



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

Universidad de la República Oriental del Uruguay  
Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo  
Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura

TESIS DE MAESTRÍA

**Influencia del agregado fino  
en las características mecánicas del micro-hormigón de alto desempeño**

Paola Gargano Rossi



Montevideo, Uruguay  
Setiembre, 2020



**Influencia del agregado fino  
en las características mecánicas del micro-hormigón de alto desempeño**

Autor: Paola Gargano Rossi

Tesis presentada como parte de los requisitos para la obtención del título de Magíster en Construcción de Obras de Arquitectura, en el marco del Programa de Posgrado Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República.

Tutoras: Dr. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale – Dr. Arq. María Esther Fernández

Montevideo, Uruguay  
Setiembre, 2020

Autor: Gargano, Paola

Título: Influencia del agregado fino en las características mecánicas del micro-hormigón de alto desempeño.

Fecha y lugar: Setiembre, 2020 / Universidad de la República Oriental del Uruguay, Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo.

Maestría: Maestría en Construcción de Obras de Arquitectura.

Tutoras: Dr. Arq. Gemma Rodríguez de Sensale  
– Dr. Arq. María Esther Fernández

Páginas: 92

Palabras clave:

Micro-hormigón

Micro-hormigón de alto desempeño

Mortero

Agregado

Agregado fino

## **AGRADECIMIENTOS:**

---

Primeramente, quiero agradecer especialmente a la Dr. Arq. Gemma Rodríguez por su orientación, apoyo y entrega con el fin de poder sacar adelante esta Tesis de Maestría. Agradezco a la Dr. Arq. María Esther Fernández por la co-tutoría del trabajo, orientación y tiempo brindado durante la parte experimental del mismo.

Agradezco al Laboratorio del Instituto de la Construcción (LabIC) de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo (FADU) de la Universidad de la República (UdelaR) por permitir el uso de sus instalaciones, equipos y materiales para poder llevar a cabo los trabajos de índole experimental.

Quiero dedicar un especial agradecimiento a mi familia, cuyo apoyo y amor contribuyeron en gran medida a poder culminar este trabajo de investigación; a mis padres, mi esposo y especialmente a nuestra hija quien con su llegada trajo luz y renovadas fuerzas para poder cumplir objetivos trazados, culminar etapas y poder comenzar nuevos caminos.

## INDICE:

---

<b>Lista de figuras</b>	I
<b>Lista de tablas</b>	III
<b>Lista de símbolos y abreviaturas</b>	V
<b>Resumen</b>	VII
<b>Abstract</b>	VIII
<b>Capítulo 1 INTRODUCCIÓN</b>	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 OBJETIVOS	1
1.3 ESTRUCTURA	2
1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	2
<b>Capítulo 2 ESTADO DEL ARTE</b>	3
2.1 MATERIALES PÉTREOS	3
2.1.1 Rocas ígneas	4
2.1.2 Rocas sedimentarias	6
2.1.3 Rocas metamórficas	7
2.2 AGREGADOS	7
2.2.1 Definiciones de los agregados	7
2.2.2 Clasificación de los agregados	9
2.2.2.1 <i>Agregados naturales y agregados naturales manufacturados</i>	10
2.2.3 Fuentes de obtención de agregados	12
2.3 MORTEROS Y MICRO-HORMIGÓN	14
2.3.1 Definiciones	14
2.4 MICRO-HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO	15
2.4.1 Definiciones	15
2.4.2 Características de los agregados finos que influyen en las propiedades de los micro-hormigones	19
2.4.2.1 <i>Mineralogía del agregado</i>	20
2.4.2.2 <i>Forma</i>	20
2.4.2.3 <i>Textura</i>	25
2.4.2.4 <i>Granulometría / clasificación / tamaño máximo del agregado / distribución del tamaño del agregado</i>	26
2.4.2.5 <i>Absorción / Permeabilidad</i>	28
2.4.2.6 <i>Densidad</i>	28
<b>Capítulo 3 INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL</b>	30
3.1 PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	30
3.2 MATERIALES	31
3.2.1 Agregado fino	31
3.2.2 Cemento portland	32
3.2.3 Agua	32
3.2.4 Aditivo	32
3.3 EQUIPOS	33
3.3.1 Balanza electrónica	34
3.3.2 Tamizadora	34
3.3.3 Amasadora	34
3.3.4 Compactadora	34

3.3.5 Mesa de sacudidas	34
3.3.6 Prensa	34
3.3.7 Otras herramientas y accesorios	34
3.4 MÉTODOS	35
3.4.1 Estudio granulométrico y selección de las arenas a ser empleadas	36
3.4.2 Realización de micro-hormigones y probetas	38
3.4.2.1 <i>Ejecución de los micro-hormigones</i>	38
3.4.2.2 <i>Preparación de probetas</i>	39
3.4.2.3 <i>Desmolde y curado de probetas</i>	40
3.4.3 Ensayos de los micro-hormigones	40
3.4.3.1 <i>En estado fresco</i>	41
3.4.3.2 <i>En estado endurecido</i>	42
3.5 DOSIFICACIONES EMPLEADAS	43
3.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS	44
<b>Capítulo 4 RESULTADOS Y DISCUSION</b>	45
4.1 ETAPA 1	45
4.1.1 Estudio granulométrico de los agregados	45
4.1.2 Resultados de los micro-hormigones realizados con las muestras de agregados seleccionadas	49
4.1.2.1 <i>Resultados en estado fresco</i>	49
4.1.2.2 <i>Estado endurecido</i>	50
4.1.2.3 <i>Selección de agregados a ser empleadas en etapa 2</i>	53
4.2 ETAPA 2	55
4.2.1 Estado fresco	55
4.2.2 Estado endurecido	57
4.2.3 Análisis y discusión de resultados de la etapa 2	59
<b>Capítulo 5 CONCLUSIONES FINALES Y SUGERENCIAS</b>	62
<b>Referencias bibliográficas</b>	64
<b>Anexos</b>	68

## LISTA DE FIGURAS

---

**Figura 2.1** Gráfico de evaluación visual de la forma de las partículas derivado de la medida de la “esfericidad” y la “redondez”.

**Figura 2.2** Gráfico de evaluación visual de la forma de las partículas basado en observaciones morfológicas.

**Figura 2.3** Gráfico de evaluación visual de la forma y la angulosidad.

**Figura 2.4** Ilustraciones de formas de partículas de agregados.

**Figura 3.1** Organigrama con pasos seguidos durante la investigación experimental.

**Figura 3.2** Equipos empleados.

**Figura 3.3** Herramientas y accesorios empleados.

**Figura 3.4** Cuarteo de muestras de arena.

**Figura 3.5** Estudio granulométrico de las arenas.

**Figura 3.6** Gráfico de curvas límite que establece la Norma UNIT 82-51.

**Figura 3.7** Ejecución de micro-hormigones.

**Figura 3.8** Conformación de probetas.

**Figura 3.9** Desmolde y curado de probetas.

**Figura 3.10** Ensayo en mesa de sacudidas.

**Figura 3.11** Ensayo a flexión.

**Figura 3.12** Ensayo a compresión.

**Figura 4.1** Gráficas de curvas representativas de cada muestra.

**Figura 4.2** Total de muestras seleccionadas de acuerdo al análisis de granulometría.

**Figura 4.3** Asentamientos obtenidos.

**Figura 4.4** Gráficos de barras para etapa 1: media de la resistencia a la flexión.

**Figura 4.5** Fragmentos de las probetas producto de haber sido ensayadas por rotura a compresión.

**Figura 4.6** Gráficos de barras para etapa 1: media de la resistencia a la compresión.

**Figura 4.7** Asentamientos obtenidos.

**Figura 4.8** Ejemplo de fragmentos de las probetas.

**Figura 4.9** Gráficos de barras para etapa 2.

## LISTA DE TABLAS

---

**Tabla 2.1** Características de los agregados finos de acuerdo a su fuente de procedencia y producción.

**Tabla 2.2** Clasificación para el hormigón de alto desempeño.

**Tabla 2.3** Dosificaciones consideradas para la producción de MHAD.

**Tabla 2.4** Resistencias a la compresión a los 7 y 28 días de las dosificaciones consideradas para la producción de MHAD.

**Tabla 2.5** Dosificación básica de los micro-hormigones estudiados.

**Tabla 2.6** Resistencia a compresión y eficiencia de los micro-hormigones estudiados.

**Tabla 2.7** Clasificación de la forma de la partícula.

**Tabla 3.1** Muestras recabadas; cantera de origen y procedencia de las muestras.

**Tabla 3.2** Valores del análisis químico del cemento portland normal utilizado.

**Tabla 3.3** Valores de ensayos físicos del cemento portland normal utilizado.

**Tabla 3.4** Valores de resistencia mecánica a la compresión del cemento portland normal utilizado.

**Tabla 3.5** Resumen de ensayos realizados, normas empleadas y cantidades de muestras estudiadas.

**Tabla 3.6** Cálculo del mortero necesario para conformar tres probetas por cada muestra de arena.

**Tabla 3.7** Dosificación tomada como base.

**Tabla 3.8** Dosificaciones para conformar un metro cúbico de muestra empleada en la etapa 2.

**Tabla 4.1** Resumen de datos obtenidos y análisis de muestras de arena.

**Tabla 4.2** Resultados obtenidos de ensayos en mesa de sacudidas de las muestras seleccionadas.

**Tabla 4.3** Resultados obtenidos de ensayos de rotura a flexión de las probetas con las muestras seleccionadas.

**Tabla 4.4** Resultados obtenidos de ensayos de rotura a compresión de las probetas que fueron previamente ensayadas a flexión.

**Tabla 4.5** Resumen de resultados obtenidos en la etapa 1.

**Tabla 4.6** Resumen de los resultados de los ensayos realizados.

**Tabla 4.7** Valores de módulo de finura, resistencia a la flexión y a la compresión de las muestras ensayadas en etapa 1.

**Tabla 4.8** Resultados obtenidos de ensayos de rotura a flexión en la segunda etapa.

**Tabla 4.9** Resultados obtenidos de ensayos de rotura a compresión en la segunda etapa.

**Tabla 4.10** Resumen de resultados obtenidos de ensayos a flexión y compresión en etapa 2.

**Tabla 4.11** Resumen de resultados: características de las arenas empleadas y ensayos realizados en la etapa 2.

**Tabla 4.12** Resumen de todos los resultados de la etapa 2.

## LISTADO DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

a/aglm	Relación agua/aglomerante
ABNT	Asociación Brasileña de Normas Técnicas
a/c	Relación agua/cemento
ACI	American Concrete Institute
AENOR	Asociación Española de Normalización y Certificación
Al	Aluminio
ANII	Agencia Nacional de Investigación e Innovación
ar/c	Relación arena/cemento
ASTM	American Society for Testing and Materials (en español: Sociedad Americana para Ensayos y Materiales)
BS	British Standards (en español: Estándares Británicos)
Ca	Calcio
cm	Centímetro
CPN	Cemento portland normal
CV	Coefficiente de variación
Ø	Valor medio obtenido en estado fresco mediante ensayo en mesa de sacudidas
2D	Dos dimensiones
EN	European Norms (en español: Normas Europeas)
FADU	Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo
F <sub>c</sub>	Media de resistencia a la compresión
Fe	Hierro
F <sub>f</sub>	Media de resistencia a la flexión
FMV	Fondo María Viñas
°C	Grados Celsius
HAD	Hormigón de alto desempeño
IRAM	Instituto Argentino de Normalización y Certificación
ISO	International Organization for Standardization (en español: Organización Internacional de Normalización)
K	Potasio
kg/m <sup>3</sup>	Kilogramo por metro cúbico
kN	Kilonewton
LabIC	Laboratorio del Instituto de la Construcción
L	Litro
m	Metro
m <sup>3</sup>	Metro cúbico

±	Más/menos
MEB	Microscopio electrónico de barrido
MF	Módulo de finura
Mg	Magnesio
MHAD	Micro-hormigón de alto desempeño
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
µm	Micrones
Na	Sodio
nm	Nanómetro
NM	Norma Mercosur
N/s	Newton/segundo
Nº	Número
O	Oxígeno
Pa	Pascal
%	Por ciento
RPM	Revolución por minuto
σ	Desviación estándar
s	Segundo
Si	Silicio
SiO <sub>2</sub>	Sílice
UdelaR	Universidad de la República
UNE	Asociación Española de Normalización
UNIT	Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

## RESUMEN

---

Esta tesis continúa con la temática del Proyecto de Investigación y Desarrollo del Programa Fondo María Viñas (FMV) de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) FMV 2009-1-2717 que duró desde el 2010 al 2013, titulado “Investigación, desarrollo y aplicación de micro-hormigón de alto desempeño para infraestructura urbana, vivienda social y construcción edilicia”. Se propone continuar con el abordaje de un tema no estudiado en el proyecto de investigación previamente mencionado mediante el análisis de la influencia de los agregados en el micro-hormigón de alto desempeño (MHAD). Al carecer el micro-hormigón de agregado grueso es que se hace necesario para observar la influencia de los agregados que se deba estudiar la influencia de los agregados finos solamente.

Para ello se tomó como base una dosificación de MHAD obtenida en el proyecto mencionado y se estudió la influencia del agregado fino en las características mecánicas del MHAD mediante el empleo de 18 muestras de arenas diferentes.

Se realizaron ensayos de caracterización de las muestras de arena mediante estudio de granulometría que sirvió para pre-seleccionar dichas muestras de acuerdo a su aptitud para empleo en hormigón, quedando reducida la cantidad de muestras a 8; con las muestras pre-seleccionadas se realizaron micro-hormigones con la dosificación base del proyecto mencionado. Se hicieron ensayos en estado fresco de consistencia y en estado endurecido de resistencia a flexión y compresión a los 28 días de edad. Los resultados obtenidos en los micro-hormigones posibilitaron realizar una nueva selección de las arenas, quedando 3 muestras de arena para ser estudiadas en la siguiente etapa.

Con las muestras de arena seleccionadas se pasó a la segunda etapa experimental; en ella se realizaron nuevas amasadas variando la relación arena/cemento ( $ar/c$ ) de la dosificación base. Se hicieron ensayos en estado fresco y endurecido a los 28 días de edad.

En base a los resultados obtenidos se pudo concluir que para micro-hormigón de alto desempeño se deben seleccionar arenas más gruesas, con valores altos de módulos de finura, que presenten gráficas de distribución granulométricas regulares ubicadas dentro de los límites recomendables y aceptables para hormigón dados por la normativa vigente.

## ABSTRACT

---

This thesis carries on with the theme of the Research and Development Project of the María Viñas Fund Program (FMV) from the National Agency of Investigation and Innovation (ANII) FMV 2009-1-2717 that lasted from 2010 to 2013, entitled “Research, development and application of high performance micro-concrete for urban infrastructure, social housing and building construction”. It is proposed to continue with the approach of a subject not studied in the previously mentioned research work by analyzing the influence of aggregates on the high-performance micro-concrete. In order to observe the influence of aggregates on micro-concrete, it is necessary to study the influence of fine aggregates, as micro-concrete lacks of coarse aggregate.

For this, a high performance micro-concrete dosage obtained in the aforementioned Project was taken as a basis and the influence of the fine aggregate on the mechanical characteristics of the high-performance micro-concrete was studied by using 18 different sand samples.

Characterization tests of the 18 sand samples were carried out by means of granulometry studies that served to pre-select the sands according to their aptitude for use in concrete; reducing the number of samples to 8; with the pre-selected samples, micro-concretes were made with the base dosage of the aforementioned Project. Tests were done in a fresh state of consistency and in a hardened state of flexural and compression resistance at 28 days of age. The results obtained in the micro-concretes made it possible to make a new selection of the sands, leaving 3 sand samples to be studied in the next stage.

With the selected sand samples, it went on to the second experimental stage; in it, new mixes were made, varying the sand/cement ratio of the base dosage. Trials were performed in the fresh and hardened state at 28 days of age.

Based on the results obtained, it was concluded that thicker sands should be selected for high-performance micro-concrete, with high values of fineness modulus, that present regular granulometric distribution charts that are within the recommended and acceptable limits for concrete given by the current standards.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

La presente tesis de Maestría toma como base el Proyecto de Investigación y Desarrollo del Programa FMV de la ANII FMV 2009-1-2717, donde se estudió el desarrollo y la aplicación del MHAD con fines constructivos.

Este trabajo toma una veta no estudiada en el mencionado proyecto y aborda el estudio de la influencia de los agregados finos en las características mecánicas del MHAD.

El MHAD no utiliza en su composición agregado grueso, solamente emplea agregado fino y excede en sus prestaciones al micro-hormigón convencional. Es un material que cumple requisitos especiales de desempeño y uniformidad que no siempre pueden ser alcanzados rutinariamente usando sólo materiales convencionales y prácticas normales de mezclado, colocación y curado (Rodríguez de Sensale et al., 2012).

Las características de los agregados finos influyen en el hormigón en su estado fresco y endurecido de manera diferente a los agregados gruesos. Este trabajo involucra el estudio de los agregados finos y sus características, primeramente estudiando su influencia en hormigones, morteros y micro-hormigones y luego estudiando de manera experimental su influencia puntualmente en los micro-hormigones. Dado que el micro-hormigón es un mortero, ya que la base de su composición es pasta de cemento (cemento y agua) más agregado fino, se estudiarán como si fueran morteros y la influencia de los agregados finos en dichos morteros o micro-hormigones. Para poder llegar a determinar si las muestras de agregado fino estudiadas son idóneas en el empleo de micro-hormigón de alto desempeño, se tomará como límite mínimo en los micro-hormigones realizados, una resistencia igual o mayor a los 40 Megapascuales (MPa).

### 1.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este trabajo es el estudio de la influencia del agregado fino en las características mecánicas del MHAD.

Los objetivos específicos se detallan a continuación:

- Estudiar muestras de agregado fino y su influencia en micro-hormigones.
- Estudiar la influencia de las muestras de agregado fino en los micro-hormigones realizados variando la relación  $a/r/c$ .
- Evaluar cuáles de las muestras de agregado fino influyen significativamente en las propiedades mecánicas de los micro-hormigones.
- Ampliar el conocimiento acerca de la influencia de los agregados finos en los MHAD.

### **1.3 ESTRUCTURA**

La tesis consta de 5 capítulos.

El capítulo 1 corresponde a la introducción donde se presenta el contexto donde se encuentra insertado este trabajo y la importancia de su objeto de estudio. Se presentan los objetivos, la estructura y el alcance del trabajo.

El capítulo 2 presenta el estado del arte en relación al MHAD y a uno de sus componentes que es objeto de estudio de este trabajo: el agregado fino. Se describe la influencia del agregado fino en hormigón, morteros y micro-hormigones.

El capítulo 3 presenta la investigación experimental, las dosificaciones y materiales a utilizar, los equipos a emplear y los procedimientos a seguir de acuerdo a las normas de referencia que también se indican.

El capítulo 4 presenta los resultados obtenidos y su análisis y discusión.

El capítulo 5 presenta las conclusiones finales y contiene sugerencias para otras posibles investigaciones relacionadas con la temática.

Finalmente se presentan las referencias bibliográficas empleadas y anexos.

### **1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACION**

El estudio del MHAD es bastante reciente y al día de hoy aún no se dispone de suficiente información bibliográfica. En función de esto y para desarrollar en el estado del arte la temática de esta Tesis es que se debió recurrir al estudio de la influencia del agregado fino en el hormigón y en los morteros asimilándolos a micro-hormigón convencional.

La investigación se limitó a una sola dosificación de las que se obtuvieron en el proyecto FMV y que fue el puntapié inicial para desarrollar la parte experimental. La parte experimental con los micro-hormigones se trabajó en dos etapas; en la primera se estudiaron propiedades con todos los agregados recabados y se seleccionaron los más adecuados para poder abordar la etapa 2, en la cual se modificó la relación ar/c de la dosificación base.

## CAPÍTULO 2 – ESTADO DEL ARTE

---

### 2.1 MATERIALES PÉTREOS

Los materiales pétreos son aquellos materiales que provienen de las rocas. De acuerdo con Tarbuck y Lutgens (2005), las rocas son el material más común y abundante en la Tierra y constan de cristales o granos más pequeños denominados minerales, definiéndose estos minerales como compuestos químicos, cada uno de ellos con su propia composición y sus propiedades físicas, por lo que la naturaleza y el aspecto de una roca están fuertemente influidos por los minerales que la componen.

Las rocas atraviesan varios procesos de alteración, incluyendo procesos geotermales naturales o de meteorización a lo largo de extensos períodos geológicos (Alexander y Mindess, 2010).

Las rocas son producidas debido al enfriamiento del magma al interior de la Tierra. El magma es un fluido rocoso, un fundido natural a alta temperatura compuesto principalmente de minerales tipo silicatos y óxidos fundidos, en su mayoría: oxígeno (O), silicio (Si), aluminio (Al), hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K), y magnesio (Mg). Luego que el magma es enfriado se forman diminutos cuerpos sólidos llamados minerales que tienen la tendencia a formar cuerpos cristalinos. La Tierra está compuesta por un núcleo interior caliente, un manto que lo envuelve y una corteza exterior, produciéndose el magma por debajo de la corteza y en el manto exterior del planeta (Duque, 2016).

Las rocas se clasifican en tres grandes grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Según la descripción brindada por la Norma ASTM C294, estos tres grupos principales se subdividen en tipos según la composición mineral y química, la textura y la estructura interna y se caracterizan por lo siguiente:

- Las rocas ígneas se forman a partir de la materia fundida, ya sea en la superficie de la tierra o debajo de ella.
- Las rocas sedimentarias se forman cerca de la superficie de la tierra por la acumulación y consolidación de los productos de desgaste y erosión de rocas existentes, o por precipitación química directa. Las rocas sedimentarias pueden formarse a partir de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias preexistentes.
- Las rocas metamórficas se forman a partir de rocas ígneas, sedimentarias o metamórficas preexistentes por acción del calor o la presión, o ambas.

Aunque las rocas sedimentarias constituyen una porción muy pequeña del volumen de la corteza de la Tierra, son altas las posibilidades de encontrarlas en la superficie, donde tres cuartas partes de las rocas expuestas pertenecen a este grupo (Duque, 2016). Según Mehta y Monteiro (2006), la corteza de la Tierra consiste en un 95 por ciento (%) de rocas ígneas y un 5% de rocas sedimentarias, sin embargo, mientras que las rocas ígneas afloran solamente en el 25% del área de la superficie terrestre, las rocas sedimentarias cubren el 75% del área. Esta es la razón por la cual la mayoría de los agregados minerales naturales utilizados en el hormigón; arena, grava, y

rocas carbonatadas trituradas se derivan de rocas sedimentarias. Sin embargo, dado que las rocas sedimentarias como las metamórficas pueden derivar de rocas ígneas existentes y según lo expuesto por Alexander y Mindess (2010), las propiedades de las rocas ígneas son superiores a las de rocas sedimentarias y metamórficas, se hará a continuación mayor hincapié en las propiedades de las rocas ígneas.

### 2.1.1 Rocas ígneas

Todas las rocas se originan como rocas ígneas, derivadas de la solidificación del magma subyacente a la zona de la corteza de la tierra. Tarbuck y Lutgens (2005) refieren a que los magmas son material completa o parcialmente fundido, que al enfriarse se solidifica y forma las rocas ígneas, las cuales se clasifican según su textura (por textura de una roca ígnea se entiende el aspecto general de la roca basado en el tamaño y disposición de los cristales) y composición mineral. De acuerdo a Mehta y Monteiro (2006), el grado de cristalinidad y el tamaño de grano de este tipo de rocas varían con la velocidad a la que el magma se enfría en el momento de la formación rocosa. Tarbuck y Lutgens (2005), aluden a que existen tres factores que contribuyen y condicionan la textura de las rocas ígneas: la velocidad a la cual se enfría el magma, la cantidad de sílice presente y la cantidad de gases disueltos en el magma, siendo la primera la más importante. Conforme el magma se enfría los iones que lo componen se disponen según modelos ordenados durante un proceso denominado cristalización. El enfriamiento lento se traduce en la formación de grandes cristales, mientras que cuando el enfriamiento se produce rápidamente, el resultado es una masa sólida que consiste en diminutos cristales. Cuando el material fundido se enfría instantáneamente, se forma una masa de átomos desordenados a los que se conoce como vidrio. Según Alexander y Mindess (2010), estos minerales al ser físicamente desintegrados o químicamente descompuestos pueden formar la base de las rocas sedimentarias y metamórficas.

De acuerdo al lugar donde se produce el enfriamiento del magma estas rocas se clasifican en 3 grupos. En función de lo expuesto por la Norma ASTM C294; Alexander y Mindess (2010) y Tarbuck y Lutgens (2005), se resume esta clasificación en:

- Plutónicas o intrusivas, de grano grueso a medio, con tamaños de grano mayores a 1 milímetro (mm) aproximadamente, que se solidifican lentamente bajo la corteza a grandes profundidades, en condiciones de alta presión y temperatura, formando minerales con cristales gruesos reconocibles a simple vista cuyo tamaño de grano es mayor a 5 mm. Esto último hace que su textura cristalina sea denominada fanerítica. Un ejemplo de este tipo de roca es el granito.
- Hipabisales, de grano medio, son formadas a profundidades intermedias y presentan una velocidad de enfriamiento mayor que las plutónicas y a veces bajo grandes presiones. La cristalización de los minerales de roca es generalmente completa y el tamaño del grano depende de la duración del enfriamiento y la presión, pudiendo transformarse en rocas plutónicas o volcánicas. Contienen minerales con cristales de grano fino de entre 1 a 5 mm. Un ejemplo de este tipo de roca es la dolerita.
- Volcánicas o extrusivas, de grano fino, con tamaños de grano menores a 1 mm aproximadamente, que fuerzan su camino a la superficie de la Tierra y enfrían rápidamente resultando en una cristalización parcial de los componentes minerales. La cristalización

parcial da rocas que son mezclas de componentes cristalinos y materiales vítreos. El enfriamiento extremadamente rápido puede producir una roca enteramente cristalina o vítrea. La porción vítrea presenta mayores contenidos de sílice que la porción cristalina, pudiendo ser reactivo a los álcalis, lo que conduce a reacciones perjudiciales con los productos de la hidratación del cemento en el hormigón. Se forman minerales con cristales demasiado pequeños para ser distinguidos a simple vista, esto último hace que su textura cristalina sea denominada afanítica. Un ejemplo de este tipo de roca es el basalto.

Otras clasificaciones de las rocas ígneas de acuerdo a lo expuesto por Tarbuck y Lutgens (2005) pueden ser de acuerdo al contenido de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) presente en el magma y en función de sus proporciones minerales de colores claros y oscuros.

En el caso del contenido de  $\text{SiO}_2$ , el silíceo y el oxígeno son los elementos que más abundan en las rocas ígneas y la cantidad de  $\text{SiO}_2$  presente en un magma condiciona en gran medida su comportamiento, por lo que se puede observar la siguiente distinción:

- Rocas que contienen más de 65% de  $\text{SiO}_2$ . Pertenecen al grupo ácido.
- Rocas que contienen de 55% a 65% de  $\text{SiO}_2$ . Pertenecen al grupo intermedio.
- Rocas que contienen menos de 55% de  $\text{SiO}_2$ . Pertenecen al grupo básico.

En el caso de sus proporciones minerales de colores claros y oscuros, se realiza la siguiente distinción:

- Rocas compuestas fundamentalmente por silicatos de colores claros como cuarzo y feldespatos. De acuerdo a este tipo de minerales dominantes se denomina que tienen una composición granítica (también denominadas rocas félsicas) y son rocas ricas en  $\text{SiO}_2$  (aproximadamente al 70%). Un ejemplo de este tipo de roca es el granito.
- Rocas que contienen cantidades sustanciales de silicatos oscuros se dice que tienen una composición basáltica (también denominadas rocas máficas), debido a su contenido en Fe es que son normalmente más oscuras y densas que otras rocas ígneas. Un ejemplo de este tipo de roca es el basalto.
- Rocas con una composición comprendida entre las rocas graníticas y las basálticas se dice que tienen una composición intermedia o andesítica. Esta categoría de roca se asocia con actividades volcánicas y contienen al menos un 25% de silicatos oscuros.
- Otro grupo composicional que se encuentra del lado opuesto de las rocas graníticas son las ultramáficas, aunque son infrecuentes en la superficie de la Tierra.

De acuerdo a las clasificaciones proporcionadas, Tarbuck y Lutgens (2005), resumen lo siguiente:

- El magma granítico es de tipo ácido y se caracteriza por ser rico en  $\text{SiO}_2$ , presenta colores claros y altos contenidos de cuarzo y es bastante viscoso a temperaturas de tan solo 700 grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Rocas como el granito se forman con este tipo de magma. El granito

se caracteriza por contener cuarzo, feldespato y micas. Presenta una textura fanerítica de cristales gruesos reconocibles a simple vista y es de magma ácido. Es una roca dura y resistente por lo que se usa frecuentemente en construcción en hormigones y fundaciones.

