario, humedad, absorción y gravedad específica.

De acuerdo con la norma NTE INEN 695, el tamaño de muestra para un agregado cuyo tamaño máximo es de 37,5 mm es mínimo 75 kg. Para obtener esta cantidad se siguió el siguiente procedimiento (INEN 695, 2011).

### **Procedimiento de muestreo**

1. Definir el tercio superior de la pila de material.
2. Colocar un tablero verticalmente en la pila, justo por encima del punto de muestreo para prevenir que las partículas rueden y se produzca segregación.
3. Con ayuda de una pala, remover la capa exterior de material de la pila, ya que, puede tener alguna segregación y tomar la muestra del material que está debajo.
4. Con ayuda de una pala extraer la primera porción de la muestra.
5. Extraer la primera porción de material y repetir el procedimiento para extraer el material del punto medio y del tercio inferior de la pila.
6. Transportar el material en sacos para evitar la pérdida o contaminación de la muestra.

### **3.3.2 Granulometría de los agregados para hormigones y determinación del porcentaje de material menor que 75 $\mu\text{m}$**

#### **Método de ensayo**

Las partículas de la muestra de agregados (finos y gruesos) empleados para la elaboración de hormigón, deben estar en condiciones secas y tener una masa conocida. La muestra se separa por tamaños, haciéndola pasar a través de una serie de tamices de aberturas ordenadas de manera descendente. La masa de las partículas cuyo tamaño sea mayor al de las aberturas de la serie de tamices, expresado en porcentaje de la masa total, permite determinar la distribución del tamaño de las partículas de agregado.

Para el lavado del material emplearemos agua potable. El agua de lavado decantada que contiene el material en suspensión y materia disuelta, pasa a través de un tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200). Secar el material lavado y calcular la pérdida de masa seca como un porcentaje de la masa de la muestra original y se expresa como el porcentaje de material más fino que 75  $\mu\text{m}$  (No. 200) mediante lavado.

## Equipo

### Balanzas

La balanza utilizada para el ensayo de árido fino debe tener una precisión de 0,1 gramos. Para ensayar el agregado grueso, la balanza debe tener una precisión de 0,5 gramos.

### Tamices

Se emplean los tamices que cumplen con la normativa NTE INEN 154: Mallas y tamices para ensayos, requisitos. Los tamices normalizados son aquellos cuya abertura de tamices consecutivos están dadas por una relación constante; por ejemplo, cada tamiz tiene doble abertura que el siguiente de abertura menor (*Ver tabla 3.3*).

Tabla 3.3 Abertura de los tamices normados por la serie ASTM, utilizados en Ecuador

Tamiz	3"	1 ½ "	¾ "	⅜ "	N° 4	N° 8	N° 16	N° 30	N° 50	N°100
Abertura de la malla en mm	75	37.5	19	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15

Fuente: (INEN 154, 2010)

Además de estos tamices, para la granulometría se emplean los tamices de ½" (12.7mm); 1" (25.4 mm); 2 (50.8 mm); 2 ½ " (63.5 mm); 3 ½ " (88.9 mm) (*Ver Figura 3.2*).



Figura 2.2 Tamices normados por la ASTM necesarios para el ensayo granulométrico.

Fuente: La autora

### Agitador de tamices mecánico

Es un dispositivo mecánico que produce el rebote de las partículas para que estas caigan, durante un tiempo no mayor a 10 minutos, a fin de evitar la degradación de la muestra.

### Horno

Un horno de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### Procedimiento de ensayo

1. Teniendo en cuenta que el tamaño máximo del agregado que se empleará para elaborar el hormigón de este proyecto es de  $1\frac{1}{2}$ " (37,5 mm), tomaremos para este ensayo de granulometría, una muestra cuyos áridos pasen el tamiz N° 2" (50 mm).
2. El tamaño de la muestra que se empleará es de 15000 g, compuesto por agregado grueso [retenido en el tamiz N° 4 (4,75mm)] y agregado fino [pasante del tamiz N° 4 (4,75mm) y retenido en el tamiz N° 200 (0,075mm)], en diferentes proporciones.
3. Secar la muestra húmeda, de aproximadamente 15000 g, en el horno hasta conseguir una masa constante, a una temperatura  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas (Ver Figura 3.3).



Figura 3.3 Secado de la muestra de agregado en el horno a temperatura controlada por 24 horas.  
Fuente: La autora

4. Determinar la masa de aproximadamente 15000 g para el ensayo. Determinar la masa seca antes del lavado (**B**). A continuación, se debe colocar la muestra

en un recipiente y agregar agua hasta cubrirla. Agitar la muestra para separar las partículas más finas que  $75\ \mu\text{m}$  adheridas a las más gruesas, de tal manera que se lleve al material fino a suspensión en el agua (Ver Figura 3.4).



Figura 3.4 Separación de las partículas para alcanzar la suspensión de las partículas más finas que  $75\ \mu\text{m}$ .

Fuente: La autora

5. Verter el agua de lavado que contiene sólidos suspendidos y disueltos sobre el arreglo de tamices, en orden decreciente según su tamaño de abertura para proteger a los tamices más finos y el tamiz No. 200 en la parte inferior (Ver Figura 3.5).



Figura 3.5 Vertido de agua para eliminar las partículas en suspensión.

Fuente: La autora

6. Repetir el proceso añadiendo una nueva cantidad de agua y decantar hasta que el agua de lavado no esté turbia y una vez terminado el proceso, secar todo el material retenido en los tamices en el horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
7. Determinar la masa seca después de lavada ( $C$ ) y realizar el ensayo granulométrico seleccionando y ordenando los tamices necesarios. Agitar la muestra con ayuda del agitador mecánico durante 5 minutos con el objetivo de lograr que las partículas descendan y no se acumulen en un tamiz. De ser necesario, se deben girar las partículas a fin de determinar si pasarán o no a través de un tamiz particular (Ver Figura 3.6).



Figura 3.6 Proceso de tamizado mecánico  
Fuente: La autora

8. Determinar las masas de la muestra seca retenida en cada uno de los tamices. Si hay partículas retenidas en los tamices, se debe girarlas para determinar si pasarán a través de una abertura, sin forzarlas (Ver Figura 3.7).



Figura 3.7 Determinación de masa retenida en los tamices  
Fuente: La autora

9. Se debe tener en cuenta que la masa seca total debe ser similar a la masa de la muestra seca colocada sobre los tamices inicialmente. Si la diferencia entre ellas es mayor al 0,3%, respecto de la masa de muestra seca colocada al inicio sobre los tamices, no se deben utilizar estos resultados con fines de aceptación.
10. Calcular la masa seca de la muestra retenida acumulada en cada tamiz, el porcentaje retenido acumulado en cada tamiz con relación a la masa seca original de la muestra de material.

Restándole del 100% el porcentaje retenido acumulado en cada tamiz se obtiene el porcentaje que pasa por cada tamiz, con lo cual se grafica la curva granulométrica, que es una representación semi logarítmica (porcentaje de material que pasa cada tamiz vs el tamaño de la abertura en mm).

Para calcular el porcentaje de material que pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (No. 200), se lo realiza de la siguiente manera:

$$A = \frac{B-C}{B} \times 100 \text{ Ecu 7.}$$

Donde:

A = Porcentaje de partículas menores de 75  $\mu\text{m}$ .

B = Masa seca original de la muestra, g.

C = Masa seca de la muestra luego del lavado, g.

- 11.** Para calcular el módulo de finura, se realiza la sumatoria de los porcentajes totales de material que es más grueso que cada tamiz, es decir, los porcentajes retenidos acumulados y dividir la sumatoria para 100.

Los tamices empleados son los siguientes: 150  $\mu\text{m}$  (No. 100), 300  $\mu\text{m}$  (No. 50), 600  $\mu\text{m}$  (No. 30), 1.18 mm (No. 16), 2.36 mm (No. 8), 4.75 (No. 4), 9.5 mm, 19.0mm, 37.5mm.

### **3.3.3 Determinación del contenido total de humedad**

#### **Método de ensayo**

Se seca una muestra de masa de agregado en un horno hasta eliminar su humedad superficial y de poros. La humedad es la cantidad de agua evaporada con respecto a la masa seca expresada en porcentaje (INEN, 2011).

#### **Equipos**

#### **Balanza**

La balanza utilizada para el ensayo de árido fino debe tener una precisión de 0,1 gramos. Para ensayar el agregado grueso, la balanza debe tener una precisión de 0,5 gramos.

### **Horno**

Un horno capaz de mantener la temperatura, de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### **Recipiente para la muestra**

Su volumen debe ser suficiente para contener el material sin que se derrame y el material no debe afectarse debido al calor.

### **Procedimiento de ensayo**

1. El tamaño de la muestra que se empleará es de 6000 g, compuesto por agregado grueso [retenido en el tamiz N° 4 (4,75mm)] y 1500 g de agregado fino [pasante del tamiz N° 4 (4,75mm) y retenido en el tamiz N° 200 (0,075mm)].
2. Secar la muestra en el recipiente empleando el horno a una temperatura controlada de temperatura  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Se debe tener en cuenta que la masa de agregados está completamente seca, cuando un mayor tiempo de calor provoca una pérdida adicional de la masa no mayor al 0,1%.
3. Después de que la muestra seca se haya enfriado, determinar su masa, con una aproximación de 0,1%.
4. Para calcular el contenido total de humedad de la muestra se realizan los siguientes cálculos:

$$P = \frac{100(W-D)}{D} \text{ Ecu 8.}$$

Siendo:

P = Contenido total de humedad evaporable de la muestra de agregados en porcentaje.

W = Masa de la muestra original, en gramos.

D = Masa de la muestra seca, en gramos.

Para determinar el contenido de humedad superficial, se realiza la diferencia entre el contenido total de humedad evaporable y la absorción, cuyo procedimiento se detalla a continuación.



### **3.3.4 Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del agregado fino y grueso**

Este ensayo permite determinar las densidades y absorción para el agregado grueso [retenido en el tamiz N° 4 (4,75mm)] y agregado fino [pasante del tamiz N° 4 (4,75mm)].

La densidad de un material está definida como la masa dividida entre su volumen. Las partículas de los agregados, tienen poros permeables e impermeables; los poros permeables pueden estar vacíos, parcialmente saturados o completamente saturados.

Este método se emplea para determinar la densidad promedio de una muestra de agregado sin incluir el volumen de vacíos entre partículas, la densidad relativa también llamada gravedad específica y la absorción del agregado (INEN, 2010).

La absorción se define como el incremento de la masa del agregado causado por el agua que se aloja en los poros permeables de las partículas de agregado, sin incluir el agua adherida a la superficie exterior. Se expresa como un porcentaje de la masa seca.

#### **Método de ensayo**

Una muestra de agregado previamente secada, se sumerge en agua por  $24 \pm 4$  horas, hasta obtener una masa constante, es decir, hasta que los poros se llenen de agua.

Transcurrido este tiempo, se seca el agua superficial de las partículas y se determina su masa por el método gravimétrico. Se seca la muestra al horno de temperatura controlada y se determina su masa una vez más.

A través de este método es posible calcular la densidad, densidad relativa y la absorción de los agregados (INEN, 2010).

#### **Equipos**

##### **Balanza**

Para el agregado fino, la balanza debe tener una capacidad de al menos 1 kilogramo, con una precisión de 0,1 gramos o menos de 0.1% de la masa del ensayo.

Para el agregado grueso, es necesario que tenga una precisión de 0,5 gramos o menos 0,05% de la masa de la muestra. La balanza debe, además, contar con un dispositivo

apropiado para suspender la canasta de alambre para la muestra en agua, desde el centro de la balanza.

### **Recipiente para la muestra**

Es una canasta de alambre con una abertura de 3,35Cm (Tamiz No.6) o de una malla más fina (Ver Figura 3.8).



Figura 3.8 Canasta de alambre para el ensayo de gravedad específica para el agregado grueso.  
Fuente: La autora

### **Tanque de agua**

Es un tanque hermético, en el cual se coloca la canasta de alambre con la muestra mientras es suspendida bajo el agua.

### **Matraz**

Para una muestra de 500 gramos del agregado fino (Ver Figura 3.9).



Figura 3.9 Matraz para el ensayo de gravedad específica para el agregado fino.  
Fuente: La autora

### **Molde y compactador para el ensayo de humedad superficial**

Es un molde de metal con forma de cono truncado de las siguientes dimensiones: 40 mm  $\pm$  3 mm de diámetro interno superior, 90 mm  $\pm$  3 mm de diámetro interno en la

base y  $75 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$  de altura; el metal debe tener un espesor no menor a  $0,8 \text{ mm}$ . La masa del compactador metálico es de  $340 \text{ g} \pm 15 \text{ g}$  y una cara compactadora circular y plana de  $25 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$  de diámetro (Ver Figura 3.10).



Figura 3.10 Molde compactador para el ensayo de humedad superficial en el agregado fino.  
Fuente: La autora

### **Horno**

Con capacidad para mantener una temperatura uniforme  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ .

### **Procedimiento de ensayo**

#### **Agregado grueso**

1. Secar la muestra de aproximadamente  $5000 \text{ g}$  de agregado grueso [retenido en el tamiz N° 4 ( $4.75 \text{ mm}$ )] en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas. Posteriormente, enfriar la muestra a temperatura ambiente entre 1 a 3 horas. Finalmente sumergir la muestra en agua a temperatura ambiente durante  $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$  (Ver Figura 3.11).



Figura 3.11 Muestra de agregado grueso sumergida en agua.  
Fuente: La autora

2. Transcurrido ese tiempo, se debe retirar la muestra de agregado del agua y colocarla sobre un paño absorbente y con él frotar los agregados hasta eliminar la lámina visible de agua; las partículas de gran tamaño deben secarse de forma

individual. Determinar la masa de la muestra de ensayo en condición saturada superficialmente seca (**B**), con una precisión de 0,5 gramos (Ver Figura 3.12).



Figura 3.12 Eliminación de lámina visible de agua empleando un paño absorbente  
Fuente: La autora

3. Colocar la muestra saturada superficialmente seca en la canasta de alambre y determinar su masa aparente en agua a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  (**C**). Agitar la canasta mientras se sumerge para remover el aire atrapado. Es importante mencionar que la diferencia entre la masa en aire y la masa en agua de agregado, es la masa de agua desplazada de la muestra (Ver Figura 3.13).



Figura 3.13 Sumersión del agregado grueso saturado superficialmente seco (SSS) de la canasta en el taque de agua.  
Fuente: La autora

4. Secar la masa de agregado en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Enfriar la muestra a temperatura ambiente y determinar su masa (**A**) (Ver Figura 3.14).



Figura 3.14 Secado de la muestra de agregado grueso en el horno a temperatura controlada.  
Fuente: La autora

### Cálculos

#### a. Densidad relativa (gravedad específica)

Se calcula la densidad relativa (gravedad específica) del agregado en condición seca al horno (SH). Es decir, que los áridos han sido secados por calentamiento en un horno a  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{(B-C)} \text{ Ecu 9.}$$

Siendo:

- A = Masa en el aire de la muestra seca al horno, g.
- B = Masa en el aire de la muestra saturada superficialmente seca, g.
- C = Masa aparente en agua de la muestra saturada, g.

Se calcula la densidad relativa del agregado en condición saturada superficialmente seca (SSS). En esta condición, los poros permeables de las partículas de agregado se llenan con agua al ser sumergidos, pero sin agua libre en su superficie.

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{B}{(B-C)} \text{ Ecu 10.}$$

Se calcula la densidad relativa aparente (gravedad específica aparente), de la siguiente manera:

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{(A-C)} \text{ Ecu 11.}$$

## b. Densidad

Densidad (SH): Es la masa de las partículas de agregado, seco al horno por unidad de volumen. Se incluye el volumen de los poros permeables e impermeables, sin embargo, no se incluyen los vacíos entre partículas.

Calcular la densidad del árido en condición seca al horno (SH), como se muestra a continuación:

$$\text{Densidad (SH)}, \frac{kg}{m^3} = \frac{997,5 A}{(B-C)} \text{ Ecu 12.}$$

Densidad (SSS): Se entiende como la masa de partículas de agregado, saturado superficialmente seco por unidad de volumen. Se incluye el volumen de poros impermeables y permeables llenos de agua. También se excluyen los vacíos entre partículas.

Calcular la densidad del agregado en condición saturada superficialmente seca (SSS), se la siguiente forma:

$$\text{Densidad (SSS)}, \frac{kg}{m^3} = \frac{997,5 B}{(B-C)} \text{ Ecu 13.}$$

Densidad aparente: Se define como la masa por unidad de volumen, de la porción impermeable de las partículas del agregado.

Calcular la densidad aparente del agregado de la siguiente manera:

$$\text{Densidad aparente}, \frac{kg}{m^3} = \frac{997,5 A}{(A-C)} \text{ Ecu 14.}$$

Para calcular la absorción, se emplea la siguiente expresión:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{(B-A)}{A} \times 100 \text{ Ecu 15.}$$

### Agregado fino

1. Secar la muestra de agregado fino en el horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , hasta conseguir una masa constante. Posteriormente, dejar que la muestra se enfríe a temperatura ambiente hasta que sea manipulable.

2. A continuación, sumergir el agregado en agua y dejar que repose por un periodo de  $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$  para lograr la saturación. Decantar el agua en exceso, evitando la pérdida de finos (Ver Figura 3.15).



Figura 3.15 Muestra de agregado fino sumergida en agua para lograr la saturación.  
Fuente: La autora

3. Se extrae la muestra de la bandeja y se extiende sobre una superficie plana no absorbente y secar el agua adherida a las partículas hasta que se alcance la condición saturada superficialmente seca (SSS). Para determinar la humedad superficial, colocar una porción de agregado fino parcialmente seco en el cono truncado, con el mayor diámetro hacia abajo hasta que se llene y compactar el material con 25 golpes ligeros del compactador; cada caída inicia a 5 mm sobre la superficie del agregado (Ver Figura 3.16).



Figura 3.16 Compactación del agregado en el cono truncado.  
Fuente: La autora

### Procedimiento gravimétrico

4. Llenar el matraz con agua hasta la marca de calibración a una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  y determinar su masa, g (**B**) (Ver Figura 3.17).



Figura 3.17 Determinación de la masa del matraz con agua hasta la marca de calibración.  
Fuente: La autora

5. Introducir en el picnómetro 500 g de agregado fino en condición saturada superficialmente seca (S). Después adicionar agua hasta aproximadamente 90% de su capacidad y agitarlo, haciéndolo rodar para eliminar las burbujas de aire que se forman en el interior (Ver Figura 3.18).



Figura 3.18 Adición de agua en el matraz previo a la agitación para eliminar burbujas de aire.  
Fuente: La autora

6. Después de eliminar las burbujas de aire, se debe ajustar la temperatura del matraz, de ser necesario por inmersión parcial en agua circulante hasta alcanzar una temperatura de  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ ; llevar el nivel de agua del matraz hasta la marca de calibración. Determinar la masa del matraz, muestra de agregado y agua (C) (Ver Figura 3.19).





Figura 3.19 Matraz lleno de agregado fino y agua hasta la marca de calibración.  
Fuente: La autora

7. Posteriormente, retirar el agregado del matraz, secarlo en el horno a temperatura controlada de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas. Transcurrido este periodo se debe secar el agregado a temperatura ambiente y determinar su masa, g (A).

### Cálculos

#### Densidad relativa (gravedad específica)

Se calcula la gravedad específica del agregado fino en condición seca al horno (SH), como se muestra a continuación:

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{A}{(B+S-C)} \text{ Ecu 16.}$$

Siendo:

- A = Masa de la muestra seca al horno, g.
- B = Masa del matraz lleno con agua, hasta la marca de calibración, g.
- C = Masa del matraz lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración, g.
- S = Masa de muestra saturada superficialmente seca (empleada en el procedimiento gravimétrico, para determinar la densidad y densidad relativa o la absorción), g.