- El magma basáltico es de tipo básico y se caracteriza por ser pobre en contenido de sílice, presenta colores oscuros y bajo contenido de cuarzo y tiene baja viscosidad por lo que generalmente son más fluidos. Estos magmas cristalizan a temperaturas superiores que los magmas graníticos y son completamente sólidos cuando se enfrían a 1000 °C. Rocas como el basalto se forman con este tipo de magma. El basalto se caracteriza por contener plagioclasas cálcicas, olivino y piroxeno. De textura afanítica, con cristales demasiado pequeños para ser distinguidos a simple vista y de magma básico. Es alterado rápidamente, genera finos y presenta problemas para fundar en él. Es empleado en hormigones y en triturados para obras viales.

### **2.1.2 Rocas sedimentarias**

Las rocas sedimentarias se derivan de rocas ígneas existentes. Según lo expuesto en la Norma ASTM C294 y por Mehta y Monteiro (2006), las rocas sedimentarias son rocas estratificadas que generalmente se depositan bajo el agua, aunque también pueden formarse a raíz del viento y la acción glacial. De acuerdo con Alexander y Mindess (2010), las rocas sedimentarias son derivadas de la degradación física/mecánica y química de otras rocas, resultando en fragmentos que se acumulan en forma de depósitos, usualmente bajo el agua.

En comparación con las rocas ígneas, los agregados que se producen a partir de sedimentos estratificados pueden variar ampliamente en las características, como la forma, la textura, la porosidad, la resistencia y la solidez. Esto se debe a que las condiciones en que se consolidan varían ampliamente. Las rocas tienden a ser porosas y débiles cuando se forman bajo presiones relativamente bajas mientras que son densas y fuertes si se forman bajo presiones altas (Mehta y Monteiro, 2006).

Ejemplos brindados por Alexander y Mindess (2010) de este tipo de rocas son las gravas y arenas derivadas de sus rocas madre. Ya que sus minerales han soportado procesos de degradación, tienden a ser más estables que aquellos en rocas ígneas o metamórficas. Su estructura a veces en capas puede resultar en partículas escamosas y de forma pobre en los casos de los agregados que son triturados de esas rocas. El grupo de las areniscas, siempre que tengan una resistencia adecuada, representan la fuente más abundante de agregados para hormigón debido a su estabilidad química. Las rocas calcáreas también son ampliamente utilizadas como agregados en el hormigón. Según lo expresado por Duque (2016), las rocas sedimentarias más importantes por su abundancia son: la lutita (proviene de las arcillas y limos depositados en mares, lagos o lagunas), la arenisca (proviene de arenas en general cementadas con minerales como calcita, dolomita y cuarzo) y la caliza (rocas de naturaleza calcárea, de origen químico u orgánico). De acuerdo a Mehta y Monteiro (2006), algunas calizas y areniscas pueden tener menos de 100 Megapascales (MPa) de resistencia a la compresión y, por lo tanto, no son aptas para el uso en hormigones de alta resistencia. En comparación con las rocas ígneas, las rocas sedimentarias con frecuencia contienen impurezas que a veces condicionan su uso como agregado. Por ejemplo, la piedra caliza, la dolomita y la piedra arenisca pueden contener minerales de ópalo o arcilla, que afectan negativamente el comportamiento del agregado bajo ciertas condiciones de exposición.

### 2.1.3 Rocas metamórficas

Conforme a lo expuesto en la Norma ASTM C294 y por Mehta y Monteiro (2006), las rocas metamórficas son rocas ígneas o sedimentarias que han cambiado su textura original, estructura cristalina o composición mineralógica en respuesta a cambios en las condiciones físicas y químicas que ocurren dentro de la corteza terrestre después de la formación de la roca original. Las rocas son densas y pueden ser masivas, pero con mayor frecuencia son foliadas (laminadas o en capas) y tienden a romperse en partículas escamosas.

Según Duque (2016), algunas de las principales rocas metamórficas son: a partir de la lutita y conforme aumenta la presión y la temperatura: la pizarra; a partir de la arenisca (cuarzosa): la cuarcita; a partir de la caliza: el mármol; a partir del basalto (o rocas afines): la serpentina y la anfíbolita; a partir del granito: el ortogneis.

## 2.2 AGREGADOS

El hormigón de acuerdo a la Norma ASTM C125 es un material compuesto, que consiste esencialmente de un medio ligante, siendo los hormigones de cemento hidráulico formados por cemento hidráulico y agua, encontrándose los agregados embebidos dentro de dicho medio ligante.

Tanto Mehta y Monteiro (2006) como Alexander y Mindess (2010), aluden a que el agregado es relativamente barato y al no entrar en reacciones químicas complejas con agua ha sido visto como un relleno inerte en el hormigón, un relleno económico cuya función es otorgarle volumen. Sin embargo, estos autores explican que debido a la creciente conciencia del papel desempeñado por los agregados en la determinación de muchas propiedades importantes del hormigón, la visión tradicional del agregado como un relleno inerte está siendo seriamente cuestionada y esta visión ha evolucionado en cuanto a que cada material que compone al hormigón es importante como componente individual, con la interacción entre todos los materiales controlando la totalidad de las propiedades del hormigón.

Los agregados son formados por elementos minerales, arena y piedra de granulometría variable. Estos componentes son los que se encuentran en mayor cantidad en el hormigón, ocupando entre un 70%-80% de su volumen, razón por la cual las características de los agregados influyen en gran manera en las propiedades del hormigón. Numerosas investigaciones como Chan et al. (2003) y Quiroga y Fowler (2004) entre otros, han intentado determinar hasta qué punto la influencia de las propiedades de los agregados repercuten en las propiedades del estado fresco y endurecido del hormigón, sin embargo, al día de hoy es un tema en el que sigue existiendo falta de conocimiento y que se encuentra en un continuo proceso de estudio.

### 2.2.1 Definiciones de los agregados

La Norma ASTM C125 define al agregado como un material granular como por ejemplo arena, pedregullo, piedra triturada o escoria de alto horno, que es utilizado con un medio ligante para formar mortero y hormigón de cemento hidráulico. Según la norma que corresponda, los agregados se dividen en categorías. La norma previamente mencionada divide a los agregados en: agregado grueso, agregado fino, agregado pesado y agregado ligero. A continuación, se presentan las definiciones dadas por la mencionada norma:

El agregado grueso se define como el agregado que queda predominantemente retenido en el tamiz número (N°) 4 de 4,75 mm o como esa porción de agregado que queda retenida en el tamiz de 4,75 mm (N°4). El agregado fino se define como el agregado que pasa el tamiz de 9.5 mm y que casi pasa por completo el tamiz de 4,75 mm (N°4) y queda predominantemente retenido en el tamiz de 75 micrones ( $\mu\text{m}$ ) (N°200) o como esa porción de agregado que pasa el tamiz de 4,75 mm (N°4) y queda retenido en el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N°200). El agregado pesado se define como un agregado de alta densidad como por ejemplo: barita, magnetita, limonita, ilmenita, hierro o acero. El agregado ligero se define como un agregado de baja densidad utilizado para producir hormigón liviano, que incluye: piedra pómez, escoria, cenizas volcánicas, toba y diatomita; arcilla expandida o sinterizada, pizarra, pizarra de diatomeas, perlita, vermiculita o escoria; y productos finales de combustión de carbón o coque.

Se recurre a la definición de agregados dada por Rodríguez de Sensale (2005), en el curso de grado de "Materiales y Ensayos", dictado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República dado que no hay una norma UNIT que los defina propiamente. En el curso se toman las definiciones de agregados dadas por la Norma ASTM C125 mencionada previamente y también la brindada por la Norma IRAM 1569, que estipula que los agregados son materiales granulares resultantes de la desintegración natural o el desgaste de las rocas, o que se obtiene de la trituración de ellas, de escorias siderúrgicas o de otros materiales que permitan obtener partículas de forma y tamaño estables.

La Norma UNIT 1050 diferencia al agregado fino del grueso por su granulometría, entendiendo por agregado fino al agregado o fracción del agregado que pasa por el tamiz 4,75 mm y por agregado grueso al agregado que resulta retenido por el tamiz 7,1 mm, definidos de acuerdo a la Norma UNIT-NM 66:1998. Esta última define los términos empleados en la descripción de los constituyentes mineralógicos de los agregados naturales utilizados en el hormigón, brindando una clasificación según el tamaño de grano del agregado para rocas ígneas y metamórficas. Dentro de la clasificación, refiere a tamaño de grano fino cuando la mayoría de sus granos minerales tienen un tamaño inferior a 1 mm; medio cuando la mayoría de sus granos minerales tienen un tamaño comprendido entre 1 mm y 5 mm; gruesa cuando la mayoría de los granos minerales tienen un tamaño comprendido entre 5 mm y 30 mm y muy gruesa cuando la mayoría de los granos minerales tienen un tamaño superior a 30 mm. Por otra parte, en la Norma UNIT 82-51 se establecen límites dentro de los cuales debe mantenerse la granulometría de un agregado fino, para ser considerado apto para la elaboración de hormigones, sin necesidad de ensayos especiales. En la norma se brindan límites de porcentajes máximos y mínimos de las arenas retenidas en diferentes tamices (150  $\mu\text{m}$  - 300  $\mu\text{m}$  - 600  $\mu\text{m}$  - 1,19 mm - 2,38 mm - 4,76 mm), estableciendo de esta forma dos clases de agregados: clase I (recomendable para hormigón) y clase II (aceptable para hormigón). Las tablas brindadas en la norma, indican que para una clase II el agregado fino es aquel que como mucho queda el 9% retenido en el tamiz 4,76 mm y en la clase I es el agregado cuyo máximo porcentaje de retención en el mismo tamiz es del 5%.

El proyecto ANII se rigió con las especificaciones de granulometría para agregados finos para hormigón indicadas en la Norma UNIT 82-51, en la cual se establecen límites (clase I: recomendable para hormigones y clase II: aceptable para hormigones) dentro de los que se debe de mantener la granulometría de un agregado fino para ser considerado apto para la elaboración de hormigón sin necesidad de realizar ensayos especiales. Estos límites son los empleados en esta Tesis a la hora de realizar los ensayos de granulometría de los agregados con el fin de determinar si dichos

agregados pueden ser empleados para realizar los micro-hormigones en los ensayos experimentales.

Autores como Jiménez et al. (2000), dividen a los agregados en agregado fino, agregado grueso y polvo o finos. Definen a la grava o agregado grueso como la fracción mayor de 4 mm y a la arena o agregado fino como la fracción menor de 4 mm. Para los autores, la arena suele dividirse a partir de los 2 mm en arena gruesa y arena fina, llamándose polvo o finos de la arena a la fracción inferior a 0,063 mm. De acuerdo a los autores, la arena es el agregado de mayor responsabilidad. A diferencia de la grava, el agua e incluso el cemento, puede decirse que no es posible hacer un buen hormigón sin una buena arena.

Esta tesis se remite a la influencia de los agregados finos en las características mecánicas del micro-hormigón de alto desempeño, por lo que se centrará en las características de estos agregados y su influencia en los hormigones, morteros, micro-hormigón y micro-hormigón de alto desempeño.

### **2.2.2 Clasificación de los agregados**

Existen distintos tipos de agregados que permiten elaborar hormigones con diferentes características deseadas. Estos agregados pueden obtenerse de diversas formas y sufrir diferentes procesos de transformación para alcanzar los requerimientos necesarios para la elaboración del hormigón. Para Chan et al. (2003), los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, pudiendo variar sus características durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Estos procesos a los que aluden los autores, pueden influir de diversas maneras en las características del hormigón.

La Norma UNE-EN 12518 define a los agregados como materiales utilizados en la construcción y los clasifica en naturales, artificiales o reciclados. El agregado natural es definido como un agregado de origen mineral que únicamente ha sido sometido a un proceso mecánico. El agregado artificial es definido como un agregado de origen mineral resultante de un proceso industrial que comprende una modificación térmica o de otro tipo y el agregado reciclado es definido como el agregado resultante del tratamiento de material inorgánico previamente empleado en la construcción.

Por otro lado, la Norma ASTM C294 refiere a agregados naturales minerales y a los agregados artificiales, definiendo a los naturales como agregados compuestos por rocas y minerales y a los agregados artificiales como los agregados resultantes de la reconstitución de materiales naturales mediante procesos distintos a los físicos como trituración y cribado, o producto del procesamiento físico o mecánico de materiales artificiales preexistentes para producir agregados para el nuevo trabajo.

Mehta y Monteiro (2006) expresan que, en su mayor parte, los agregados del hormigón se componen de arena, grava y roca triturada derivados de fuentes naturales, y por lo tanto se los denomina agregados minerales naturales. Por otro lado, los materiales procesados térmicamente son llamados agregados sintéticos. Los agregados hechos de subproductos industriales como por ejemplo escoria de alto horno y cenizas volantes también pertenecen a esta categoría. Los desechos municipales y el hormigón reciclado de los edificios y pavimentos demolidos también se han investigado para su uso como agregados. Alexander y Mindess (2010) refieren a que los agregados naturales son materiales compuestos por fragmentos de roca, derivados de fuentes

geológicas naturales que son procesados con el fin de producir materiales granulares duros, no cohesivos y de diferentes tamaños que pueden ser incorporados en el hormigón.

Los agregados pueden emplearse en su estado natural, requiriendo de un procesamiento mínimo por lo que son empleados directamente de su fuente de origen, como por ejemplo las gravas y las arenas que constituyen una fuente importante de agregados naturales. Los agregados en estado natural pueden obtenerse de depósitos terrestres o marinos de origen natural como pozos de grava, ríos y cursos fluviales, riberas, playas, dunas de arena y otros depósitos que proporcionan materiales granulares. Los agregados en su estado natural también pueden sufrir procesos de manufacturación como trituración, cribado, lavado y dimensionado, como por ejemplo gravas trituradas o sin triturar, piedra triturada producida mediante la trituración artificial de rocas, cantos rodados y arena. Muchos agregados naturales son obtenidos de canteras de roca dura que requieren explosiones y trituración para producir los materiales deseados (Chan et al., 2003; Alexander y Mindess, 2010).

La Norma UNIT 1050, plantea que como agregados para la fabricación de hormigones, se puede emplear arenas y gravas existentes en yacimientos naturales, rocas trituradas u otros productos cuyo empleo resulte aconsejable como consecuencia de estudios realizados en laboratorio. Los agregados deben ser químicamente inertes frente al cemento y no deben descomponerse por los agentes exteriores a los que estarán sometidos. No deben emplearse agregados como los que proceden de rocas blandas, friables y porosas, ni los que contengan nódulos de yeso, compuestos ferrosos y sulfuros oxidables.

En función de lo anteriormente dicho, se propone a efectos de esta tesis distinguir a los agregados de la siguiente forma:

- Agregados naturales: agregados empleados directamente de la fuente de origen, o que han sufrido procesos mínimos de transformación.
- Agregados naturales manufacturados: agregados naturales que han sufrido procesos de manufacturación al someterlos a procesos de tipo mecánico.
- Agregado artificial o sintético: agregado natural o manufacturado sometido a modificaciones térmicas.
- Agregado reciclado: agregado producto del tratamiento de material inorgánico previamente empleado en la construcción.

Al centrarse este trabajo en los agregados finos de tipo natural y natural manufacturado, se propone continuar en esa línea con la revisión bibliográfica, pudiendo eventualmente mencionar a los otros tipos de agregados.

### **2.2.2.1 Agregados naturales y agregados naturales manufacturados**

El agregado puede provenir de medios naturales y emplearse directamente de la fuente de procedencia o puede provenir de la modificación mecánica del agregado natural por ejemplo mediante procesos de trituración. Las propiedades y calidad de los materiales varían en función del

origen, desgaste, transporte y procesamiento e influirán en la mezcla de los hormigones de diferentes maneras. Los agregados naturales presentan formas más redondeadas y superficies más suaves, producto de la meteorización al entrar en contacto con agentes atmosféricos. El fenómeno de meteorización no solo redondea las partículas de los agregados y cambia sus proporciones sino que además elimina la mayoría de los minerales débiles. Por otra parte, la forma del agregado fino triturado es a menudo más angular y con superficies más rugosas que los agregados finos naturales (Westerholm et al., 2007); según los autores, cuando la roca es obtenida por explosión y procesada, se producen cantidades excesivas de finos, lo que resulta en un agregado fino con mayores cantidades de finos. Quiroga y Fowler (2004), argumentan que la producción de arenas manufacturadas presenta un mayor contenido de microfinos (material que pasa el tamiz N°200 o 0.075 mm) en comparación con las arenas naturales. Dichas arenas presentan entre un 10%-20% de microfinos mientras que el límite impuesto por la ASTM C33 para arenas naturales es de un 7%. Sin embargo, se ha demostrado que podrían llegar a tenerse arenas manufacturadas con cantidades de microfinos de hasta un 20% sin producir un efecto negativo sobre la calidad del hormigón. En otros países, se permiten inclusive límites más altos con respecto al contenido de microfinos que el establecido por la ASTM C33. De acuerdo con Jiménez et al. (2000), al emplear agregado rodado suelto se tiene la garantía de que se trata de piedras duras y limpias, salvo que exista contaminación del lugar de donde se extrae el agregado. Análogamente, el agregado triturado debe estar provisto del polvo de trituración, que supone un incremento de finos en el hormigón y por consiguiente una mayor cantidad de agua de amasado, menor resistencia y mayor riesgo de fisuras en las primeras edades. Sin embargo, por otra parte los autores expresan que los agregados de trituración proporcionan una mayor trabazón que se refleja en una mayor resistencia del hormigón, especialmente a tracción y en general en una mayor resistencia química.

Debido a su forma y contenido de finos, el hormigón con agregado triturado a menudo presenta una mayor demanda de agua y menor trabajabilidad que el correspondiente hormigón con agregado natural (Westerholm et al., 2007). Según Jiménez et al. (2000), los agregados naturales proporcionan hormigones más dóciles y trabajables, requiriendo menor cantidad de agua que los agregados naturales triturados. Por su parte, los agregados triturados confieren al hormigón fresco una cierta acritud que dificulta su puesta en obra. En ambos casos influye más la arena que la grava.

Hoy en día cada vez más se emplean los agregados finos triturados, dejando de lado la noción de que su calidad es pobre en comparación con los agregados finos no triturados. Alexander y Mindess (2010) expresan que los agregados finos triturados pueden ser manufacturados satisfactoriamente en plantas de trituración modernas y hay ciertas ventajas de emplear arenas trituradas manufacturadas bajo condiciones modernas de control como: la producción de partículas con formas equivalentes o inclusive superiores a las de los agregados naturales; la producción de clasificaciones uniformes mejores que las obtenidas provenientes de depósitos naturales donde puede existir variación de tamaños, dependiendo del estrato del depósito que esté siendo explotado en un momento determinado; la producción de agregados con menor cantidad de contaminación con arcillas y sustancias orgánicas en comparación con los agregados naturales, permitiendo esto un mayor contenido de finos en las especificaciones de los agregados triturados. Los autores señalan que las arenas de trituración producidas de manera apropiada, con sus propiedades controladas, pueden tener requerimientos de agua en el hormigón comparables o inclusive menores que las arenas naturales. A pesar de poder ser usados por sí solos, los agregados finos triturados frecuentemente son mezclados con arenas naturales debido a las siguientes razones: mejorar la forma del material triturado en caso que esta no sea la ideal mediante el mezclado con una arena

natural de mejor forma para mejorar la calidad de la arena y obtener menores requerimientos de agua; lograr graduaciones deseadas que solamente con arenas trituradas no serían fáciles de lograr; mejora de la economía de la mezcla siempre que una de las fuentes sea significativamente más barata.

De acuerdo a lo anteriormente expresado, es viable utilizar tanto agregados naturales como agregados naturales manufacturados en la ejecución del hormigón y obtener buenos resultados. Jiménez et al. (2000) explican que para la confección del hormigón pueden emplearse tanto arenas y gravas naturales como elementos procedentes de la trituración, que reúnan las características de resistencia y durabilidad que se le exigen al hormigón. Para hormigones de durabilidad en medios agresivos, se debe de optar por agregados de tipo silíceo (gravas y arenas de río o cantera) y los que provienen de trituración de rocas volcánicas (basalto, andesita, etc.) o de calizas sólidas y densas. Por otra parte, las rocas sedimentarias en general (calizas, dolomitas, etc.) y las volcánicas sueltas (pómez, toba, etc.) deben ser objeto de análisis previo. No deben emplearse agregados que provengan de calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas friables ni porosas ni tampoco deben de emplearse agregados que contengan sulfuros oxidables, dado el riesgo existente de que dichos sulfuros se oxiden a largo plazo, lo que conlleva a un aumento de volumen y en consecuencia a la fisuración y cuarteamiento del hormigón. Las mejores arenas son las de río, ya que salvo excepciones son cuarzo puro por lo que no se debe de preocupar por su resistencia y durabilidad. La arena de mina suele tener arcilla en exceso, por lo que es preciso en general lavarla. Las arenas de mar, si son limpias pueden emplearse en hormigón armado, previo lavado con agua dulce. Las arenas que provienen de la trituración de granitos, basaltos y rocas análogas son muy buenas siempre y cuando sean rocas sanas que no tengan principio de descomposición. No deben de emplearse arenas de naturaleza granítica alterada (caolinización de los feldespatos). Las arenas de procedencia caliza son de calidad muy variable, resultan más absorbentes y requieren mayor cantidad de agua en comparación a las silíceas, por lo que la resistencia al desgaste de las arenas de procedencia caliza es baja, haciendo que resulte conveniente confeccionar ciertos hormigones como por ejemplo los de pavimentos con arena silícea, empleando al menos un porcentaje de este tipo de arena en el contenido total de la arena.

### 2.2.3 Fuentes de obtención de agregados

Los agregados son obtenidos de diversas fuentes para luego ser empleados de forma natural o sufrir procesos de transformación. A continuación se detallan las diversas fuentes de las cuales es posible obtener agregados según la descripción realizada por Alexander y Mindess (2010):

- **Pozos o terrazas (minería a cielo abierto):** el material puede ser excavado de pozos o terrazas y procesado para producir agregados, mientras que en algunos depósitos naturales de agregados que contienen gravas y arenas, el material puede ser empleado en hormigones con poca necesidad de ser procesado previamente. El desgaste físico y químico de las rocas puede producir grandes cantidades de material granular que puede ser utilizado como agregado en el hormigón: material residual de la roca madre o material transportado que fue movido sobre la superficie de la tierra y luego depositado por la acción del hielo, agua o viento. Algunas de estas fuentes pueden producir agregados finos o gruesos o ambos. Por ejemplo, arenas de granitos degradados pueden tener formas de partículas y texturas superficiales poco ideales y pueden tener un alto porcentaje de

absorción. Por otro lado, las gravas de terrazas producto de procesos aluviales naturales tenderán a tener formas redondeadas y texturas lisas.

- **Ríos:** durante el transporte en el río, los fragmentos de rocas sufrirán mayor desgaste, serán moldeados y reducidos en tamaño. Es por esto que en general la mayor parte de los agregados de río son bien formados, redondeados y lisos. En casos donde los ríos presentan cursos erráticos o flujos consistentes, distintos tamaños de partículas tienden a ser transportados y depositados, pudiendo esto hacer que sea necesario mezclar los materiales para obtener consistencia y uniformidad y mejorar la clasificación. En general los agregados de río tendrán un menor requerimiento de agua en el hormigón debido a su forma y textura superficial superior pero este requerimiento de agua puede verse aumentado debido a la clasificación pobre y al tipo de material fino absorbente.
- **Depósitos de playa:** los materiales de las playas se encuentran bajo la influencia de la acción de olas y mareas. Al ser transportados, generalmente tienen texturas relativamente lisas y buena forma de las partículas. La mayor deficiencia de la arena de playa es la clasificación pobre, siendo esto resultado de la acción de las olas. Frecuentemente solo uno o dos tamaños de partículas están presentes con escasez o ausencia de material fino. En consecuencia, estos materiales, particularmente las arenas deben ser mezcladas con otros agregados para mejorar la graduación y proporcionar finos adecuados para tener cohesión en la mezcla de hormigón.
- **Depósitos de dunas:** las arenas de dunas pueden encontrarse adyacentes a la costa o en áreas secas tipo desérticas. Las partículas en las dunas tienden a ser similares en cuanto a forma, densidad relativa y composición mineral. Las arenas provenientes de dunas tienen formas bien redondeadas pero presentan graduación pobre, con partículas que tienden a concentrarse en los rangos de tamaño de 0,1-1,0 mm. Estas arenas suelen caracterizarse por una severa deficiencia de finos, resultando en hormigones con falta de cohesión y con tendencia a la exudación en exceso. Debido a esto, estas arenas se benefician de ser mezcladas con otras arenas para mejorar la deficiencia de graduación.
- **Fuentes de dragado:** la mayor parte del dragado es de fuentes marinas. Los agregados marinos en general son de textura lisa y forma redondeada y debido a su forma de extracción son relativamente libres de polvo, arcillas y limos. Difieren de fuentes terrestres principalmente con respecto a la presencia de conchas marinas y sal.
- **Canteras de roca dura:** es posible producir tanto agregados gruesos como finos. Las propiedades y calidad del material dependerán de factores como la naturaleza de la roca madre, el grado de desgaste, los métodos de extracción y la trituración y el procesamiento de la roca.

Como se puede ver en el esquema de la tabla 2.1, la fuente y producción de los agregados finos hace que estos posean distintas características.

Fuente	Tipo de agregado producido	Influencia de fuente y producción en propiedades de agregados		
	Arena	Forma de la partícula	Textura superficial	Graduación
Pozo	sí	Redondeada a angular	Lisa a áspera	Graduada
Dunas	sí	Redondeada	Lisa	Único tamaño
Río o playa	sí	Redondeada	Lisa	Graduada a único tamaño
Cantera de roca	sí	Angular	En general áspera	Graduada

**Tabla 2.1** – Características de los agregados finos de acuerdo a su fuente de procedencia y producción (Dr. RodRankine apud Alexander y Mindess, 2010).

## 2.3 MORTEROS Y MICRO-HORMIGÓN

A lo largo de los años diversos materiales de la construcción han evolucionado en sus componentes hasta registrar las mejoras que al día de hoy conocemos y generar nuevos productos. El micro-hormigón de alto desempeño es producto de la evolución de los morteros y micro-hormigones, tal como se menciona en el punto 1.1 Introducción; el micro-hormigón puede ser considerado un mortero debido a que la base de ambas composiciones es la misma.

### 2.3.1 Definiciones

La Norma UNIT-ISO 679 que trata los métodos de ensayo de cementos y la determinación de resistencias mecánicas se refiere a los morteros como mezclas de arena, cemento y agua. Dicha base es la que también forma parte de la composición de los micro-hormigones de alto desempeño.

El mortero en su evolución ha ido adecuándose a diversas prestaciones a través de su uso y adaptación de sus componentes como la aparición del mortero armado y de nuevos conceptos emparentados con el de mortero armado como por ejemplo micro-hormigón, micro-hormigón armado y micro-hormigón de alto rendimiento.

En palabras de Lima et al. (2016), el mortero armado se ha convertido en una opción interesante gracias a su versatilidad y la agilidad que propicia en la realización. Una reseña cronológica realizada por estos autores ubica en 1856 al material denominado “ferciment” desarrollado por Joseph Louis Lambot y al denominado “ferro-cemento” por el ingeniero italiano Pier Luigi Nervi, como el puntapié inicial del mortero armado, que llega a Brasil en 1950 y alcanza en el inicio de los años 90 perspectiva en dicho país bajo el nombre de “argamassa armada”. Según los autores, el mortero armado es un sistema constructivo apuntado como una especie de micro-hormigón armado, formado por la combinación de mortero que es cemento, arena y agua, con un armazón de acero formado por hilos de fino espesor con pequeños espacios entre ellos, o sea, malla soldada.

Ejemplo de normas que definen al mortero armado son la ACI 549R de la ACI (American Concrete Institute), que define el ferrocemento (mortero armado) como un tipo de pared fina de hormigón armado, generalmente construido de mortero de cemento reforzado con capas de telas continuas y con malla relativamente pequeña de alambre, que puede ser de metal u otros materiales y también la norma de la Asociación Brasileña de Normas Técnicas (ABNT) NBR 11.173, que define al mortero armado como pieza de pequeño espesor (aquella en que esta dimensión no sobrepase el valor

convencional de 40 mm), compuesta de mortero y armadura de pantallas de acero de mallas de apertura limitada, distribuida en toda la sección transversal.

De acuerdo con la definición de mortero armado dada por Lima et al. (2016) y mencionada previamente, donde refiere a que dicho material es una especie de micro-hormigón armado, Fonseca (2017), define al micro-hormigón armado como un ferrocemento industrializado, resultante de la asociación de un micro-hormigón estructural (cemento, arena y agua), con una armadura de acero, constituida por hilos de pequeño diámetro y poco espaciados entre sí, con la eventual incorporación de fibras discontinuas. Dicho autor señala que el micro-hormigón armado desarrollado en Brasil, a lo largo de casi seis décadas, a diferencia de la tecnología asimilada y desarrollada simultáneamente en otros países, tiende a ser un ferrocemento de alto desempeño, sea por las características de elevado rendimiento estructural y durabilidad que pueden alcanzarse, sea por la posibilidad económica de su aplicación, particularmente para la construcción industrializada ligera. Por medio del análisis de los resultados de ensayos realizados en el Laboratorio de Concreto del IPT-Instituto de Investigaciones Tecnológicas del Estado de São Paulo, entre los años 1997 y 2002, fue posible comprobar la estrecha relación existente entre lo que hoy se ha convenido llamar hormigón de alto desempeño y el mortero armado.

## **2.4 MICRO-HORMIGONES DE ALTO DESEMPEÑO**

### **2.4.1 Definiciones**

El desarrollo del micro-hormigón de alto rendimiento, sucesor del mortero armado, basado en el incremento de la calidad de la matriz cementicia, permite vislumbrar diversas contribuciones técnicas, económicas, sociales y ambientales derivadas de su utilización (Fonseca, 2017).

Según la definición dada por Rodríguez de Sensale et al. (2012), el MHAD es un material cementicio que cumple requisitos especiales de desempeño y uniformidad que no siempre pueden ser alcanzados usando sólo materiales convencionales y prácticas normales de mezclado, colocación y curado. De acuerdo con Fonseca (2002) apud Rodríguez de Sensale et al. (2012), se diferencia de los hormigones convencionales por no utilizarse en su composición agregados gruesos, siendo esa la razón de su nombre, y su carácter de alto desempeño refiere a que excede en sus prestaciones al micro-hormigón convencional. Siguiendo esta misma línea Silva et al. (2018), definen al MHAD como un material que tiene una dimensión máxima de agregado reducido y baja relación agua/aglomerante ( $a/aglm$ ), mientras que la expresión alto desempeño se refiere a la calidad de la matriz, que proporciona elevada resistencia mecánica y baja porosidad al hormigón. Según Chunsheng (2014) apud Silva et al. (2018), la principal característica que diferencia el micro-hormigón del hormigón convencional es la presencia de agregado grueso; el micro-hormigón no tiene agregado grueso.

El MHAD presenta ventajas en comparación con hormigones convencionales como las señaladas por Rodríguez de Sensale et al. (2012): alcanza resistencias a compresión superiores a las habituales, mayor durabilidad relacionada con una menor permeabilidad, mayor libertad de forma de las piezas construidas y piezas de espesores reducidos, gran facilidad de colocación y reducción del peso de las estructuras, de los tiempos de construcción y de los costos directos e indirectos de obra. Otra ventaja que explica Fonseca (2017) es que el MHAD presenta entre sus propiedades

potenciales un campo de aplicación asociado a las estructuras de elementos delgados, donde el pequeño espesor (20 a 30 mm en promedio) es su característica más evidente.

Según reseña realizada por Fonseca (2005), en la década del 80 las estructuras de hormigón armado evolucionaron hacia mayores resistencias mecánicas, haciendo que hoy en día, resistencias de entre 60 y 80 MPa sean fáciles de obtener, pudiendo alcanzar valores superiores a los 80 y 100 MPa gracias a dosificaciones más elaboradas y el empleo de adiciones como el de humo de sílice. Hasta entonces los aditivos fluidificantes eran usados para hormigones convencionales solamente con la finalidad de mejorar sus características de trabajabilidad pero fue con el avance en el desarrollo de los aditivos químicos para hormigón, especialmente con la introducción de los llamados superplastificantes, que se hizo posible reducir drásticamente la relación agua/cemento ( $a/c$ ) o  $a/aglm$  y se pudieron percibir otras propiedades que podían alcanzarse. Tales propiedades refieren a mejoras en tanto una menor permeabilidad, mayor resistencia a la abrasión, mayor durabilidad y mejoras en las características de la matriz original de mortero, permitiendo reducciones importantes del factor  $a/c$  y del consumo de cemento, con el mantenimiento de la consistencia, con ganancias significativas de resistencia y por lo tanto, con perspectivas de economía y aumento de la vida útil para los elementos de micro-hormigón.

Según Aitcin (1998), un hormigón de alto desempeño (HAD) puede definirse esencialmente como un hormigón con una relación  $a/aglm$  baja, con la adición de humo de sílice u otro material cementicio suplementario (por lo que la expresión factor  $a/c$  se sustituye por la expresión factor  $a/aglm$ , considerando aglomerante el cemento más la adición en polvo), aditivos generalmente líquidos y añadidos a la mezcla en pequeñas proporciones (los cuales no deben ser confundidos con adiciones, generalmente presentadas en polvo) y con un valor de 0,40 como el sugerido como frontera entre hormigones usuales y los hormigones de alto desempeño. La tabla 2.2 contiene la clasificación en la cual el autor divide al HAD en cinco categorías:

<b>Clase de hormigón de alto desempeño</b>	<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
Resistencia a compresión (Mpa)	50	75	100	125	150

**Tabla 2.2** – Clasificación para el hormigón de alto desempeño (Aitcin, 1998).

Fonseca (2017), señala que un micro-hormigón a semejanza de un hormigón de alto desempeño, puede ser definido como un hormigón con una baja relación  $a/aglm$  (cemento más adiciones en polvo de sílice activa o metacaolin, por ejemplo), posible gracias al empleo de superplastificantes que actúan como aditivos reductores de agua. La disminución en el consumo de cemento, la mejora en la consistencia y el incremento de la resistencia y durabilidad llevan a una economía en la producción de componentes producidos con micro-hormigón, contribuyendo además para que se busquen las metas de sostenibilidad requeridas para los productos a base de cemento. La incorporación simultánea de aditivo superplastificante y sílice activa (del orden del 10% en relación a la masa de cemento) no sólo implican mejoras significativas en la resistencia, pero también conduce a una reducción de la porosidad.

En función de todo lo anteriormente expresado, se observa que los MHAD en su composición no contienen agregado grueso, conformándose su base por cemento pórtland, agregado fino, agua y aditivo superplastificante, pudiendo eventualmente incorporar adiciones y también fibras. Los MHAD presentan bajas relaciones  $a/c$  o  $a/aglm$ .

El Proyecto de Investigación y Desarrollo del Programa FMV de la ANII FMV 2009-1-2717, llevado adelante por Rodríguez de Sensale et al. (2012), estudió el desarrollo y la aplicación de MHAD con materiales y técnicas locales. Dicho proyecto de investigación fue realizado con el fin de presentar aspectos vinculados al MHAD como la selección de materiales y el desarrollo de un método de dosificación de MHAD, con el fin de aplicarlo a los materiales disponibles en nuestro medio. Fueron los parámetros del proyecto previamente mencionados los que se tomaron como base para la realización de este trabajo de investigación.

En el Proyecto ANII FMV 2009-1-2717, las dosificaciones empleadas para la producción de MHAD fueron las que se presentan a continuación en la tabla 2.3, tomando de referencia para la realización de este trabajo la dosificación llamada "Nivel Medio-rico", punto de partida de los ensayos experimentales, al igual que la consistencia especificada en dicho proyecto que fue de 280 mm a 240 mm ( $26\pm 2$ ) centímetros (cm) y que es la que se toma como premisa a efectos realizar los ensayos experimentales de consistencia de los micro-hormigones en estado fresco en este trabajo.

Nivel	Relación arena/cemento	Relación agua/cemento	Cemento portland (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
Pobre	3,5	0,60	471	1647	280	2
Medio-pobre	3	0,50	536	1608	266	2
Medio	2,5	0,42	611	1531	253	5
Medio-rico	2	0,36	707	1413	252	3
Rico	1,5	0,30	856	1286	255	3

**Tabla 2.3** – Dosificaciones consideradas para la producción de MHAD (Rodríguez de Sensale et al., 2012).

La elección de la muestra media-rica responde a la eficiencia mostrada por dicha muestra tanto en el Proyecto ANII FMV 2009-1-2717 como en la investigación experimental llevada a cabo por Rodríguez de Sensale et al. (2015) y presentada en IV Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante. La tabla 2.4 muestra las resistencias a la compresión ( $f_c$ ) obtenidas para las diferentes muestras del Proyecto ANII, siendo el nivel medio-rico la segunda dosificación con mayor resistencia a los 7 y 28 días.

Nivel	Relación arena/cemento	Relación agua/cemento	$f_c$ 7 días (MPa)	$f_c$ 28 días (MPa)
Pobre	3,5	0,60	10,32	22,64
Medio-pobre	3	0,50	20,43	33,32
Medio	2,5	0,42	29,74	45,77
Medio-rico	2	0,36	50,67	58,74
Rico	1,5	0,30	71,02	98,92

**Tabla 2.4** – Resistencias a la compresión a los 7 y 28 días de las dosificaciones consideradas para la producción de MHAD (Rodríguez de Sensale et al., 2012).

El trabajo experimental llevado adelante por Rodríguez de Sensale et al. (2015), estudia el micro-hormigón autocompactante de alto desempeño (MHAC) a través de ensayos realizados en estado fresco y endurecido. Se emplean para este estudio 10 mezclas en total: dos de las dosificaciones son las habitualmente empleadas para realizar micro-hormigones en Uruguay y las otras tres correspondientes a micro-hormigones autocompactantes de alto desempeño (en estas últimas tres

se encuentra la dosificación media-rica empleada en el Proyecto ANII para micro-hormigones de alto desempeño, presentada como MHAC2). Las cinco mezclas son estudiadas tanto con la incorporación de fibras de polipropileno como también sin ellas. Las tablas 2.5 y 2.6 presentan la dosificación básica de los micro-hormigones estudiados y los resultados obtenidos de resistencia a la compresión respectivamente.

Denominación	Relación arena/cemento	Relación agua/cemento	Cemento portland (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
MH1	3,5	0,60	471	1647	280	2
MH2	3	0,50	536	1608	266	2,25
MHAC1	2,5	0,42	611	1531	253	2,5
MHAC2	2	0,36	707	1413	252	3
MHAC3	1,5	0,30	856	1286	255	3

**Tabla 2.5** – Dosificación básica de los micro-hormigones estudiados (Rodríguez de Sensale et al., 2015).

Tal como se mencionó, la muestra media-rica empleada en el Proyecto ANII corresponde a la denominada MHAC2.

	fc (Mpa)				fc (kg/m <sup>2</sup> ) / cont. CP (kg/m <sup>3</sup> )			
	7 días		28 días		7 días		28 días	
	Sin Fibras	Con Fibras	Sin Fibras	Con Fibras	Sin Fibras	Con Fibras	Sin Fibras	Con Fibras
MH1	18,45	19,13	30,06	28,76	0,39	0,41	0,64	0,61
MH2	25,42	31,30	33,74	38,30	0,47	0,58	0,63	0,71
MHAC1	36,32	34,20	52	52,50	0,59	0,56	0,85	0,86
MHAC2	53,7	52,00	65,8	70,10	0,76	0,74	0,93	0,99
MHAC3	61,9	43,40	77,7	79,10	0,72	0,51	0,91	0,92

**Tabla 2.6** – Resistencia a compresión y eficiencia de los micro-hormigones estudiados (Rodríguez de Sensale et al., 2015).

De la tabla 2.6 se observa que la dosificación MHAC2 es la más eficiente teniendo en cuenta la razón entre la resistencia y el contenido de cemento de las diferentes mezclas estudiadas.

En función de todo lo anteriormente expresado es que se justifica la elección de la muestra “media-rica” como dosificación a emplear durante la etapa experimental de esta tesis.

El Proyecto ANII detalla los materiales empleados y sus características dado que la elección de los componentes resulta de suma importancia para la producción de MHAD. A raíz de que este trabajo de investigación analiza la influencia de los agregados finos en los MHAD es que se toman como referencia las especificaciones que fueron dadas en el proyecto para los agregados. En palabras de Rodríguez de Sensale et al. (2012), la elección de los agregados en el MHAD es un asunto crítico conforme la resistencia a la compresión aumenta y el MHAD debe tener una buena graduación granulométrica de componentes, por lo que al dosificarlo se debe estudiar cuál es la granulometría óptima de arenas (mediante combinación de arenas gruesas y finas). Tal como ya fue mencionado en el punto 2.2.1, el proyecto ANII se rigió con las especificaciones de granulometría para agregados finos destinados a hormigón indicadas en la Norma UNIT 82-51, en la cual se establecen límites dentro de los que se debe mantener su granulometría para ser considerados aptos para ese empleo sin necesidad de realizar otros ensayos especiales. En esta Tesis dichos límites son los empleados luego de realizar los ensayos de granulometría de los agregados para determinar si dichos

agregados pueden ser empleados para realizar los micro-hormigones en los ensayos experimentales.

Rodríguez de Sensale et al. (2012), refieren a que es necesario optimizar el esqueleto granular del MHAD (esqueleto granular definido como la mezcla de todos los agregados presentes en el hormigón) al no contener el micro-hormigón agregado grueso, encontrando la proporción arena fina /arena gruesa considerada óptima cuando la mezcla presenta el mínimo contenido de vacíos posible y entendiendo que el mínimo contenido de vacíos previamente mencionado genera una mejor trabajabilidad y desempeño en cuanto a durabilidad, la que colabora para alcanzar las prestaciones requeridas para los MHAD. En función de esto, en el proyecto se da la pauta que las arenas que se empleen en la fabricación de MHAD, podrán ser arenas gruesas, con un módulo de finura en el rango de 2,70 y 3,0. La arena empleada en las dosificaciones presentadas en la tabla 2.5 del Proyecto ANII consistió en agregado fino seco, compuesto por 90% de arena gruesa y 10% de arena fina al haber optimizado el esqueleto granular, con un módulo de finura igual a 2,92 y tamaño máximo de 4,75 mm. En este trabajo de investigación, se analizan muestras de arena de distintas procedencias con el fin de determinar si existe en plaza alguna muestra cuyas características la hagan óptima para realizar MHAD, sin necesidad de adaptar su esqueleto granular.

Las características de los agregados finos influyen en hormigones y morteros. En relación a la influencia de los agregados finos en los MHAD, tema de esta tesis, no se dispone de artículos o publicaciones especializados por lo que un estudio específico puede ser de utilidad. Por la definición de micro-hormigón dada al inicio de esta sección, los micro-hormigones no contienen agregados gruesos por lo que son como morteros, de allí que los MHAD son como morteros con prestaciones superiores a los morteros convencionales. Por lo tanto, los resultados de esta tesis pueden servir para visualizar si lo publicado para morteros es válido para el caso de los MHAD.

#### **2.4.2 Características de los agregados finos que influyen en las propiedades de los micro-hormigones**

Se han llevado a cabo investigaciones acerca del efecto que producen las propiedades de la arena en el mortero en su estado fresco y endurecido. En función de la definición de MHAD y lo expresado en el punto 2.4.1 se puede expresar que hay propiedades inherentes a los agregados finos que afectan tanto a micro-hormigones como a morteros y a hormigones. En esta sección se abordarán dichas propiedades, señaladas como comunes a los tres tipos de materiales.

La composición mineralógica, la dureza, la distribución del tamaño de partícula, la forma y la textura de la superficie de los agregados finos son propiedades que afectan el comportamiento de los morteros en estado fresco y endurecido e influyen en las propiedades mecánicas y reológicas de los morteros (Neville, 2011). Siguiendo lo anteriormente expresado, Abu Seif (2013) señala que la distribución del tamaño del grano, la tenacidad, la forma, la textura de la superficie, las impurezas químicas y la composición mineralógica del agregado fino son propiedades que controlan el comportamiento del mortero fresco y endurecido. Para Cortes et al. (2008), algunas propiedades de la arena como la distribución del tamaño de grano, la equivalencia de arena, durabilidad, impurezas orgánicas, módulo de finura y reactividad afectan a los hormigones. Gillott (1980) apud Abu Seif (2013), indica que las propiedades mecánicas del mortero se ven afectadas por factores como la textura y la solidez de la roca. Según explican Haach et al. (2011) y también Westerholm et al.

(2007), el contenido de finos influye en la viscosidad del mortero dado que la viscosidad puede aumentar debido al aumento en la superficie total de los agregados finos.

De acuerdo con las afirmaciones anteriormente expresadas, se entiende que las propiedades de agregados finos que resultan comunes tanto a hormigones, micro-hormigones y morteros y que serán las abordadas en los siguientes puntos son: mineralogía, forma, textura, granulometría/clasificación/tamaño máximo del agregado/ distribución del tamaño del agregado (se listan juntas estas propiedades dado que se vinculan entre sí), absorción/permeabilidad y densidad.

#### **2.4.2.1 Mineralogía del agregado**

La mineralogía influye en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión del hormigón (Järvenpää, 2001), por lo que influye tanto en las propiedades del estado plástico como endurecido del hormigón. Mehta y Monteiro (2006) expresan que la mineralogía puede afectar la resistencia del hormigón de diferentes formas, dado que en condiciones idénticas, la sustitución de agregados silíceos por agregados calcáreos da como resultado una mejora sustancial en la resistencia del hormigón. Quiroga y Fowler (2004) aluden a que el tipo de agregado afecta la resistencia, la dureza y las deformaciones a largo plazo del hormigón endurecido.

Distintos tipos de agregados pueden ser empleados en los hormigones, siendo los resultados diferentes en cada caso. Cada tipo de agregado tiene características únicas que aportará ciertas características a la mezcla, no será lo mismo por ejemplo el empleo de un agregado basáltico al empleo de un agregado granítico. Santos y Piovesan (2014) expresan que tanto el basalto como el granito son agregados que ofrecen buena resistencia para la conformación de hormigones, sin embargo en hormigones de altas prestaciones como los HAD las propiedades de los agregados cobran mayor importancia por lo que se debe saber qué agregados conviene más utilizar para cumplir con los requerimientos de dichos hormigones.

De acuerdo con Mehta y Monteiro (2006), el basalto es un buen agregado que posee granulación fina y es resistente. Por otro lado el granito es un excelente agregado ya que posee granulación media a gruesa, es resistente, produce partículas equidimensionales en la trituración y presenta baja absorción. Santos y Piovesan (2014) estudiaron el basalto y el granito como agregados gruesos de granulometrías diferentes en la producción de HAD para determinar cuál de los agregados presentaba mejores características mecánicas en la producción de HAD. A efectos de la presente tesis donde se estudian agregados finos, el trabajo de las autoras realizado con agregados gruesos sirve de ejemplo para mostrar que agregados con distintas características mineralógicas influirán de diferente forma en las características de los hormigones que los componen, trasladando esto no solamente a agregados gruesos sino también a los agregados finos.

#### **2.4.2.2 Forma**

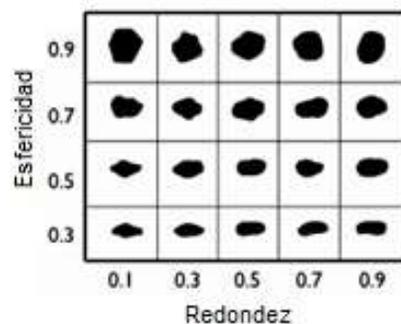
La forma de los agregados influye en varias de las características de morteros y hormigones, estudios realizados por Koehler y Fowler (2007), determinaron que las características de la forma del agregado son significativas para determinar las propiedades frescas del flujo de las mezclas del mortero autocompactante, según Järvenpää (2001) la forma influye en la trabajabilidad, porcentaje de aire, exudación, resistencia a la compresión y retracción; Bahabri (2016) menciona la trabajabilidad y la resistencia y agrega la durabilidad; Alexander y Mindess (2010) refieren a la

trabajabilidad y por lo tanto a la influencia en el requerimiento de agua de la mezcla, también a la resistencia y añade que la forma del agregado influye en el contenido de vacíos y en la densidad de empaqueo de los agregados. En consonancia con la última característica mencionada, Cho et al. (2006) señalan que el efecto de la forma de la partícula influye en las relaciones máximas y mínimas de espacios vacíos. Para Amenta et al. (2017), los parámetros morfológicos de los agregados tienen un papel crucial en el desarrollo de la microestructura y el rendimiento mecánico de los morteros, especialmente la densidad de empaqueo, dado que el rendimiento mecánico de los morteros se controla mediante la combinación de la cantidad de aglomerante y la densidad de empaquetamiento de los agregados.

Los agregados pueden tener diversas formas que pueden ser producto de la manera en que los agregados se obtienen y/o se producen. Según indican Alexander y Mindess, 2010, la forma depende de la fuente y la naturaleza del agregado.

En cuanto a la forma de los agregados se pueden mencionar diferentes características como por ejemplo redondez y esfericidad. De acuerdo Powers, 1953; Galloway, 1994 apud Alexander y Mindess, 2010 y Quiroga y Fowler, 2004, la esfericidad es una medida de cuán cerca la partícula se aproxima a una forma esférica y por lo tanto de cuán iguales son los tres ejes o dimensiones principales de la partícula, mientras que redondez describe la forma afilada de los bordes y esquinas. También se puede hablar de partículas planas o escamosas, según señalan Mehta y Monteiro (2006), este término refiere a que el grosor de la partícula es pequeño en relación con otras dos dimensiones, y también refieren a formas alargadas en tanto la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones. Según la descripción de Koehler y Fowler (2007), en términos cualitativos, las partículas pueden describirse como angulares, sub-angulares, sub-redondeadas, redondeadas o bien redondeadas.

De acuerdo con Cho et al. (2006), para una arena dada, los granos se estudian a diferentes aumentos de microscopio y luego, la esfericidad y la redondez de los granos representativos se determinan comparando las formas en fotografías en dos dimensiones (2D) con las del cuadro de la figura 2.1. La figura 2.2 muestra otro gráfico que permite la comparación visual de la forma de los agregados. Por su parte, Koehler y Fowler (2007) presentan otro gráfico que se muestra en la figura 2.3 para determinar de manera visual la forma y la angulosidad de los agregados, mientras que en la tabla 2.7 se presenta una clasificación de las diferentes formas de las partículas junto a su descripción y ejemplos de agregados en cada caso.



**Figura 2.1** – Gráfico de evaluación visual de la forma de las partículas derivado de la medida de la “esfericidad” y la “redondez” (Krumbein y Sloss, 1963 apud Cho et al. 2006).

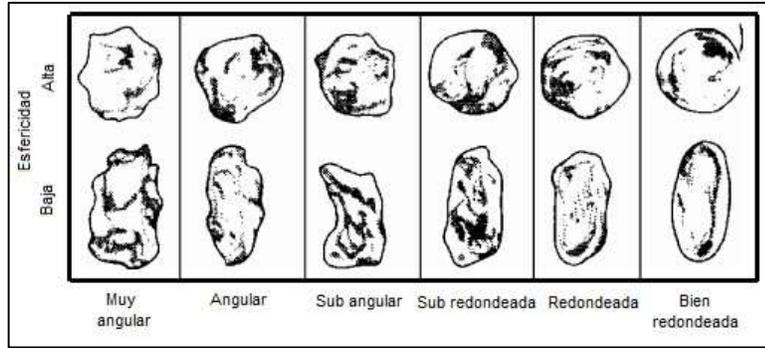


Figura 2.2– Gráfico de evaluación visual de la forma de las partículas basado en observaciones morfológicas (Sims y Brown, 1998 apud Alexander y Mindess, 2010).

		Forma visual y Clasificación de angulosidad				
		← Bien formada, bien redondeada		Pobremente formada, altamente angulosa →		
		1	2	3	4	5
Forma		La mayoría de las partículas cercanas a ser equidimensionales	Modesta desviación de equidimensionales	La mayoría de las partículas no son equidimensionales pero tampoco planas ni elongadas	Algunas partículas planas y/o elongadas	Pocas partículas equidimensionales; abundancia de partículas planas y/o elongadas
Angulosidad		Bien redondeada	Redondeada	Sub-angular o sub-redondeada	Angular	Altamente angular
Ejemplos		Mayormente gravas y arenas de ríos/ glaciares	Gravas de ríos/ glaciares parcialmente trituradas o algunas muy bien formadas arenas manufacturadas	Agregado grueso triturado bien formado o arena manufacturada con la mayoría de filos > 90°	Agregado grueso triturado o arena manufacturada con algunos filos ≤ 90	Agregado grueso triturado o arena manufacturada con muchos filos ≤ 90° y grandes áreas convexas

Figura 2.3 – Gráfico de evaluación visual de la forma y la angulosidad (Koehler y Fowler, 2007).

Clasificación de la forma de la partícula		
Clasificación	Descripción	Ejemplos
Redondeada	Totalmente desgastado por el agua o completamente formado por atrición.	Gravas y arenas derivadas de fuentes marinas, aluviales o impulsadas por el viento.
Irregular	Naturalmente irregular, o parcialmente formadas por atrición y teniendo bordes redondeados.	Otras gravas, por lo general cavadas de fosas.
Angular	Posee bordes bien definidos formados en la intersección de caras planas y ásperas.	Rocas trituradas de origen natural o artificial.
Escamosa	Material en el que el espesor es pequeño relativo a las otras dos dimensiones.	Rocas pobremente trituradas, en particular si derivan de rocas laminadas o estratificadas.
Elongada	Material, usualmente angular, en el que la longitud es considerablemente más grande que las otras dos dimensiones.	
Escamosa y elongada	Material que tiene la longitud considerablemente más grande que el ancho, y el ancho considerablemente más grande que el espesor.	Rocas pobremente trituradas como descrito arriba. Técnicas pobres de procesamiento pueden exacerbar la forma indeseable y viceversa.

Tabla 2.7 –Clasificación de la forma de la partícula (BS 812-102:1989, apud Alexander y Mindess, 2010).

La figura 2.4 muestra la ilustración de agregados con diferentes posibles formas.



**Figura 2.4** – Ilustraciones de formas de partículas de agregados, en sentido horario a partir de arriba a la izquierda: redondeada, irregular, angular, escamosa, elongada, escamosa y elongada (BS 812-102:1989, apud Alexander y Mindess, 2010).

En cuanto a la obtención y/o producción, las arenas naturales tienden a ser redondeadas producto de los efectos climáticos y al efecto acumulativo de múltiples colisiones y abrasiones. Las arenas manufacturadas son producto de la trituración de roca, cuya forma dependerá de la composición de la roca madre y el modo de fractura entre otros factores.

De acuerdo con Mehta y Monteiro (2006), las partículas formadas por desgaste tienden a redondearse perdiendo bordes y esquinas. El proceso de trituración tiende a producir partículas angulosas y afiladas (Cho et al., 2006). Según Alexander y Mindess, (2010), los agregados triturados pueden variar de una buena forma en el sentido de partículas cúbicas y sub-angulares a partículas altamente angulares, o planas y elongadas, escamosas, dependiendo de la roca y el tipo y eficiencia del equipo de triturado. Por otro lado, las gravas naturales tenderán a ser más esféricas y a tener bordes redondeados debido al desgaste.

Para la preparación de los morteros se debe tener en cuenta la forma del agregado específicamente si se emplearán arenas naturales o manufacturadas trituradas Cortes et al. (2008).

Las arenas redondeadas y lisas requieren menos agua de mezcla en el mortero, produciendo una mejor resistencia con el mismo contenido de cemento, al emplear una relación a/c más baja (Langer, 1993 apud Abu Seif, 2013), de acuerdo con (Shilstone, 1999; Dewar, 1999 apud Quiroga y Fowler, 2004) esto se debe a que las partículas cúbicas o esféricas tienen menor área de superficie específica que las partículas planas y elongadas. En función de lo anteriormente dicho, el agregado fino angular produce morteros de menor trabajabilidad que las arenas esféricas (Quiroga y Fowler, 2004; Järvenpää, 2001). Por otro lado, Amenta et al. (2017) indican que el aumento de agua en mezclas donde se emplean agregados angulares en lugar de redondeados, puede atribuirse a una mayor fricción entre los granos angulares y la necesidad de que el agua actúa como lubricante. Según Koehler y Fowler (2007), el uso de agregados equidimensionales bien redondeados con alta densidad de empaque permite reducir el volumen de la pasta necesaria para rellenar los vacíos entre los agregados, resultando en una mejor economía y propiedades endurecidas.

Mejores formas de agregados ayudan a mejorar las resistencias de las mezclas, sin embargo, los agregados angulares podrían ayudar a aumentar las resistencias de las mezclas, Kaplan (1959) apud Abu Seif (2013), argumenta que las resistencias a la compresión y a la flexión del mortero parecen depender de la angularidad ya que partículas angulares tienden a aumentar las resistencias. Esto también es compartido por Merchant et al. (2001) apud Amenta et al. (2017) quienes explican que la resistencia a la flexión se ve afectada por la interacción de las partículas del agregado al aumentar la fricción entre ellas y es por eso que se ve incrementada la resistencia. Esta interacción entre las partículas es mencionada por Donza y Cabrera (2002) apud Cortes et al. (2008), quienes señalan que son la forma y la textura de las arenas trituradas las que pueden conducir a mejoras en la resistencia del hormigón, debiéndose esto a la mejor interrelación/unión entre las partículas. Cabe mencionar que al referirse a arenas trituradas, se está refiriendo a arenas angulares, pudiendo observarse la clasificación de las arenas, su descripción y ejemplos en la tabla 2.7 previamente mencionada.

Referente a los espacios vacíos y el empaqueo de los agregados, partículas que posean mejores formas optimizarán la distribución de los agregados en las mezclas. Según indican Cho et al. (2006), partículas angulares ásperas producen un empaqueo granular de menor densidad, en comparación con las arenas naturales más redondeadas, ya que a medida que disminuyen la redondez y la esfericidad, aumenta la diferencia de relación de espacios vacíos máximos y mínimos.