Calcular la densidad relativa en condición saturada superficialmente seca (SSS), de la siguiente forma:

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{S}{(B+S-C)} \text{ Ecu 17.}$$

Determinar la densidad relativa aparente (gravedad específica aparente), como se muestra a continuación:

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{A}{(B+A-C)} \text{ Ecu 18.}$$

### **Densidad**

Para calcular la densidad del agregado fino en condición seca al horno (SH), de la siguiente manera:

$$\text{Densidad (SH)}, \frac{kg}{m^3} = \frac{997,5 A}{(B+S-C)} \text{ Ecu 19.}$$

Calcular la densidad del árido en condición saturada superficialmente seca (SSS), empleando la siguiente expresión:

$$\text{Densidad (SSS)}, \frac{kg}{m^3} = \frac{997,5 S}{(B+S-C)} \text{ Ecu 20.}$$

Se calcula la densidad aparente, de la siguiente manera:

$$\text{Densidad aparente (SSS)}, \frac{kg}{m^3} = \frac{997,5 A}{(B+A-C)} \text{ Ecu 21.}$$

### **Absorción**

$$\text{Absorción, \%} = \frac{(S-A)}{A} \times 100 \text{ Ecu 22.}$$

#### **3.3.5 Determinación de la masa unitaria y el porcentaje de vacíos**

El procedimiento que se detalla a continuación, sirve para determinar el valor de masa unitaria, también conocido como peso volumétrico de los agregados, necesario para realizar la dosificación de mezclas de hormigón. Con este método se determina la masa unitaria en condición seca.

#### **Método de ensayo**

El agregado fino o grueso se debe colocar sobre un molde con capacidad adecuada y se compacta. A partir de este método se determina la masa unitaria del agregado y el contenido de vacíos (INEN 858, 2010).

## **Equipos**

### **Balanza**

Debe tener una precisión de 0,1% de la masa empleada en el ensayo.

### **Varilla de compactación:**

Es una varilla recta, lisa de acero de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud aproximadamente. El extremo de compactación es redondeando con una punta semiesférica de 16 mm de diámetro.

### **Molde**

Es un recipiente de metal y cilíndrico con empuñaduras. Su altura debe ser aproximadamente igual a su diámetro, pero la altura no puede en ningún caso, ser menor al 80% ni superior al 150% del diámetro. En el presente caso, según define la norma NTE INEN 858, para agregado con un tamaño máximo nominal de 37,5 mm la capacidad nominal del molde es de 14 litros. El molde, además, debe estar calibrado antes de realizar la prueba (Ver Figura 3.20).



Figura 3.20 Equipo necesario para realizar el ensayo de peso volumétrico de los agregados.  
Fuente: La autora

### **Procedimiento de ensayo**

1. Secar la muestra de agregado en un horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.
2. Como el agregado tiene un tamaño máximo nominal de 37,5 mm se utiliza el procedimiento de compactación por varillado.

3. Para la primera capa, colocar el material hasta la tercera parte del molde y nivelar la superficie con los dedos. Para compactar, se deben varillar la capa de agregados a 25 golpes de varilla distribuidos de manera uniforme, evitando golpear fuertemente el fondo del molde. Después, llenar los dos tercios del molde y repetir el proceso de la primera capa, la compactación debe ser maciza sin que se penetre la capa anterior. Para la última capa, se debe llenar el molde hasta su límite y compactar nuevamente como se indicó para la segunda capa (Ver Figura 3.21).



Figura 3.21 Molde relleno con la última capa de material previo a la compactación.  
Fuente: La autora

4. Nivelar la superficie del agregado con una regleta de tal manera que se equilibren los vacíos mayores en la superficie.
5. Determinar la masa del molde con su contenido con una aproximación de 0,05kg

### 3.3.6 Procedimiento del diseño de la mezcla de hormigón

La mezcla de hormigón base, es decir, aquella dosificada con agregado grueso y fino naturales, se diseñará mediante la metodología propuesta por el autor, Diego Sánchez de Guzmán en su libro, Tecnología del concreto y del mortero del año 2001, basada en el método del ACI 211. El procedimiento de diseño es el siguiente:

Paso 1. Selección del asentamiento.

Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado.

Paso 3. Estimación del contenido de agua de mezclado y de aire.

Paso 4. Selección de la relación agua - cemento.

Paso 5. Cálculo del contenido de cemento.

Paso 6. Estimación de las proporciones de agregados.

Paso 9. Ajuste por humedad de los agregados.

## CAPÍTULO IV

### RESULTADOS

#### 4.1 Determinación de las propiedades de los agregados

Las muestras de los áridos naturales se obtuvieron de acuerdo a la norma NTE INEN 695: Áridos. Muestreo; prestando atención a que se debe garantizar que dicha muestra sea representativa del conjunto.

Las propiedades físicas estudiadas para los agregados gruesos naturales y reciclados fueron: granulometría, humedad, absorción, peso volumétrico y peso específico.

Las propiedades físicas estudiadas para el agregado fino natural fueron: granulometría, humedad, absorción, peso volumétrico, peso específico y adicionalmente se determinó el módulo de finura, puesto que todos estos resultados se emplean para la dosificación de la mezcla de hormigón, de acuerdo al método ACI 211.

Para determinar las propiedades antes mencionadas en los agregados naturales que provienen de la Compañía Minera Pirincay ubicada en el cantón Paute, se realizó la limpieza y lavado del agregado, para eliminar las impurezas orgánicas que como es común, se encuentran en el material, puesto que el mismo está expuesto a la intemperie en la zona de almacenamiento de la mina.

##### 4.1.1 Granulometría

La granulometría es un factor muy importante para realizar una dosificación por este método puesto que, debe cumplir con los límites superior e inferior establecidos por la norma ASTM C 33 – NTE INEN 872; caso contrario se debe emplear otro método de diseño (Sánchez de Guzmán, 2001).

##### 4.1.1.1 Agregado grueso natural

Este ensayo consiste en determinar la gradación de las partículas de agregado grueso, para lo cual se ha empleado el método especificado en la Norma NTE INEN 696 – ASTM C 136, lo cual permite realizar comparaciones bajo las mismas condiciones. En

las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 y Figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se muestran los resultados del ensayo de granulometría a las 3 muestras ensayadas del agregado grueso natural.

Tabla 4.1 Ensayo de granulometría para la muestra No.1 del agregado grueso natural.

Análisis granulométrico del agregado grueso natural								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,06	0,06	0,38	0,38	99,62	95	100
1"	25	3,66	3,72	23,34	23,72	76,28		
3/4"	19	3,30	7,02	21,05	44,77	55,23	35	70
1/2"	12,5	5,06	12,08	32,27	77,04	22,96		
3/8"	9,5	1,97	14,05	12,56	89,60	10,40	10	30
N 4	4,75	1,50	15,55	9,57	99,17	0,83	0	5
<b>Masa final</b>			15,67	kg				
<b>Masa inicial</b>			15,68	kg				

Fuente: La autora

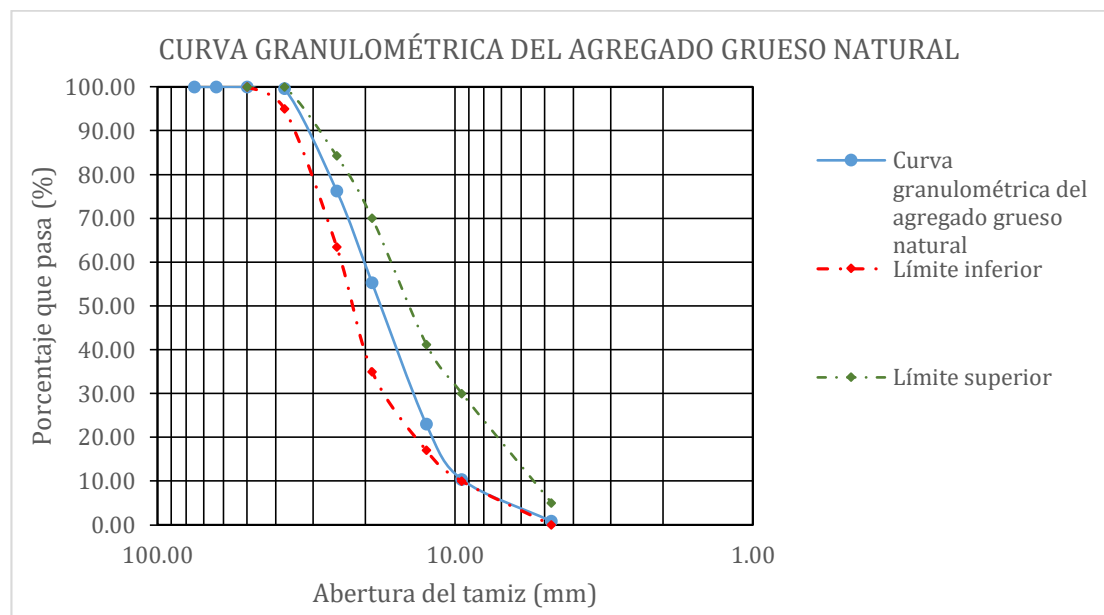


Figura 4.1 Curva granulométrica para la muestra No.1 del agregado grueso natural.

Fuente: La autora

Tabla 4.2 Ensayo de granulometría para la muestra No.2 del agregado grueso natural.

Análisis granulométrico del agregado grueso natural								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,29	0,294	1,66	1,66	98,34	95	100
1"	25	3,34	3,634	18,84	20,50	79,50		
3/4"	19	3,32	6,958	18,75	39,24	60,76	35	70
1/2"	12,5	4,98	11,937	28,08	67,33	32,67		
3/8"	9,5	2,36	14,301	13,33	80,66	19,34	10	30
N 4	4,75	3,12	17,416	17,57	98,23	1,77	0	5
<b>Masa final</b>			17,72	kg				
<b>Masa inicial</b>			17,73	kg				

Fuente: La autora

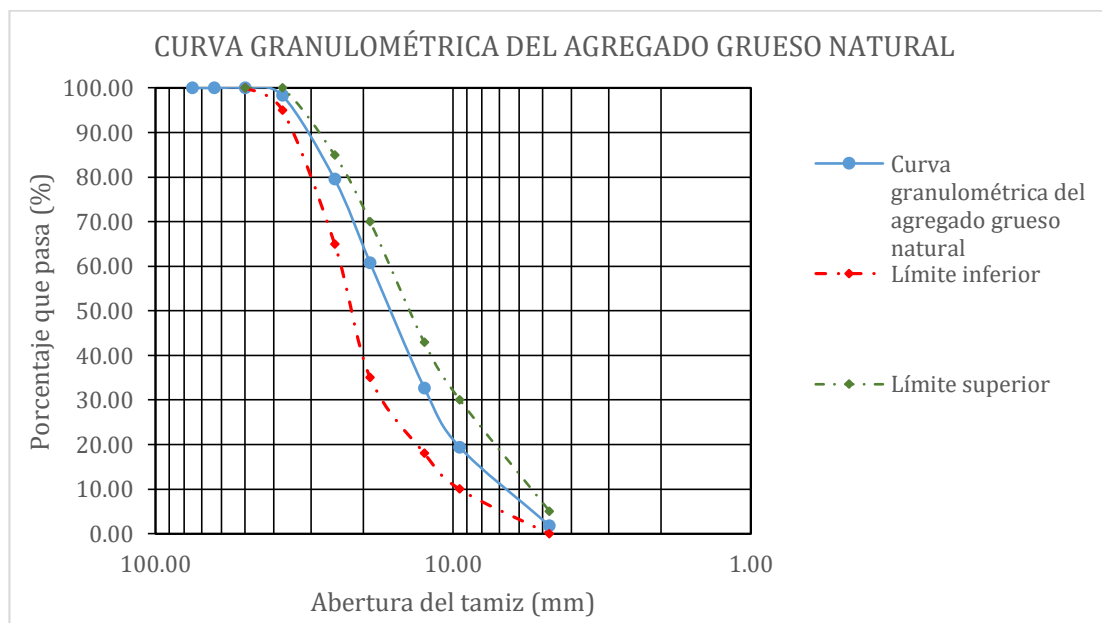


Figura 4.2 Curva granulométrica para la muestra No.2 del agregado grueso natural.

Fuente: La autora



Tabla 4.3 Ensayo de granulometría para la muestra No. 3 del agregado grueso natural.

Análisis granulométrico del agregado grueso natural								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,19	0,194	1,17	1,17	98,83	95	100
1"	25	2,34	2,530	14,09	15,26	84,74		
3/4"	19	3,33	5,860	20,08	35,34	64,66	35	70
1/2"	12,5	4,98	10,840	30,04	65,38	34,62		
3/8"	9,5	2,36	13,200	14,23	79,61	20,39	10	30
N 4	4,75	3,13	16,330	18,88	98,49	1,51	0	5
<b>Masa final</b>			16,57	kg				
<b>Masa inicial</b>			16,58	kg				

Fuente: La autora

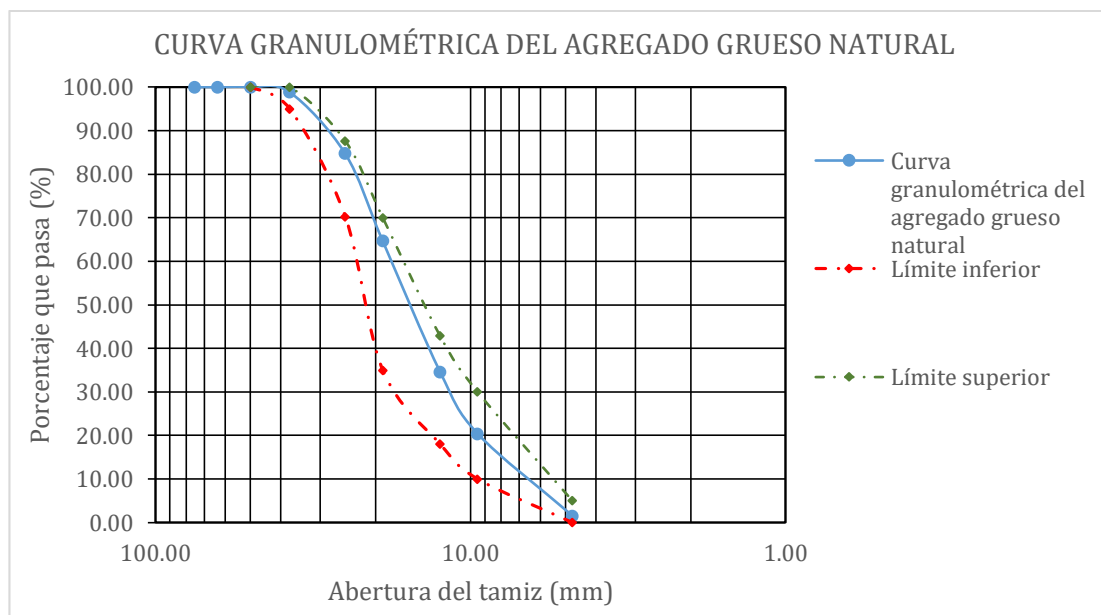


Figura 4.3 Curva granulométrica para la muestra No. 3 del agregado grueso natural.

Fuente: La autora

En las tablas y figuras reportadas, se evidencia que la gradación de los agregados gruesos naturales empleados en este proyecto, cumplen con el criterio de aceptación establecido por la norma ASTM C 33 para un tamaño máximo nominal de 1 ½". *“La primera curva define el límite superior y la segunda el inferior, dentro de las cuales cualquier granulometría es buena”* (Sánchez de Guzmán, 2001, pág. 88).

La importancia de la gradación continua radica en que: *“esta variedad en el tamaño de las partículas tiene la finalidad de que los vacíos dejados por las partículas de mayor tamaño sean ocupados por las partículas más pequeñas, incrementando el espesor de la capa lubricante, la laborabilidad de la mezcla, algo que permite obtener una mejor compactación con un uso moderado de energía”* (Acevedo et al., 1985. pág. 230).

De este análisis también se concluye que el tamaño máximo nominal del agregado grueso natural es de 1 ½" (37,5 mm), puesto que este valor se define como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel cuyo porcentaje retenido acumulado es del 15% o más.

#### **4.1.1.2 Agregado grueso reciclado**

De la misma manera que para el agregado grueso natural, para determinar la granulometría del agregado reciclado (ladrillo triturado proveniente de demolición), se ha empleado el método especificado en la Norma NTE INEN 696 – ASTM C 136, lo cual permite realizar comparaciones bajo las mismas condiciones.

Como se mencionó anteriormente en el capítulo 3, después de realizar la trituración del material reciclado, de manera manual, con un tamaño aproximado a 1 ½", de modo que se asemeje al tamaño máximo de las partículas de agregado natural, se realiza el ensayo de granulometría.

En los resultados reportados a continuación, se muestran los valores obtenidos junto a los límites de gradación especificados por la norma ASTM C 33. En las Tablas 4.4, 4.5 y 4.6 y las Figuras 4.4, 4.5 y 4.6 se muestran los resultados del ensayo de granulometría, a las 3 muestras ensayadas del agregado grueso reciclado.

Tabla 4.4 Ensayo de granulometría de la muestra No. 1 del agregado grueso reciclado.

Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,38	4,378	21,89	21,89	78,11		
3/4"	19	5,32	9,702	26,62	48,51	51,49	35	70
1/2"	12,5	3,44	13,144	17,21	65,72	34,28		
3/8"	9,5	1,33	14,475	6,66	72,38	27,63	10	30
N 4	4,75	1,58	16,051	7,88	80,26	19,75	0	5
<b>Masa final</b>			16,22	kg				
<b>Masa inicial</b>			20,00	kg				

Fuente: La autora

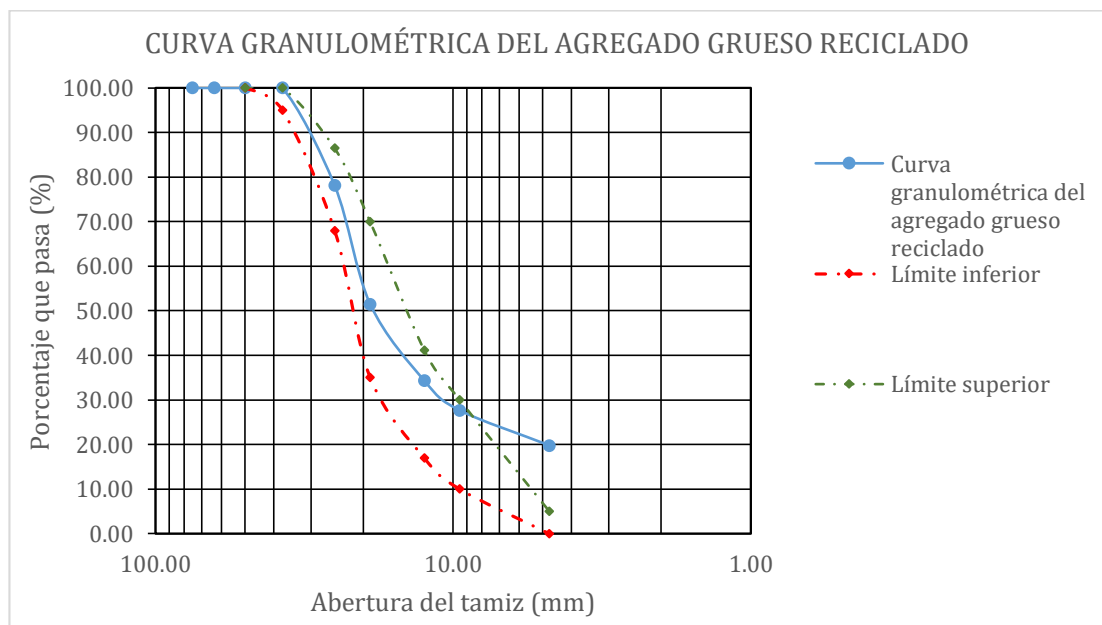


Figura 4.4 Curva granulométrica de la muestra No. 1 del agregado grueso reciclado.