Formas irregulares como la del agregado triturado afectan las propiedades reológicas de los morteros al igual que la cantidad de finos. El agregado triturado debido a su forma de producción tiende a una forma irregular y a contener mayores cantidades de finos que los agregados naturales. En función de esto y de acuerdo al trabajo realizado por Westerholm et al. (2007), quienes emplearon agregados finos triturados, todos ellos conteniendo cantidades relativamente grandes de finos, concluyeron que dichas cantidades de finos mal formados son la razón principal de la mayor demanda de agua de los morteros con agregados finos triturados, conduciendo esto a mayor tensión de fluencia y viscosidad plástica en comparación con el empleo de agregado fino natural. Estudios realizados por Koehler y Fowler (2007) determinaron que las arenas manufacturadas y altamente angulares son las que exhiben la mayor demanda de aditivo tanto para graduaciones de agregado fino empleadas en su forma original y sin modificar, como para graduaciones estándar. La mayor demanda de aditivo y de viscosidad plástica, surge a raíz de un mayor contenido de huecos compactados y el aumento de la fricción entre partículas. Sin embargo, los agregados naturales, las arenas manufacturadas con buena forma y los agregados gruesos triturados bien formados presentan un bajo contenido de huecos compactados y una baja fricción entre partículas, lo que resulta en una baja demanda de aditivo y baja viscosidad plástica.

En función de todo lo anteriormente expuesto, los agregados naturales presentan un muy buen desempeño en las mezclas, mejorando la trabajabilidad y la densidad de empaqueo mientras que los agregados triturados poseen formas irregulares que afectan la trabajabilidad y densidad de empaqueo, sin embargo, pueden mejorar las resistencias. Koehler y Fowler (2007), determinaron en sus estudios que los agregados bien formados mostraron las diferencias más pequeñas de desempeño a medida que se modificó la clasificación, siendo el caso de las arenas naturales debido a su forma favorable. Sin embargo, varias de las arenas manufacturadas mostraron un desempeño similar o mejor, independientemente de la clasificación, siendo posible corregir un agregado de bajo rendimiento cambiando la clasificación. En el caso de las resistencias, la arena que exhibió la mayor

resistencia a la compresión fue la que tuvo un alto contenido de finos, la mayor angularidad y textura de superficie más áspera.

Alexander y Mindess (2010), señalan que las resistencias más altas del hormigón usualmente resultan del uso de agregados más angulares por lo que son estas partículas las que son preferibles a la hora de mejorar la resistencia pero no las partículas escamosas ya que pueden reducirla. De acuerdo con Järvenpää (2001), partículas escamosas, angulosas y alargadas, especialmente con los agregados finos, reducen la trabajabilidad del hormigón, sin embargo, el hormigón trabajable puede realizarse con partículas angulares y rugosas si son cúbicas y están bien graduadas; inclusive, cuando la forma y/o la angularidad de las partículas del agregado se desvían de la forma esférica, el espacio intersticial entre las partículas puede llegar a decrecer si dichas partículas se ordenan de la forma más compacta posible.

### **2.4.2.3 Textura**

El tipo de textura superficial depende de varios factores de acuerdo con Alexander y Mindess (2010), como de la textura de la roca madre, dureza, tamaño de grano, estructura de poros, la cantidad de desgaste sobre la partícula que la pueda haber alisado o hecho más áspera, así como de la fuente y producción del agregado. Habitualmente, son los agregados naturales que se encuentran sujetos a la exposición de elementos climáticos aquellos que tienden a ser relativamente suaves, mientras que los materiales triturados van a fracturar con texturas superficiales.

Las características de textura de los agregados finos tienen un efecto importante tanto en el mortero fresco en su trabajabilidad como en el mortero endurecido en su resistencia y durabilidad (Abu Seif, 2013), volviéndose el impacto de la textura sobre el comportamiento del mortero más importante a medida que las partículas se hacen más pequeñas (Hudson, 1999 apud Abu Seif, 2013). Järvenpää (2001) señala que la textura influye en la trabajabilidad como en la resistencia del hormigón de acuerdo a lo anteriormente expresado, así como también en el porcentaje de aire y en la exudación.

La textura superficial influye en la trabajabilidad de las mezclas ya que puede influir en los requerimientos de agua y cemento de las mezclas dependiendo si los agregados presentan texturas ásperas o lisas. Según indican Mehta y Monteiro (2006), agregados de textura rugosa requieren de mayor cantidad de agua de mezcla para obtener una trabajabilidad deseada con un cierto contenido de cemento y en comparación con partículas lisas y redondeadas, las partículas de textura rugosa, angulares y alargadas requerirán más pasta de cemento para producir mezclas de hormigón trabajables por lo que el costo sería mayor. En concordancia con lo anteriormente dicho, Kaplan (1959) apud Alexander y Mindess (2010) refieren a que texturas rugosas u ásperas incrementan los requerimientos de agua de las mezclas debido a que se da un aumento del área total de la superficie del agregado, por lo que se requiere más agua para mojar la superficie del agregado.

La textura superficial también influye en la resistencia mecánica según mencionado previamente. Esto de acuerdo con Galloway (1994) apud Quiroga y Fowler (2004) y Abu Seif (2013) sucede debido a que las superficies ásperas mejoran la unión entre las partículas y la pasta, aumentando de esa forma la resistencia. En la misma línea, Kaplan (1959) apud Alexander y Mindess (2010) refiere a que texturas ásperas pueden llevar a una mejor vinculación entre los agregados y la pasta por lo que se pueden mejorar las propiedades mecánicas del hormigón. En cuanto al tipo de agregado que mejora la resistencia, Mehta y Monteiro (2006) señalan que las mezclas con

agregados triturados o de textura rugosa generan resistencias algo mayores a edades tempranas en comparación con mezclas con agregados suaves o naturalmente degradados de una mineralogía similar.

Otro elemento que afecta la textura superficial es la eficiencia del empaqueo de las partículas o granulometría. Según estudio realizado por Abu Seif (2013), el autor concluye que las arenas finas (en su caso estudió arenas de dunas) pueden usarse como agregados finos en mezclas de mortero de cemento cuando los materiales de arena adecuados no se encuentren disponibles económicamente, sin embargo, desde un punto de vista del tamaño del grano y la textura, las arenas finas (en este caso arenas de dunas) debieran de mezclarse con un agregado fino triturado (de textura rugosa) para mejorar su graduación y textura, aumentando así la resistencia del mortero.

#### **2.4.2.4 Granulometría / clasificación / tamaño máximo del agregado / distribución del tamaño del agregado**

Los términos granulometría, clasificación, y distribución del tamaño del agregado van de la mano y refieren a lo mismo; a la organización de partículas de los agregados de acuerdo a su tamaño. El tamaño máximo del agregado al estar vinculado con estos términos también se incluye en este punto.

Según Alexander y Mindess (2010), la graduación refiere a la distribución del tamaño de las partículas y es una característica de los agregados en su forma granular. La graduación del agregado es muy importante en relación a las propiedades plásticas del hormigón pero no puede ser considerada de manera aislada de la forma de la partícula y de la textura superficial, influyendo las tres en conjunto en las propiedades plásticas del hormigón.

La distribución del tamaño del agregado afecta significativamente características del mortero como la densidad de empaqueo y el contenido de vacíos y como consecuencia afecta a la trabajabilidad, la segregación y la durabilidad (Abu Seif, 2013). La densidad de empaqueo y el contenido de vacíos se ven afectados en mayor o menor medida en función del tipo de distribución uniforme o despareja de los tamaños de agregados. Goltermann et al. (1997), señalan que el grado de empaqueo indica el volumen vacío y la cantidad de pasta de cemento necesaria en el hormigón. La mezcla de agregados juega un papel dominante en la trabajabilidad e influye en el contenido mínimo de cemento necesario en el hormigón y por ende, en el precio de la mezcla. Una reducción en la pasta de cemento (y por lo tanto del precio de mezcla resultante) es principalmente posible a través de una reducción del volumen de vacíos entre los agregados, pudiendo lograr esto a través de un mayor empaqueo de la mezcla de agregados.

Según señalan Johansson (1979); Johansen y Andersen (1989); Glavind et al. (1993) apud Abu Seif (2013), la uniformidad de la distribución de los tamaños mejora la trabajabilidad en comparación con las mezclas donde faltan tamaños de agregados. De acuerdo con Alexander y Mindess (2010), los agregados uniformes o de un único tamaño contienen grandes volúmenes de vacíos entre las partículas, mientras que agregados continuos en los que una serie de tamaños está presente, disminuye el espacio de vacíos y reduce los requerimientos de la pasta. Los materiales granulares pueden empacarse juntos en varios arreglos; desde sueltos a más densos. Estos arreglos dependen de la naturaleza de las partículas, particularmente su forma y tamaño de distribución. El empaqueo de materiales granulares y su clasificación están interrelacionadas, desde que la

clasificación/graduación va a afectar la densidad de empaçado. Ganaw y Ashour (2014), indican que la clasificación de la arena tiene un efecto sobre la fluidez del mortero; morteros con arena mejor clasificada presentan mejor fluidez que otros debido al menor volumen de huecos sin compactar.

En consonancia con lo anteriormente dicho, Hu y Wang (2005) indican que, para un módulo de finura similar, el agregado con buena graduación proporciona al mortero un flujo mayor que el agregado de un solo tamaño debido a los contenidos de vacíos, ya que el agregado clasificado tiene un bajo contenido de vacíos no compactados, requiriendo dicho agregado menor cantidad de pasta de cemento para proporcionar el mismo flujo.

La clasificación de los agregados influye en el comportamiento físico y mecánico de los morteros: en la ductilidad, módulo elástico y en la deformabilidad al influir considerablemente en la cantidad de agua necesaria para obtener una determinada consistencia de mortero (Haach et al., 2011). Los autores refieren a que las mezclas de mortero de cemento con arena fina necesitan mayor cantidad de agua para alcanzar la misma consistencia que la fabricada con arena gruesa dado que se requiere mayor cantidad de agua para humedecer las partículas sólidas.

De acuerdo con Amenta et al. (2017), las propiedades mecánicas de morteros endurecidos se mejoran cuando los agregados con mayor densidad de empaçado se utilizan ya que para la misma relación  $a/aglm$ , la mayor densidad de empaçado requiere menor cantidad de aglomerante para lograr los mismos valores de resistencia. La densidad de empaçado del agregado tiene un efecto beneficioso en el desempeño mecánico de los morteros dado que el nivel de aglomerante en una mezcla de mortero puede reducirse sin afectar la resistencia, siempre que los agregados tengan una distribución de tamaño de grano que permita una densidad de empaquetamiento elevada. Por su parte, Haach et al., (2011) señalan que la clasificación de las arenas no tiene influencia en la resistencia a la compresión pero sí la tiene a la flexión, exhibiendo mayor resistencia a la flexión los morteros fabricados con arena gruesa, probablemente debido a que se promueve una mejor interrelación de partículas debido a los grandes tamaños de grano, aumentando dicha resistencia.

Braga et al. (2012) realizaron un estudio donde determinaron que los morteros a base de cemento pueden incorporar hasta un 15% de agregados muy finos de hormigones reciclados en la composición del mortero. Estudios previos sobre la incorporación de finos en morteros sugieren que los agregados de hormigón triturado reciclado muy finos que llenan vacíos en el mortero mejorarían sus propiedades a través del llamado efecto de relleno, por lo que existe una buena posibilidad de que los morteros modificados muestren una mejora en la resistencia mecánica debido a una mejor compactación y densificación. Alexander y Mindess (2010) indican que es común mezclar dos fuentes diferentes de agregados finos para mejorar la clasificación/graduación general. Por ejemplo, una arena triturada más bien gruesa y dura puede ser mejorada si se mezcla con una arena natural más fina que tenga una mejor forma de partícula.

De todo lo previamente expresado, se entiende necesaria una mejor distribución de los tamaños de los agregados (pudiendo contar con todo el espectro granulométrico en proporciones uniformes en una mezcla), evitando la falta de tamaños de agregados a efectos de reducir los huecos o espacios vacíos en las mezclas, aumentando de esta forma la densidad de empaçado y en conclusión mejorando la trabajabilidad y la resistencia.

#### **2.4.2.5 Absorción / Permeabilidad**

Las características de absorción y permeabilidad se encuentran relacionadas, ya que la primera condiciona a la segunda, en cuanto a una mayor absorción del agregado se refiere, mayor será también la permeabilidad.

De acuerdo a Chan et al. (2003), la absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del hormigón, puesto que las partículas absorben agua directamente en la mezcladora, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Si dos tipos de agregados tienen absorción similar, otros factores secundarios serán de importancia en la consistencia de la mezcla, tales como forma, tamaño y graduación.

En la misma línea, Järvenpää (2001) señala que la absorción influye en la propiedad de trabajabilidad del hormigón en estado fresco, relacionándose esto con el tipo de agregado que compone el hormigón ya que los agregados naturales pueden ser más porosos que los obtenidos por trituración debido a su proceso natural de erosión. Debido a esto los agregados naturales pueden llegar a absorber mayor cantidad de agua.

Estudios realizados por Kockal (2016) con mezclas de mortero con distintos tipos de agregado fino: arena calcárea natural triturada, piedra pómez básica, piedra pómez ácida y escoria porosa, (valor de porosidades: 23,47%, 30,11%, 32,18% y 37,93% respectivamente) muestran la influencia en las propiedades físicas, mecánicas y térmicas del mortero, manteniendo una dosificación constante de cemento y una relación constante a/c. Se pudo observar que el mortero con arena calcárea fue el que obtuvo la mayor densidad y el de escoria porosa el que obtuvo la menor. La utilización de agregados ligeros como escoria porosa llevó a una absorción mayor de agua que los demás agregados y por lo tanto a una reducción en peso y en resistencia a la compresión y a la tracción al igual que a valores de conductividad térmica más bajos. Esto implica que el comportamiento de la absorción influye en las propiedades de los morteros, al igual que otros factores como el tipo de agregado, la mineralogía, la porosidad y las características de las partículas.

La permeabilidad, que es uno de los factores más importantes que afecta la durabilidad del hormigón, está relacionada al contenido de vacíos de la mezcla de agregados ya que cuanto menor el contenido de vacíos, menor será la permeabilidad. Para reducir la permeabilidad, es deseable tener el mayor contenido de agregado posible, por lo que en consecuencia, mezclas bien graduadas producen hormigones con mayor durabilidad (Quiroga y Fowler, 2004).

Los agregados finos con una absorción muy baja generalmente desarrollan enlaces de menor resistencia en los morteros, por lo que a medida que aumenta la absorción, aumenta la fuerza del enlace (Quiroga y Fowler, 2004).

#### **2.4.2.6 Densidad**

La densidad específica, de acuerdo con la definición dada por Mehta y Monteiro (2006), se define como la densidad del material incluidos los poros internos, por ejemplo, como cuando se requiere conocer para la dosificación de una mezcla el espacio ocupado por las partículas de los agregados, incluidos los poros existentes dentro de las partículas. Para la dosificación previamente mencionada, sería necesario conocer también la densidad aparente, definida por los autores como

el peso de los fragmentos de los agregados que llenarían un volumen unitario. El fenómeno de la densidad aparente surge a raíz de que no es posible empaquetar fragmentos de agregados de manera tal que no haya espacio vacío. El término “aparente” se usa porque el volumen está ocupado por ambos agregados y vacíos.

Neville (2011), por su parte, señala que la densidad aparente depende de qué tan densamente se empaqueta el agregado y se deduce que, para un material de un peso específico dado, la densidad aparente depende de la distribución del tamaño y la forma de las partículas: las partículas de un solo tamaño pueden empaquetarse hasta un cierto límite, pero se pueden agregar partículas más pequeñas en los vacíos entre las más grandes, aumentando así la densidad aparente del material empaquetado. La forma de las partículas afecta en gran medida la cercanía del empaque que se puede lograr. Para un agregado de gravedad específica dada, una densidad aparente más alta significa que hay menos vacíos que deben llenarse con agregado fino y cemento. La densidad aparente real del agregado depende no solo de las diversas características del material que determinan el grado potencial de empaque, sino también de la compactación real lograda en un caso determinado. De acuerdo con Järvenpää (2001), la forma y la textura del agregado afectan su densidad y por lo tanto, para un agregado áspero y pobre de forma, la densidad es menor que la de un agregado liso y redondeado de la misma densidad, debido a la fricción y la interferencia entre partículas y esto afecta a la trabajabilidad del hormigón.

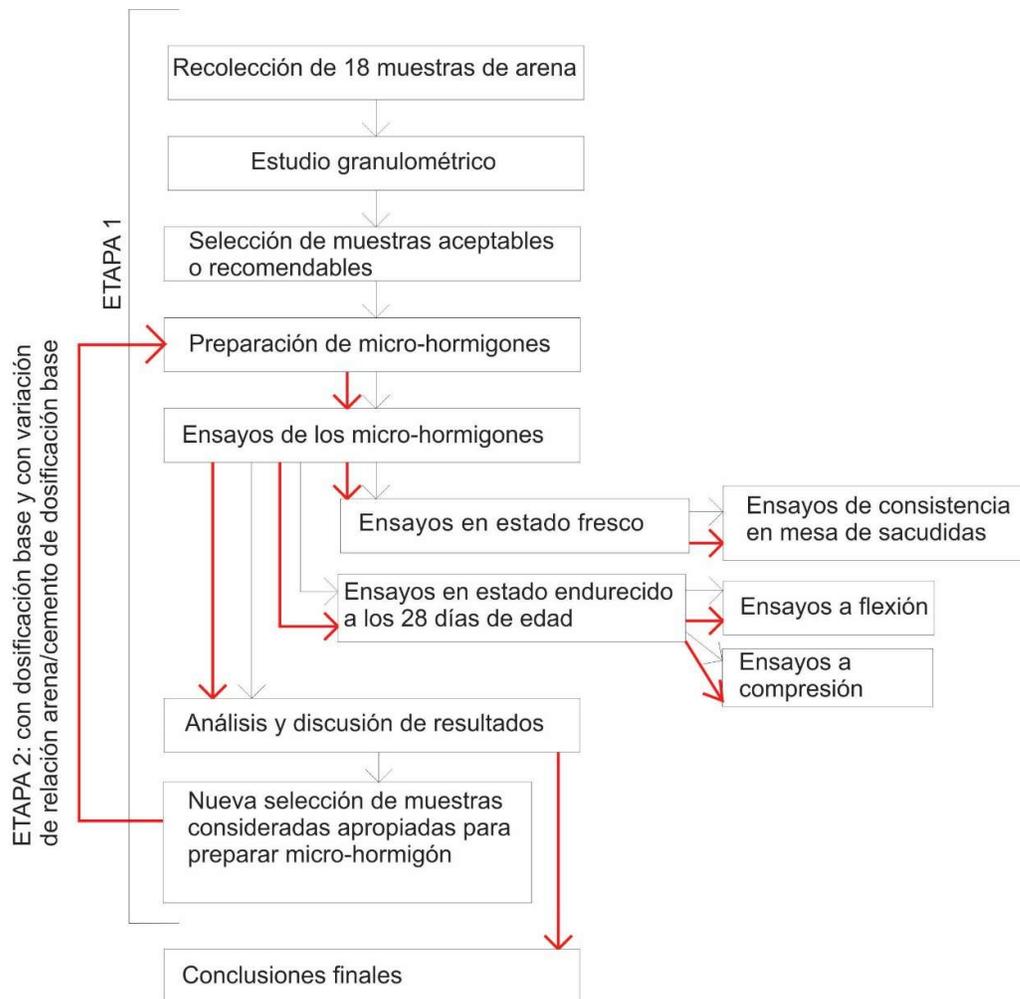
La densidad de un agregado es un indicador útil de la idoneidad de dicho agregado y ayuda a determinar la cantidad de cemento necesaria en la mezcla de mortero (Roberts et al., 1996 apud Abu Seif, 2013). Para Amenta et al. (2017), la densidad aparente de los componentes agregados puede ser un índice importante para la selección de la arena adecuada en la preparación de los morteros. Según Langer (1993) apud Abu Seif (2013), una densidad muy baja frecuentemente indica que un agregado es poroso, débil o absorbente.

## CAPÍTULO 3 – INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL

### 3.1 PLANEAMIENTO DE LA INVESTIGACION

Este trabajo estudia la influencia del agregado fino en las características mecánicas del micro-hormigón de alto desempeño, siendo necesario desarrollar una parte experimental que acompañe dicho estudio. Para el trabajo experimental se toma como base una de las dosificaciones obtenidas de micro-hormigón de alto desempeño denominada “muestra media rica”, del proyecto de investigación de la ANII FMV 2009-1-2717.

La figura 3.1 presenta un organigrama que resume los pasos seguidos durante la investigación experimental.



**Figura 3.1** – Organigrama con pasos seguidos durante la investigación experimental.

La parte experimental se desarrolló en dos etapas; en la etapa 1 inicialmente se utilizaron 18 muestras de diferentes arenas en las cuales se estudió su granulometría con el fin de establecer cuáles de ellas son aceptables o recomendables para su empleo en la primera partida de micro-hormigón a realizar en esta etapa. De las muestras estudiadas fueron seleccionadas las que se

consideraron aceptables o recomendables para la ejecución de hormigón y ellas fueron las que se emplearon para preparar los micro-hormigones realizados en la primera etapa de la parte experimental. Dichos micro-hormigones fueron elaborados con los siguientes materiales: agregado fino, cemento portland, agua y aditivos cuyas características se presentan en la sección 3.2; ellos fueron ensayados de acuerdo con las especificaciones de las normas correspondientes, primero en estado fresco y luego a los 28 días en estado endurecido con el fin de seleccionar las muestras a utilizar en la segunda etapa.

En la segunda etapa, con las muestras nuevamente seleccionadas se realizaron nuevos micro-hormigones con la dosificación base y con nuevas dosificaciones que surgen de la variación de la relación a/c de la dosificación inicial. Se ensayaron los micro-hormigones nuevamente en estado fresco y endurecido como en la etapa anterior, con el fin de identificar las mejores muestras para producir MHAD y determinar las cualidades que las hacen idóneas a tal fin.

## 3.2 MATERIALES

A continuación, se presentan las características de los materiales utilizados para preparar los micro-hormigones en el presente trabajo.

### 3.2.1 Agregado fino

Se emplearon 18 muestras de arena con distintos tipos de granulometrías, obtenidas de diferentes procedencias como fue previamente mencionado.

La tabla 3.1 presenta las 18 muestras recabadas que fueron utilizadas en la etapa experimental N°1, la arenera de la cual provienen y su lugar de obtención.

Muestra	Tipo de arena/descripción	Arenera	Procedencia
1	Terciada	Arnel	Schmidt Premoldeados S.A.
2	Terciada	Nilafér	Barraca Gallinal
3	Terciada gruesa	Darmix S.A.	Darmix S.A.
4	Terciada fina	Pérez Busto S.A.	Pérez Busto S.A.
5	Terciada	Brillo Arena (ex Colier S.A.)	Brillo Arena (ex Colier S.A.)
6	Terciada fina	Los Mellizos S.R.L.	Los Mellizos S.R.L.
7	Terciada fina	Tincotal S.A.	Tincotal S.A.
8	Terciada gruesa	MRA Limitada	Barraca Aguirre
9	Terciada	Astilco	Barraca Olivieri
10	Terciada intermedia	Darmix S.A.	Darmix S.A.
11	Gruesa	Pérez Busto S.A.	Pérez Busto S.A.
12	Terciada gruesa	Pérez Busto S.A.	Pérez Busto S.A.
13	Gravillín	Silva Redonda	Barraca Olivieri
14	Terciada	Arnel	Barraca Panamericana
15	Terciada fina	Darmix S.A.	Darmix S.A.
16	Terciada fina	La Barra	Barraca Aguirre
17	Fina	Jonimar	Schmidt Premoldeados S.A.
18	Fina	Silri	Barraca Olivieri

**Tabla 3.1** – Muestras recabadas; cantera de origen y procedencia de las muestras.

### 3.2.2 Cemento portland

Se empleó cemento portland normal (CPN) ANCAP gris, de tipo CPN 40 fabricado en la planta de Paysandú. A continuación, se presentan sus principales características en las tablas 3.2, 3.3 y 3.4:

Análisis Químico	Unidad	Resultado	Requisito Norma UNIT 20
Pérdida por calcinación (PPC)	%	2,55	máx 5
Trióxido de Azufre (SO <sub>3</sub> )	%	2,66	máx 3,5
Oxido de magnesio (MgO)	%	3,82	máx 6,0
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> )	%	20,69	no hay
Oxido de calcio (CaO)	%	63,05	no hay
Oxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	3,45	no hay
Oxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	%	3,67	no hay
Oxido de sodio (Na <sub>2</sub> O)	%	0,04	no hay
Oxido de Potasio (K <sub>2</sub> O)	%	0,1	no hay
Oxido de Sodio equivalente (Na <sub>2</sub> O + 0,658 K <sub>2</sub> O)	%	0,11	no hay
Residuo insoluble	%	0,59	máx 5

**Tabla 3.2** – Valores del análisis químico del cemento portland normal utilizado.

Ensayos físicos	Unidad	Resultado	Requisito Norma UNIT 20
Retenido tamiz 74 µm	%	5,6	máx 15
Superficie específica (Blaine)	m <sup>2</sup> /kg	369	mín 250
Expansión en autoclave	%	0,07	máx 0,8
Tiempo de fraguado inicial	h:min	03:35	mín 0:60
Tiempo de fraguado final	h:min	04:40	no hay

**Tabla 3.3** – Valores de ensayos físicos del cemento portland normal utilizado.

Resistencia mecánica a la compresión	Unidad	Resultado	Requisito Norma UNIT 20
Resistencia a la compresión a 2 días	MPa	15,5	mín 10
Resistencia a la compresión a 7 días	MPa	31	no hay
Resistencia a la compresión a 28 días	MPa	49,7	mín 40 máx 60

**Tabla 3.4** – Valores de resistencia mecánica a la compresión del cemento portland normal utilizado.

### 3.2.3 Agua

Para la realización de los ensayos se empleó agua potable obtenida a través de la red de abastecimiento de OSE, que tiene como fuente el río Santa Lucía y cuenta con la planta de potabilización y bombeo ubicada en la localidad de Aguas Corrientes.

### 3.2.4 Aditivo

Como aditivo para el trabajo experimental se empleó Viscocrete 6, un superplastificante de la marca Sika cuya composición consiste en una dispersión acuosa de poliglicoleterpolicarboxilato.

### 3.3 EQUIPOS

Para cada ensayo llevado a cabo fueron empleados diferentes equipos. A continuación, se procede a detallar los equipos empleados en la parte experimental de esta Tesis. La figura 3.2 muestra los equipos empleados que se detallan en los puntos 3.3.1 a 3.3.6.



**Figura 3.2** – Equipos empleados en la realización de los ensayos: a) balanza digital, b) tamices y tamizadora mecánica a vaivén, c) amasadora de mortero, d) mesa de sacudidas, e) compactadora mecánica, f) bastidor para ensayo a flexión, g) prensa Multitest con bastidor para ensayo compresión.

### **3.3.1 Balanza electrónica**

Tanto para el estudio granulométrico de las arenas como para la ejecución de los micro-hormigones se empleó una balanza electrónica Marca AND, modelo GP-30K, con un rango de medición de 5 g a 31 Kg y precisión de 0,1 g. Para la medición de agua y aditivo se utilizó una balanza digital Marca CHYO, modelo MK-2000 B, capacidad máxima 2 kg y capacidad mínima 5 g cuya precisión es de 0,1 g.

### **3.3.2 Tamizadora**

Para el estudio granulométrico de las arenas se utilizó una tamizadora eléctrica de vaivén marca Soiltest, modelo CL305, con un juego de tamices de 4,76 mm; 2,38 mm; 1,19 mm; 0,59 mm; 0,297 mm; 0,149 mm.

### **3.3.3 Amasadora**

Para la ejecución de los micro-hormigones se empleó una amasadora de morteros de cemento marca Controls, modelo 65-L0005, con un recipiente de acero inoxidable de capacidad de 5 litros (L) y una paleta de acero inoxidable, velocidad de giro entre 62 y 125 Revoluciones por minuto (RPM) y velocidad de paleta de 140 y 285 RPM.

### **3.3.4 Compactadora**

Para la preparación de las probetas se empleó una compactadora de probetas, marca Controls y modelo 65-L0012/E según requisitos de la Norma UNE-EN 196-1.