Fuente: La autora

Tabla 4.5 Ensayo de granulometría de la muestra No. 2 del agregado grueso reciclado.

Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,83	4,828	24,76	24,76	75,24		
3/4"	19	5,32	10,152	27,30	52,06	47,94	35	70
1/2"	12,5	3,44	13,594	17,65	69,71	30,29		
3/8"	9,5	1,33	14,925	6,83	76,54	23,46	10	30
N 4	4,75	1,58	16,501	8,08	84,62	15,38	0	5
<b>Masa final</b>			16,67	kg				
<b>Masa inicial</b>			19,50	Kg				

Fuente: La autora

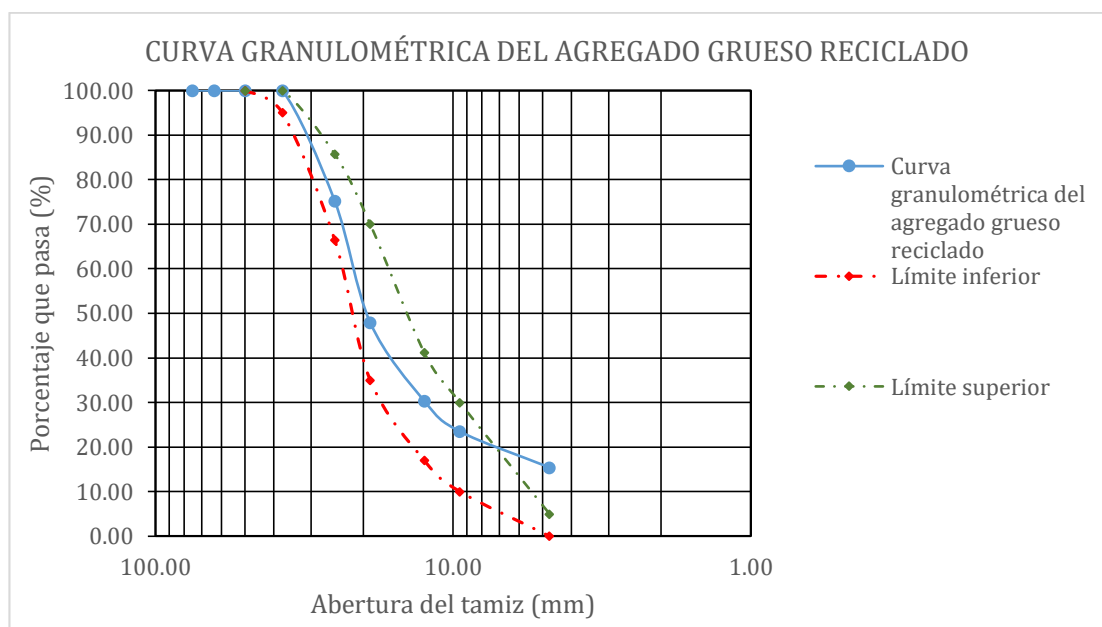


Figura 4.5 Curva granulométrica de la muestra No. 2 del agregado grueso reciclado.

Fuente: La autora

Tabla 4.6 Ensayo de granulometría de la muestra No. 3 del agregado grueso reciclado.

Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	5,58	5,578	27,89	27,89	72,11		
3/4"	19	5,32	10,902	26,62	54,51	45,49	35	70
1/2"	12,5	2,44	13,344	12,21	66,72	33,28		
3/8"	9,5	2,34	15,680	11,68	78,40	21,60	10	30
N 4	4,75	1,57	17,250	7,85	86,25	13,75	0	5
<b>Masa final</b>			17,42	kg				
<b>Masa inicial</b>			20,00	kg				

Fuente: La autora

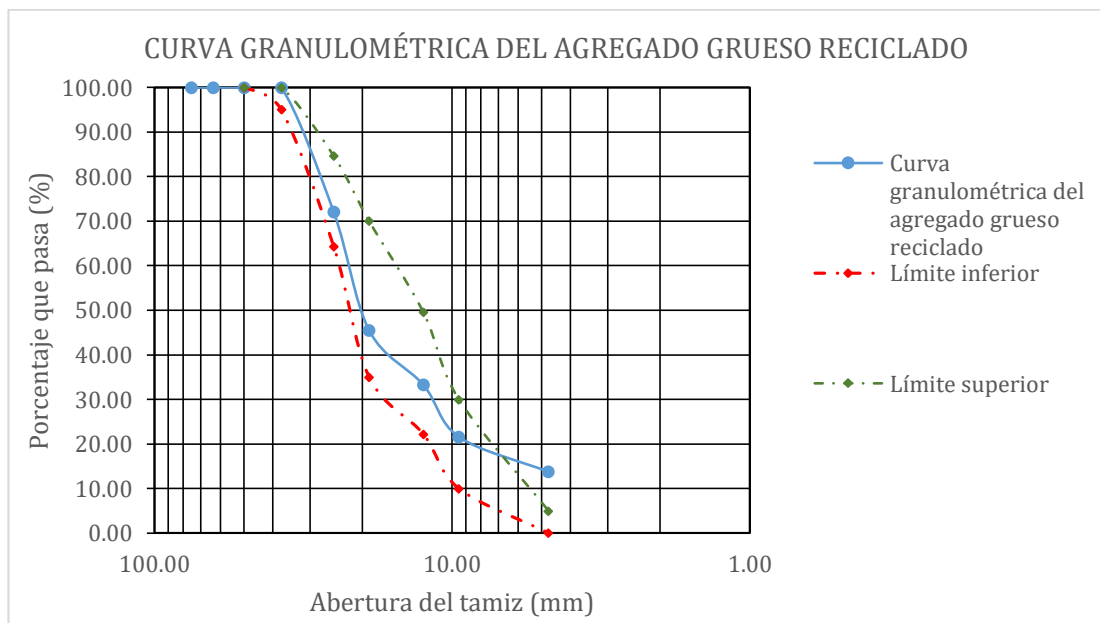


Figura 4.6 Curva granulométrica de la muestra No. 3 del agregado grueso reciclado.

Fuente: La autora

Como puede observarse en las tablas y figuras anteriores, el agregado grueso reciclado se mantiene dentro de los límites establecidos por la norma ASTM, a excepción del tamiz de 4,75 mm (Ver anexo 2). Dicho comportamiento era esperado, puesto que durante el proceso de trituración se produce una gran cantidad de partículas con un tamaño menor a 4,75 mm, el cual, a partir de ahora, se denominará material fino de agregado reciclado.

Debido a lo antes mencionado, para conseguir la eliminación del exceso de parte fina del agregado reciclado, se procede a realizar un lavado inicial y luego de secar el material restante de esta operación, se procede a realizar el tamizado manual sobre la malla de abertura 4,75 mm (Tamiz No. 4).

En las tablas 4.7, 4.8 y 4.9 y las Figuras 4.7, 4.8, y 4.9 se muestran los resultados de los ensayos de granulometría a las 3 muestras ensayadas del agregado grueso reciclado, después de lavar el material fino en exceso, en la cual se observa, que después de este procedimiento, el agregado cumple con los rangos de gradación superior e inferior (Ver Anexo 3), establecidos en la norma ASTM C 33 y es por ello que el método de diseño proporcionado por el American Concrete Institute, ACI 211, es aplicable para estos agregados. De igual manera se realizaron 3 ensayos.

Tabla 4.7 Ensayo de granulometría de la muestra No. 1 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso.

Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado lavado								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,40	4,400	27,08	27,08	72,92		
3/4"	19	5,40	9,800	33,23	60,31	39,69	35	70
1/2"	12,5	3,38	13,180	20,80	81,11	18,89		
3/8"	9,5	1,34	14,520	8,25	89,35	10,65	10	30
N 4	4,75	1,52	16,040	9,35	98,71	1,29	0	5
<b>Masa final</b>			16,21	kg				
<b>Masa inicial</b>			16,25	kg				

Fuente: La autora

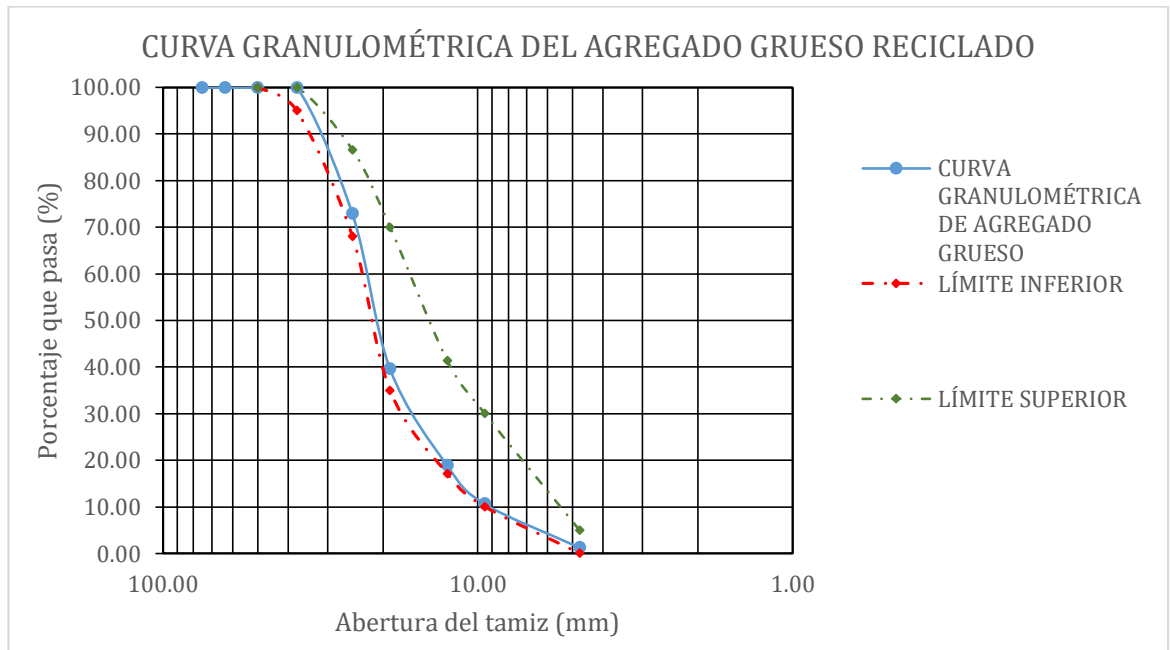


Figura 4.7 Curva granulométrica de la muestra No. 1 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso.  
Fuente: La autora

Tabla 4.8 Ensayo de granulometría de la muestra No. 2 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso.

<b>Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado lavado</b>								
<b>Tamices</b>		<b>Masa</b>	<b>Masa</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que</b>	<b>Límites ASTM C33</b>	
<b>Ø</b>	<b>(mm)</b>	<b>Retenida (kg)</b>	<b>Acumulada (kg)</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasa</b>	<b>Inferior (%)</b>	<b>Superior (%)</b>
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,89	4,891	27,95	27,95	72,05		
3/4"	19	5,05	9,943	28,87	56,82	43,18	35	70
1/2"	12,5	4,18	14,120	23,87	80,69	19,31		
3/8"	9,5	1,38	15,500	7,89	88,57	11,43	10	30
N 4	4,75	1,60	17,100	9,14	97,71	2,29	0	5
<b>Masa final</b>			17,27	kg				
<b>Masa inicial</b>			17,50	kg				

Fuente: La autora

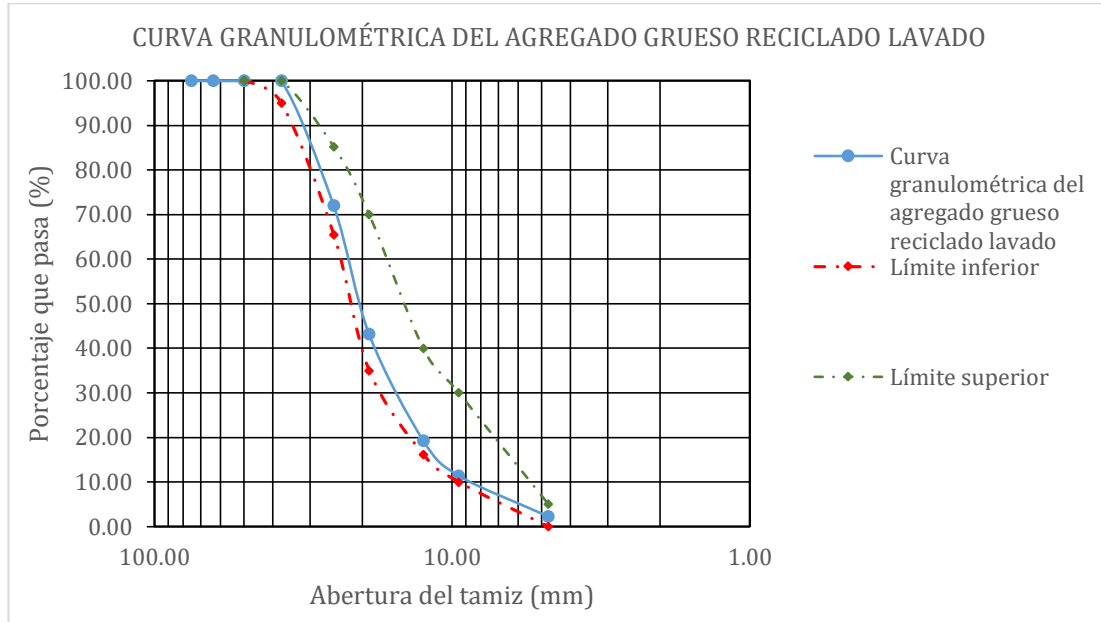


Figura 4.8 Curva granulométrica de la muestra No. 2 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso.

Fuente: La autora

Tabla 4.9 Ensayo de granulometría de la muestra No. 3 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso.

Análisis granulométrico del agregado grueso reciclado lavado								
Tamices		Masa	Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Retenida (kg)	Acumulada (kg)	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
3"	75,2	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,00	0,000	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,62	4,621	26,79	26,79	73,21		
3/4"	19	5,05	9,673	29,29	56,08	43,92	35	70
1/2"	12,5	4,18	13,850	24,21	80,29	19,71		
3/8"	9,5	1,42	15,270	8,23	88,52	11,48	10	30
N 4	4,75	1,56	16,830	9,04	97,57	2,43	0	5
<b>Masa final</b>			17,03	kg				
<b>Masa inicial</b>			17,25	kg				

Fuente: La autora



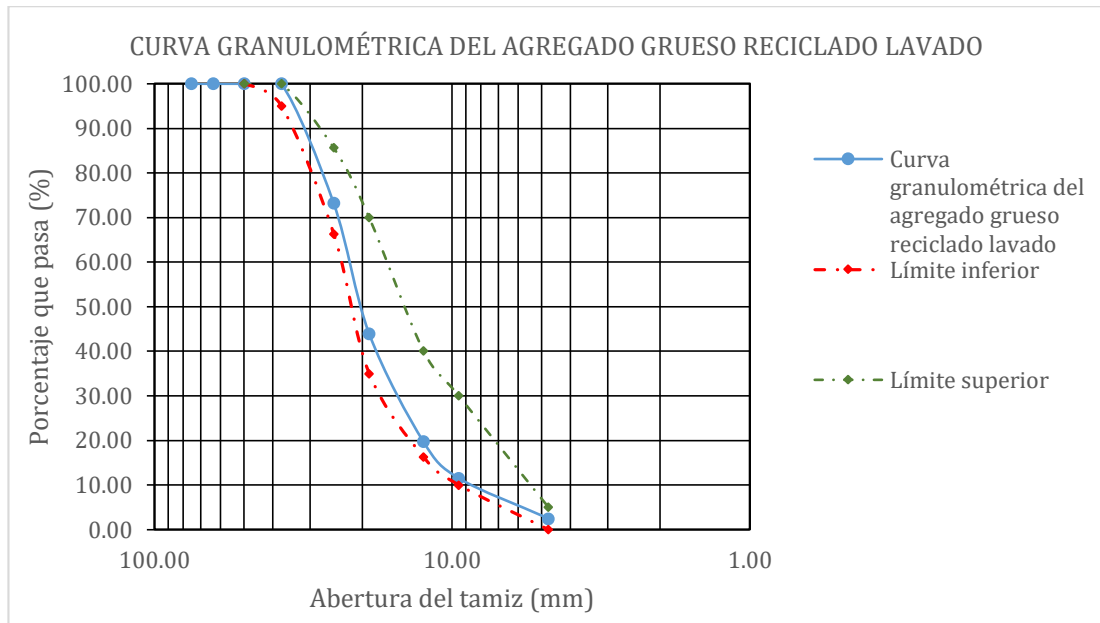


Figura 4.9 Curva granulométrica de la muestra No. 3 del agregado grueso reciclado después del lavado para eliminar el material fino en exceso.

Fuente: La autora

#### 4.1.1.3 Agregado fino natural

Finalmente, para obtener la gradación del agregado fino natural se realizó la toma de muestra en campo de acuerdo a la norma NTE INEN 695, procurando obtener una muestra representativa del conjunto. Posteriormente se realizó el ensayo granulométrico de acuerdo a la norma ASTM D 422-63 – NTE INEN 872. En las tablas 4.10, 4.11 y 4.12 y Figuras 4.10, 4.11 y 4.12 se muestran los resultados del ensayo de granulometría a las 3 muestras ensayadas del agregado fino natural.

Tabla 4.10 Ensayo de granulometría de la muestra No. 1 del agregado fino natural.

<b>Análisis granulométrico del agregado fino natural</b>							
<b>Tamices</b>		<b>Masa</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Retenido</b>	<b>% Que</b>	<b>Límites</b>	
<b>Ø</b>	<b>(mm)</b>	<b>Retenida</b>	<b>Parcial</b>	<b>Acumulado</b>	<b>Pasa</b>	<b>Inferior (%)</b>	<b>Superior (%)</b>
4	4,75	53,15	3,60	3,60	96,40	95	100
8	2,380	201,95	13,68	17,28	82,72	80	100
16	1,190	247,90	16,80	34,08	65,92	50	85
30	0,590	341,55	23,14	57,22	42,78	25	60
50	0,297	357,98	24,25	81,47	18,53	10	30
100	0,149	192,79	13,06	94,53	5,47	2	10
<b>Masa final</b>		1475,82 g					
<b>Masa inicial</b>		1476,000 g					

Fuente: La autora

Módulo de finura = 2,88

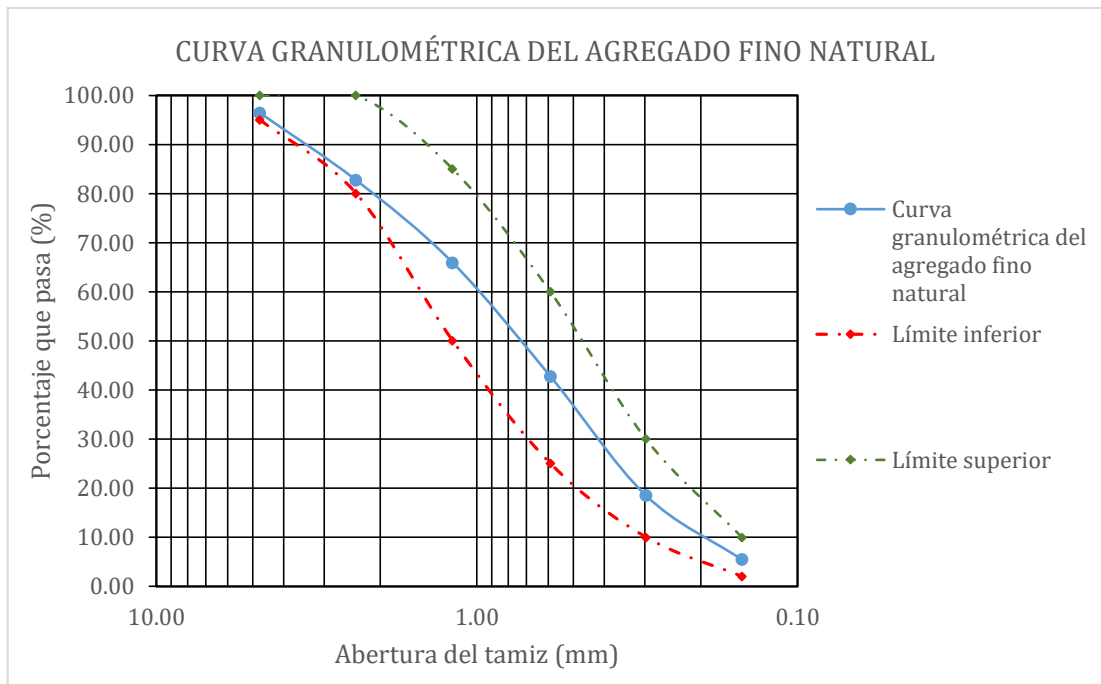


Figura 4.10 Curva granulométrica de la muestra No. 1 del agregado fino natural.  
Fuente: La autora

Tabla 4.11 Ensayo de granulometría de la muestra No. 2 del agregado fino natural.

<b>Análisis granulométrico del agregado fino natural</b>							
Tamices		Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites	
Ø	(mm)	Retenida	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
4	4,75	56,71	56,71	3,65	3,65	96,35	95
8	2,380	239,85	183,14	11,80	15,45	84,55	80
16	1,190	464,46	224,61	14,47	29,91	70,09	50
30	0,590	814,90	350,44	22,57	52,49	47,51	25
50	0,297	1218,91	404,01	26,02	78,51	21,49	10
100	0,149	1448,40	229,49	14,78	93,29	6,71	2
<b>Masa final</b>		1551,56 g					
<b>Masa inicial</b>		1552,600 g					

Fuente: La autora

Módulo de finura = 2,73

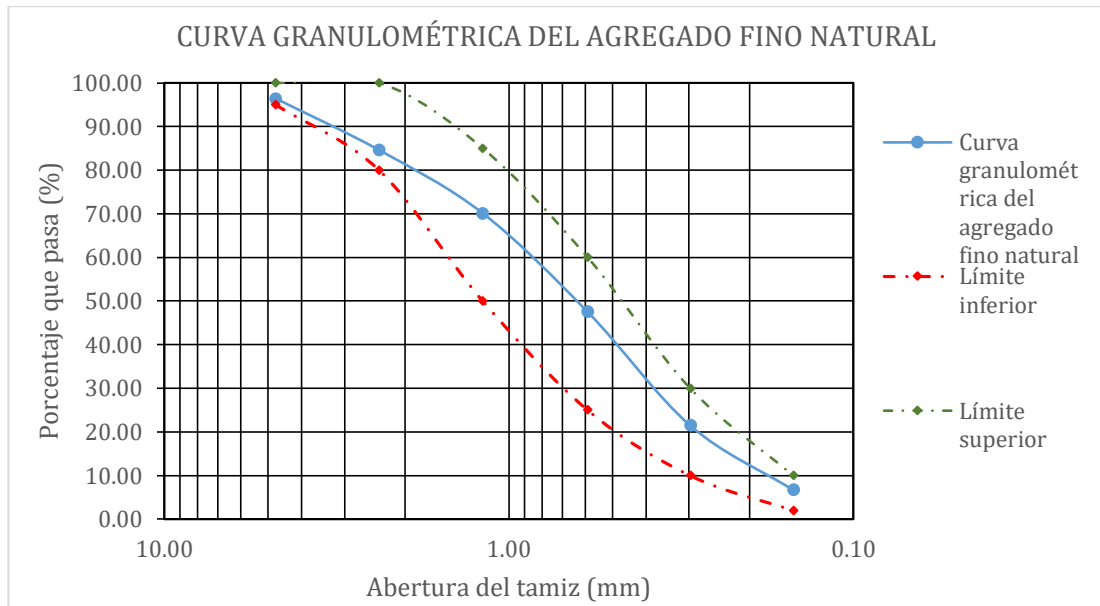


Figura 4.11 Curva granulométrica de la muestra No. 2 del agregado fino natural.  
Fuente: La autora

Tabla 4.12 Ensayo de granulometría de la muestra No. 3 del agregado fino natural.

<b>Análisis granulométrico del agregado fino natural</b>							
Tamices		Masa	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites	
Ø	(mm)	Retenida	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior (%)	Superior (%)
4	4,75	6,20	0,41	0,41	99,59	95	100
8	2,380	182,30	12,03	12,44	87,56	80	100
16	1,190	212,46	14,02	26,47	73,53	50	85
30	0,590	362,05	23,90	50,36	49,64	25	60
50	0,297	382,02	25,22	75,58	24,42	10	30
100	0,149	266,63	17,60	93,18	6,82	2	10
<b>Masa final</b>		1514,82	gr				
<b>Masa inicial</b>		1515,000	gr				

Fuente: La autora

$$\text{Módulo de finura} = 2,58$$

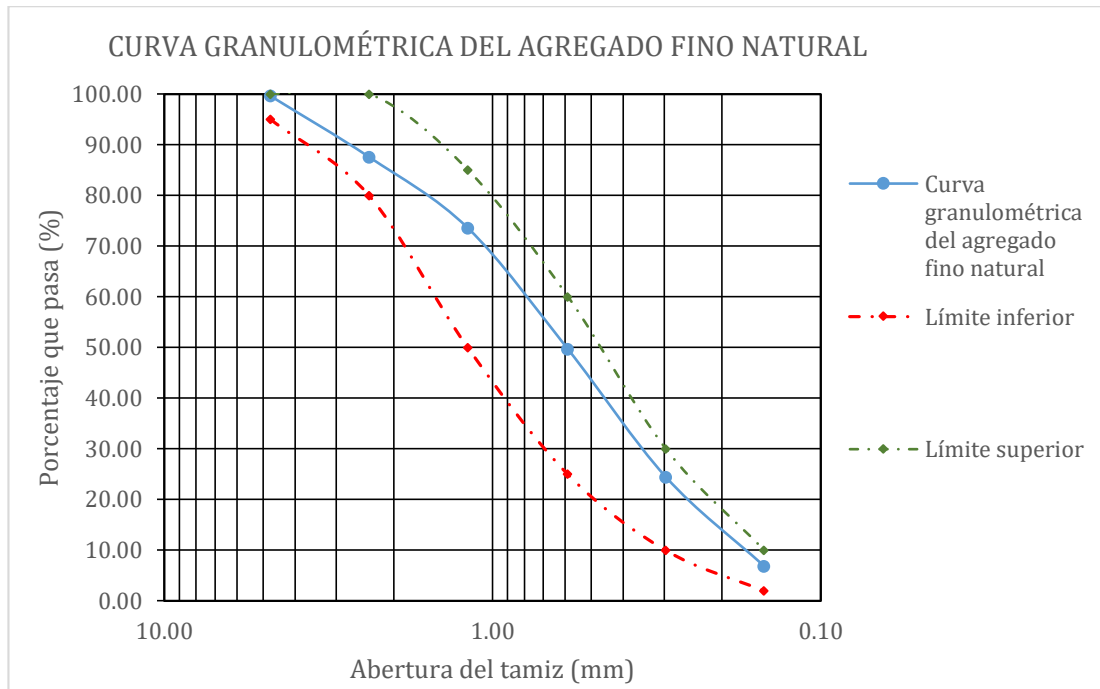


Figura 4.12 Curva granulométrica de la muestra No. 3 del agregado fino natural.  
Fuente: La autora

Como se puede observar en las y figuras anteriores, el agregado fino natural cumple con los requisitos de gradación establecidos en la norma ASTM C 33, es decir con los límites superior e inferior de gradación, razón por la cual, de acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001), el material posee adecuada gradación.

El valor del módulo de finura (MF) para el agregado fino natural, se encuentra entre 2,58 y 2,88 (Ver Anexo 3) y dado que, de acuerdo con Gómez (2001), si este valor se encuentra entre 2,5 y 3 se considera adecuado, entendiéndose que existe un predominio de partículas gruesas dentro de la distribución granulométrica.

#### 4.1.2 Humedad

Se inicia el proceso de ensayo de humedad de los agregados, tanto grueso (natural y reciclado) como fino, un día antes de la elaboración de las mezclas de hormigón, de acuerdo al método especificado en la norma ASTM C 566 – NTE INEN 862 para el agregado grueso natural y reciclado y la norma ASTM C 566 – NTE INEN 859, en el caso del agregado fino natural. En la Tabla 4.13 se muestra la humedad promedio de las tres pruebas realizadas cada material (Ver Anexos 4,5 y 6).

Tabla 4.13 Humedad promedio de los agregados.

<b>Material</b>	<b>Humedad promedio</b>	<b>Unidad</b>
Agregado Grueso Natural	1,60	%
Agregado Grueso Reciclado	10,50	%
Agregado Fino Natural	7,64	%

Fuente: La autora

Como se evidencia en la tabla anterior, los agregados reciclados, presentan mayor porcentaje de humedad que los naturales; sin embargo, de acuerdo con Gómez (2001), este valor se lo utiliza para aprobar o rechazar el agregado en una cierta aplicación, por ejemplo, cuando el hormigón estará sometido a congelamiento y deshielo, en la que se recomienda una humedad no mayor al 5%, para evitar el deterioro del material, pero ya que entre las consideraciones de diseño de la mezcla de hormigón para este proyecto no se contempla ese tipo de condiciones de exposición, se concluye que no existe impedimento para el uso del agregado grueso reciclado.

#### 4.1.3 Absorción

Para determinar esta propiedad se realizó el procedimiento especificado en la norma ASTM C 127 – NTE INEN 857 para los agregados gruesos (natural y reciclado) y ASTM C 128 – NTE INEN 856 para los agregados finos (Ver Anexos 7, 8 y 9). En la Tabla 4.14, se muestran los resultados de los ensayos de absorción de los agregados fino y grueso naturales y del agregado grueso reciclado:

Tabla 4.14 Absorción de los agregados fino y grueso naturales y el agregado grueso reciclado.

<b>Material</b>	<b>Absorción</b>	<b>Unidad</b>
Agregado Grueso Natural	2,12	%
Agregado Grueso Reciclado	18,95	%
Agregado Fino Natural	3,81	%

Fuente: La autora

En el cuadro anterior se evidencia, que tanto el agregado grueso natural como el agregado fino natural se encuentran dentro de los límites aceptables (Sánchez de Guzmán, 2001, pág. 97). Como se puede notar, el porcentaje de absorción del agregado

grueso reciclado (ladrillo triturado) es mayor que el del agregado natural; además, el valor de la absorción del agregado fino también es bastante alto, lo que quiere decir que en la corrección de la mezcla de hormigón se debe añadir agua, ya que de acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001), si la capacidad de absorción del agregado es mayor que la humedad, el agregado requiere de agua adicional para terminar de saturarse y llegar a la condición de saturado superficialmente seco, que tal cual se explicó en el marco teórico es el estado ideal de las partículas para el diseño de mezclas, por lo cual debe ser sumada al agua de mezclado. Además, a partir de estos resultados, se puede decir que el agregado reciclado (ladrillo triturado) al ser una partícula muy porosa afectará a la adherencia y resistencia a la compresión del hormigón.

#### 4.1.4 Gravedad específica de los agregados

Para la ejecución de este ensayo se realiza el procedimiento especificado en la norma ASTM C 128 - NTE INEN 857, en el caso del agregado fino y ASTM C 127 – NTE INEN 856, en el caso del agregado grueso. En la Tabla 4.15, se muestran los resultados de los ensayos de gravedad específica de los agregados fino y grueso naturales y del agregado grueso reciclado:

Tabla 4.15 Gravedad específica de los agregados naturales y reciclados.

<b>Material</b>	<b>Gravedad específica</b>
Agregado Grueso Natural	2,65
Agregado Grueso Reciclado	1,38
Agregado Fino Natural	2,54

Fuente: La autora

De acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001) la densidad aparente es inversamente proporcional al volumen de poros, pudiendo oscilar entre 2,3 a 2,8 g/cm<sup>3</sup>, por lo que el agregado grueso natural si cumpliría con lo dicho por el autor.

Al contrario del ladrillo triturado, lo que permitiría interpretar que el agregado natural presenta menor cantidad de poros que el reciclado, puesto que la gravedad específica es una medida de porosidad del agregado y un mayor valor significa menor presencia de estos (Ver Anexos 7, 8 y 9). De esto se concluye que, el agregado grueso reciclado al presentar un valor de gravedad específica inferior al estipulado por el autor, no es apto para la producción de hormigones de alta resistencia.

#### 4.1.5 Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados

Para determinar esta propiedad de los agregados se ha empleado el procedimiento especificado en la norma ASTM C 29 - NTE INEN 858.

Tabla 4.16 Peso volumétrico suelto y compactado de los agregados.

Material	Peso Volumétrico Suelto	Peso Volumétrico Compactado	Unidades
Agregado Grueso Natural	1569,55	1668,12	kg/m <sup>3</sup>
Agregado Grueso Reciclado	778,19	978,09	kg/m <sup>3</sup>
Agregado Fino Natural	1530,62	1619,55	kg/m <sup>3</sup>

Fuente: La autora

Se puede notar que los valores de peso volumétrico suelto del agregado grueso y fino naturales son mayores al del agregado grueso reciclado. Además, el valor de peso volumétrico compactado del agregado grueso natural es muy superior al del ladrillo triturado. De acuerdo con lo expuesto en el marco teórico, esto significa que el agregado natural tiene un mejor grado de acomodamiento de las partículas cuando se somete a compactación.

#### 4.2 Diseño de mezclas

De acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001), no existe un método exacto para el proporcionamiento de mezclas de hormigón, sino simplemente diversos métodos de diseño que permiten obtener las cantidades aproximadas de los componentes, debido a la variabilidad en las propiedades de los materiales.

El método empleado para la elaboración de mezclas de hormigón es el método A.C.I.-211: "PRÁCTICA RECOMENDABLE PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL Y CONCRETO PESADO", en el cual se determina la cantidad en peso de los materiales para producir un metro cúbico de hormigón. Es importante mencionar que, la dosificación se realiza con las características de los agregados naturales puesto que el objetivo del presente trabajo es comparar la resistencia a la compresión obtenida al reemplazar el agregado grueso natural por agregado grueso reciclado en una dosificación ya establecida. En la tabla 4.17 se muestra el resumen del diseño de la mezcla de hormigón base, es decir aquella con respecto a la cual se compararán los resultados de resistencia a la compresión de los hormigones reciclados.

Tabla 4.17 Resumen de la dosificación de la mezcla de hormigón base incluyendo el ajuste por humedad de los agregados

<b>Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cúbico de hormigón</b>			
<b>Ingrediente</b>	<b>Peso seco Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Peso húmedo g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Peso húmedo para 100 l en kg</b>
Cemento	285,00	285,00	28,50
Agua	181,00	214,69	21,47
Cont. De aire	0,00	0,00	0,00
Agregado grueso	1183,00	1201,93	120,19
Agregado fino	717,69	745,04	74,50
<b>TOTAL</b>	<b>2366,69</b>	<b>2446,66</b>	<b>244,66</b>

Fuente: La autora

Los cilindros elaborados con las diferentes mezclas se nombraron de la siguiente manera: hormigón elaborado con agregado natural como HN, el hormigón elaborado con agregado reciclado (ladrillo triturado, residuo de demolición) remplazando el agregado grueso natural como H20%, H40% y H60%.

Además, para la elaboración de las mezclas de hormigón reciclado, se procedió a saturar el ladrillo triturado debido a la alta porosidad que este presentaba con la finalidad de que, en el momento de mezclado, no absorba agua de la mezcla. Adicionalmente, se debe indicar que el agregado fino empleado para las muestras de hormigón reciclado es la misma que se empleó para elaborar la mezcla de hormigón con el agregado grueso natural.

En total se elaboraron 12 cilindros de hormigón para cada tipo de mezcla, de los cuales 3 cilindros se destinaron para el ensayo de compresión a los 7 y 14 días, 5 para el ensayo de resistencia a la compresión a los 28 días y un cilindro para determinar la absorción del hormigón.

### **4.3 Propiedades del hormigón en estado fresco**

El hormigón se mezcló en una concretera basculante, con una capacidad para 50kg. El primer paso fue colocar la grava en la máquina y agregar la mitad de agua, mezclarlos por un minuto y luego agregar el cemento. A continuación, se coloca el agregado fino y el resto de agua mezclándolos por 3 minutos. Para las mezclas de hormigón con agregado reciclado, se procede en el mismo orden, con la variante del tiempo de



mezclado del agregado reciclado y la mitad de la cantidad de agua que fue de 3 minutos.

La propiedad del hormigón en estado fresco estudiada fue la trabajabilidad o laborabilidad, de acuerdo con los procedimientos establecidos en las normas NTE INEN 1578 o su homóloga ASTM C143, que corresponden al método del Cono de Abrams. En la tabla 4.18, se presentan los valores de asentamiento obtenidos durante el ensayo de Cono de Abrams para las distintas mezclas de hormigón.

Tabla 4.18 Asentamiento de las mezclas de hormigón.

<b>Hormigón</b>	<b>Asentamiento</b>	<b>Unidades</b>
Hormigón base con agregados naturales	7,5	cm
Hormigón con agregado reciclado 20% (H20%)	6,9	cm
Hormigón con agregado reciclado 40% (H40%)	6,1	cm
Hormigón con agregado reciclado 60% (H60%)	5,4	cm

Fuente: La autora

Como se puede observar en la tabla 4.18, a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo del agregado grueso natural por el agregado reciclado, el valor de asentamiento disminuye. Esto se debe a que, el agregado reciclado, al ser ladrillo triturado, presentaba mayor absorción como se mencionó en los resultados de los ensayos de agregados, siendo este el motivo por el cual el asentamiento de los hormigones reciclados y, en consecuencia, su trabajabilidad, disminuye con respecto a la mezcla base con agregados naturales.

#### **4.4 Elaboración de las mezclas de hormigón**

Las mezclas se realizaron a lo largo de cuatro días, procediéndose a realizar en el primer día la mezcla base, es decir aquella que contiene agregado grueso y agregado fino naturales. El segundo día se reemplazó el 20% del agregado grueso natural por agregado reciclado (residuo de ladrillo proveniente de una demolición). El tercer día se reemplazó el 40% y el último día de elaboración de mezclas se reemplazó el 60% de agregado grueso natural por agregado reciclado. En la Figura 4.13, se muestran algunos de los cilindros elaborados para este trabajo después de ser desmoldados.



Figura 4.13 Cilindros de hormigón después de ser desmoldados.  
Fuente: La autora

## 4.5 Propiedades del hormigón en estado endurecido

### 4.4.1 Densidad seca

Este procedimiento se realiza de acuerdo a la norma ASTM 138 a los 28 días. En la Tabla 4.19, se presenta los valores obtenidos, tanto para el hormigón con agregado grueso natural, como para aquellos en los que se reemplazan con agregado reciclado.

Tabla 4.19 Densidad seca del hormigón a los 28 días.