### **3.3.5 Mesa de sacudidas**

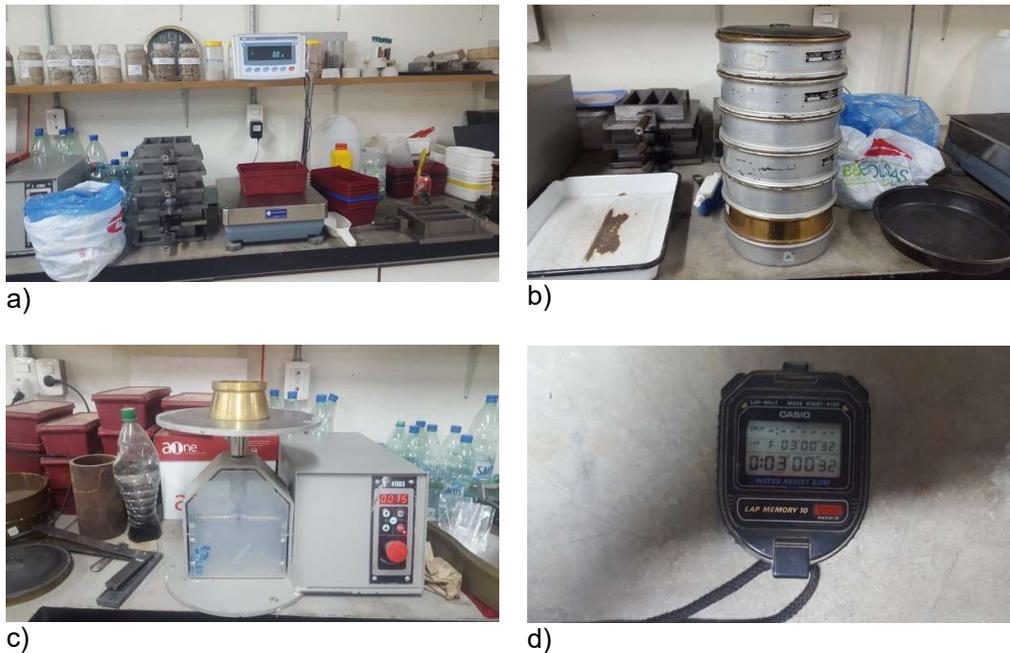
Para el ensayo de consistencia se utilizó una mesa de sacudidas marca Controls y modelo 64-L0038/E y accesorios según UNE-EN 1015-3 y ASTM C230.

### **3.3.6 Prensa**

Para los ensayos a flexión y a compresión de las probetas se utilizó una prensa Multitest, marca Controls y modelo MCC8, con dos bastidores; un bastidor para ensayos de flexión con carga máxima de 100 Kilonewton (kN) y otro bastidor para ensayos a compresión con carga máxima de 2000 kN.

### **3.3.7 Otras herramientas y accesorios**

Otras herramientas y accesorios empleados en la realización de los ensayos que se muestran en la figura 3.3 fueron: recipientes, pala pequeña, tamices, cepillos de limpieza para retirar el material de los tamices, cronómetro, cuentagotas, espátula de goma, molde troncocónico de bronce, pisón, calibre capaz de medir diámetros de hasta 30 mm con exactitud de 1 mm, regla metálica para enrasar, molde metálico en acero que contiene planchuelas divisorias para obtener tres probetas prismáticas de 40 mm x 40 mm x 160 mm, lámina de vidrio, martillo de goma, marcador indeleble, agua potable a temperatura ambiente y tubos plásticos.



**Figura 3.3** – Herramientas y accesorios empleados: a) recipientes, pala, moldes metálicos, b) tamices, c) molde troncocónico de bronce, d) cronómetro.

### 3.4 METODOS

En la etapa 1 las muestras de arenas que figuran en la tabla 3.1 se estudiaron mediante la realización de ensayos de granulometría de acuerdo a la Norma UNIT-NM 248. Empleando límites presentados en la norma UNIT 82-51 se seleccionaron las arenas que se consideraron aceptables o recomendables para la ejecución de hormigón, las que se emplearon para preparar micro-hormigones siguiendo la dosificación base mencionada en la sección 3.5. Los micro-hormigones se realizaron siguiendo la Norma UNIT-ISO 679, la cual es similar en procedimiento a la Norma UNE-EN 196-1 previamente mencionada en el capítulo 2. Posteriormente se estudiaron en estado fresco de acuerdo a la Norma UNE-EN 1015-3; luego se realizaron probetas que fueron estudiadas en estado endurecido, todo de acuerdo a la Norma UNIT-ISO 679. Luego de realizados los ensayos y de analizar los resultados obtenidos, se hizo una nueva selección de agregados para ser empleados en la etapa 2.

En la etapa 2, con las muestras de arena seleccionadas al final de la etapa 1 como más apropiadas como componentes para preparar MHAD, se prepararon nuevamente micro-hormigones utilizando los mismos procedimientos que en la etapa 1, siguiendo la dosificación base de la tabla 3.7 pero también con nuevas dosificaciones variando la relación ar/c de la dosificación base inicial tomada como premisa para este estudio según la tabla 3.8. Estas nuevas muestras de micro-hormigones se estudiaron en estado fresco y en estado endurecido, según los procedimientos y normas empleados en la etapa anterior. Luego de realizados los ensayos se analizaron los resultados obtenidos para obtener las conclusiones que permitieron cumplir con los objetivos de este trabajo. A continuación se presenta la tabla 3.5 donde se resumen los ensayos realizados, las normas empleadas en su realización y las cantidades de muestras estudiadas; en los ítems siguientes se explican con más detalle.

Etapa	Tipo de ensayo	Norma	Cant. muestras
1	Estudio granulométrico de arenas	UNIT-NM 248:2002	18
1	Selección de agregados aptos para su empleo en hormigón	UNIT 82-51	8
1	Preparación de micro-hormigones	UNIT-ISO 679:2009	8
1	Ensayo de consistencia	UNE-EN 1015-3:2000	8
1	Preparación de probetas con micro-hormigón	UNIT-ISO 679:2009	24
1	Ensayo de probetas a flexión	UNIT-ISO 679:2009	24
1	Ensayo de probetas a compresión	UNIT-ISO 679:2009	48
2	Nueva preparación de micro-hormigones	UNIT-ISO 679:2009	15
2	Nuevo ensayo de consistencia	UNE-EN 1015-3:2000	15
2	Nueva preparación de probetas con micro-hormigón	UNIT-ISO 679:2009	45
2	Nuevo ensayo de probetas a flexión	UNIT-ISO 679:2009	45
2	Nuevo ensayo de probetas a compresión	UNIT-ISO 679:2009	90

**Tabla 3.5** – Resumen de ensayos realizados, normas empleadas y cantidades de muestras estudiadas.

### 3.4.1 Estudio granulométrico y selección de las arenas a ser empleadas

Se estudió la granulometría de las diferentes arenas según el procedimiento establecido en la Norma UNIT-NM 248 con el fin de establecer cuáles de ellas poseen curvas representativas dentro de los límites planteados por la Norma UNIT 82-51. De esa forma se determinó si la muestra es aceptable o recomendable para la realización de los micro-hormigones.

Para realizar los ensayos de granulometría de cada arena se debieron tomar dos muestras de material (en adelante a llamarse “M1” y “M2”) según el procedimiento establecido en la norma de referencia y así llegar a los valores representativos buscados. Con el fin de obtener dos muestras M1 y M2 que fueran representativas de la muestra de origen, se realizó el cuarteado de las muestras y previo a la realización del ensayo fue necesario secar dichas muestras a horno para eliminar cualquier rastro de humedad que pudiera haber. En la figura 3.4 se presenta ejemplo del cuarteo realizado con una de las muestras de arena.



**Figura 3.4** – Cuarteo de muestras de arena.

Una vez que se tuvieron las muestras en condiciones para comenzar con el ensayo, se trabajó en primera instancia con una muestra: M1 y luego con M2. Se pesó la muestra M1 y luego se la colocó en una torre de tamices cerrada que se ubicó en la sacudidora mecánica donde se sacudió durante un tiempo adoptado de 3 minutos. Una vez finalizada la sacudida de la muestra, se pesó el contenido

de dicha muestra que quedó retenida en cada tamiz y posteriormente se calcularon los porcentajes de retención en los tamices. Cabe aclarar que la sumatoria de las masas en cada tamiz no puede diferir en más de 0,3% de la masa inicial. A continuación, se realizó el mismo procedimiento con la muestra M2.

Una vez que se obtuvieron los porcentajes de retención de cada muestra, se calculó el porcentaje medio entre ambas M1 y M2 y con los valores de porcentaje medio retenido en cada tamiz se calculó el porcentaje acumulado. Cabe destacar que, en los tamices, la norma plantea que los valores de los porcentajes retenidos individualmente no deben diferir en más de un 4% entre sí y los medios se determinan con una aproximación del 1%. Con el porcentaje de acumulados calculados se procedió a obtener el módulo de finura (MF) con una aproximación de 0,01, mediante la realización de la sumatoria de todos los porcentajes acumulados para cada tamiz y dividiendo dicha sumatoria entre 100. A continuación, se presenta una ecuación de creación propia para el cálculo del módulo de finura que ilustra lo anteriormente dicho.

$$MF = \frac{\Sigma \%Retenido\ Acumulado\ (4,76-2,38-1,19-0,59-0,297-0,149)}{100}$$

Donde:

% Retenido Acumulado (4,76-2,38-1,19-0,59-0,297-0,149) son los porcentajes retenidos acumulados en los tamices 4,76 mm – 2,38 mm – 1,19 mm – 0,59 mm – 0,297 mm– 0,149 mm. Cada porcentaje acumulado de cada tamiz se calcula mediante la sumatoria de los porcentajes medios correspondientes al del propio tamiz y a los de los tamices siguientes de mayor tamaño de apertura.

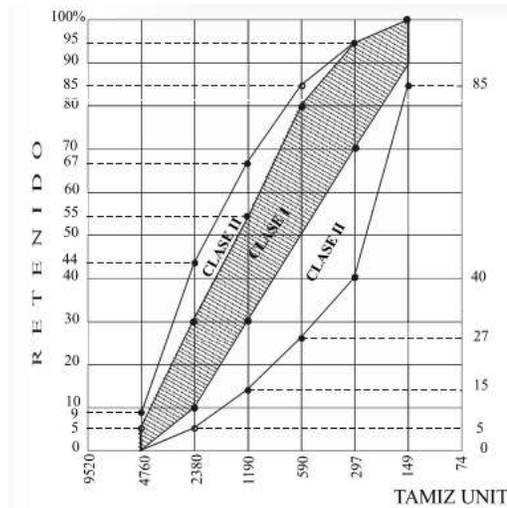
Posteriormente se pudo determinar con el valor del módulo de finura el valor de la dimensión máxima característica del agregado.

Con estos datos se graficó la curva representativa de la muestra de origen en el gráfico de curvas límite que brinda la Norma UNIT 82-51, debiendo colocar en el eje de abscisas las aberturas de mallas de los tamices y en el eje de ordenadas los porcentajes acumulados de retención de los agregados en los tamices. Una vez realizado esto, se observó si la curva trazada se encontraba dentro de los límites dados por las curvas límite indicadas en la Norma UNIT 82-51. Las curvas límite de la norma anteriormente mencionada establecen dos clases de agregado fino en función de su granulometría siendo la clase I: agregado fino recomendable para hormigones y la clase II: agregado fino aceptable para hormigones. La curva granulométrica de la muestra de origen conviene que sea de forma regular y de un trazado similar al de las curvas límite de la clase I.

Las figuras 3.5 presenta el proceso del estudio granulométrico de una de las muestras y la figura 3.6 el gráfico de la Norma UNIT 82-51 con los límites aceptables y recomendables indicados con los cuales se realizó la comparación de las curvas representativas de las muestras estudiadas.



**Figura 3.5 – Estudio granulométrico de las arenas:**  
 a) contenido de muestra de arena retenido en uno de los tamices,  
 b) peso del contenido retenido de muestra de arena en cada tamiz,  
 c) clasificación del contenido total de muestra de arena según el diámetro del tamiz donde el material quedó retenido: 4,76 mm -2,38 mm -1,19 mm-0,59 mm-0,297 mm-0,149 mm-resto.



**Figura 3.6 – Gráfico de curvas límite que establece la Norma UNIT 82-51 dentro de las que debe mantenerse la granulometría de un agregado fino para ser considerado apto para la elaboración de hormigones.**

### 3.4.2 Realización de micro-hormigones y probetas

Una vez obtenidas las muestras idóneas, con curvas representativas comprendidas dentro de las curvas límite indicadas por la norma mencionada, se realizaron los micro-hormigones con esas muestras siguiendo el procedimiento de la Norma UNIT-ISO 679, con la excepción de la dosificación para la que se empleó la mencionada en el punto 3.5. Posteriormente se conformaron las probetas de acuerdo también con la misma norma.

#### 3.4.2.1 Ejecución de los micro-hormigones

Teniendo de referencia la dosificación base, la tabla 3.6 presenta la determinación del volumen necesario de micro-hormigón empleado en los ensayos, en función de la necesidad de conformar tres probetas de micro-hormigón por cada muestra de arena para ensayar en estado endurecido.

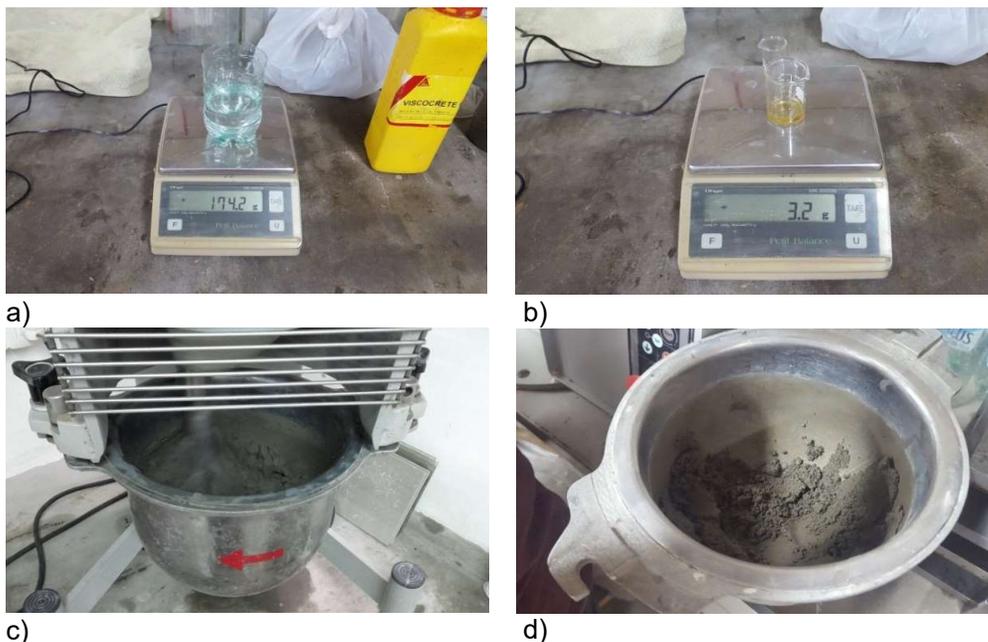
Dichos micro-hormigones se realizaron de forma similar a como se hacen los morteros para el ensayo de resistencia de cementos.

Dimensiones de prismas			Volumen/prisma (m <sup>3</sup> )	Cantidad prismas/muestra	Volumen (m <sup>3</sup> )
largo (m)	ancho (m)	altura (m)			
0,04	0,04	0,16	0,000256	3	0,000768

**Tabla 3.6** – Cálculo del mortero necesario para conformar tres probetas por cada muestra de arena.

Una vez obtenido el volumen de micro-hormigón a fabricar por muestra, se calcularon los kilos de materiales necesarios para la realización de cada mezcla de micro-hormigón considerando un desperdicio del 20%. Una vez calculadas las cantidades ya se está en condiciones de comenzar el amasado y la ejecución de los micro- hormigones.

Según procedimiento establecido en la Norma UNIT-ISO 679, para la ejecución del micro-hormigón se colocó el agua junto con el aditivo y el cemento portland y se puso en marcha la amasadora a velocidad lenta durante 30 segundos. Durante los 30 segundos siguientes se fue agregando de a poco la arena para luego amasar a velocidad rápida durante 30 segundos más. Luego de parar la amasadora durante otros 90 segundos para retirar el micro-hormigón de las paredes y acomodarlo en el centro del recipiente se amasó nuevamente a velocidad rápida durante 60 segundos. La figura 3.7 muestra las etapas realizadas durante el ensayo para la ejecución del micro-hormigón.

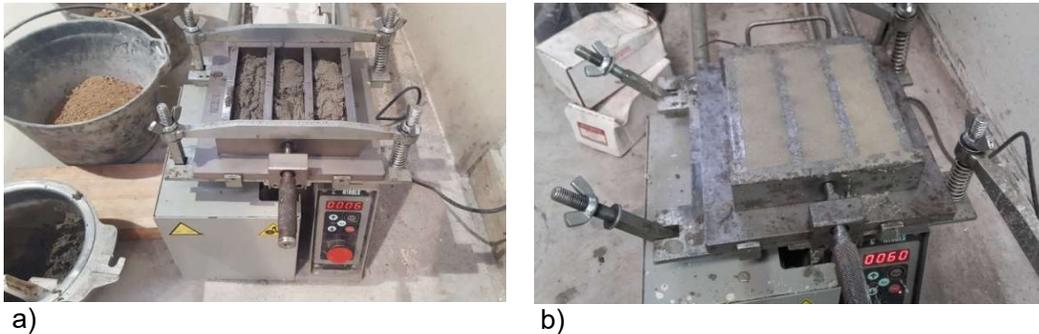


**Figura 3.7** – Ejecución de micro-hormigones: a) peso del agua, b) peso del aditivo, c) amasado del agua, aditivo, cemento portland y arena, d) micro-hormigón obtenido

### 3.4.2.2 Preparación de probetas

Luego de realizado el ensayo en estado fresco se conformaron las probetas para la evaluación en estado endurecido según lo indicado en la Norma UNIT-ISO 679. Se colocó el micro-hormigón en 2 capas en el molde metálico lubricado que permite realizar tres probetas prismáticas tal como

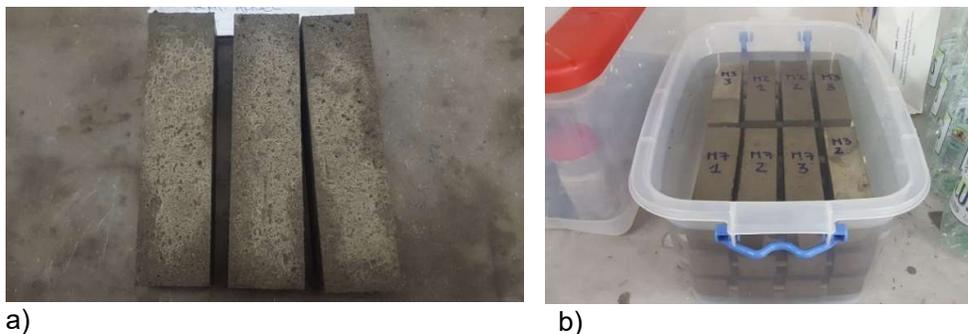
muestra la figura 3.8. Cada capa se compactó 60 golpes en una compactadora mecánica, posteriormente se enrasó quitando el excedente de material, se retiró el molde de la compactadora y se le colocó sobre dicho molde una placa de vidrio para luego ser guardado durante 24 horas en laboratorio a temperatura controlada ( $20 \pm 1$ ) °C.



**Figura 3.8** – Conformación de probetas: a) colocación de material en una primera capa en molde metálico de probetas, b) micro-hormigón ya colocado en 2 capas en molde metálico de probetas y ya compactado.

### 3.4.2.3 Desmolde y curado de probetas

Al día siguiente de su realización, se llevó a cabo el desmolde y curado de las probetas de acuerdo a la figura 3.9. Una vez fueron desmoldadas del molde metálico, las probetas fueron curadas por inmersión de acuerdo con la norma, en un recipiente con agua potable a temperatura de laboratorio ( $20 \pm 1$ ) °C, ubicándolas de forma horizontal separadas entre sí.



**Figura 3.9** – Desmolde y curado de probetas: a) desmolde de probetas para ser posteriormente curadas, b) curado de probetas en agua potable.

### 3.4.3 Ensayos de los micro-hormigones

Una vez conformados los micro-hormigones se ensayaron en estado fresco mediante ensayo de consistencia de acuerdo a la Norma UNE-EN 1015-3. A continuación ese material fue empleado para la ejecución de las probetas las cuales fueron posteriormente curadas. A los 28 días de edad a partir del “tiempo cero” se retiraron las probetas de los recipientes con agua en los que fueron curadas, ubicándolas en recipientes secos y cubriéndolas con un paño húmedo hasta el momento del ensayo a rotura por flexión y a compresión, ambos de acuerdo con la Norma UNIT-ISO 679.

### 3.4.3.1 En estado fresco

Una vez obtenido el micro-hormigón, se realizó el ensayo en mesa de sacudidas de acuerdo al procedimiento de la Norma UNE-EN 1015-3 para poder determinar su tipo de consistencia.

De acuerdo con lo que especifica la norma previamente mencionada, el micro-hormigón se introdujo en 2 capas en un molde troncocónico ubicado en el centro de la mesa de sacudidas. Una vez compactadas las capas y enrasado el micro-hormigón, al cabo de 15 segundos se retiró el molde y se activó la mesa de sacudidas. Al cabo de 15 sacudidas a razón de 1 sacudida/segundo la mezcla que quedó extendida en el disco fue medida en 2 diámetros perpendiculares y se calculó el promedio.

La investigación previamente mencionada del Proyecto ANII FMV 2009-1-2717 recomienda que el valor del escurrimiento debe de quedar dentro del rango ( $26\pm 2$ ) cm. En caso de encontrarse por debajo de este rango, se debería corregir agregando aditivo mientras que si se encuentra por encima del rango se debería repetir el procedimiento empleando menos aditivo.

Dado que el objetivo de este trabajo experimental consiste en determinar si alguna de las muestras recabadas es idónea para realizar micro-hormigón de alto desempeño en su estado original (entiéndase por estado original el no tener necesidad de realizar modificaciones en su consistencia y por lo tanto ajustes en la cantidad de aditivo), se pre-estableció que no se realizarían ajustes en la cantidad de aditivo en caso que los valores de escurrimiento no estuvieran dentro del rango ( $26\pm 2$ ) cm de acuerdo con la investigación tomada de referencia. En el presente estudio cabe aclarar que se realizaron probetas con los valores originales de asentamiento, a los efectos de comparar los resultados con la dosificación base empleada, proveniente del proyecto ANII FMV mencionado anteriormente. La figura 3.10 ilustra el ensayo en mesa de sacudidas.



**Figura 3.10** – Ensayo en mesa de sacudidas: a) colocación de micro-hormigón en molde troncocónico, b) molde lleno listo para ser retirado y activada la mesa de sacudidas, c) escurrimiento.

### 3.4.3.2 En estado endurecido

Al cabo de 28 días de haber conformado las probetas con el micro-hormigón, se ensayaron dichas probetas primeramente a rotura por flexión y los dos trozos de probeta obtenidos producto de ese ensayo fueron a continuación ensayados por rotura a compresión.

Para realizar el ensayo a flexión se siguió el procedimiento establecido por la Norma UNIT-ISO 679 en el que se utiliza el método de carga de los tres puntos. De acuerdo con la norma, se ubicó el prisma de 40 mm x 40 mm x 160 mm en la máquina de ensayo con una cara lateral sobre los rodillos soporte separados 100 mm ± 0,5mm entre sí, y con su eje longitudinal normal a los soportes de acuerdo con la figura 3.11. Se aplicó la carga verticalmente mediante el rodillo de carga superior sobre la cara lateral opuesta del prisma y se incrementó uniformemente a una velocidad de 50 N/s (Newton/segundo) ± 10 N/s hasta la rotura. Posteriormente se mantuvieron las mitades del prisma cubiertas con un paño húmedo hasta el ensayo de compresión.

Una vez realizada la rotura se procedió de acuerdo con la norma al cálculo de la resistencia a la flexión, en megapascales, mediante la siguiente fórmula:

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3}$$

Donde:

$R_f$  es la Resistencia a flexión (en megapascales)

$b$  es el lado de la sección cuadrada del prisma (en milímetros)

$F_f$  es la carga aplicada en la mitad del prisma en la rotura (en newtons)

$l$  es la distancia entre soportes (en milímetros)

De acuerdo con la normativa, el resultado del ensayo a flexión se calculó realizando la media aritmética de los tres resultados individuales, expresados, cada uno de ellos, redondeados al 0,1 MPa más cercano y obtenidos de la determinación realizada sobre un conjunto de tres probetas. Se expresa la media aritmética redondeada al 0,1 MPa más cercano.

Para realizar el ensayo a compresión se siguió el procedimiento establecido por la Norma UNIT-ISO 679 para ensayar los semiprismas rotos obtenidos en el ensayo a flexión. Se ensayó cada semiprisma cargando sus caras laterales en la prensa Multitest tal como se muestra en la figura 3.12. Se centró cada semiprisma lateralmente con relación a los platos de la máquina a ± 0,5mm, y longitudinalmente de forma que la base del prisma no sobresaliera de los platos o placas auxiliares más de unos 10mm. Una vez ubicado el semiprisma se procedió a aumentar la carga uniformemente a una velocidad de 2400 N/s ± 200 N/s durante todo el tiempo de aplicación de la carga hasta la rotura.

Una vez realizada la rotura se procedió de acuerdo con la norma al cálculo de la resistencia a la compresión, en megapascales, mediante la siguiente fórmula:

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Donde:

$R_c$  es la Resistencia a compresión (en megapascuales)

$F_c$  es la carga máxima de rotura (en newtons)

1600= 40 mm x 40 mm, es la superficie de los platos o placas auxiliares (en milímetros cuadrados)



Figura 3.11 – Ensayo a flexión de una de las probetas realizadas.



Figura 3.12 – Ensayo a compresión de una de las mitades obtenidas de las probetas ensayadas a flexión.

De acuerdo con la normativa, el resultado del ensayo a compresión se calculó realizando la media aritmética de los seis resultados individuales, expresados, cada uno de ellos, redondeados al 0,1 MPa más cercano y obtenidos de las seis determinaciones realizadas sobre un conjunto de tres probetas. Se expresa la media aritmética redondeada al 0,1 MPa más cercano. Si uno de los resultados varía en más de  $\pm 10\%$  respecto a la media, se descarta este resultado y se calcula la media aritmética de los cinco resultados restantes. Si uno de los cinco resultados de las muestras restantes varía en más de  $\pm 10\%$  respecto a la media, se descarta la totalidad de los resultados y se repite el ensayo de muestras.

### 3.5 DOSIFICACIONES EMPLEADAS

La tabla 3.7 presenta la dosificación empleada para el trabajo experimental y con la que se trabajó en la etapa 1, que fue tomada como referencia de una de las dosificaciones obtenidas de micro-hormigón de alto desempeño denominada “muestra media rica”, del proyecto de investigación de la ANII FMV 2009-1-2717. Dicha dosificación fue elegida para este trabajo dado que de las dosificaciones obtenidas en el proyecto mencionado previamente, fue la dosificación más

conveniente desde el punto de vista económico y de prestaciones para realizar micro-hormigón de alto desempeño.

Muestra	Relación arena/cemento	Relación agua/cemento	Cemento portland (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
MEDIA RICA	2	0,36	707	1413	252	3

**Tabla 3.7** – Dosificación tomada como base.

La tabla 3.8 presenta la dosificación base y las nuevas dosificaciones producto de alterar la relación ar/c y manteniendo la relación a/c de la dosificación base y que fueron empleadas en la etapa 2 para conformar las muestras de MHAD.

Relación arena/cemento	Relación agua/cemento	Cemento portland (kg/m <sup>3</sup> )	Arena (kg/m <sup>3</sup> )	Agua (kg/m <sup>3</sup> )	Aditivo (kg/m <sup>3</sup> )
4	0.36	480	1920	173	4
3.5		525	1838	189	3.5
3		579	1737	208	3.5
2.5		644	1610	232	3.5
2		707	1413	252	3

**Tabla 3.8** – Dosificaciones para conformar un metro cúbico de muestra empleada en la etapa 2.

### 3.6 ANALISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

En función de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados el análisis de resultados varió.