Edad de ensayo	Porcentaje de reemplazo	No. Cilindro	Densidad kg/m <sup>3</sup>	Densidad promedio kg/m <sup>3</sup>
28 días	0%	7	2371,05	2364,64
28 días	0%	8	2359,74	
28 días	0%	9	2359,74	
28 días	0%	10	2367,28	
28 días	0%	11	2365,40	
28 días	20%	7	2259,76	2271,84
28 días	20%	8	2246,56	
28 días	20%	9	2282,40	
28 días	20%	10	2282,40	
28 días	20%	11	2288,06	
28 días	40%	7	2150,36	2186,01
28 días	40%	8	2206,95	
28 días	40%	9	2203,18	
28 días	40%	10	2173,00	
28 días	40%	11	2196,57	
28 días	60%	7	2129,61	2134,14
28 días	60%	8	2140,93	
28 días	60%	9	2131,50	
28 días	60%	10	2137,16	
28 días	60%	11	2131,50	

Fuente: La autora

A partir de la tabla presentada, se concluye que el hormigón con agregados gruesos y finos naturales de acuerdo al ACI 318, se considera como un hormigón normal puesto que su densidad oscila entre  $2400 \text{ kg/m}^3$ .

La densidad de los hormigones reciclados, es una consecuencia de una deficiente densidad del agregado reciclado (ladrillo triturado proveniente de una demolición) con respecto al natural. Sin embargo, los hormigones con agregados gruesos reciclados se consideran como hormigones de peso normal, puesto que superan los  $2000 \text{ kg/m}^3$  (Neville, 2013).

#### 4.4.2 Absorción

Mediante este ensayo se determina la porosidad, es decir los espacios comunicados entre sí, que es considerada un criterio de durabilidad al igual que la permeabilidad. Para ello, se empleó el ensayo de absorción de agua por inmersión para determinar la cantidad máxima de agua que absorbe una probeta de hormigón seca y de esta manera obtener una medida total de poros permeables que existe dentro del hormigón.

Se determinó la absorción sobre una probeta cilíndrica de cada mezcla de hormigón, a los 28 días; se las pesó después de que se secó su superficie, es decir, se determinó su peso saturado superficialmente seco; a continuación, se las secó al horno durante 24 horas a fin de obtener una masa constante y se pesó. Entonces, se calcula la absorción al dividir la pérdida de peso entre el peso seco al horno.

Tabla 4.20 Porcentaje de absorción del hormigón.

Porcentaje de reemplazo	Edad de ensayo	% Absorción
HN	28 días	1,56
H20%	28 días	9,20
H40%	28 días	16,11
H60%	28 días	20,87

Fuente: La autora

Se observa que el hormigón reemplazado con un 40% y 60% de agregado reciclado, presenta una absorción alta en comparación con el hormigón reemplazado en un 20%. De acuerdo al criterio empleado en el Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Estructuras de Hormigón Armado CYTED, que se presenta en la tabla 25, permite concluir que el hormigón reciclado H20% se considera como un hormigón de buena

calidad y compactación, debido a que el porcentaje de absorción es menor al 10% establecido por dicho manual.

Tabla 4.21 Criterios de evaluación de la porosidad de acuerdo al manual proporcionado por la CYTED.

<b>Porcentaje de absorción</b>	<b>Calidad de hormigón</b>
≤ 10%	Hormigón de buena calidad y compactación
10% - 15%	Hormigón de moderado calidad
>15%	Hormigón de durabilidad inadecuada

Fuente: (Troconis de Rincón et al., 2006)

#### 4.4.3 Resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de las mezclas de hormigón, se siguió el proceso descrito en la norma ASTM C 39 - NTE INEN 1573. Los resultados se encuentran en la sección de anexos; sin embargo, en las tablas 4.22, 4.23 y 4.24, se muestran los resultados de resistencia a la compresión para las distintas mezclas obtenidos a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 4.22 Resistencia a la compresión a los 7 días de elaborada la mezcla de hormigón.

<b>Porcentaje de reemplazo</b>	<b>No. Cilindro</b>	<b>Edad de la muestra</b>	<b>Resistencia f'c kg/cm<sup>2</sup></b>
HN	1	7 días	153,35
HN	2	7 días	159,01
HN	3	7 días	153,35
H20%	1	7 días	92,81
H20%	2	7 días	96,77
H20%	3	7 días	112,05
H40%	1	7 días	88,66
H40%	2	7 días	63,79
H40%	3	7 días	67,36
H60%	1	7 días	60,91
H60%	2	7 días	64,63
H60%	3	7 días	65,52

Fuente: La autora

Tabla 4.23 Resistencia a la compresión a los 14 días de elaborada la mezcla de hormigón.

<b>Porcentaje de reemplazo</b>	<b>No. Cilindro</b>	<b>Edad de la muestra</b>	<b>Resistencia f'c kg/cm<sup>2</sup></b>
HN	4	14 días	186,63
HN	5	14 días	193,72
HN	6	14 días	200,32
H20%	4	14 días	132,98
H20%	5	14 días	116,01
H20%	6	14 días	117,70
H40%	4	14 días	114,87
H40%	5	14 días	88,84
H40%	6	14 días	107,52
H60%	4	14 días	83,75
H60%	5	14 días	84,32
H60%	6	14 días	71,87

Fuente: La autora

Tabla 4.24 Resistencia a la compresión a los 28 días de elaborada la mezcla de hormigón.

<b>Porcentaje de reemplazo</b>	<b>No. Cilindro</b>	<b>Edad de la muestra</b>	<b>Resistencia f'c kg/cm<sup>2</sup></b>
HN	7	28 días	242,34
HN	8	28 días	245,29
HN	9	28 días	243,98
HN	10	28 días	246,73
HN	11	28 días	245,64
H20%	7	28 días	180,18
H20%	8	28 días	173,28
H20%	9	28 días	198,85
H20%	10	28 días	206,78
H20%	11	28 días	203,24
H40%	7	28 días	164,93
H40%	8	28 días	164,02
H40%	9	28 días	163,40
H40%	10	28 días	164,31
H40%	11	28 días	165,93
H60%	7	28 días	150,40
H60%	8	28 días	149,08
H60%	9	28 días	149,17
H60%	10	28 días	149,51
H60%	11	28 días	149,66

Fuente: La autora

Tabla 4.25 Resistencia promedio a la compresión de las mezclas de hormigón.

Mezcla	Resistencia promedio a la compresión (kg/cm <sup>2</sup> )		
	7 días	14 días	28 días
HN	155,24	193,56	244,80
H20%	100,54	122,23	192,47
H40%	73,27	103,75	164,52
H60%	63,69	79,98	149,56

Fuente: La autora

Se observa que las resistencias de los hormigones reciclados (aquellos en los que se ha reemplazado el agregado grueso por ladrillo triturado en un 20, 40, 60%) son deficientes; sin embargo, ya que el hormigón con 20% de agregado reciclado, presenta una resistencia a la compresión mayor a los 170 kg/cm<sup>2</sup> de acuerdo con el ACI 318, se consideran hormigones estructurales livianos, los cuales pueden destinarse a la construcción de muros y losas. Por otro lado, los hormigones con un 40 y 60% de agregado reciclado se clasifican como hormigones livianos; ideales para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas que requieren reducir las cargas muertas, para la construcción de viviendas con características de aislamiento térmico o como elementos que no soportan cargas estructurales. En la Figura 4.14, se presenta el ensayo de compresión a un cilindro de hormigón.



Figura 4.14 Ensayo de compresión de un cilindro de hormigón.

Fuente: La autora

En la Figura 4.14, se puede apreciar el tipo de fractura de los cilindros en la prueba de compresión, tanto para el hormigón con agregado natural, como para el que contiene agregado reciclado. La falla de los cilindros tiene la forma normal de falla a compresión, en forma de reloj de arena. Además, se puede observar el desprendimiento de agregado reciclado debido a la falta de adherencia de los componentes.

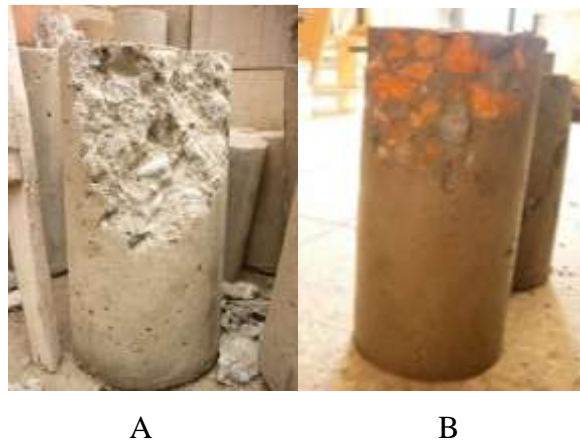


Figura 4.15 Tipo de fractura del cilindro de hormigón con agregado natural (A) y fractura del hormigón con agregado reciclado (B).  
Fuente: La autora

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

De acuerdo con el objetivo general y los objetivos específicos del presente trabajo de investigación, se ha llegado a las siguientes conclusiones:

1.- De acuerdo al ensayo granulométrico y los límites establecidos por la NTE INEN 872, el agregado grueso natural y el agregado fino natural cumplen con el criterio de aceptación para un agregado cuyo tamaño máximo nominal es de 1 ½". De igual manera, el agregado grueso reciclado después de ser lavado para eliminar el exceso de agregado fino cumple con dicho criterio, motivo por el cual es apto para emplearse para el diseño de hormigón de acuerdo con el método ACI 211.

2.- El porcentaje de humedad promedio del agregado grueso reciclado mostrado en la tabla 4.13 es del 10,5%, un valor mucho mayor al del agregado grueso natural de 1,60%. Sin embargo, es un valor aceptable dado que el límite establecido de 5% según (Neville, 2013), se considera cuando el hormigón estará sometido a condiciones de congelamiento y deshielo, motivo por el cual, no se considera un impedimento para su empleo en la elaboración del hormigón reciclado sometido a condiciones de exposición normal.

3.- Como se mostró en la tabla 4.14, el porcentaje de absorción del agregado grueso reciclado es mayor al límite permisible de 5% y dado que la absorción de dicho agregado es mayor a su humedad, requiere de agua adicional para terminar de saturarse y alcanzar la condición de saturado superficialmente seco, ideal para las partículas en la elaboración de mezclas de hormigón, de acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001, pág. 97).

4.- Como se mostró en la tabla 4.15, la gravedad específica del agregado grueso reciclado cuyo valor es de 1,38 g/cm<sup>3</sup> indica que este agregado posee una mayor cantidad de poros permeables que el agregado grueso natural y agregado fino natural. De acuerdo con (Sánchez de Guzmán, 2001, pág. 96) el valor de gravedad específica de los agregados pétreos debe oscilar entre 2.30 y 2.80 g/cm<sup>3</sup> por tal motivo, se



concluye que este tipo de agregado reciclado es solamente apto para la producción de hormigones de baja resistencia, debido a que, si las partículas del agregado grueso reciclado son muy porosas, la adherencia y la resistencia a la compresión disminuyen.

5.- Como se mencionó anteriormente los hormigones con agregados reciclados de acuerdo al criterio del ACI 318 se consideran como hormigones livianos. En la tabla 4.25 se presentaron las resistencias a compresión de las distintas mezclas de hormigón; a partir de la cual se concluye: el hormigón reciclado con ladrillo triturado en un porcentaje del 40% y 60% no producen hormigones estructurales, puesto que de acuerdo a la clasificación dada por el ACI 318, para aplicaciones estructurales la resistencia a la compresión a los 28 días de los hormigones livianos debe superar los  $170 \text{ kg/cm}^2$ . En el presente trabajo se obtuvo una resistencia a la compresión a los 28 días de  $165 \text{ kg/cm}^2$  para el hormigón elaborado con un 40% de agregado grueso reciclado, lo cual representa una disminución del 32% con respecto a la muestra patrón. Para el hormigón con un 60% de agregado grueso reciclado se obtuvo un valor de  $f'_c$  de  $150 \text{ kg/cm}^2$ , que representa una disminución del 39% con respecto a la muestra patrón. Sin embargo, de acuerdo a esta misma clasificación, el hormigón con un 20% de agregado grueso reciclado se considera un hormigón estructural liviano debido a que alcanza una resistencia a la compresión de  $193 \text{ kg/cm}^2$  a los 28 días, motivo por el cual puede destinarse a la construcción de losas o muros.

6.- Como se pudo observar en la tabla 4.20, el hormigón con un 40% y 60% de agregado grueso reciclado, presentaron una absorción del 16% y 21% respectivamente, superando el límite permisible de 15% establecido en el Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado proporcionado por el CYTED (Troconis de Rincón et al., 2006), motivo por el cual se considera un hormigón de durabilidad inadecuada. El hormigón con un 20% de agregado reciclado presentó una absorción del 9% concluyendo que se trata de un hormigón de buena calidad y compactación.

## **5.2 Recomendaciones**

1.- De acuerdo a los resultados obtenidos en los hormigones reciclados con un reemplazo del 40% y 60% de agregado grueso natural por ladrillo triturado, es

recomendable destinar agregado reciclado para la elaboración de hormigones livianos no estructurales ideales para la construcción de elementos secundarios en edificios o viviendas. Entre las aplicaciones más importantes del hormigón liviano se destacan las construcciones de piscinas, jardines, garajes, paredes o en la construcción de elementos decorativos.

En cuanto al hormigón con agregado reciclado en un 20%, se recomienda destinar a la construcción de losas, pilares y vigas, puesto que se considera un hormigón estructural liviano.

2.- Sería importante caracterizar el comportamiento a largo plazo de los hormigones resultantes, enfocándose en la variación de la resistencia al hormigón a flexión y compresión, puesto que este trabajo está enmarcado en el aprovechamiento de materiales de reciclaje.

## ANEXOS

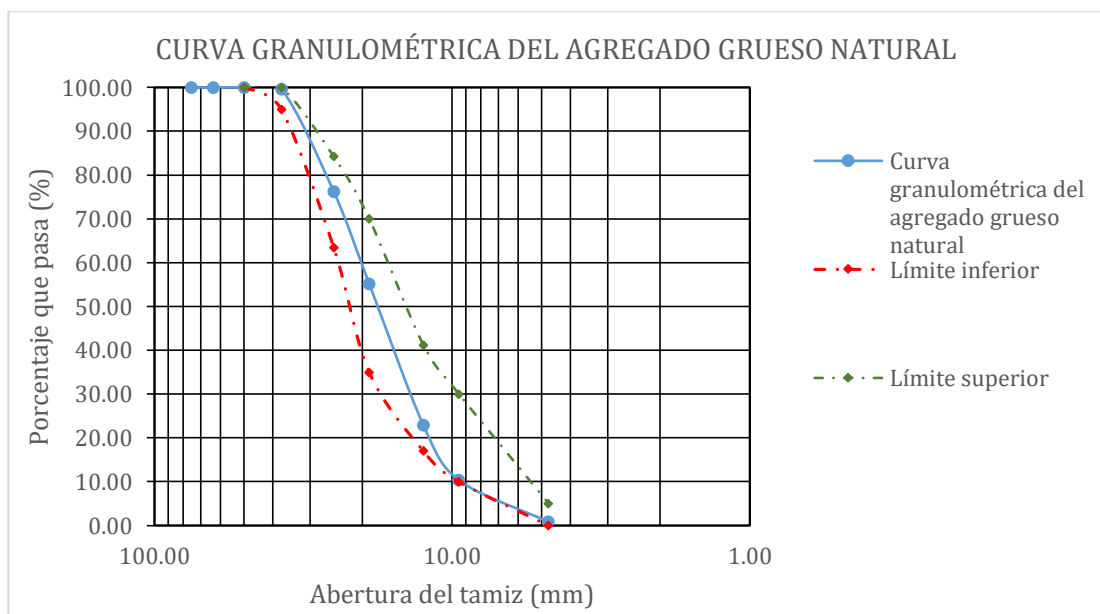
## Anexo 1. Ensayo de granulometría del agregado grueso natural

## UNIVERSIDAD DEL AZUAY

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Primera muestra



Análisis granulométrico del Agregado Grueso Natural								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,06	0,06	0,38	0,38	99,62	95	100
1"	25	3,72	3,66	23,34	23,72	76,28		
3/4"	19	7,02	3,30	21,05	44,77	55,23	35	70
1/2"	12,5	12,08	5,06	32,27	77,04	22,96		
3/8"	9,5	14,05	1,97	12,56	89,60	10,40	10	30
N 4	4,75	15,55	1,50	9,57	99,17	0,83	0	5
<b>Masa final</b>		15,67	kg					
<b>Masa inicial</b>		15,68	kg					

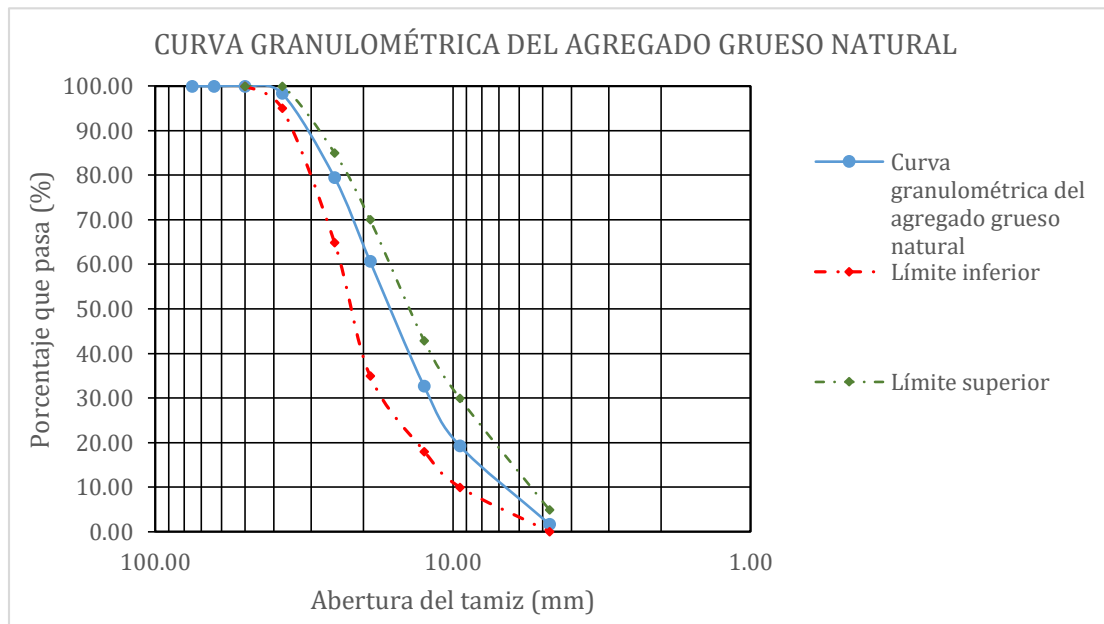


# UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Segunda muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Natural								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,294	0,29	1,66	1,66	98,34	95	100
1"	25	3,634	3,34	18,84	20,50	79,50		
3/4"	19	6,958	3,32	18,75	39,24	60,76	35	70
1/2"	12,5	11,937	4,98	28,08	67,33	32,67		
3/8"	9,5	14,301	2,36	13,33	80,66	19,34	10	30
N 4	4,75	17,416	3,12	17,57	98,23	1,77	0	5
<b>Masa final</b>		17,72	kg					
<b>Masa inicial</b>		17,73	kg					