En algunos casos se realizó un análisis estadístico básico determinando la media, desviación estándar y coeficiente de variación de los resultados obtenidos y se discutieron los resultados; en otros casos se procedió a analizar los resultados obtenidos con el fin de poder determinar las muestras que se consideran idóneas para producir micro-hormigón y con las que se continuará trabajando en otra de las etapas de la parte experimental.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS Y DISCUSIÓN

---

### 4.1 ETAPA 1

#### 4.1.1 Estudio granulométrico de los agregados

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 3, se caracterizaron 18 muestras de diferentes arenas mediante la realización de ensayos de granulometría de acuerdo a la Norma UNIT-NM 248. Cada muestra fue estudiada (ver Anexo 1 donde se presentan las tablas, gráfico y fotografías de cada muestra) y analizada con el fin de obtener los datos que permiten realizar las curvas granulométricas de cada una. A continuación, la figura 4.1 presenta las curvas de cada muestra en la gráfica con los límites presentados por la Norma UNIT 82-51 (las gráficas se numeran en orden creciente de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo), donde se puede observar que:

- La muestra 1 es mayoritariamente fina, la mayor parte del material quedó retenido en los diámetros más pequeños de los tamices (0.59 mm, 0.297 mm y 0.149 mm). De acuerdo con esto, dicha muestra presenta una gráfica muy irregular, escapando de los límites indicados como aceptable y recomendable por la Norma UNIT 82-51 y la cual es utilizada como referencia por este trabajo de investigación para seleccionar las arenas a ser empleadas para realizar micro-hormigón, por lo que esta muestra no fue seleccionada para continuar con los ensayos.
- La muestra 2 es mayoritariamente fina de acuerdo a su dimensión máxima característica, quedando la mayor parte del material retenido en los diámetros más pequeños de los tamices (0.59 mm, 0.297 mm y 0.149 mm) pero también quedando retenido en el tamiz de 1.19 mm, presentando un gráfico con tendencia a ser irregular pero que se encuentra entre las clases recomendable y aceptable por lo que se continuó trabajando con dicha muestra en la realización de micro-hormigones.
- La muestra 3 presenta similares características que la muestra 2, la mayor parte del material queda retenido en los diámetros 0.59 mm, 0.297 mm, 0.149 mm y 1.19 mm de los tamices, presentando un gráfico con tendencia a ser irregular y encontrándose entre las clases recomendable y aceptable por lo que también se continuó trabajando con dicha muestra.
- La muestra 4 queda mayormente retenida en los diámetros 0.59 mm, 0.297 mm, 0.149 mm y el último tamiz, siendo mayoritariamente fina. Presenta una gráfica muy irregular, que escapa también irregularmente de los límites indicados en la norma, por lo que esta muestra no fue empleada en ensayos futuros.
- La muestra 5 corresponde a arena mayoritariamente fina, quedando mayormente retenida en los diámetros 0.59 mm, 0.297 mm, 0.149 mm y el último tamiz como la muestra 4. Su gráfica escapa del límite recomendable de la norma, siendo muy irregular por lo que tampoco se continuó trabajando con dicha muestra.

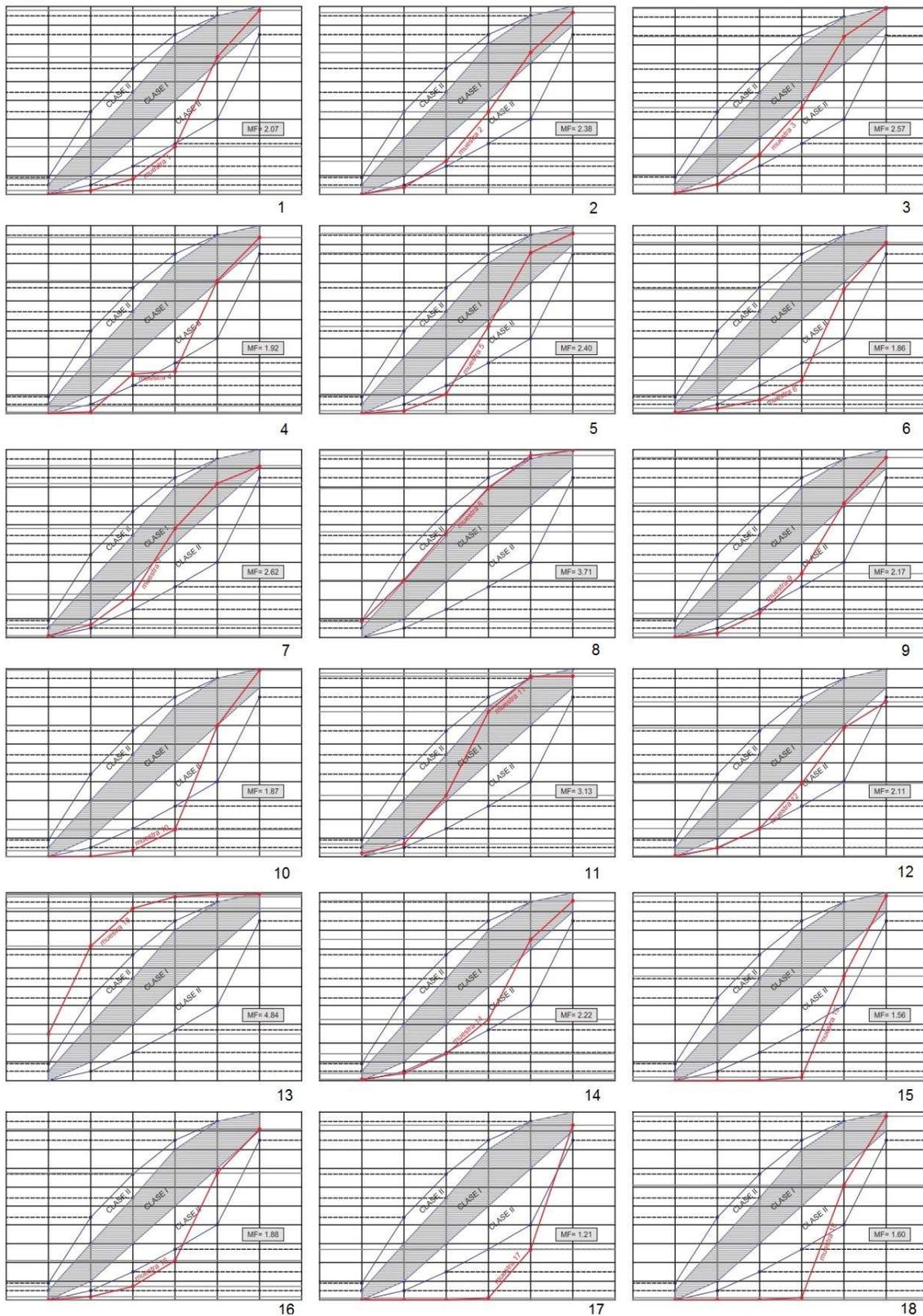


Figura 4.1 – Gráficas de curvas representativas de cada muestra según la Norma UNIT 82-51.

- La muestra 6 está constituida mayoritariamente por arena fina que queda retenida principalmente en los tamices 0.297 mm, 0.149 mm y el último tamiz, por lo que constituye una gráfica muy irregular que escapa mayoritariamente del límite establecido como aceptable y no se continuó trabajando con esta muestra.
- La muestra 7 presenta una distribución más uniforme de las granulometrías retenidas en los diferentes tamices, mayormente quedando retenida en los diámetros 1,19 mm, 0.59 mm, 0.297 mm, 0.149 mm y el último tamiz. La gráfica muestra una arena que está muy próxima a ser recomendable para su empleo en la ejecución de MHAD por lo que se continuó trabajando con ella en la etapa siguiente.
- La muestra 8 se encuentra en el límite superior de la curva recomendable, esto puede deberse a la presencia con pocos finos que se observa tanto en el tipo de arena más bien gruesa como en el valor de su dimensión máxima característica. La distribución de la arena en los diferentes tamices se encuentra mayormente en los diámetros 4,76 mm, 2,38 mm, 1,19 mm, 0.59 mm y 0.297 mm. Se continuó trabajando con dicha muestra.
- La muestra 9 presenta una distribución granulométrica mayormente en los tamices 1,19 mm, 0.59 mm, 0.297 mm y 0,149 mm. Esta muestra presenta una gráfica irregular, sin embargo, podría considerarse casi aceptable por lo que se siguió trabajando con dicha muestra.
- La muestra 10 es mayoritariamente fina, quedando retenida principalmente en los tamices 0.59 mm, 0.297 mm y 0,149 mm. Su gráfica escapa del límite aceptable, por lo que no se empleó en futuros ensayos.
- La muestra 11 de arena queda principalmente retenida en los tamices 1,19 mm, 0.59 mm y 0.297 mm y su gráfica, aunque algo irregular indica que es recomendable para su empleo por lo que se siguió trabajando con dicha muestra.
- La muestra 12 presenta una distribución granulométrica mayormente en los tamices 0.59 mm, 0.297 mm, 0,149 mm y el último tamiz. En los tamices 2.38 mm y 1.19 mm queda retenida una menor cantidad de material y en el de 4,76 mm menos cantidad aún. La gráfica de dicha muestra es algo regular y se encuentra dentro del límite aceptable para su empleo por lo que se continuó trabajando con dicha muestra.
- La muestra 13 al ser gravillín, escapa de los límites establecidos por la norma. Si bien tiene alto contenido de material fino, es muy alto el material retenido en los tamices mayores a 0.59 mm por lo que no es aconsejable trabajar con esta muestra. Su gráfico es irregular y escapa totalmente a los límites aceptables y recomendables por la norma de allí que no se empleará para realizar micro-hormigones en esta tesis. La dimensión máxima característica de la muestra es mucho mayor que 4,76 mm (tamiz que separa los agregados finos de los agregados gruesos), quedando retenido en dicho tamiz aproximadamente 25% de la muestra, adoptándose dicho valor como dimensión máxima característica pues la fracción retenida en dicho tamiz también se podría emplear para realizar micro-hormigones si el porcentaje retenido fuera menor o igual a 5%.

- La muestra 14 queda principalmente retenida en los tamices 1.19 mm, 0.59 mm, 0.297 mm y 0.149 mm, quedando la mayor cantidad de material retenido en el tamiz 0.297 mm. Presenta una gráfica irregular, sin embargo puede considerarse dentro de los límites para su empleo por lo que se continuó trabajando con dicha muestra.
- La muestra 15 queda principalmente retenida en los tamices 0,297 mm y 0,149 mm siendo la arena muy fina para su empleo y su gráfica escapa de los límites establecidos por la norma por lo que no se continuó usando dicha muestra.
- La muestra 16 presenta una distribución granulométrica mayormente en los tamices 0.59 mm, 0.297 mm, 0,149 mm y el último tamiz, siendo mayoritariamente arena fina. El gráfico escapa de los límites establecidos y es muy irregular por lo que esta muestra no se continuó empleando en futuros ensayos.
- La muestra 17 presenta un gráfico irregular que escapa de los límites recomendables y aceptables de arena, correspondiendo su gráfico al de una arena fina. La mayor parte del material queda retenido en los tamices 0,297 mm y 0,149 mm. Esta muestra no se empleó en la siguiente etapa de ensayos.
- La muestra 18, si bien parte de su gráfica irregular está en los límites recomendables y aceptables, el resto escapa siendo mayoritariamente arena fina y quedando retenida principalmente en los tamices 0,297 mm y 0,149 mm como la muestra 17. Tampoco se continuó empleando esta muestra en futuros ensayos.

A continuación, se presenta la tabla 4.1 que resume los datos y resultados obtenidos (N° de muestra, idoneidad de la muestra, módulo de finura, dimensión máxima característica, tipo de gráfico de la muestra de arena y límite de la curva granulométrica) del estudio granulométrico realizado a las arenas, así como las conclusiones extraídas mencionadas anteriormente.

Muestra	Idónea	Módulo de finura (MF)	Dimensión máxima característica	Observación	Límites
1	No	2,07	2,38 mm	Gráfica muy irregular	Escapa de límite aceptable y recomendable
2	Si	2,38	2,38 mm	Gráfica algo irregular	Entre límite aceptable y recomendable
3	Si	2,57	4,76 mm	Gráfica algo irregular	Entre límite aceptable y recomendable
4	No	1,92	1,19 mm	Gráfica muy irregular	Escapa irregularmente de los límites
5	No	2,40	2,38 mm	Gráfica muy irregular	Escapa de los límites
6	No	1,86	2,38 mm	Gráfica muy irregular	Escapa mayormente de límite aceptable
7	Si	2,62	4,76 mm	Gráfica algo regular	Próximo a límite recomendable
8	Si	3,71	4,76 mm	Gráfica regular	En límite superior de curva recomendable
9	Si	2,17	2,38 mm	Gráfica irregular	En límite casi aceptable
10	No	1,87	1,19 mm	Gráfica irregular	Escapa de límite aceptable
11	Si	3,13	4,76 mm	Gráfica algo irregular	En límite recomendable
12	Si	2,11	2,38 mm	Gráfica algo regular	En límite aceptable
13	No	4,84	4,76 mm	Gráfica irregular	Escapa de los límites
14	Si	2,22	2,38 mm	Gráfica irregular	Entra en los límites
15	No	1,56	0,59 mm	Gráfica irregular	Escapa de los límites
16	No	1,88	2,38 mm	Gráfica muy irregular	Escapa de los límites
17	No	1,21	0,59 mm	Gráfica irregular	Escapa de los límites
18	No	1,60	0,59 mm	Gráfica irregular	Escapa de los límites

**Tabla 4.1** –Resumen de datos obtenidos y análisis de muestras de arena.

En función de los resultados obtenidos del análisis de las 18 muestras iniciales se continuará trabajando con las siguientes muestras: M2 – M3 - M7 – M8 – M9 – M11 – M12 – M14, presentadas en la figura 4.2; con ellas se realizaron micro-hormigones con la dosificación base presentada en el capítulo 3.

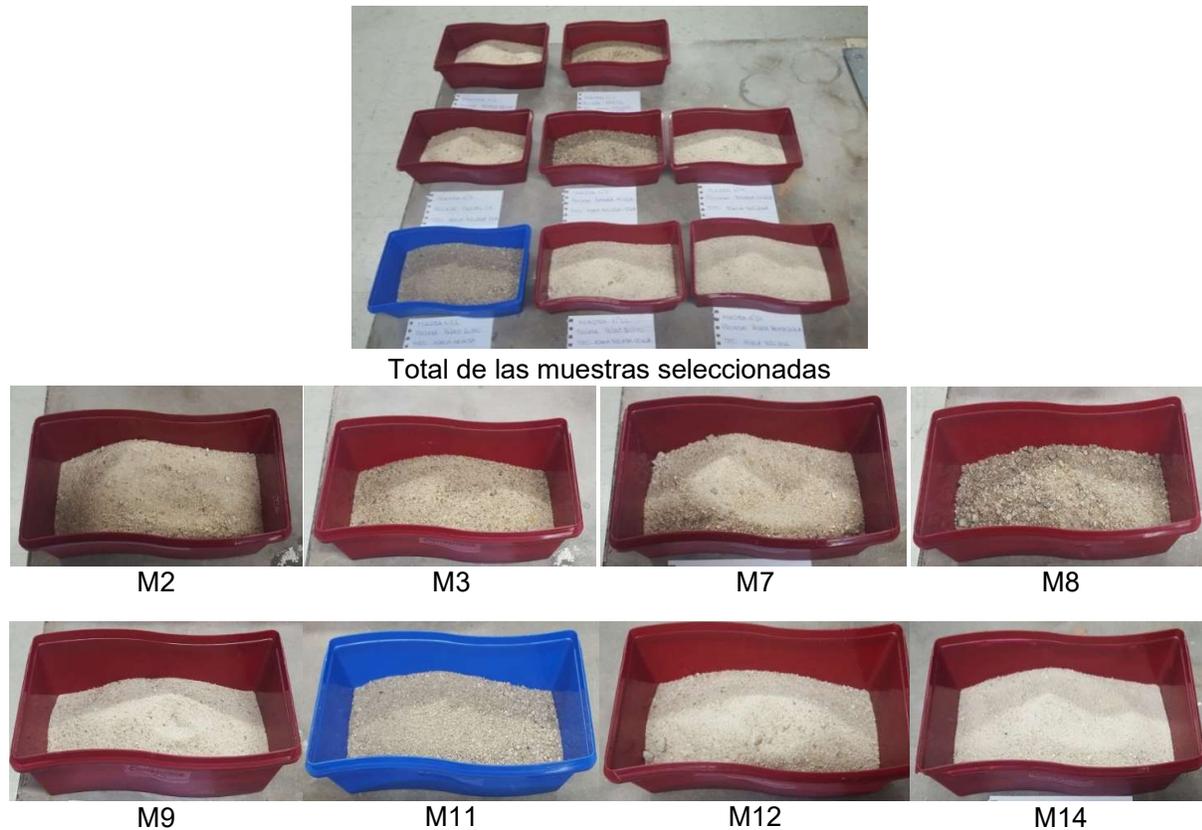


Figura 4.2 –Total de muestras seleccionadas de acuerdo al análisis de granulometría y detalle de cada una de ellas.

#### 4.1.2 Resultados de los micro-hormigones realizados con las muestras de agregados seleccionadas

El micro-hormigón realizado según lo indicado en el capítulo 3, con las muestras de arenas seleccionadas, se ensaya primeramente para conocer su comportamiento en estado fresco y con él se realizan probetas para conocer su comportamiento en estado endurecido. Los resultados obtenidos con cada una de las muestras seleccionadas en el punto anterior se presentan a continuación

##### 4.1.2.1 Resultados en estado fresco

Para conocer el comportamiento en estado fresco de los micro-hormigones se ensayan en la mesa de sacudidas de acuerdo a la Norma UNE-EN 1015-3. La figura 4.3 muestra los asentamientos obtenidos para algunas de las muestras estudiadas y la tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos de dichos ensayos.



Figura 4.3 – Resultados en ensayos de mesa de sacudidas.

Muestra		Diámetro 1 (mm)	Diámetro 2 (mm)	Media (mm)
2	Tipo: arena terciada Cantera: Nilafer Procede de: Barraca Gallinal	142	142	142
3	Tipo: arena terciada gruesa Cantera: Darmix Procede de: Darmix	248	250	249
7	Tipo: arena terciada fina Cantera: Tincotal S.A. Procede de: Tincotal S.A.	134	134	134
8	Tipo: arena terciada gruesa Cantera: MRA Ltda. Procede de: Barraca Aguirre	285	285	285
9	Tipo: arena terciada Cantera: Astilco Procede de: Barraca Olivieri	145	145	145
11	Tipo: arena gruesa Cantera: Pérez Busto Procede de: Pérez Busto	257	254	255,5
12	Tipo: arena terciada gruesa Cantera: Pérez Busto Procede de: Pérez Busto	131	129	130
14	Tipo: arena terciada Cantera: Arnel Procede de: Barraca Panamericana	133	134	133,5

Tabla 4.2 – Resultados obtenidos de ensayos en mesa de sacudidas de micro-hormigones realizados con las muestras de arenas seleccionadas.

En función de los datos obtenidos se observa que el valor hallado se encuentra dentro del rango de  $(26 \pm 2)$  cm, usado en el proyecto ANII FMV 2009-1-2717, en los casos de las muestras M3 y M11. Las muestras cuyos valores se encuentran por debajo de ese rango y que por lo tanto se deberían de corregir agregando aditivo son las siguientes: M2, M7, M9, M12 y M14. En el caso de la muestra M8, el valor del escurrimiento es mayor que el valor de la media por lo que se debería de repetir el ensayo reduciendo la cantidad de aditivo.

#### 4.1.2.2 Estado endurecido

Como fuera mencionado en el capítulo 3, con los micro-hormigones estudiados en estado fresco se realizaron probetas prismáticas de 4 cm x 4 cm x 16 cm las que a los 28 días se ensayaron según procedimiento establecido en la Norma UNIT-ISO 679, primero a flexión y luego cada mitad se ensayó a compresión.

Los resultados de los ensayos a flexión de 24 probetas (3 probetas por muestra) se presentan en la tabla 4.3, junto con los parámetros estadísticos básicos (media,  $F_f$ , desviación estándar,  $\sigma$  y coeficiente de variación, CV). En el Anexo 2 se puede observar la tabla completa con las cargas máximas aplicadas y los valores obtenidos de resistencia para cada probeta.

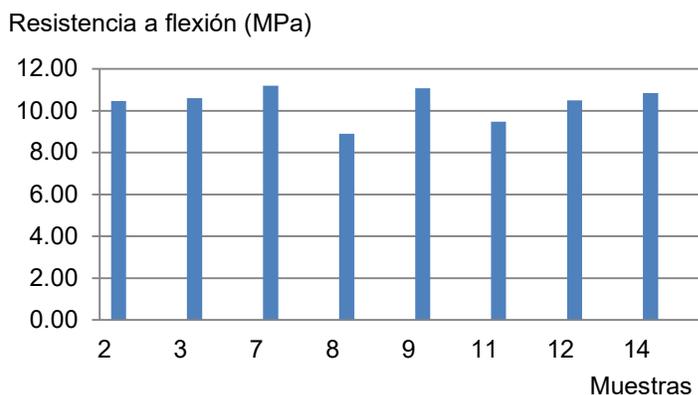
Muestra	$F_f$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)
2	10,46	0,57	5,42
3	10,59	0,18	1,71
7	11,19	0,34	3,08
8	8,89	0,17	1,92
9	11,07	0,31	2,78
11	9,47	0,40	4,22
12	10,49	0,71	6,81
14	10,84	0,23	2,09

**Tabla 4.3** – Resultados obtenidos de ensayos de rotura a flexión y los parámetros estadísticos básicos de las probetas con las muestras de arenas seleccionadas.

El coeficiente de variación (CV) de cada muestra hace referencia a la relación entre la variabilidad de la muestra y su media, de allí que es la relación entre la desviación estándar de la muestra y su media; se expresa en porcentaje y permite comparar las dispersiones de dos distribuciones distintas, siempre que sus medias sean positivas. De acuerdo con esto, el CV se toma como índice de las condiciones de ejecución; cuánto más bajo su valor mejores serán las condiciones en las que se realizan los ensayos y los resultados obtenidos serán más confiables. La Norma UNIT-ISO 679 plantea para los CV un valor tope del 10% para determinar si los resultados de la muestra son válidos en los ensayos de compresión.

Se puede observar en la tabla que todos los CV son menores a 10% de acuerdo con lo estipulado por la Norma UNIT-ISO 679, por lo tanto, los resultados obtenidos son válidos. En orden de mayor a menor valor de coeficientes de variación se observan las muestras: M12 – M2 – M11 – M7 – M9 – M14 – M8 – M3.

La Figura 4.4 presenta en gráfico de barras los valores medios obtenidos, observándose que las resistencias a flexión son mayores a 10 MPa, excepto en las probetas en que se empleó las muestras de arena 8 y 11.



**Figura 4.4**—Gráficos de barras para etapa 1: media de la resistencia a la flexión.

La tabla con los resultados de la resistencia a compresión de 48 probetas (ambas partes de las probetas que fueron producto del ensayo a flexión) según la Norma UNIT-ISO 679 se presenta en la tabla 4.4, donde figuran los parámetros estadísticos básicos (media, desviación estándar y coeficiente de variación). En el Anexo 3 se puede observar la tabla completa con las cargas aplicadas y los valores obtenidos de resistencia para cada probeta.

Muestra	F <sub>c</sub> (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
2	69,87	2,84	4,06
3	83,56	2,62	3,13
7	75,70	2,08	2,75
8	72,85	2,38	3,27
9	72,02	2,15	2,99
11	67,36	2,67	3,97
12	69,14	1,80	2,61
14	70,78	3,01	4,25

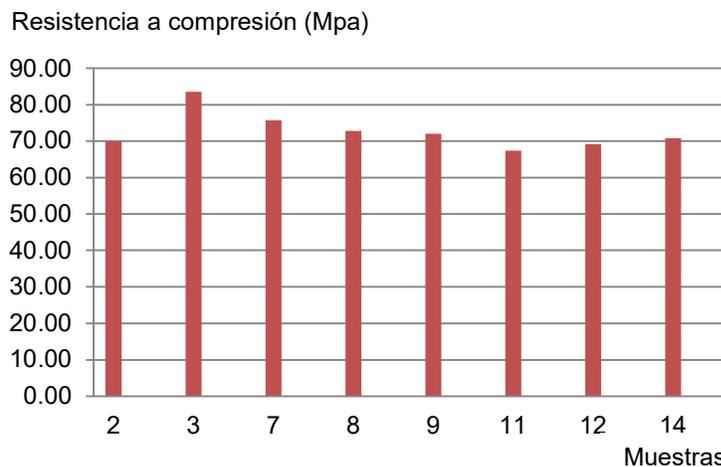
**Tabla 4.4**– Resultados obtenidos de ensayos de rotura a compresión junto con los parámetros estadísticos básicos

La figura 4.5 muestra fragmentos de dichas probetas luego de haber sido ensayadas a compresión, en las que se puede observar que la forma de rotura similar a un “reloj de arena” fue la apropiada para el ensayo realizado (Mehta y Monteiro, 2006).



**Figura 4.5** – Fragmentos de las probetas producto de haber sido ensayadas por rotura a compresión (de izquierda a derecha: M2-M3-M7-M8-M9-M11-M12-M14).

La Figura 4.6 presenta en gráfico de barras los valores medios obtenidos, observándose que las resistencias a compresión a los 28 días de edad son mayores a 60 MPa con todas las muestras de arena empleadas, siendo las probetas realizadas con la muestra de arena 3 las que presentaron mayor resistencia (mayor a 80 MPa).



**Figura 4.6**–Gráficos de barras para etapa 1: media de la resistencia a la compresión.

#### 4.1.2.3 Selección de agregados a ser empleados en etapa 2

La tabla 4.5 muestra un resumen de los resultados obtenidos, siendo el valor medio de la resistencia a flexión ( $F_f$ ), el valor medio de la resistencia a compresión ( $F_c$ ), la desviación estándar ( $\sigma$ ) y el coeficiente de variación (CV).

ARENAS		MICRO-HORMIGONES					
Muestra	MF	FLEXIÓN			COMPRESIÓN		
		$F_f$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)	$F_c$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)
2	2,38	10,46	0,57	5,42	69,87	2,84	4,06
3	2,57	10,59	0,18	1,71	83,56	2,62	3,13
7	2,62	11,19	0,34	3,08	75,70	2,08	2,75
8	3,71	8,89	0,17	1,92	72,85	2,38	3,27
9	2,17	11,07	0,31	2,78	72,02	2,15	2,99
11	3,13	9,47	0,40	4,22	67,36	2,67	3,97
12	2,11	10,49	0,71	6,81	69,14	1,80	2,61
14	2,22	10,84	0,23	2,09	70,78	3,01	4,25

Tabla 4.5 – Resumen de resultados obtenidos en la etapa 1.

Para relacionar los resultados obtenidos con las características de las arenas utilizadas se presenta en la tabla 4.6 resumen de toda la información correspondiente a las arenas preseleccionadas, módulo de finura y observaciones realizadas de las gráficas de los ensayos de granulometría, y los resultados medios obtenidos de los ensayos a flexión ( $F_f$ ) y a compresión ( $F_c$ ) de las probetas realizadas con esas arenas.

ARENAS				MICRO-HORMIGONES	
Muestra	MF	Observaciones	Límites	$F_f$ (MPa)	$F_c$ (MPa)
2	2,38	Gráfica algo irregular	Gráfica de límite entre aceptable y recomendable	10,46	69,87
3	2,57	Gráfica algo regular	Gráfica de límite entre aceptable y recomendable, principalmente aceptable	10,59	83,56
7	2,62	Gráfica algo regular	Gráfica de límite entre aceptable y recomendable, próxima a recomendable	11,19	75,70
8	3,71	Gráfica regular	Gráfica de límite aceptable y en el límite superior de la curva recomendable	8,89	72,85
9	2,17	Gráfica irregular	Gráfica en el límite de lo aceptable	11,07	72,02
11	3,13	Gráfica algo irregular	Gráfico de límite principalmente recomendable	9,47	67,36
12	2,11	Gráfica algo regular	Gráfica de límite aceptable	10,49	69,14
14	2,22	Gráfica irregular	Gráfico de límite principalmente aceptable	10,84	70,78

Tabla 4.6 – Resumen de los resultados de los ensayos realizados.

A continuación, la tabla 4.7 muestra enumeradas las muestras de mayor a menor con los valores de módulo de finura, resistencia a la flexión y resistencia a la compresión.

<b>MF</b>	<b>M8</b>	<b>M11</b>	<b>M7</b>	<b>M3</b>	<b>M2</b>	<b>M14</b>	<b>M9</b>	<b>M12</b>
	3,71	3,13	2,62	2,57	2,38	2,22	2,17	2,11
<b>Flexión</b>	<b>M7</b>	<b>M9</b>	<b>M14</b>	<b>M3</b>	<b>M12</b>	<b>M2</b>	<b>M11</b>	<b>M8</b>
	11,19	11,07	10,84	10,59	10,49	10,46	9,47	8,89
<b>Compresión</b>	<b>M3</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>	<b>M14</b>	<b>M2</b>	<b>M12</b>	<b>M11</b>
	83,56	75,70	72,85	72,02	70,78	69,87	69,14	67,36

**Tabla 4.7** –Valores de módulo de finura, resistencia a la flexión y a la compresión de las muestras ensayadas en etapa 1, enumerados de mayor a menor de izquierda a derecha).

De lo anteriormente presentado se puede extraer las siguientes observaciones relativas a las arenas empleadas en esta fase de la etapa 1:

- La muestra M2 presenta valores bajos de la media de resistencia a compresión y a flexión en comparación con otras de las muestras, obteniendo en ambos casos el sexto lugar. Su gráfico es irregular y se encuentra entre las clases de lo recomendable y aceptable.
- La muestra M3 presentó el cuarto mayor valor de resistencia a la flexión y el mayor valor de resistencia a la compresión. Su gráfico de forma algo regular también se encontró en el límite de lo aceptable y recomendable, pero tendiendo principalmente al aceptable.
- La muestra M7 es la que alcanzó el máximo valor de resistencia por rotura a la flexión y el segundo valor más alto de resistencia a la rotura por compresión. La curva representativa de esta muestra se encuentra entre las curvas aceptable y recomendable pero más próxima a la curva recomendable y la forma del gráfico es algo regular.
- La muestra M8 presentó el menor valor de resistencia a la flexión y el tercer mayor valor de resistencia a la compresión. Su gráfico es regular y se encuentra en el límite superior de la curva recomendable.
- La muestra M9 alcanzó el segundo mayor valor de resistencia a la flexión, sin embargo quedó ubicada en cuarto lugar con referencia al valor de resistencia a la compresión. Su gráfica es encuentra en el límite de lo aceptable, presentando una forma irregular.
- La muestra M11 presentó el penúltimo valor de resistencia a la flexión mientras que obtuvo el valor más bajo de resistencia a la compresión. A pesar de presentar una curva que se encuentra dentro del límite recomendable su forma es algo irregular.