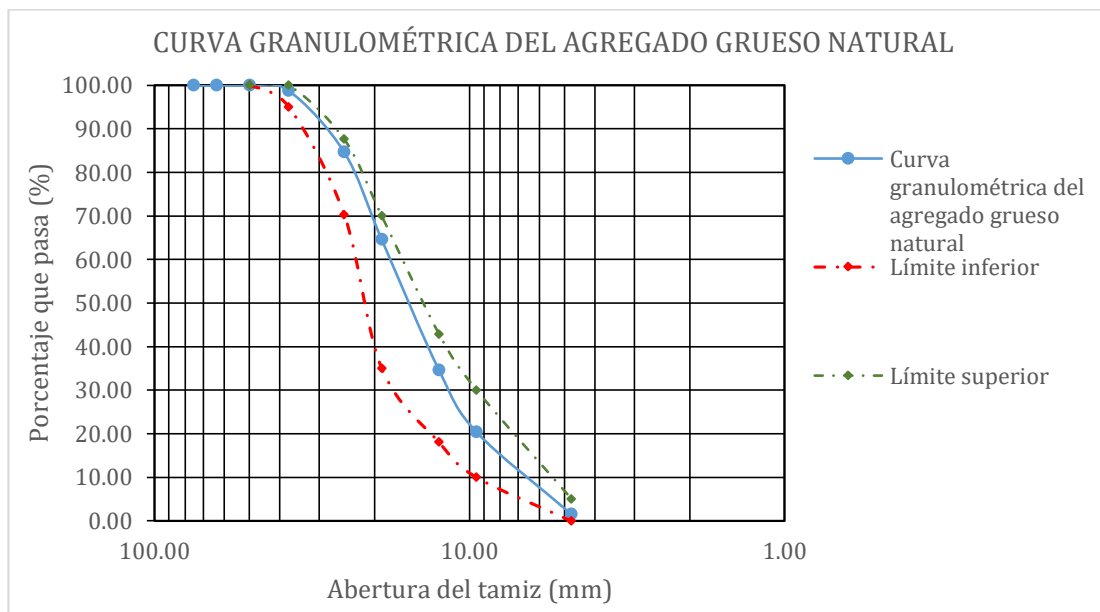


## UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Tercera muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Natural								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,194	0,19	1,17	1,17	98,83	95	100
1"	25	2,530	2,34	14,09	15,26	84,74		
3/4"	19	5,860	3,33	20,08	35,34	64,66	35	70
1/2"	12,5	10,840	4,98	30,04	65,38	34,62		
3/8"	9,5	13,200	2,36	14,23	79,61	20,39	10	30
N 4	4,75	16,330	3,13	18,88	98,49	1,51	0	5
<b>Masa final</b>		16,57	kg					
<b>Masa inicial</b>		16,58	kg					



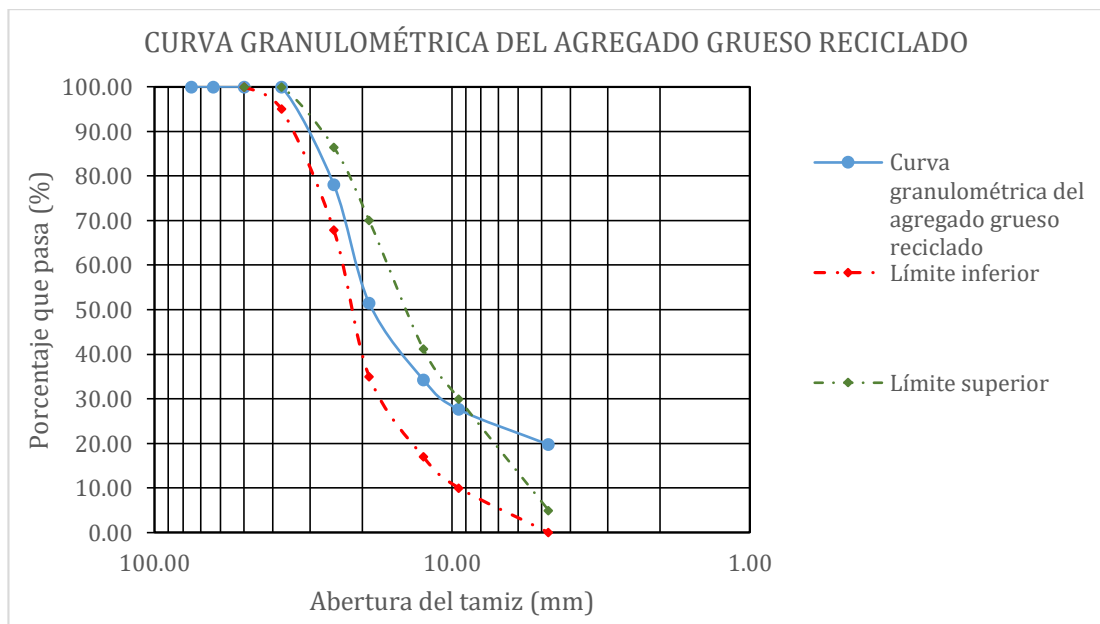
## Anexo 2. Ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado

### UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Primera muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Reciclado									
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33		
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior	
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00			
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00			
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100	
1 1/2"	37,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100	
1"	25	4,378	4,38	21,89	21,89	78,11			
3/4"	19	9,702	5,32	26,62	48,51	51,49	35	70	
1/2"	12,5	13,144	3,44	17,21	65,72	34,28			
3/8"	9,5	14,475	1,33	6,66	72,38	27,63	10	30	
N 4	4,75	16,051	1,58	7,88	80,26	19,75	0	5	
<b>Masa final</b>		16,22	kg						
<b>Masa inicial</b>		20,00	kg						

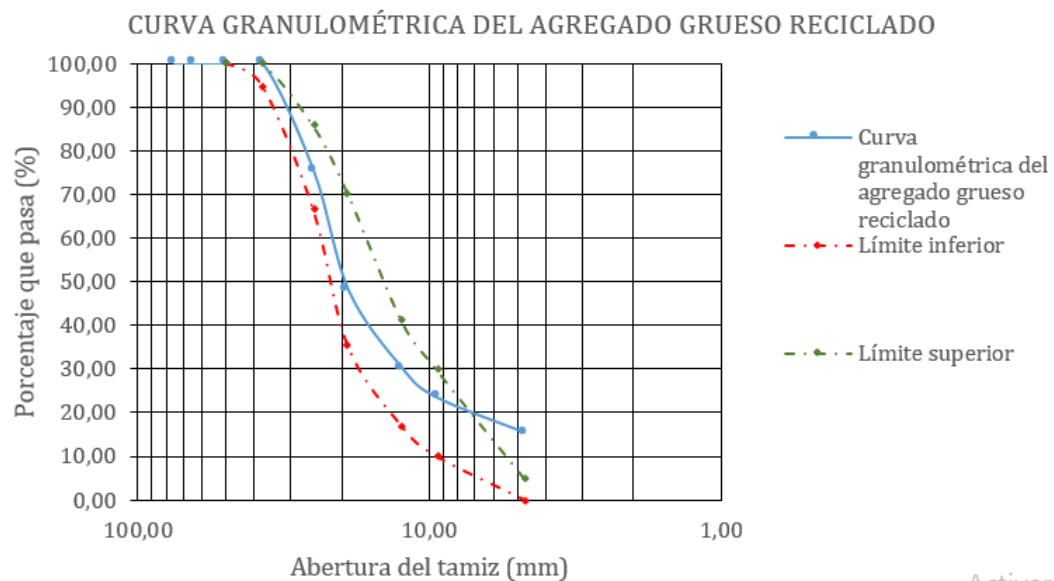


# UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Segunda muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Reciclado								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,828	4,83	24,76	24,76	75,24		
3/4"	19	10,152	5,32	27,30	52,06	47,94	35	70
1/2"	12,5	13,594	3,44	17,65	69,71	30,29		
3/8"	9,5	14,925	1,33	6,83	76,54	23,46	10	30
N 4	4,75	16,501	1,58	8,08	84,62	15,38	0	5
<b>Masa final</b>		16,67	kg					
<b>Masa inicial</b>		19,50	kg					



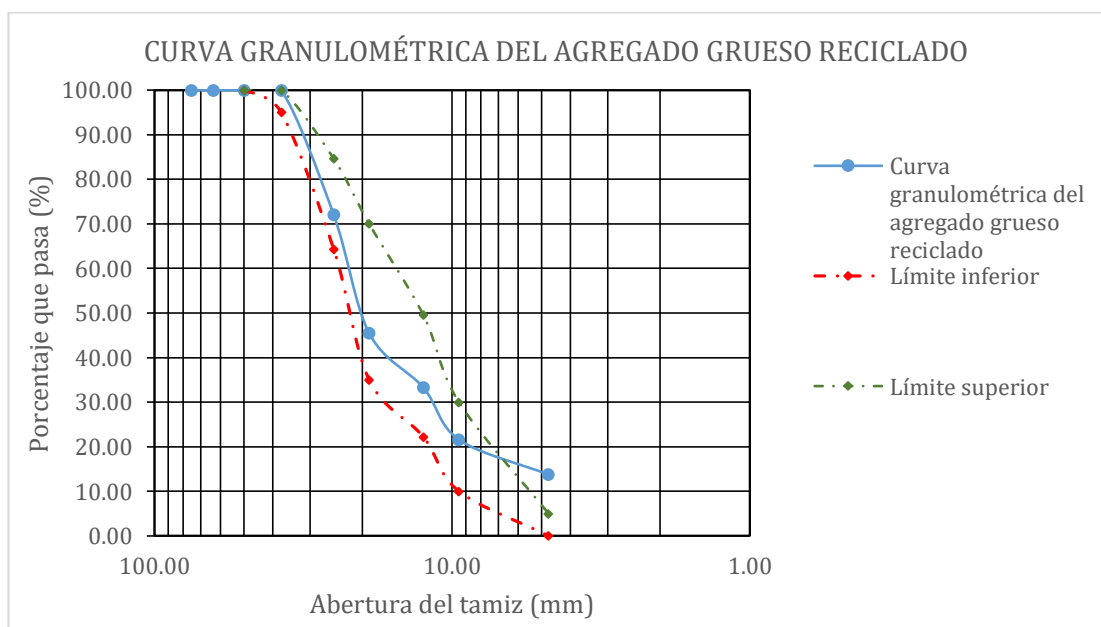
Activar'

# UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Tercera muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Reciclado								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	5,578	5,58	27,89	27,89	72,11		
3/4"	19	10,902	5,32	26,62	54,51	45,49	35	70
1/2"	12,5	13,344	2,44	12,21	66,72	33,28		
3/8"	9,5	15,680	2,34	11,68	78,40	21,60	10	30
N 4	4,75	17,250	1,57	7,85	86,25	13,75	0	5
<b>Masa final</b>		17,42	kg					
<b>Masa inicial</b>		20,00	kg					





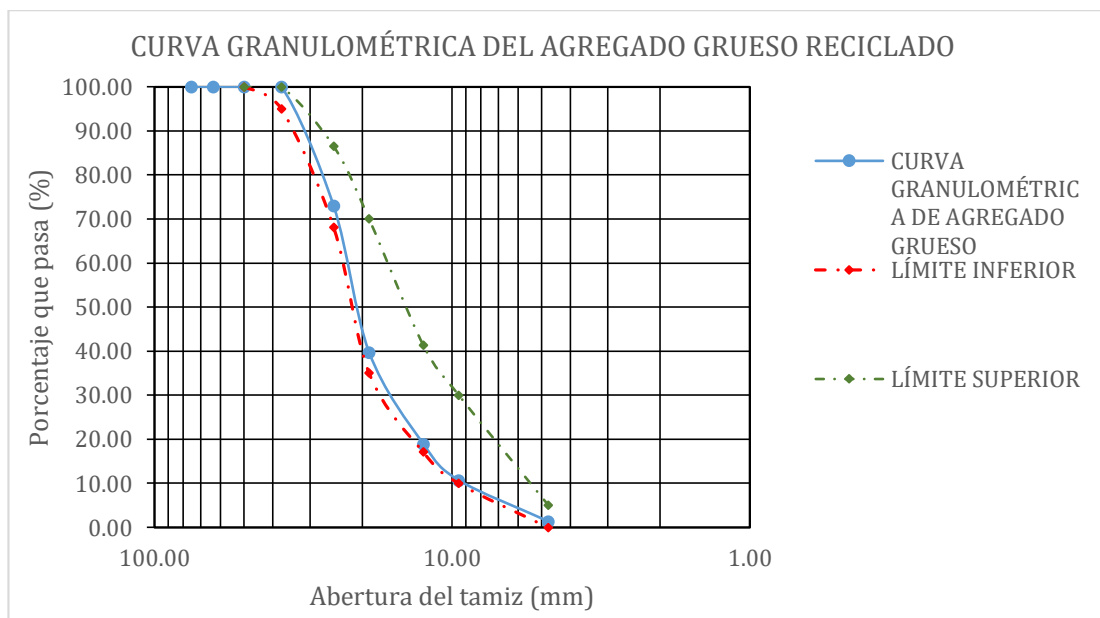
### Anexo 3. Ensayo de granulometría del agregado grueso reciclado después de lavado

## UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Primera muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Reciclado								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,000	4,00	24,62	24,62	75,38		
3/4"	19	9,490	5,49	33,78	58,40	41,60	35	70
1/2"	12,5	13,220	3,73	22,95	81,35	18,65		
3/8"	9,5	14,520	1,30	8,00	89,35	10,65	10	30
N 4	4,75	16,040	1,52	9,35	98,71	1,29	0	5
<b>Masa final</b>		16,21	kg					
<b>Masa inicial</b>		16,25	kg					

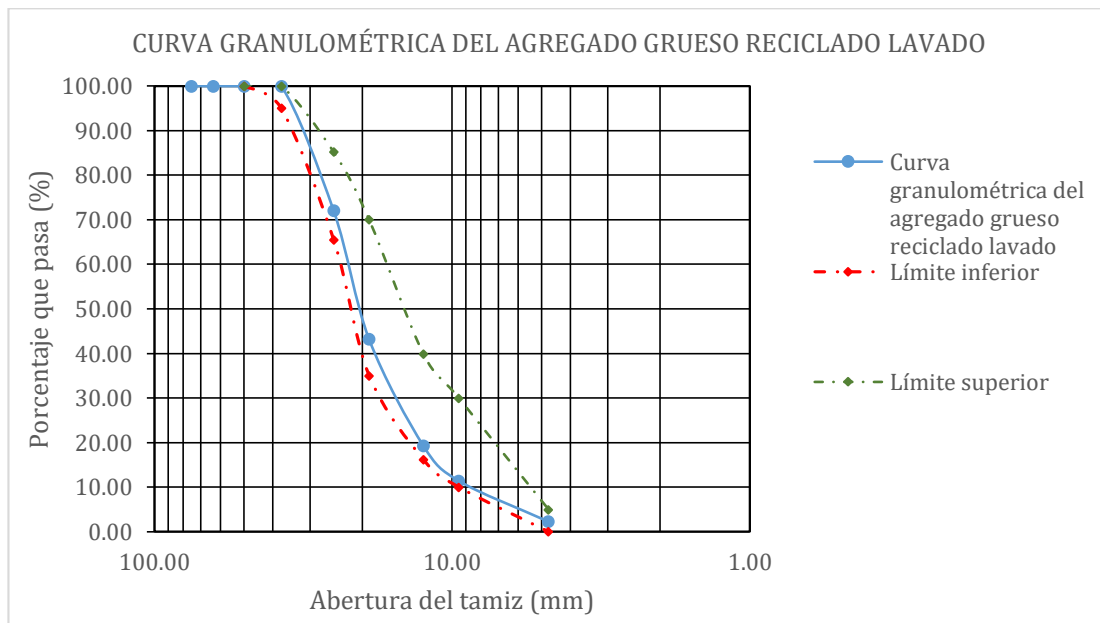


# UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Segunda muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Reciclado								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00		
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
1 1/2"	37,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100
1"	25	4,891	4,89	27,95	27,95	72,05		
3/4"	19	9,943	5,05	28,87	56,82	43,18	35	70
1/2"	12,5	14,120	4,18	23,87	80,69	19,31		
3/8"	9,5	15,500	1,38	7,89	88,57	11,43	10	30
N 4	4,75	17,100	1,60	9,14	97,71	2,29	0	5
<b>Masa final</b>		17,27	kg					
<b>Masa inicial</b>		17,50	kg					

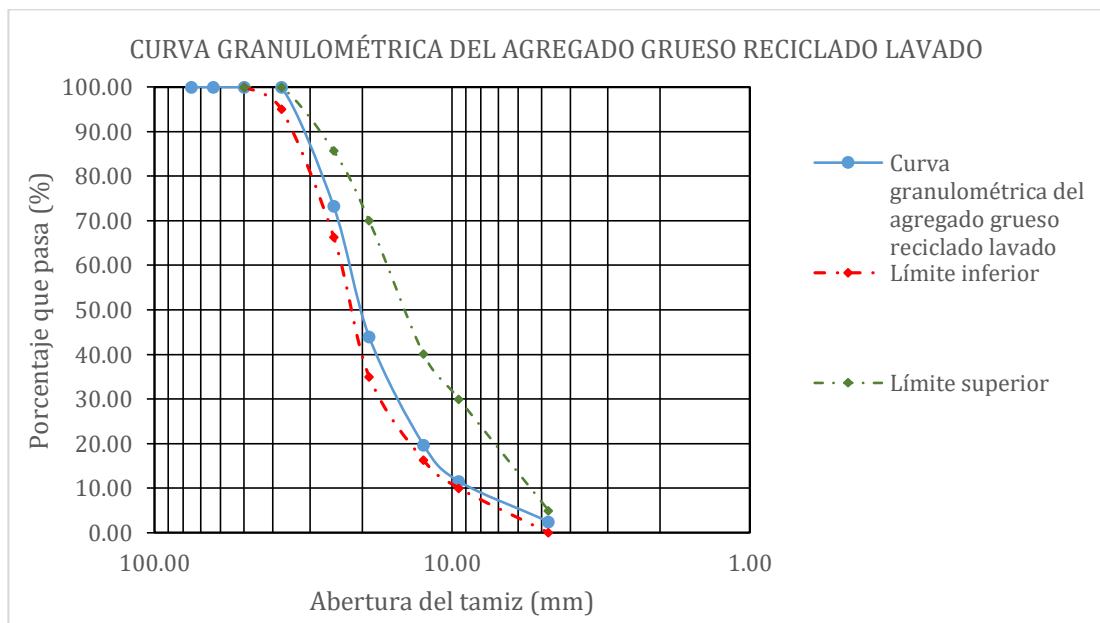




## UNIVERSIDAD DEL AZUAY

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Tercera muestra

Análisis granulométrico del Agregado Grueso Reciclado									
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites ASTM C33		
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior	
3"	75,2	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00			
2 1/2"	63,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00			
2"	50	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100	
1 1/2"	37,5	0,000	0,00	0,00	0,00	100,00	95	100	
1"	25	4,621	4,62	26,79	26,79	73,21			
3/4"	19	9,673	5,05	29,29	56,08	43,92	35	70	
1/2"	12,5	13,850	4,18	24,21	80,29	19,71			
3/8"	9,5	15,270	1,42	8,23	88,52	11,48	10	30	
N 4	4,75	16,830	1,56	9,04	97,57	2,43	0	5	
<b>Masa final</b>		17,03	kg						
<b>Masa inicial</b>		17,25	kg						



#### Anexo 4. Ensayo de granulometría del agregado fino natural

### UNIVERSIDAD DEL AZUAY

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado fino natural de la Compañía Minera "Pirinca"  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Primera muestra

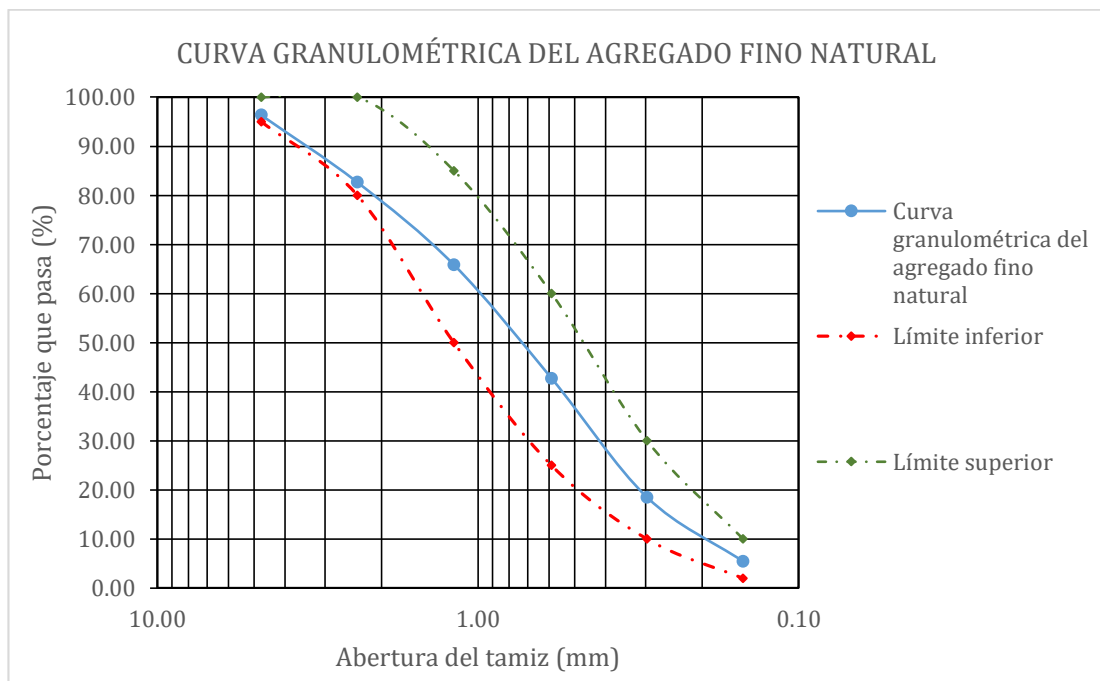


Análisis granulométrico del Agregado Fino Natural								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
4	4,75	53,15	53,15	3,60	3,60	96,40	95	100
8	2,380	255,10	201,95	13,68	17,28	82,72	80	100
16	1,190	503,00	247,90	16,80	34,08	65,92	50	85
30	0,590	844,55	341,55	23,14	57,22	42,78	25	60
50	0,297	1202,53	357,98	24,25	81,47	18,53	10	30
100	0,149	1395,32	192,79	13,06	94,53	5,47	2	10
<b>Masa inicial</b>		1475,82	1475,82	kg				

<b>Masa final</b>	1476,000	1476,000	kg
-------------------	----------	----------	----

% Error = 0,012 %

Módulo de finura = 2,88





## UNIVERSIDAD DEL AZUAY

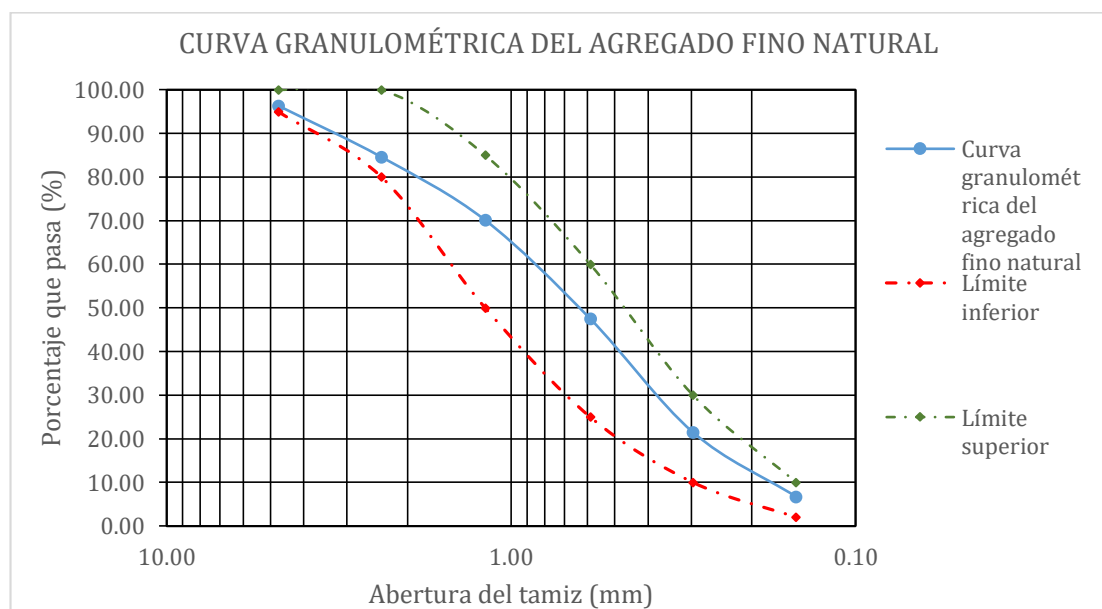
**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado fino natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Segunda muestra

Análisis granulométrico del Agregado Fino Natural								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
4	4,75	56,71	56,71	3,65	3,65	96,35	95	100
8	2,380	239,85	183,14	11,80	15,45	84,55	80	100
16	1,190	464,46	224,61	14,47	29,91	70,09	50	85
30	0,590	814,90	350,44	22,57	52,49	47,51	25	60
50	0,297	1218,91	404,01	26,02	78,51	21,49	10	30
100	0,149	1448,40	229,49	14,78	93,29	6,71	2	10
<b>Masa final</b>		1551,56	kg					

<b>Masa inicial</b>	1552,600	kg
---------------------	----------	----

% Error = 0,067 %

Módulo de finura = 2,73



# UNIVERSIDAD DEL AZUAY



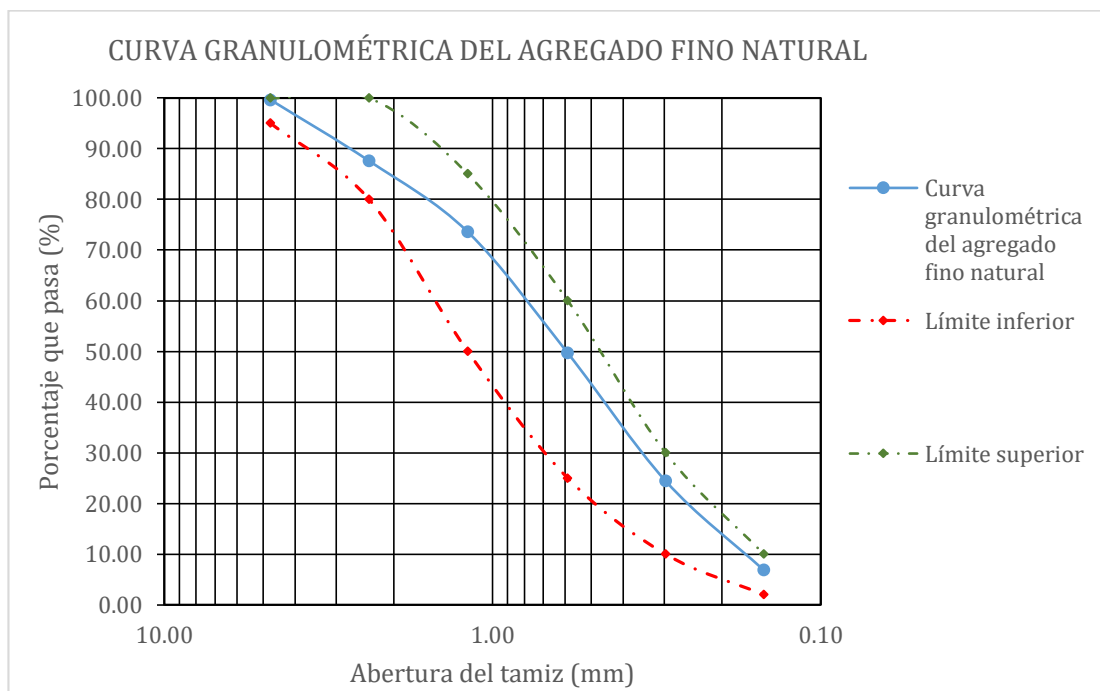
**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado fino natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Análisis granulométrico  
**Fecha:** Tercera muestra

Análisis granulométrico del Agregado Fino Natural								
Tamices		Peso	Peso	% Retenido	% Retenido	% Que	Límites	
Ø	(mm)	Acumulado	Retenido	Parcial	Acumulado	Pasa	Inferior	Superior
4	4,75	6,2	6,20	0,41	0,41	99,59	95	100
8	2,380	188,50	182,30	12,03	12,44	87,56	80	100
16	1,190	400,96	212,46	14,02	26,47	73,53	50	85
30	0,590	763,01	362,05	23,90	50,36	49,64	25	60
50	0,297	1145,03	382,02	25,22	75,58	24,42	10	30
100	0,149	1411,66	266,63	17,60	93,18	6,82	2	10
<b>Masa final</b>		1514,82	1514,82	gr				

<b>Masa inicial</b>	1515,00	1515,000	gr
---------------------	---------	----------	----

% Error = 0,012 %

Módulo de finura = 2,58



## Anexo 5. Ensayo de humedad del agregado grueso natural

## UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Determinación del porcentaje de humedad  
**Fecha:**

<b>Determinación de la humedad del Agregado Grueso Natural</b>				
<b>N° Recipiente</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del recipiente</b>	0,480	0,610	0,550	kg
<b>Peso del suelo húmedo + recipiente</b>	8,520	8,500	8,536	kg
<b>Peso del suelo seco + recipiente</b>	8,400	8,370	8,410	kg
<b>Peso del agua</b>	0,120	0,130	0,126	kg
<b>Peso del suelo seco</b>	7,920	7,760	7,860	kg
<b>% de humedad</b>	1,515	1,675	1,600	%
<b>% de humedad promedio</b>	<b>1,60</b>			<b>%</b>

## Anexo 6. Ensayo de humedad del agregado grueso reciclado

## UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado reciclado  
**Ensayo:** Determinación del porcentaje de humedad  
**Fecha:**

<b>Determinación de la humedad del Agregado Grueso Reciclado</b>				
<b>N° Recipiente</b>	<b>F1</b>	<b>F2</b>	<b>F3</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del recipiente</b>	0,125	0,110	0,191	kg
<b>Peso del suelo húmedo + recipiente</b>	1,693	1,626	1,681	kg
<b>Peso del suelo seco + recipiente</b>	1,580	1,520	1,575	kg
<b>Peso del agua</b>	0,113	0,106	0,106	kg
<b>Peso del suelo seco</b>	1,455	1,410	1,384	kg
<b>% de humedad</b>	7,766	7,518	7,640	%
<b>% de humedad promedio</b>	<b>7,64</b>			<b>%</b>



## Anexo 7. Ensayo de humedad del agregado fino natural

## UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Determinación del porcentaje de humedad  
**Fecha:**

<b>Determinación de la humedad del Agregado Fino Natural</b>				
<b>N° Recipiente</b>	<b>GR 1</b>	<b>GR 2</b>	<b>GR 3</b>	<b>Unidad</b>
<b>Peso del recipiente</b>	49,900	44,000	48,020	kg
<b>Peso del suelo húmedo + recipiente</b>	111,460	105,560	100,450	kg
<b>Peso del suelo seco + recipiente</b>	106,800	99,870	94,350	kg
<b>Peso del agua</b>	4,660	5,690	6,100	kg
<b>Peso del suelo seco</b>	102,140	94,180	88,250	kg
<b>% de humedad</b>	8,190	10,184	13,166	%
<b>% de humedad promedio</b>	<b>9,19</b>			<b>%</b>

## Anexo 8. Ensayo de gravedad específica y peso unitario del agregado grueso natural

### UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Gravedad específica del agregado grueso natural  
**Fecha:**

AGREGADO GRUESO NATURAL		Cantidad	Unidades
Masa en el aire de la muestra secada en el horno	<b>A</b>	5415	gramos
Masa en el aire de la muestra secada en condición S.S.S.	<b>B</b>	5530	gramos
Masa en el agua de la muestra en condición S.S.S.	<b>C</b>	3445	gramos

#### Cálculos:

#### Densidad relativa (gravedad específica):

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{A}{B-C} = 2,5971 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{B}{B-C} = 2,6523 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{A-C} = 2,7487 \text{ g/cm}^3$$

#### Densidad:

$$\text{Densidad (SH),} \quad \frac{kg}{m^3} = \frac{997.5 A}{B-C} = 2590,63 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Densidad (SSS),} \quad \frac{kg}{m^3} = \frac{997.5 B}{B-C} = 2645,65 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Densidad aparente,} \quad \frac{kg}{m^3} = \frac{997.5 A}{A-C} = 2741,86 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Porcentaje de absorción \%} = \frac{B-A}{A} * 100 = 2,124 \%$$

Resultados	
<b>Promedio Peso Específico Superficie Saturada Seca</b>	
<b>Gs</b>	= 2,6523 g/cm <sup>3</sup>

Promedio Peso unitario compactado	=	1668,12 kg/ m <sup>3</sup>
Promedio Peso unitario suelto	=	1569,55 kg/ m <sup>3</sup>

## Anexo 9. Ensayo de gravedad específica y peso unitario del agregado grueso reciclado

### UNIVERSIDAD DEL AZUAY



**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado grueso reciclado  
**Ensayo:** Gravedad específica del agregado grueso reciclado  
**Fecha:**

AGREGADO GRUESO RECICLADO		Cantidad	Unidades
Masa en el aire de la muestra secada en el horno	<b>A</b>	4000	gramos
Masa en el aire de la muestra secada en condición S.S.S.	<b>B</b>	4758	gramos
Masa en el agua de la muestra en condición S.S.S.	<b>C</b>	1302	gramos

#### Cálculos:

#### Densidad relativa (gravedad específica):

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{A}{B-C} = 1,1574 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{B}{B-C} = 1,3767 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{A-C} = 1,4826 \text{ g/cm}^3$$

#### Densidad:

$$\text{Densidad (SH),} \quad \frac{kg}{m^3} = \frac{997.5 A}{B-C} = 1154,51 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Densidad (SSS),} \quad \frac{kg}{m^3} = \frac{997.5 B}{B-C} = 1373,29 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Densidad aparente,} \quad \frac{kg}{m^3} = \frac{997.5 A}{A-C} = 1478,87 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Porcentaje de absorción \%} = \frac{B-A}{A} * 100 = 18,950 \%$$

Resultados	
<b>Promedio Peso Específico Superficie Saturada Seca</b>	
<b>G<sub>s</sub></b>	= 1,3767 g/cm <sup>3</sup>

Promedio Peso unitario compactado	=	978,09 kg/ m <sup>3</sup>
Promedio Peso unitario suelto	=	778,19 kg/ m <sup>3</sup>

## Anexo 10. Ensayo de gravedad específica y peso unitario del agregado fino natural

### UNIVERSIDAD DEL AZUAY

**Proyecto:** Tesis de grado  
**Realizado por:** Srta. Alba Estefanía Torres Cabrera  
**Descripción del material:** Agregado natural de la Compañía Minera "Pirincay"  
**Ensayo:** Gravedad específica del agregado fino natural  
**Fecha:**



AGREGADO FINO NATURAL		Cantidad	Unidades
Masa de muestra secada en el horno	<b>A</b>	481,65	gramos
Masa del picnómetro lleno con agua, hasta marca de calibración	<b>B</b>	1208,25	gramos
Masa del picnómetro lleno con muestra y agua, hasta marca de calibración	<b>C</b>	1511,48	gramos
Masa de muestra S.S.S. para proceso gravimétrico	<b>S</b>	500,00	gramos

#### Cálculos:

#### Densidad relativa (gravedad específica):

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{A}{B+S-C} \quad 2,4478 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)} = \frac{S}{B+S-C} \quad 2,5410 \text{ g/cm}^3$$

$$\text{Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)} = \frac{A}{B+A-C} \quad 2,6995 \text{ g/cm}^3$$

#### Densidad:

$$\text{Densidad (SH),} = \frac{997.5 A}{B+S-C} \quad 2441,66 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Densidad (SSS),} = \frac{997.5 S}{B+S-C} \quad 2692,78 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Densidad aparente,} = \frac{997.5 A}{B+A-C} \quad 2692,78 \text{ kg/ m}^3$$

$$\text{Porcentaje de absorción \%} = \frac{S-A}{A} * 100 \quad 3,81 \%$$

Resultados	
<b>Promedio Peso Específico Superficie Saturada Seca</b>	
<b>Gs</b>	= 2,5410 g/cm <sup>3</sup>

Promedio Peso unitario compactado	=	1619,55 kg/ m <sup>3</sup>
-----------------------------------	---	----------------------------

## **Anexo 11. Diseño de mezclas de hormigón**

### **Paso 1. Selección del asentamiento**

Como se mencionó en el marco teórico, una de las primeras consideraciones a tomar en cuenta para especificar una consistencia determinada en el hormigón fresco, son el tamaño de la sección que se va a construir y la cantidad y espaciamiento del acero de refuerzo; puesto que, si la sección es demasiado estrecha, el hormigón debe ser altamente manejable, de tal manera que se alcance la mejor compactación posible con una cantidad razonable de esfuerzo (ACI, 2009).

Entonces de acuerdo a lo antes expuesto, para este proyecto se diseñará una mezcla de hormigón con un asentamiento requerido entre 75 – 100 mm, para pavimentos, losas, columnas, vigas y muros reforzados de acuerdo con la tabla A1.6.3.1. proporcionada por el ACI 211.

### **Paso 2. Selección del tamaño máximo del agregado**

Se diseñará una mezcla de hormigón para un agregado cuyo tamaño máximo nominal es de 1 ½” de acuerdo con los resultados obtenidos en el ensayo de granulometría.

### **Paso 3. Estimación del contenido de agua de mezclado y de aire.**

Como este hormigón no estará expuesto a agentes de congelamiento, deshielo o sulfatos, se dice que no habrá condiciones de exposición severas, por lo tanto, se deberá usar hormigón sin aire incluido. Se estima que para un tamaño máximo nominal de 1 ½” (37,5 mm), el contenido de aire naturalmente atrapado es del 1% del volumen, de acuerdo con la tabla A1.6.3.3 proporcionada por el ACI 211.

Sin embargo, se sugiere que para efectos prácticos, si el hormigón no va a tener aire intencionalmente incluido, no se tome en consideración este valor de cantidad de aire atrapado, ya que esta cantidad es tan pequeña que más bien puede convertirse en un factor de seguridad, también pequeño en favor del volumen unitario del hormigón (Sánchez, 2001, pág. 232).

Para estimar la cantidad de agua de mezclado se toma en cuenta que el hormigón no estará expuesto a un clima severo, que el mismo no tendrá aire incorporado, que el

asentamiento requerido se encuentra entre 75 – 100 mm y que el tamaño máximo nominal del agregado es 1 ½ ”. Entonces, de acuerdo con la misma tabla antes mencionada, A1.6.3.3 propuesta por el ACI 211, se obtiene que el contenido de agua de mezclado por cada metro cúbico de hormigón es aproximadamente 181 litros.

### **Paso 6. Selección de la relación agua – cemento**

A continuación, se muestra una tabla propuesta por el ACI 211 para encontrar la relación agua – cemento dependiendo si se ha incorporado aire o no en la mezcla de hormigón. En este caso es necesario realizar una interpolación lineal para encontrar la relación agua – cemento, ya que la resistencia a la compresión a los 28 días requerida es de 240 kg/cm<sup>2</sup>.

Resistencia a la compresión kg/cm <sup>2</sup>	Relación agua – cemento en masa	
	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
400	0.42	---
350	0.47	0.39
300	0.54	0.45
250	0.61	0.52
200	0.69	0.60
150	0.79	0.70

Considerando las características del cemento disponible, el cual es un cemento portland tipo I de la marca Atenas, recurrimos a una interpolación lineal, obteniendo que el valor de la relación agua – cemento es:

$$\frac{0,61 - 0,69}{250 - 200} = \frac{A/C - 0,69}{240 - 200}$$

$$A/C = 0,626$$

Además, se considera que la estructura no estará sujeta a condiciones severas de exposición, es decir, no estará expuesta a congelamiento, deshielo o sulfatos, motivo por el cual no se recurre a las tablas recomendadas por el ACI.