- La muestra M12 alcanzó el quinto lugar en cuanto a valor de resistencia a la flexión y quedó en el penúltimo lugar en cuanto al valor de resistencia a la compresión. Su gráfica es algo regular y se encuentra en el límite aceptable.
- La muestra M14 es algo irregular en su forma, sin embargo, obtuvo el tercer mayor valor de resistencia a la flexión y quedó en quinto lugar con respecto al valor de resistencia a la compresión.

De las tablas y la descripción previamente realizada se obtiene que la muestra M8 tiene el mayor valor de módulo de finura, la muestra M7 presenta el mayor valor de resistencia a flexión y la muestra M3 el mayor valor de resistencia a la compresión. Las tres arenas son las que registran los mayores valores de resistencia a la compresión en relación a las demás muestras y también las que presentan las gráficas más regulares, por lo que serán las arenas seleccionadas para continuar con la etapa siguiente de ensayos.

## **4.2 ETAPA 2**

Luego de seleccionar las tres muestras de arena con las que se trabajó en la etapa 2, de acuerdo con el capítulo 3 se realizaron micro-hormigones con las variaciones de ar/c para cada muestra indicadas en la tabla 3.8 y se ensayaron para conocer sus características en estado fresco con mesa de sacudidas de acuerdo a la Norma UNE-EN 1015-3, y luego al igual que fuera hecho en la etapa 1 se realizaron probetas prismáticas que se rompieron a flexión en primera instancia y luego cada mitad se ensayó a compresión. A continuación, se presentan y discuten los resultados obtenidos de dichos ensayos.

### **4.2.1 Estado fresco**

La figura 4.7 presenta los resultados obtenidos de dichos ensayos para las 5 relaciones ar/c estudiadas (4; 3,5; 3; 2,5; 2) y las 3 muestras de arena empleadas en esta etapa.

Los valores de las medias obtenidos indican que solamente la muestra de arena 3 con relación ar/c igual a 2 y la muestra 8 con relación ar/c de 2,5 se encuentran dentro del rango de  $(26\pm 2)$  cm fijado en el proyecto FMV-2009-1-2717. Ambas arenas son denominadas comercialmente como “arena terciada gruesa”, una procede de la arenera Darmix y la otra de MRA Limitada.

Con la muestra de arena 7 en ninguna de las relaciones ar/c consideradas se obtuvo valores dentro del rango  $(26\pm 2)$  cm. Su denominación comercial de “arena terciada fina” explica los resultados obtenidos, ya que absorbe más agua que las otras dos presentando consistencias muy secas que se disgregaban con las relaciones ar/c mayores (4; 3,5 y 3).

Arena/cemento	Muestra 3	Muestra 7	Muestra 8
4			
	17,00 cm Seca	16,75 cm Muy seca	11,00 cm Poco trabajable
3,5			
	12,25 cm Seca	14,50 cm Muy seca	12,35 cm Poco trabajable
3			
	13,25 cm Seca	13,00 cm Muy seca	17,25 cm Trabajable
2,5			
	15,75 cm Seca a Trabajable	13,15 cm Seca a trabajable	26,35 cm Líquida
2			
	26,50 cm Trabajable	20,75 cm Trabajable	29,50 cm Muy líquida

**Figura 4.7** –Diámetros medios y observaciones del ensayo de mesa de sacudidas para las muestras y relaciones ar/c estudiadas.

Con las arenas 3 y 8 con relaciones ar/c de 2 y 2,5, respectivamente, se obtiene un comportamiento adecuado para la realización de MHAD, debiendo agregarse aditivo para relaciones ar/c mayores. La arena 8 tiene mayor módulo de finura que las otras dos estudiadas; es la más gruesa lo cual provoca una disminución del agua de mezclado, necesaria para lograr determinada trabajabilidad, y que con menor contenido de cemento el comportamiento en estado fresco sea similar al de la arena 3 lo cual es ventajoso desde el punto de vista de la economía

#### 4.2.2 Estado endurecido

La tabla 4.8 presenta los resultados estadísticos básicos de la rotura a flexión según la Norma UNIT-ISO 679 de las probetas realizadas con las tres muestras de arena seleccionadas para esta segunda etapa, siendo  $F_f$  la resistencia media. En el Anexo 4 se encuentran las tablas ampliadas con los valores obtenidos.

Muestra	ar/c	$F_f$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)
3	4	2,04	0,08	3,82
	3,5	5,80	0,18	3,17
	3	7,89	0,21	2,60
	2,5	9,33	0,23	2,42
	2	10,58	0,26	2,50
7	4	0,87	0,04	4,09
	3,5	0,98	0,16	15,87
	3	4,91	0,05	1,01
	2,5	9,83	0,34	3,47
	2	10,96	0,32	2,93
8	4	6,79	0,39	5,74
	3,5	7,36	0,23	3,07
	3	8,71	0,30	3,45
	2,5	8,57	0,08	0,97
	2	9,30	0,11	1,18

**Tabla 4.8** – Resultados obtenidos de ensayos de rotura a flexión en la segunda etapa.

La tabla 4.9 presenta parámetros estadísticos básicos de los resultados de rotura a compresión según la Norma UNIT-ISO 679 de ambas partes de las probetas producto del ensayo a flexión, siendo  $F_c$  la resistencia media. En el Anexo 5 se encuentran las tablas ampliadas con los valores obtenidos.

Muestra	ar/c	$F_c$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)
3	4	21,15	0,79	3,74
	3,5	39,41	2,27	5,77
	3	47,82	1,57	3,28
	2,5	60,95	2,33	3,82
	2	77,46	1,77	2,29
7	4	8,22	0,67	8,18
	3,5	9,61	0,72	7,44
	3	22,75	1,26	5,54
	2,5	59,32	1,72	2,90
	2	69,33	0,97	1,40
8	4	49,82	2,35	4,72
	3,5	58,28	1,84	3,15
	3	66,21	2,86	4,32
	2,5	70,81	2,35	3,33
	2	66,46	2,28	3,43

**Tabla 4.9**– Resultados obtenidos de ensayos de rotura a compresión en la segunda etapa.

La figura 4.8, a modo de ejemplo, muestra fragmentos de las probetas luego de haber sido ensayadas a compresión.



**Figura 4.8** – Fragmentos de las probetas realizadas con la arena M3 producto de haber sido sometidas a ensayos de compresión.

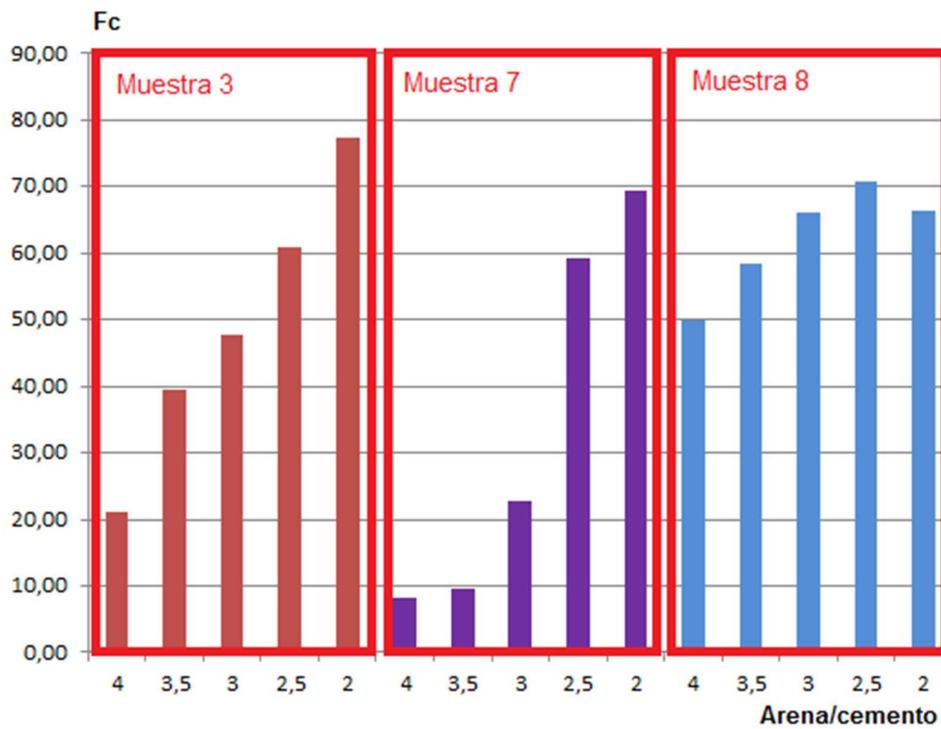
La tabla 4.10 presenta un resumen de los resultados obtenidos y la figura 4.9 gráficos de barras con los resultados de las medias de la resistencia a la flexión y compresión de las probetas.

ARENAS			MICRO-HORMIGONES					
Muestra	MF	ar/c	FLEXIÓN			COMPRESIÓN		
			F <sub>f</sub> (MPa)	σ (MPa)	CV (%)	F <sub>c</sub> (MPa)	σ (MPa)	CV (%)
3	2,6	4	2,04	0,08	3,82	21,15	0,79	3,74
		3,5	5,80	0,18	3,17	39,41	2,27	5,77
		3	7,89	0,21	2,60	47,82	1,57	3,28
		2,5	9,33	0,23	2,42	60,95	2,33	3,82
		2	10,58	0,26	2,50	77,46	1,77	2,29
7	2,6	4	0,87	0,04	4,09	8,22	0,67	8,18
		3,5	0,98	0,16	15,87	9,61	0,72	7,44
		3	4,91	0,05	1,01	22,75	1,26	5,54
		2,5	9,83	0,34	3,47	59,32	1,72	2,90
		2	10,96	0,32	2,93	69,33	0,97	1,40
8	3,7	4	6,79	0,39	5,74	49,82	2,35	4,72
		3,5	7,36	0,23	3,07	58,28	1,84	3,15
		3	8,71	0,30	3,45	66,21	2,86	4,32
		2,5	8,57	0,08	0,97	70,81	2,35	3,33
		2	9,30	0,11	1,18	66,46	2,28	3,43

**Tabla 4.10** – Resumen de resultados obtenidos de ensayos a flexión y compresión en etapa 2.



a)



b)

Figura 4.9 –Gráficos de barras para etapa 2 con media de la resistencia: a) flexión, b) compresión.

### 4.2.3 Análisis y discusión de resultados de la etapa 2

La tabla 4.11 presenta los valores de módulo de finura de las arenas seleccionadas, observaciones de las gráficas de los ensayos de granulometría y los resultados de los valores medios obtenidos en estado fresco ( $\phi$ ) y endurecido con esas arenas.

ARENAS				MICRO-HORMIGONES		
Muestra	MF	ar/c	Observaciones de las curvas típicas	Estado fresco	Estado endurecido	
				Ø (cm)	F <sub>r</sub> (MPa)	F <sub>c</sub> (MPa)
3	2,57	4	Gráfica algo regular, estando entre los límites de aceptable y recomendable se puede considerar principalmente aceptable	17,00	2,04	21,15
		3,5		12,25	5,80	39,41
		3		13,25	7,89	47,82
		2,5		15,75	9,33	60,95
		2		26,50	10,58	77,46
7	2,62	4	Gráfica algo regular, estando entre los límites de aceptable y recomendable se puede considerar próxima a recomendable	16,75	0,87	8,22
		3,5		14,50	0,98	9,61
		3		13,00	4,91	22,75
		2,5		13,15	9,83	59,32
		2		20,75	10,96	69,33
8	3,71	4	Gráfica regular, estando entre los límites de aceptable y en el límite superior de la curva recomendable	11,00	6,79	49,82
		3,5		12,35	7,36	58,28
		3		17,25	8,71	66,21
		2,5		26,35	8,57	70,81
		2		29,50	9,30	66,46

Tabla 4.11 – Resumen de resultados: características de las arenas empleadas y ensayos realizados en la etapa 2.

La tabla 4.12 presenta enumerados los resultados de mayor a menor resistencia a la flexión y a la compresión, y los valores medios obtenidos en ensayo en mesa de sacudidas ( $\phi$ ).

Flexión			Mesa de sacudidas		Compresión			Mesa de sacudidas	
Muestra	Ar/c	F <sub>r</sub> (MPa)	Ø (cm)	Rango (26±2)cm	Muestra	Ar/c	F <sub>c</sub> (MPa)	Ø (cm)	Rango (26±2)cm
7	2	10,96	20,75	no	3	2	77,46	26,50	sí
3	2	10,58	26,50	sí	8	2,5	70,81	26,35	sí
7	2,5	9,83	13,15	no	7	2	69,33	20,75	no
3	2,5	9,33	15,75	no	8	2	66,46	29,50	no
8	2	9,30	29,50	no	8	3	66,21	17,25	no
8	3	8,71	17,25	no	3	2,5	60,95	15,75	no
8	2,5	8,57	26,35	sí	7	2,5	59,32	13,15	no
3	3	7,89	13,25	no	8	3,5	58,28	12,35	no
8	3,5	7,36	12,35	no	8	4	49,82	11,00	no
8	4	6,79	11,00	no	3	3	47,82	13,25	no
3	3,5	5,80	12,25	no	3	3,5	39,41	12,25	no
7	3	4,90	13,00	no	7	3	22,75	13,00	no
3	4	2,04	17,00	no	3	4	21,15	17,00	no
7	3,5	0,98	14,50	no	7	3,5	9,61	14,50	no
7	4	0,86	16,75	no	7	4	8,22	16,75	no

Tabla 4.12 – Resumen de resultados de la etapa 2: Izquierda) resultados a flexión y mesa de sacudidas; Derecha) resultados a compresión y mesa de sacudidas.

Los resultados obtenidos en estado fresco que se presentaron en 4.2.1 indican que la muestra 3 presenta consistencias secas para las relaciones altas de  $ar/c = 4; 3,5$  y  $3$ , con tendencia a comenzar a ser trabajable a partir de la relación  $ar/c=2,5$ ; sin embargo, para las cuatro relaciones  $ar/c$  previamente mencionadas presenta un diámetro de mezcla por debajo del rango  $(26\pm 2)$  cm que requiere ser ajustado agregando aditivo. Para la relación  $ar/c=2$  esta mezcla se vuelve trabajable y su diámetro entra dentro del rango establecido. La muestra 7 presenta mezclas con tendencia a ser más bien secas en todas las relaciones  $ar/c$  ya que a pesar de comenzar a ser más trabajable con relación  $ar/c= 2,5$  y trabajable con relación  $ar/c=2$  los diámetros de las mezclas siempre se mantienen por debajo del rango  $(26\pm 2)$  cm, por lo que se debiera de incorporar aditivo en todos los casos de relación  $ar/c$  estudiados, siendo esta muestra en estado fresco la de peor comportamiento. La muestra 8 presenta diámetros de mezcla por debajo del rango  $(26\pm 2)$  cm para las relaciones altas de  $ar/c= 4; 3,5$  y  $3$ , siendo estas mezclas poco trabajables que debieran de ajustarse incorporando mayor cantidad de aditivo. Para la relación  $ar/c=2,5$  la muestra 8 presenta una mezcla con tendencia a ser líquida cuyo diámetro entra en el rango establecido de  $(26\pm 2)$  cm y ya para la relación  $ar/c=2$  que es la más baja, la mezcla es muy líquida y su diámetro excede el rango de referencia debiéndose repetir el ensayo reduciendo la cantidad de aditivo. Para el caso de la muestra 8, a medida que se incrementan las relaciones  $ar/c$  a partir de  $ar/c=3$ , donde se va incrementando cada vez más la cantidad de arena y reduciendo la cantidad de cemento, es que las mezclas se van volviendo cada vez menos trabajables.

De acuerdo a lo presentado la muestra de arena 7 es la que presenta peor comportamiento en estado fresco, lo cual se traduce en peor comportamiento a compresión en relación a las otras muestras, registrando con relaciones  $ar/c= 4$  y  $3,5$  valores inadmisibles para empleo estructural tanto a flexión como compresión.

Considerando los valores obtenidos de las medias de las resistencias si se observa la tabla 4.12, se puede ver que tanto en los valores de resistencia a la flexión y compresión, los valores más altos son los que presentan en general las relaciones  $ar/c$  más bajas. De allí que la muestra 7 con la relación  $a/r=2$  (la cual fue la dosificación base empleada en la etapa 1) presentó el mayor valor de resistencia a flexión, pero difiere muy poco del valor obtenido con la muestra 3 para la misma relación  $ar/c$ . La muestra 3 con la relación  $a/r=2$  presentó el mayor valor de la resistencia a la compresión. De allí que podría considerarse que con la muestra de arena 3 y la relación  $a/r=2$  se tiene los mayores valores de resistencia (10,58 y 77,46 MPa a flexión y compresión respectivamente), pero se alcanza valores relativamente bajos (2,03 y 21,15 MPa a flexión y compresión respectivamente) con esta muestra considerando mayores relaciones  $ar/c$ . La muestra 7 con relaciones  $ar/c= 4$  y  $3,5$  registra valores muy bajos para empleo estructural tanto a flexión como compresión.

Pero si observamos los resultados obtenidos con la muestra de arena 8 tanto en flexión como en compresión, si bien no registra los mejores resultados a compresión y flexión como las otras dos muestras, sus valores se encuentran posicionados en las tablas entre los valores máximos e intermedios estando en el rango de 9-7 MPa en flexión y de 71 a 50 MPa en compresión de allí que con esta arena se tienen valores más estables de resistencia para cualquiera de las relaciones  $ar/c$  estudiadas pudiendo considerarse como la más apropiada para micro-hormigón de alto desempeño. Cabe destacar que la muestra 8 presenta con relación  $ar/c= 2,5$  mayor resistencia a compresión que con la relación  $a/r= 2$  siendo esto importante dado que con menor cantidad de cemento se tiene mayor resistencia y será por lo tanto mejor desde el punto de vista económico.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSIONES FINALES Y SUGERENCIAS

---

Como se mencionó en los capítulos anteriores, el trabajo experimental se planteó en dos etapas; en la etapa 1 se estudiaron inicialmente dieciocho muestras de arena, mediante ensayos de granulometría se redujo la cantidad de muestras a ocho que estaban dentro de los límites indicados por la Norma UNIT 82-51 como aceptables y recomendables para su empleo en hormigón. Empleando una relación ar/c fija que era igual a 2 se hicieron micro-hormigones los que se estudiaron en estado fresco y endurecido. Los resultados obtenidos permitieron reducir la cantidad de muestras a ser estudiadas en la segunda etapa a tres. Según los resultados analizados en este trabajo se puede extraer las siguientes conclusiones:

De la etapa 1 de esta tesis se puede concluir que para micro-hormigón de alto desempeño se deben seleccionar arenas que efectivamente se encuentren dentro de los límites recomendables y aceptables para hormigón dados por la Norma UNIT 82-51, la cual fue empleada de referencia para este trabajo y que presenten gráficas de distribución granulométricas regulares dentro de los límites brindados por dicha norma. Las tres arenas con las que se obtuvieron los mejores valores de resistencia a la compresión y que fueron las seleccionadas al final de la etapa 1, cumplen con encontrarse sus gráficas granulométricas dentro de los límites dados por la Norma UNIT 82-51.

De la etapa 2, en función de los ensayos de consistencia realizados y de acuerdo a lo ya mencionado, la muestra 7 es la que peor comportamiento tiene en estado fresco por lo cual se concluye que arenas con granulometrías similares no serían adecuadas para la realización de micro-hormigones de alto desempeño. Esto puede deberse a su peor distribución granulométrica, quedando grandes cantidades de finos retenidos en los tamices de apertura más pequeña lo cual implica que el tipo de agregado es fino por lo que requiere mayor cantidad de agua para lograr consistencias que se encuentren dentro del rango  $(26\pm 2)$  cm tomado como referencia en este trabajo, ya que todas las consistencias obtenidas en las relaciones ar/c son más bien secas.

En términos de resistencia mecánica, la muestra 7 solamente registra valores altos a flexión y compresión con la relación ar/c=2, registrando los valores más bajos de resistencia en prácticamente todas las relaciones ar/c. Posiblemente los valores altos de resistencia mecánica con relación ar/c=2 se deban a la mayor cantidad de cemento empleada en esa dosificación que permite lograr dichos valores que sin embargo no pueden ser alcanzados en los otros casos. Los valores de las resistencias mecánicas pueden deberse al tipo de distribución granulométrica de la muestra, que de acuerdo a los valores de retenciones en los tamices, se podría decir que no existe una buena densidad de empaquetamiento en la mezcla, al ser arena más bien fina, por lo que se requiere mayor cantidad de aglomerante para obtener buenos resultados.

Con la muestra de arena 8 los resultados obtenidos en flexión como en compresión no fueron los mejores pero se encuentran posicionados entre los valores máximos e intermedios estando en el rango de 9-7 MPa en flexión y entre 71-50 MPa en compresión por lo que se tienen valores más estables de resistencia que con la muestra 3 para cualquiera de las relaciones ar/c estudiadas. De allí que la muestra de arena 8 puede considerarse como la más apropiada para realizar MHAD, cabiendo observar que es la más gruesa de las 3 estudiadas en esta etapa.

Por lo que de los resultados obtenidos en la etapa 2 de esta tesis se puede concluir que para MHAD se deben seleccionar arenas más gruesas, con módulos de finura mayores. El uso de arenas más

gruesas provoca una disminución del agua de mezclado, necesaria para lograr determinada trabajabilidad, lo cual es ventajoso desde el punto de vista de la resistencia como se ha demostrado.

Finalmente, como sugerencias para futuras investigaciones, se propone:

- Continuar con la línea de investigación de esta Tesis de Maestría, estudiando la influencia del factor de forma del agregado fino en las propiedades del micro-hormigón de alto desempeño. El estudio del factor forma en los agregados finos ha sido implementado en instituciones como por ejemplo el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja en España.
- Incorporar estudios de microestructura mediante microscopio electrónico de barrido (MEB) a los efectos de relacionar los resultados obtenidos con la microestructura.
- El estudio de los agregados incorporando como variable la cantidad de aditivo a emplear en los ensayos en estado fresco hasta obtener una consistencia determinada y el estudio de los costos asociados a ello.

## Referencias bibliográficas

Abu Seif, E-S.S. (2013). Performance of Cement Mortar Made with Fine Aggregates of Dune Sand, Kharga Oasis, Western Desert, Egypt: An Experimental Study. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 7 (3), 270-284. <https://www.researchgate.net/publication/260365496>

Aitcin, P.C. (1998). *High Performance Concrete*. Londres, Nueva York: E & FN Spon.

Alexander, M. y Mindess, S. (2010). *Aggregates in Concrete*. Nueva York: Ed. Taylor & Francis.

Amenta, M., Karatasios, I., Maravelaki, P. y Kilikoglou, V. (2017). The role of aggregate characteristics on the performance optimization of high hydraulicity restoration mortars. *Construction and building materials*, 153, 527- 534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.134>

American Concrete Institute (ACI). *Report on Ferrocement*. American Concrete Institute (ACI Committee), ACI 549R, 1997, Farmington Hills, Estados Unidos.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). *Áridos para morteros*. UNE-EN 13139:2003/UNE-EN 13139/AC:2004, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). *Métodos de ensayo de cementos. Parte 1: Determinación de resistencias*. UNE-EN 196-1:2018, Madrid, España.

Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). *Métodos de ensayo para morteros de albañilería. Parte 3: Determinación de la consistencia del mortero fresco (por la mesa de sacudidas)*. UNE-EN 1015-3:2000/A1:2005/A2:2007, Madrid, España.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). *Projeto e execução de argamassa armada – Procedimento*. NBR 11173, 1990, Rio de Janeiro, Brasil.

ASTM International. *Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates*. ASTM C294-19, 2019, West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM International. *Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM C33 / C33M-18, 2018, West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM International. *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. ASTM C230 / C230M-20, 2020, West Conshohocken, Estados Unidos.

ASTM International. *Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. ASTM C125-20, 2020, West Conshohocken, Estados Unidos.

Bahabri, A.A. (2016). Textural Characteristics of Fine Aggregate Efficiency on Concrete Strength. *American Journal of Materials Science*, 6(3), 73-78. <http://article.sapub.org/10.5923.j.materials.20160603.02.html>

Braga, M., De Brito, J. y Veiga, R. (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials*, 36, 960-968. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.031>

British Standards Institution (BSI). *Testing aggregates. Methods for sampling*. BS 812-102: 1989 / BS EN 932-1:1997, 1997, Londres, Reino Unido.

Chan, J.L., Solís, R. y Moreno, E.I., (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Revista Ingeniería*, 7 (2), 39-46. <https://www.researchgate.net/publication/237829903>

Cho, G-C., Dodds, J. y Santamarina, J.C. (2006). Particle shape effects on packing density, stiffness and strength — natural and crushed sands. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132 (11), 591–602. <http://materias.fi.uba.ar/6408/santamarina2.pdf>

Cortes, D.D., Kim, H.-K., Palomino, A.M. y Santamarina, J.C. (2008). Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands. *Cement and Concrete Research*, 38, 1142-1147. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.03.020>

Duque, G. (2016). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/>

Fonseca, P.E. (2005). *Microconcreto de Alto Desempenho: Uma Contribuição para o Desenvolvimento da Pré-fabricação Leve*. Ponencia presentada en: 1o. Encontro Nacional de Pesquisa-Projeto-Produção em Concreto Pré-moldado. São Carlos, Brasil. [http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab\\_pdf/102.pdf](http://www.set.eesc.usp.br/1enpppcpm/cd/conteudo/trab_pdf/102.pdf)

Fonseca, P.E. (2017). *Tecnologías para a construção do hábitat social: o microconcreto de alto desempenho para o desenvolvimento da pré-fabricação leve*. Ponencia presentada en: 4° Congresso Internacional da Habitacao no Espaco Lusófono – CIHEL 2017. Covilhã, Portugal. <https://www.researchgate.net/publication/315655038>

Ganaw, A. y Ashour, A. (2014). Rheological Properties of Mortars Prepared with Different Sands. *ACI Materials Journal*, 111 (5), 561-568. <https://www.researchgate.net/publication/283167091>

Goltermann, P., Johansen, V. y Palbol, I. (1997). Packing of aggregates: An alternative tool to determine the optimal aggregate mix. *ACI Materials Journal*, 94(5), 435-443. <https://www.researchgate.net/publication/281196424>

Haach, V.G., Vasconcelos, G. y Lourenço, P.B. (2011). Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars. *Construction Building Materials*, 25 (6), 2980–2987. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.011>

Hu, J. y Wang, K. (2005). *Effects of Aggregate on Flow Properties of Mortar*. Ponencia presentada en: Proceedings of the 2005 Mid-Continent Transportation Research Symposium. Iowa, Iowa State University. <https://www.researchgate.net/publication/237325429>

Instituto Argentino de Racionalización de Materiales (IRAM). *Morteros y hormigones y sus componentes. Definiciones*. IRAM 1569, 1990, Buenos Aires, Argentina.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Agregados. Constituyentes mineralógicos de los agregados naturales. Terminología*. UNIT-NM 66:1998, 1998, Montevideo, Uruguay.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Agregados. Determinación de la composición granulométrica*. UNIT-NM 248, 2002, Montevideo, Uruguay.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Cementos pórtland para uso general – Definiciones y requisitos*. UNIT 20:2017, 2017 Montevideo, Uruguay.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Granulometría de agregados finos para hormigones*. UNIT 82, 1951, Montevideo, Uruguay.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Métodos de ensayo de cementos. Determinación de resistencias mecánicas*. UNIT-ISO 679:2009, Adopción UNIT Junio 2018, Montevideo, Uruguay.

Instituto Uruguayo de Normas Técnicas (UNIT). *Proyecto y ejecución de estructuras de hormigón en masa o armado*. UNIT 1050, 2005, Montevideo, Uruguay.

Järvenpää, H. (2001). *Quality characteristics of fine aggregates and controlling their effects on concrete*. Tesis (Doctorado). Helsinki: University of Technology, Department of Materials Science and Rock Engineering.

Jiménez Montoya, P., García Meseguer, A. y Morán Cabré, F. (2000). *Hormigón armado*. Barcelona: Editorial Gustavo Gili.

Kockal, N.U. (2016). Investigation about the effect of different fine aggregates on physical, mechanical and thermal properties of mortars. *Construction and Building Materials*, 124, 816–825. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.008>

Koehler, E.P. y Fowler, E.W. (2007). *Aggregates in self-consolidating concrete*. Austin: The University of Texas, International Center for Aggregates Research (ICAR).