### **Paso 7. Cálculo del contenido de cemento**

Utilizando la información obtenida en los pasos 4 y 6, se determina el contenido de cemento requerido que es:

$$C = \frac{A}{A/C}$$

$$C = \frac{181}{0,626}$$

$$C = 289kg/cm^2$$

### Paso 8, Estimación de las proporciones de agregados

De acuerdo al método ACI 211,1 al utilizar agregados que cumplen con las especificaciones de la norma ASTM C 33 – NTE INEN 872, es decir, agregados cuya granulometría se encuentra dentro de los límites admisibles. las proporciones de los mismos se determinan de la siguiente manera:

Lo primero es determinar el volumen seco y compactado de agregado grueso por volumen unitario de hormigón (b/bo) como se especifica en el método, empleando la tabla propuesta anteriormente por el ACI, que considera el tamaño máximo nominal de agregado grueso y el módulo de finura y en la que los volúmenes se basan en agregados secos y compactados con varilla.

A continuación, se muestran los valores de la relación b/bo antes mencionada, en función del tamaño máximo del agregado grueso y del módulo de finura del agregado fino.

Tamaño máximo nominal del agregado mm	Volumen de agregado grueso seco compactado por unidad de volumen [m <sup>3</sup> ] de hormigón para diferentes módulo de finura de agregado fino			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
<b>37.5</b>	0.75	0.73	<b>0.71</b>	<b>0.69</b>
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

De acuerdo al análisis granulométrico realizado en los agregados finos empleados en este proyecto, el módulo de finura es de 2,81 y un tamaño máximo nominal del agregado grueso de 37,5 mm (1 ½”), el volumen de agregado grueso seco es igual a:

$$\frac{0,69 - 0,71}{3,0 - 2,80} = \frac{\frac{b}{b_0} - 0,71}{2,81 - 2,80}$$

$$\frac{b}{b_0} = 0,710 \text{ m}^3 \text{ de agregado grueso por m}^3 \text{ de hormigón}$$

Al multiplicar este valor por el peso unitario compactado del agregado grueso se obtiene el peso seco del agregado grueso compactado:

$$Pg = 0,71 \text{ m}^3 \left( 1668 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$$

$$Pg = 1183 \text{ kg}$$

Una vez determinadas las cantidades de agua de contenido de mezclado (paso 4), contenido de cemento (paso 7) y contenido de agregado grueso, los materiales restantes para completar un metro cúbico (1000 litros) de hormigón, consistirán en arena y aire que pueda quedar atrapado (aunque este último se asumió como cero).

De acuerdo con el ACI 211, la cantidad requerida de agregado fino, se determina con base en el peso compactado o volumen absoluto.

#### Basado en la masa

Tamaño máximo nominal del agregado [mm]	Primera estimación de hormigón [kg/m <sup>3</sup> ]	
	Sin aire introducido	Con aire introducido
9,5	2280	2200
12,5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
<b>37,5</b>	<b>2410</b>	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

De acuerdo con la tabla antes expuesta, la masa de metro cúbico de agregado fino para un hormigón sin aire atrapado, cuyo tamaño máximo nominal de agregado es 37,5mm, es de 2410 Kg.

Las masas ya determinadas hasta el momento son:



Agua de mezclado =	181	Kg
Cemento =	289	Kg
Agregado grueso =	1183	Kg
<b>Total =</b>	<b>1653</b>	<b>kg</b>

La masa de agregado fino estimada es, por lo tanto, el valor de 2410 kg, obtenido de la tabla anterior, menos la masa total de 1656 kg.

$$\text{Masa de agregado fino} = 2410 \text{ kg} - 1656 \text{ kg}$$

$$\text{Masa de agregado fino} = 757 \text{ kg}$$

### Basado en el volumen absoluto

Con las cantidades de cemento, agua, agregado grueso ya establecidos y con el valor de aire atrapado de 1% determinado anteriormente (paso 3), la cantidad de agregado fino se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Volumen de agua} = \frac{181 \text{ kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen de agua} = 0,181 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de cemento} = \frac{289 \text{ kg}}{3,15 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen de cemento} = 0,092 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agregado grueso} = \frac{1183 \text{ kg}}{2652 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$

$$\text{Volumen de agregado grueso} = 0,446 \text{ m}^3$$

Para determinar la cantidad de agregado fino para un metro cúbico, de acuerdo con el método ACI 211, se debe restar del volumen total, la cantidad de materiales obtenidos anteriormente:

Cantidad de agregado fino =  $1 \text{ m}^3 - (\text{Cantidad de cemento, Cantidad de agua, Cantidad de aire atrapado} - \text{Cantidad de agregado grueso})$

Por lo tanto, el volumen de agregado fino es:

$$\text{Cantidad de agregado fino} = 1 \text{ m}^3 - 0,092 \text{ m}^3 - 0,181 \text{ m}^3 - 0,01 \text{ m}^3 - 0,446 \text{ m}^3$$

$$\text{Cantidad de agregado fino} = 0,271 \text{ m}^3$$

Para obtener el peso seco del agregado fino se multiplica el volumen por su peso específico:

$$\text{Peso seco de agregado fino} = 0,271 \text{ m}^3 \times 2541 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Peso seco de agregado fino} = 688,61 \text{ kg}$$

En la siguiente tabla se muestra la cantidad de materiales que se emplearán para la dosificación de acuerdo al método basado en los volúmenes absolutos.

<b>Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cúbico de hormigón</b>			
<b>Ingrediente</b>	<b>Peso seco</b>	<b>Peso específico</b>	<b>Volumen absoluto</b>
	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>g/cm<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup></b>
Cemento	289,00	3,15	0,092
Agua	181,00	1,00	0,181
Agregado grueso seco	1183,00	2,652	0,446
Agregado fino seco	688,61	2,54	0,271

### **Paso 9. Ajuste por humedad de los agregados**

Se considera la humedad de los agregados para pesar los agregados al dosificar la mezcla, pues como se dijo en el marco teórico los agregados están húmedos y a su peso seco habría que aumentarle el porcentaje de agua que contengan (tanto la humedad superficial y la absorbida).

Como la humedad del agregado grueso es del 1,60% y la del agregado fino del 7,64%, se tiene que, los pesos húmedos son los siguientes:

$$\text{Peso húmedo del agregado grueso} = 1183 (1 + 0,016)$$

$$\text{Peso húmedo del agregado grueso} = 1201,93 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso húmedo del agregado fino} = 688,61 (1 + 0,0764)$$

*Peso húmedo del agregado fino* =  $741,22 \text{ kg/m}^3$  De acuerdo con (Sánchez, 2001), para corregir la cantidad de agua de mezclado, la siguiente expresión permite determinar la cantidad que falta o sobra de agua.

$$A_o = \frac{-P_s(H - CA)}{100}$$

Donde:

<b>A</b>	=	Agua en exceso o defecto respecto de la condición SSS.
<b>P<sub>s</sub></b>	=	Peso seco del agregado.
<b>H</b>	=	Humedad del agregado.
<b>CA</b>	=	Capacidad de absorción del agregado.

Si la humedad es mayor a la absorción, se dice que el agregado tiene humedad libre y aporta agua adicional a la mezcla, motivo por el cual se debe sustraer el agua de la mezcla. Si la absorción es mayor a la humedad, se requiere adicionar agua para que el agregado tenga la condición de saturado superficialmente seco. En el caso de que la absorción y la humedad tuvieran el mismo valor no se requiere ajuste.

En el presente caso,

$$A_o = \frac{-1183(1,6 - 2,124) - 688,61(3,81 - 7,64)}{100}$$

$$A_o = 32,57 \text{ l/m}^3$$

Como el resultado obtenido es un valor negativo, esto significa que se debe agregar agua a la mezcla:

$$\text{Requerimiento de agua} = 181 + 32,57$$

$$\text{Requerimiento de agua} = 213,57 \frac{\text{l}}{\text{m}^3} \text{ de hormigón elaborado}$$

### **Resumen del diseño de mezcla de hormigón**

Finalmente, se decide emplear la dosificación por volumen absoluto ya que es más preciso y envuelve el uso de las densidades (gravedad específica) de todos los

materiales para calcular el volumen absoluto que cada uno de ellos ocupará en una unidad de volumen de hormigón

<b>Peso seco y volumen absoluto de los ingredientes por metro cúbico de hormigón</b>			
<b>Ingrediente</b>	<b>Peso seco Kg/m<sup>3</sup></b>	<b>Peso húmedo g/cm<sup>3</sup></b>	<b>Peso húmedo para 100 l en kg</b>
Cemento	285,00	285,00	28,50
Agua	181,00	214,69	21,47
Cont. De aire	0,00	0,00	0,00
Agregado grueso	1183,00	1201,93	120,19
Agregado fino	717,69	745,04	74,50
<b>TOTAL</b>	<b>2366,69</b>	<b>2446,66</b>	<b>244,66</b>

**Anexo 12. Ensayo de compresión de los cilindros de hormigón a los 7 días**

Fecha de confección	Fecha de rotura	Porcentaje de reemplazo	No. Cilindro	Edad de ensayo	Peso seco kg	Altura cm	Diámetro cm	Área cm <sup>2</sup>	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso volumétrico kg/cm <sup>3</sup>	Carga de rotura KN	Fuerza de rotura kg/cm <sup>2</sup>	f'c promedio kg/cm <sup>2</sup>
6/1/2020	13/1/2020	0%	1	7 días	12,2	30	15	176,71	5301,44	2301,26	271,00	153,35	<b>155,24</b>
6/1/2020	13/1/2020	0%	2	7 días	12,37	30	15	176,71	5301,44	2333,33	281,00	159,01	
6/1/2020	13/1/2020	0%	3	7 días	12,38	30	15	176,71	5301,44	2335,22	271,00	153,35	
7/1/2020	14/1/2020	20%	1	7 días	11,88	30	15	176,71	5301,44	2240,90	164,00	92,81	<b>100,54</b>
7/1/2020	14/1/2020	20%	2	7 días	12	30	15	176,71	5301,44	2263,54	171,00	96,77	
7/1/2020	14/1/2020	20%	3	7 días	12,04	30	15	176,71	5301,44	2271,08	198,00	112,05	
8/1/2020	15/1/2020	40%	1	7 días	11,72	30	15	176,71	5301,44	2210,72	156,68	88,66	<b>73,27</b>
8/1/2020	15/1/2020	40%	2	7 días	11,61	30	15	176,71	5301,44	2189,97	112,73	63,79	
8/1/2020	15/1/2020	40%	3	7 días	11,45	30	15	176,71	5301,44	2159,79	119,03	67,36	
9/1/2020	16/1/2020	60%	1	7 días	11,27	30	15	176,71	5301,44	2125,84	107,64	60,91	<b>63,69</b>
9/1/2020	16/1/2020	60%	2	7 días	11,19	30	15	176,71	5301,44	2110,75	114,22	64,63	
9/1/2020	16/1/2020	60%	3	7 días	11,21	30	15	176,71	5301,44	2114,52	115,79	65,52	

**Anexo 13. Ensayo de compresión de los cilindros de hormigón a los 14 días**

Fecha de confección	Fecha de rotura	Porcentaje de reemplazo	No. Cilindro	Edad de ensayo	Peso seco kg	Altura cm	Diámetro cm	Área cm <sup>2</sup>	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso volumétrico kg/cm <sup>3</sup>	Carga de rotura KN	Fuerza de rotura kg/cm <sup>2</sup>	f'c promedio kg/cm <sup>2</sup>
6/1/2020	20/1/2020	0%	4	14 días	12,19	30	15	176,71	5301,44	2299,38	329,80	186,63	<b>193,56</b>
6/1/2020	20/1/2020	0%	5	14 días	12,23	30	15	176,71	5301,44	2306,92	342,34	193,72	
6/1/2020	20/1/2020	0%	6	14 días	12,5	30	15	176,71	5301,44	2357,85	354,00	200,32	
7/1/2020	21/1/2020	20%	4	14 días	12,15	30	15	176,71	5301,44	2291,83	235,00	132,98	<b>122,23</b>
7/1/2020	21/1/2020	20%	5	14 días	11,95	30	15	176,71	5301,44	2254,11	205,00	116,01	
7/1/2020	21/1/2020	20%	6	14 días	12,03	30	15	176,71	5301,44	2269,20	208,00	117,70	
8/1/2020	22/1/2020	40%	4	14 días	11,75	30	15	176,71	5301,44	2216,38	203,00	114,87	<b>103,75</b>
8/1/2020	22/1/2020	40%	5	14 días	11,68	30	15	176,71	5301,44	2203,18	157,00	88,84	
8/1/2020	22/1/2020	40%	6	14 días	11,8	30	15	176,71	5301,44	2225,81	190,00	107,52	
9/1/2020	23/1/2020	60%	4	14 días	11,21	30	15	176,71	5301,44	2114,52	148,00	83,75	<b>79,98</b>
9/1/2020	23/1/2020	60%	5	14 días	11,3	30	15	176,71	5301,44	2131,50	149,00	84,32	
9/1/2020	23/1/2020	60%	6	14 días	11,28	30	15	176,71	5301,44	2127,72	127,00	71,87	

**Anexo 14. Ensayo de compresión de los cilindros de hormigón a los 28 días**

Fecha de confección	Fecha de rotura	Porcentaje de reemplazo	No. Cilindro	Edad de ensayo	Peso seco kg	Altura cm	Diámetro cm	Área cm <sup>2</sup>	Volumen cm <sup>3</sup>	Peso volumétrico kg/cm <sup>3</sup>	Carga de rotura KN	Fuerza de rotura kg/cm <sup>2</sup>	f'c promedio kg/cm <sup>2</sup>
6/1/2020	3/2/2020	0%	7	28 días	12,57	30	15	176,71	5301,44	2371,05	428,26	242,34	<b>244,80</b>
6/1/2020	3/2/2020	0%	8	28 días	12,51	30	15	176,71	5301,44	2359,74	433,46	245,29	
6/1/2020	3/2/2020	0%	9	28 días	12,51	30	15	176,71	5301,44	2359,74	431,15	243,98	
6/1/2020	3/2/2020	0%	10	28 días	12,55	30	15	176,71	5301,44	2367,28	436,01	246,73	
6/1/2020	3/2/2020	0%	11	28 días	12,54	30	15	176,71	5301,44	2365,40	434,08	245,64	
7/1/2020	4/2/2020	20%	7	28 días	11,98	30	15	176,71	5301,44	2259,76	318,41	180,18	<b>192,47</b>
7/1/2020	4/2/2020	20%	8	28 días	11,91	30	15	176,71	5301,44	2246,56	306,21	173,28	
7/1/2020	4/2/2020	20%	9	28 días	12,1	30	15	176,71	5301,44	2282,40	351,39	198,85	
7/1/2020	4/2/2020	20%	10	28 días	12,1	30	15	176,71	5301,44	2282,40	365,42	206,78	
7/1/2020	4/2/2020	20%	11	28 días	12,13	30	15	176,71	5301,44	2288,06	359,16	203,24	
8/1/2020	5/2/2020	40%	7	28 días	11,4	30	15	176,71	5301,44	2150,36	291,45	164,93	<b>164,52</b>
8/1/2020	5/2/2020	40%	8	28 días	11,7	30	15	176,71	5301,44	2206,95	289,85	164,02	
8/1/2020	5/2/2020	40%	9	28 días	11,68	30	15	176,71	5301,44	2203,18	288,75	163,40	
8/1/2020	5/2/2020	40%	10	28 días	11,52	30	15	176,71	5301,44	2173,00	290,36	164,31	
8/1/2020	5/2/2020	40%	11	28 días	11,645	30	15	176,71	5301,44	2196,57	293,23	165,93	
9/1/2020	6/2/2020	60%	7	28 días	11,29	30	15	176,71	5301,44	2129,61	265,78	150,40	<b>149,56</b>
9/1/2020	6/2/2020	60%	8	28 días	11,35	30	15	176,71	5301,44	2140,93	263,45	149,08	
9/1/2020	6/2/2020	60%	9	28 días	11,3	30	15	176,71	5301,44	2131,50	263,60	149,17	
9/1/2020	6/2/2020	60%	10	28 días	11,33	30	15	176,71	5301,44	2137,16	264,21	149,51	
9/1/2020	6/2/2020	60%	11	28 días	11,3	30	15	176,71	5301,44	2131,50	264,47	149,66	

## BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, J., Martínez, E., Díaz, E., & Amat, E. (1985). *Materiales de Construcción* (J. Lobato (ed.)). Ministerio de Educación Superior.
- Arenas, F. (2007). *El impacto ambiental en la edificación. Criterios para una construcción sostenible*. Edisofer.
- Debieb, F., & Kenai, S. (2008). The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Elsevier*, 22, 886–893. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013>
- Gómez, J. (2000). *Materiales de construcción - Jorge Gómez Domínguez - Google Libros* (D. de I. C. ITESM (ed.)). [https://books.google.com.ec/books/about/Materiales\\_de\\_construcción.html?id=99GPrGEACAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.ec/books/about/Materiales_de_construcción.html?id=99GPrGEACAAJ&redir_esc=y)
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010a). *NTE INEN 154: Tamices de ensayo. Dimensiones nominales de las aberturas* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010b). *NTE INEN 1573: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010c). *NTE INEN 1578: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010d). *NTE INEN 856: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010e). *NTE INEN 857: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso* (Instituto Ecuatoriano de Normalización (ed.)).
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010f). *NTE INEN 858: Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011a). *NTE INEN 1576: Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado de especímenes para ensayo* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011b). *NTE INEN 695: Áridos. Muestreo* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011c). *NTE INEN 862: Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011d). *NTE INEN 872: Áridos para hormigón. Requisitos* (Primera). Instituto Ecuatoriano de Normalización.



- López, M. T., & Gentile, N. (2008). Sistema de indicadores económicos y sociales: la importancia del análisis integrado. *IX Encuentro Nacional de La Red de Economías Regionales En El Marco Del Plan Fénix y II Jornadas Nacionales de Investigadores de Las Economías Regionales, Tandil [ARG], 18-19 Septiembre 2008.* .
- Lund, H. F. (1996). *Manual McGraw-Hill de reciclaje*. McGraw-Hill.
- Martínez, I., Etxeberria, M., Pavón, E., & Díaz, N. (2016). Analysis of the properties of masonry mortars made with recycled fine aggregates for use as a new building material in Cuba. *Revista de La Construcción*, 15(1), 9–21.
- Neville, A. (2013). *Tecnología del Concreto* (Cuarta). Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
- Poon, C. S., Kou, S. C., & Lam, L. (2002). Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Construction and Building Materials*, 16(April), 281–289.
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero* (Quinta). Bhandar Editores Ltda.
- Suconota, C., & Arèvalo, M. (2012). *UNIVERSIDAD DE CUENCA AUTORAS*.
- Troconis de Rincón, O., Romero de Carruyo, A., Andrade, M., Helene, P., & Díaz, I. (2006). *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo CYTED.
- Valdés, G. A., & Rapimán, J. G. (2007). Physical and Mechanical Properties of Concrete Bricks Produced with Recycled Aggregates. *Información Tecnológica*, 18(3), 81–88.
- Vegas, I., Azkarate, I., Juarrero, A., & Frías, M. (2009). *Diseño y prestaciones de morteros de albañilería elaborados con áridos reciclados procedentes de escombros de hormigón* Design and performance of masonry mortars made with recycled concrete aggregates. 59, 5–18. <https://doi.org/10.3989/mc.2009.44207>