Lima, A.C., De Moura, D.L., Cotta, D.G. y Pereira, C.L. (2016). Argamassa armada – Aplicacao na construcao civil. *Revista Pensar*, 4 (2), pp.18. [http://revistapensar.com.br/engenharia/pasta\\_upload/artigos/a178.pdf](http://revistapensar.com.br/engenharia/pasta_upload/artigos/a178.pdf)

Mehta, P.K. y Monteiro, P.J.M., (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. Estados Unidos: Mac Graw-Hill.

Neville, A.M. (2011). *Properties of Concrete*. Harlow; Nueva York: Ed. Pearson.

Quiroga, P.N. y Fowler, D.W. (2004). *The Effect of Aggregate Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete*. Austin: The University of Texas, International Center for Aggregates Research (ICAR).

Rodríguez de Sensale, G. (2005). *Agregados*. Apuntes del curso Materiales y Ensayos, Centro de Estudiantes de Ingeniería (CEI), Facultad de Ingeniería, UdelaR.

Rodríguez de Sensale, G., Rolfi Netto, R., Rodríguez Viacava, I. (2015). *Micro-hormigón autocompactante*. Ponencia presentada en: IV Congreso Ibero-americano sobre Betão Auto-compactável. BAC2015 FEUP, pp.10, Porto, Portugal.

Rodríguez de Sensale, G., Romay, C., Rolfi, R., Ulfe, V. y Chocca, C. (2012). *Micro-hormigón de alto desempeño: materiales y dosificación*. Ponencia presentada en: 5o. Simposio Internacional sobre hormigones especiales. SINCO, 2012, pp.15, Fortaleza, Brasil.

Santos, C.E y Piovesan, A.Z. (2014). Estudo entre dois tipos de agregados para o concreto de alto desempenho e análise das propriedades mecânicas. *Unoesc & Ciência-ACET, Edição especial*, 67-82. Recuperado de: [https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/3707/pdf\\_38](https://portalperiodicos.unoesc.edu.br/acet/article/view/3707/pdf_38)

Silva, A.C., Barcarji, E., Virgens, J.P. y Tassi, A.A (2018). Microconcreto de alto desempenho: propriedades e comportamento de pilar à flexão normal composta. *Revista Materia*, 23 (03), 1-14. Recuperado de: <https://www.scielo.br/pdf/rmat/v23n3/1517-7076-rmat-23-03-e12161.pdf>

Tarback, E.J. y Lutgens, F.K. (2005). *Ciencias de la Tierra*. Madrid: Ed. Pearson.

Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J. y Forssberg, E., (2007). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30 (4), 274-282. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.08.008>

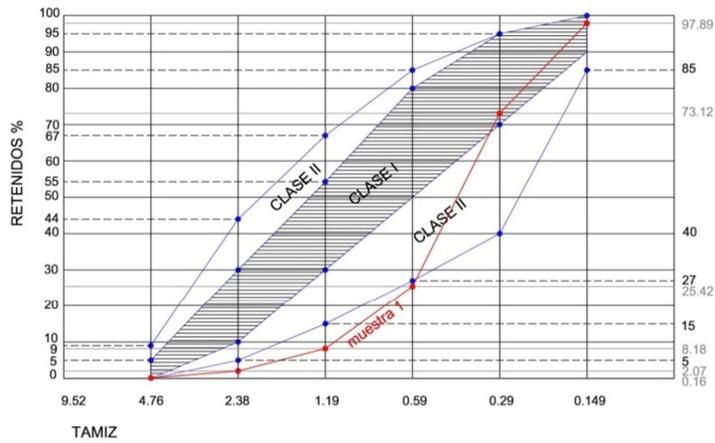
**ANEXO 1**

**MUESTRA 1**

N° de muestra: 1	Peso	Peso	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
	M1 (g)	M2 (g)		M1	M2							
Tipo: arena terciada	401,9	401,9	4,76	0,70	0,60	0,17	0,15	0,02	0,16	0,16	2,07	2,38
Cantera: Arnel			2,38	7,20	8,20	1,79	2,04	0,25	1,91	2,07		
Procede de:			1,19	22,40	26,80	5,56	6,66	1,10	6,11	8,18		
Schmidt Premoldeados S.A.			0,59	65,70	73,10	16,32	18,17	1,85	17,24	25,42		
			0,3	191,00	192,90	47,44	47,95	0,51	47,70	73,12		
			0,15	105,90	93,50	26,30	23,24	3,06	24,77	97,89		
			Resto	9,70	7,20	2,41	1,79	0,62	2,10	99,99		
Suma verificación				402,60	402,30	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 1.

GRAFICA N° MUESTRA 1



Curva representativa para Muestra 1.



Distribución granulométrica M1-Muestra 1.

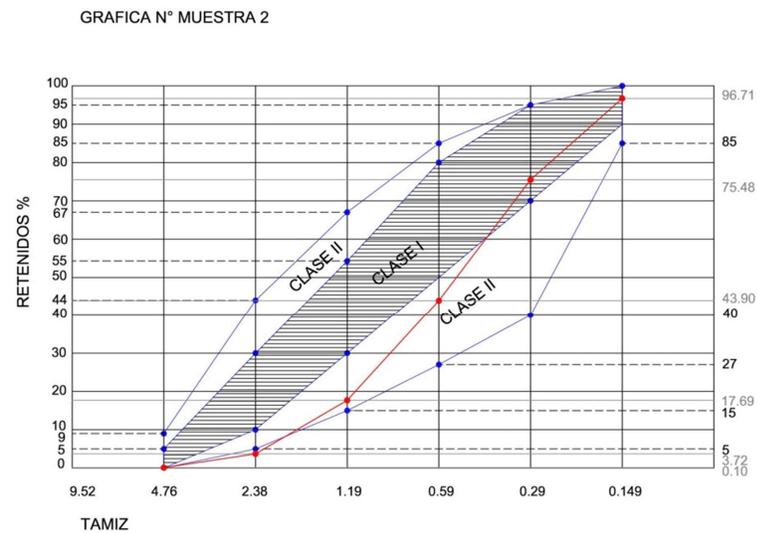


Distribución granulométrica M2-Muestra 1.

MUESTRA 2

N° de muestra: 2	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada	411,4	411,4	4,76	0,60	0,20	0,15	0,05	0,10	0,10	0,10	2,38	2,38
Cantera: Nilafer			2,38	17,80	12,00	4,32	2,92	1,41	3,62	3,72		
Procede de:			1,19	59,00	56,00	14,33	13,61	0,72	13,97	17,69		
Barraca Gallinal			0,59	106,10	109,70	25,76	26,66	0,89	26,21	43,90		
			0,3	125,60	134,40	30,50	32,66	2,16	31,58	75,48		
			0,15	88,20	86,60	21,42	21,04	0,37	21,23	96,71		
			Resto	14,50	12,60	3,52	3,06	0,46	3,29	100,00		
Suma verificación				411,80	411,50	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 2.



Curva representativa para Muestra 2.



Distribución granulométrica M1-Muestra 2.

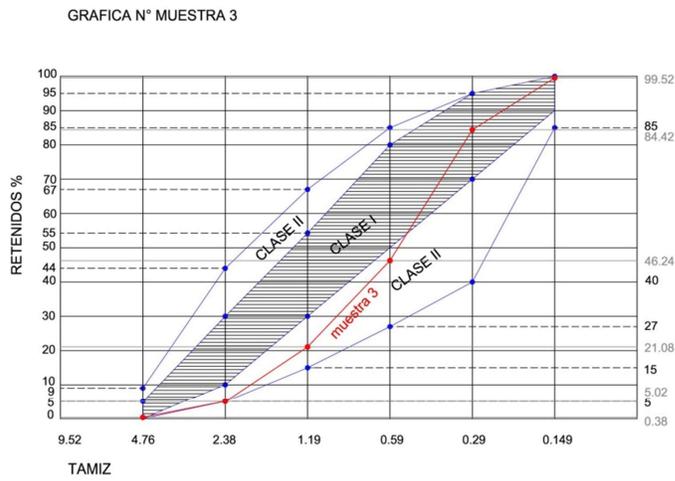


Distribución granulométrica M2-Muestra 2.

MUESTRA 3

N° de muestra: 3	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada gruesa Cantera: Darmix Procede de: Darmix	403,8	403,8	4,76	1,10	2,00	0,27	0,50	0,22	0,38	0,38	2,57	4,76
			2,38	17,50	20,00	4,34	4,95	0,61	4,64	5,02		
			1,19	68,20	61,50	16,90	15,23	1,68	16,06	21,08		
			0,59	105,30	97,80	26,10	24,21	1,88	25,16	46,24		
			0,3	149,10	159,20	36,95	39,42	2,46	38,18	84,42		
			0,15	60,50	61,40	14,99	15,20	0,21	15,10	99,52		
			Resto	1,80	2,00	0,45	0,50	0,05	0,47	99,99		
			Suma verificación			403,50	403,90	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%		

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 3.



Curva representativa para Muestra 3.



Distribución granulométrica M1-Muestra 3.

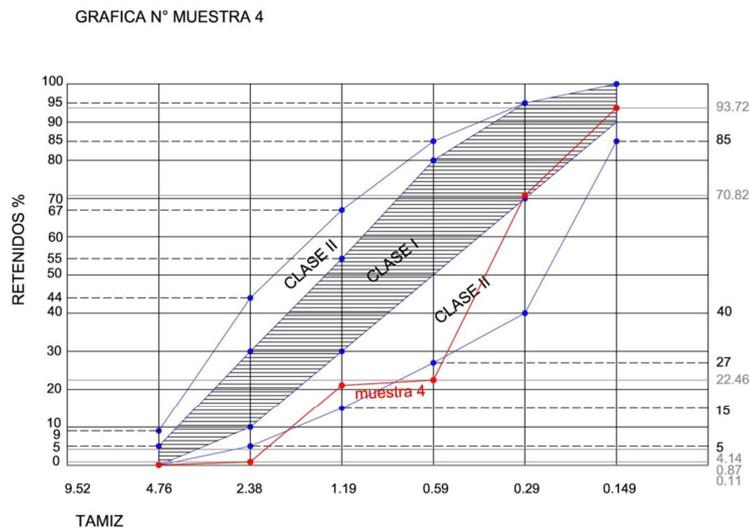


Distribución granulométrica M2-Muestra 3.

MUESTRA 4

N° de muestra: 4	Peso	Peso	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)	
	M1 (g)	M2 (g)	Tamiz	M1								M2
Tipo: arena terciada fina Cantera: Pérez Busto Procede de: Pérez Busto	402,2	402,2	4,76	0,80	0,10	0,20	0,02	0,17	0,11	0,11	1,92	1,19
			2,38	2,90	3,20	0,72	0,79	0,07	0,76	0,87		
			1,19	14,20	12,10	3,53	3,00	0,52	3,27	4,14		
			0,59	80,20	67,30	19,93	16,71	3,21	18,32	22,46		
			0,3	192,40	197,00	47,80	48,92	1,12	48,36	70,82		
			0,15	89,10	95,30	22,14	23,67	1,53	22,90	93,72		
			Resto	22,90	27,70	5,69	6,88	1,19	6,28	100,00		
Suma verificación			402,50	402,70	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%					

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 4.



Curva representativa para Muestra 4.



Distribución granulométrica M1-Muestra 4.



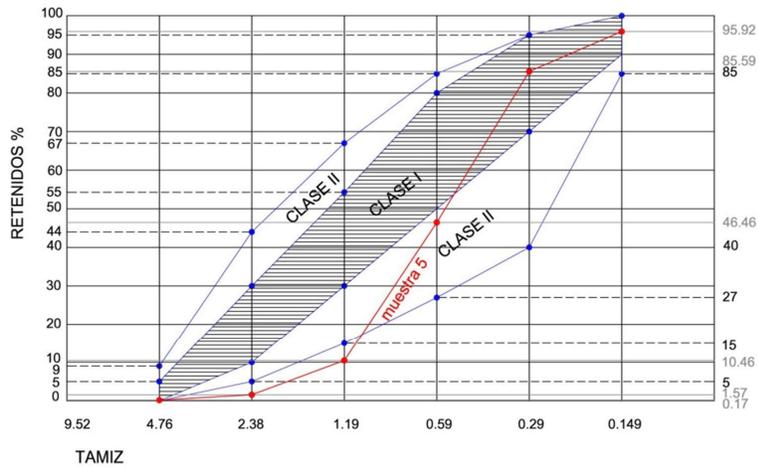
Distribución granulométrica M2-Muestra 4.

MUESTRA 5

N° de muestra: 5	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada Cantera: Brillo Arena Procede de: Brillo Arena	404	404	4,76	0,60	0,80	0,15	0,20	0,05	0,17	0,17	2,40	2,38
			2,38	5,10	6,20	1,26	1,54	0,27	1,40	1,57		
			1,19	35,80	36,10	8,85	8,94	0,09	8,89	10,46		
			0,59	147,20	143,80	36,38	35,61	0,77	36,00	46,46		
			0,3	154,80	161,50	38,26	40,00	1,74	39,13	85,59		
			0,15	42,00	41,50	10,38	10,28	0,10	10,33	95,92		
			Resto	19,10	13,90	4,72	3,44	1,28	4,08	100,00		
Suma verificación				404,60	403,80	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 5.

GRAFICA N° MUESTRA 5



Curva representativa para Muestra 5.



Distribución granulométrica M1-Muestra 5.

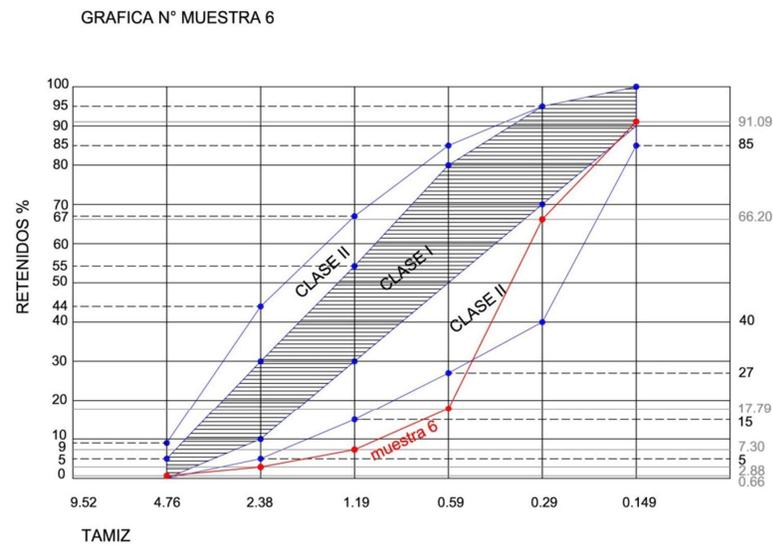


Distribución granulométrica M2-Muestra 5.

MUESTRA 6

N° de muestra: 6	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada fina Cantera: Los Mellizos Procede de: Los Mellizos	404	404	4,76	1,20	4,10	0,30	1,01	0,72	0,66	0,66	1,86	2,38
			2,38	9,80	8,10	2,43	2,00	0,43	2,22	2,88		
			1,19	17,90	17,80	4,44	4,40	0,04	4,42	7,30		
			0,59	41,20	43,50	10,22	10,76	0,54	10,49	17,79		
			0,3	194,20	196,80	48,15	48,66	0,51	48,41	66,20		
			0,15	101,10	99,90	25,07	24,70	0,36	24,89	91,09		
			Resto	37,90	34,20	9,40	8,46	0,94	8,93	100,02		
Suma verificación				403,30	404,40	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 6.



Curva representativa para Muestra 6.



Distribución granulométrica M1-Muestra 6.

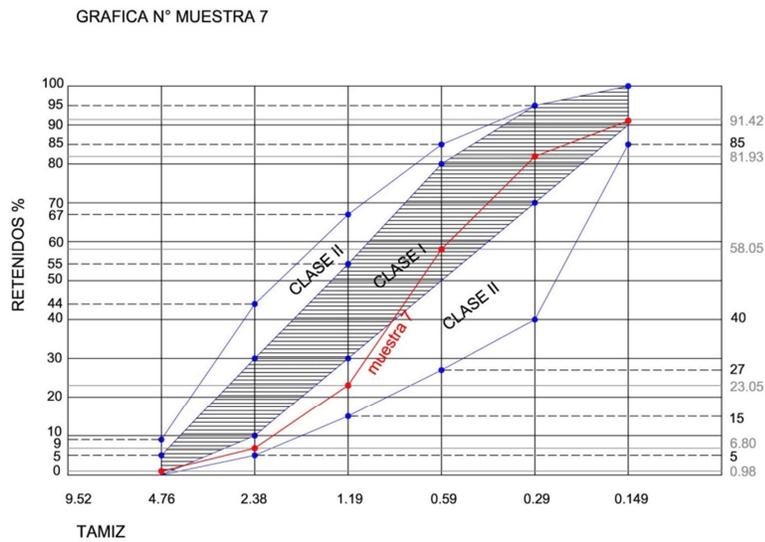


Distribución granulométrica M2-Muestra 6.

MUESTRA 7

N° de muestra: 7	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada fina Cantera: Tincotal S.A. Procede de: Tincotal S.A.	405,7	405,7	4,76	5,60	2,40	1,38	0,59	0,79	0,98	0,98	2,62	4,76
			2,38	27,30	20,00	6,72	4,93	1,79	5,82	6,80		
			1,19	70,70	61,30	17,40	15,11	2,29	16,25	23,05		
			0,59	140,80	143,40	34,65	35,34	0,68	35,00	58,05		
			0,3	91,80	102,10	22,59	25,16	2,57	23,88	81,93		
			0,15	36,90	40,20	9,08	9,91	0,82	9,49	91,42		
			Resto	33,20	36,40	8,17	8,97	0,80	8,57	99,99		
Suma verificación			406,30 405,80		100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%					

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 7.



Curva representativa para Muestra 7.



Distribución granulométrica M1-Muestra 7.

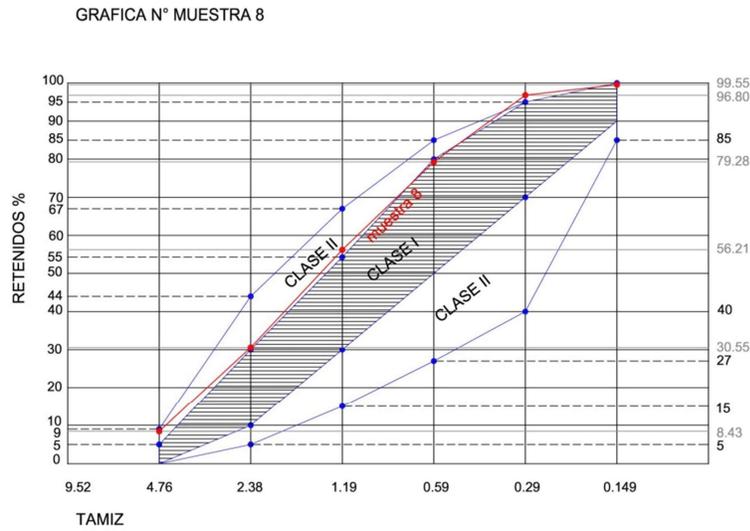


Distribución granulométrica M2-Muestra 7.

MUESTRA 8

N° de muestra: 8	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada gruesa Cantera: MRA Ltda. Procede de: Barraca Aguirre	407,6	407,6	4,76	32,10	36,70	7,88	8,99	1,12	8,43	8,43	3,71	4,76
			2,38	82,20	98,30	20,17	24,08	3,91	22,12	30,55		
			1,19	106,70	102,60	26,18	25,13	1,04	25,66	56,21		
			0,59	101,00	87,20	24,78	21,36	3,42	23,07	79,28		
			0,3	72,60	70,30	17,81	17,22	0,59	17,52	96,80		
			0,15	11,20	11,20	2,75	2,74	0,00	2,75	99,55		
			Resto	1,80	1,90	0,44	0,47	0,02	0,45	100,00		
Suma verificación				407,60	408,20	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 8.



Curva representativa para Muestra 8.



Distribución granulométrica M1-Muestra 8.



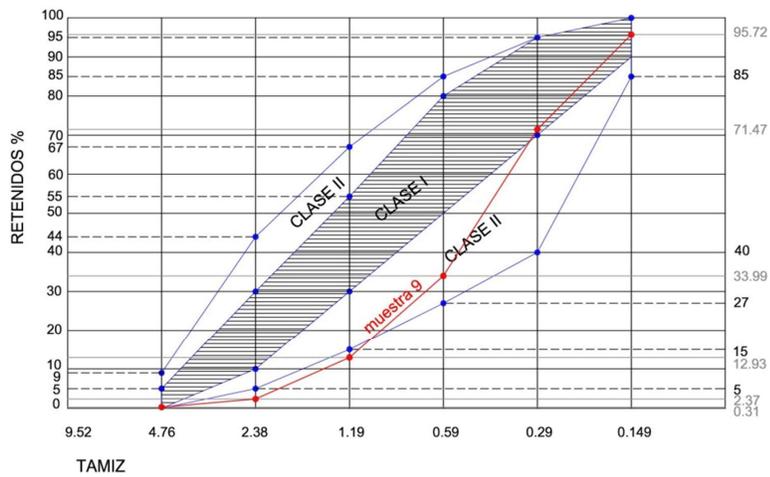
Distribución granulométrica M2-Muestra 8.

MUESTRA 9

N° de muestra: 9	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada Cantera: Astilco Procede de: Barraca Olivieri	402,4	402,4	4,76	0,50	2,00	0,12	0,50	0,37	0,31	0,31	2,17	2,38
			2,38	8,50	8,10	2,11	2,01	0,10	2,06	2,37		
			1,19	39,90	45,10	9,91	11,20	1,29	10,56	12,93		
			0,59	81,60	88,00	20,26	21,86	1,59	21,06	33,99		
			0,3	155,40	146,40	38,59	36,36	2,23	37,48	71,47		
			0,15	99,70	95,60	24,76	23,75	1,01	24,25	95,72		
			Resto	17,10	17,40	4,25	4,32	0,08	4,28	100,00		
Suma verificación				402,70	402,60	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 9.

GRAFICA N° MUESTRA 9



Curva representativa para Muestra 9.



Distribución granulométrica M1-Muestra 9.

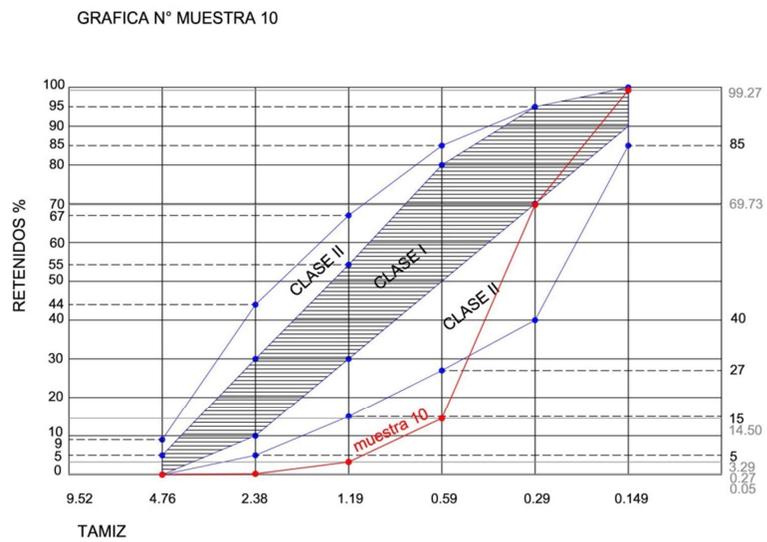


Distribución granulométrica M2-Muestra 9.

MUESTRA 10

N° de muestra: 10	Peso		Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
	M1 (g)	M2 (g)		M1	M2							
Tipo: arena terciada intermedia Cantera: Darmix Procede de: Darmix	405	405	4,76	0,40	0,00	0,10	0,00	0,10	0,05	0,05	1,87	1,19
			2,38	0,70	1,10	0,17	0,27	0,10	0,22	0,27		
			1,19	10,60	13,90	2,62	3,43	0,81	3,02	3,29		
			0,59	41,50	49,30	10,24	12,17	1,92	11,21	14,50		
			0,3	221,50	226,00	54,68	55,77	1,10	55,23	69,73		
			0,15	127,10	112,30	31,37	27,71	3,66	29,54	99,27		
			Resto	3,30	2,60	0,81	0,64	0,17	0,73	100,00		
			Suma verificación	405,10	405,20	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 10.



Curva representativa para Muestra 10.

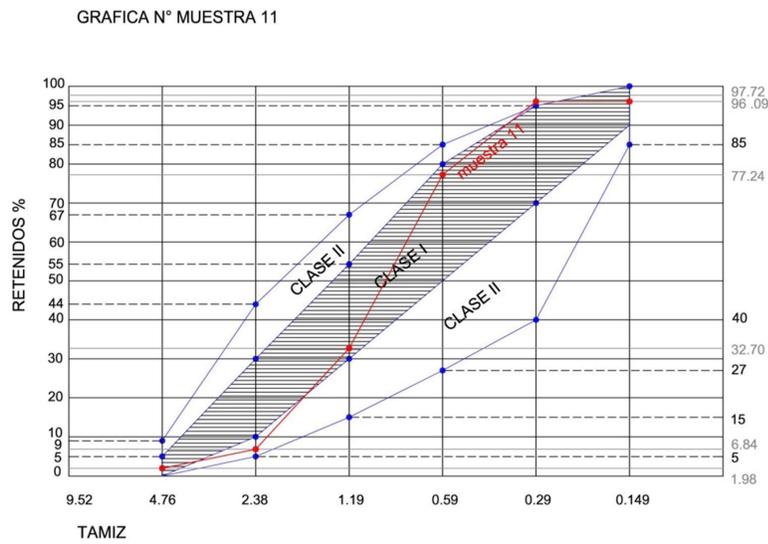


Distribución granulométrica M1-Muestra 10.

MUESTRA 11

N° de muestra: 11	Peso		Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
	M1 (g)	M2 (g)		M1	M2							
Tipo: arena gruesa Cantera: Pérez Busto Procede de: Pérez Busto	403	403	4,76	6,80	9,10	1,69	2,26	0,57	1,98	1,98	3,13	4,76
			2,38	17,40	21,70	4,32	5,40	1,07	4,86	6,84		
			1,19	96,70	111,40	24,02	27,70	3,69	25,86	32,70		
			0,59	182,30	176,10	45,28	43,80	1,49	44,54	77,24		
			0,3	81,30	70,40	20,19	17,51	2,69	18,85	96,09		
			0,15	8,00	5,10	1,99	1,27	0,72	1,63	97,72		
			Resto	10,10	8,30	2,51	2,06	0,44	2,29	100,01		
Suma verificación				402,60	402,10	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 11.



Curva representativa para Muestra 11.



Distribución granulométrica M1-Muestra 11.

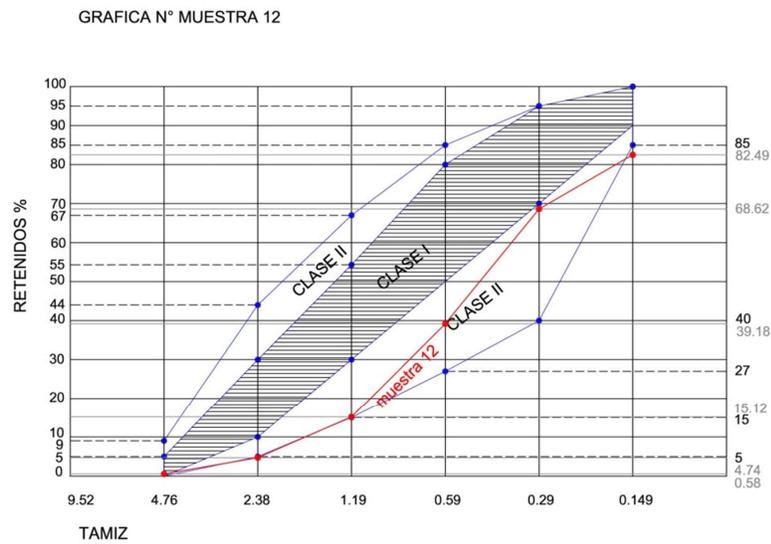


Distribución granulométrica M2-Muestra 11.

MUESTRA 12

N° de muestra: 12	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada gruesa Cantera: Pérez Busto Procede de: Pérez Busto	407,9	407,9	4,76	3,90	0,80	0,96	0,20	0,76	0,58	0,58	2,11	2,38
			2,38	17,50	16,40	4,30	4,02	0,27	4,16	4,74		
			1,19	41,30	43,30	10,14	10,62	0,49	10,38	15,12		
			0,59	95,80	100,30	23,51	24,61	1,09	24,06	39,18		
			0,3	117,40	122,50	28,82	30,05	1,24	29,44	68,62		
			0,15	56,70	56,30	13,92	13,81	0,10	13,87	82,49		
			Resto	74,80	68,00	18,36	16,68	1,68	17,52	100,01		
			Suma verificación			407,40	407,60	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%		

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 12.



Curva representativa para Muestra 12.



Distribución granulométrica M1-Muestra 12.



Distribución granulométrica M2-Muestra 12.

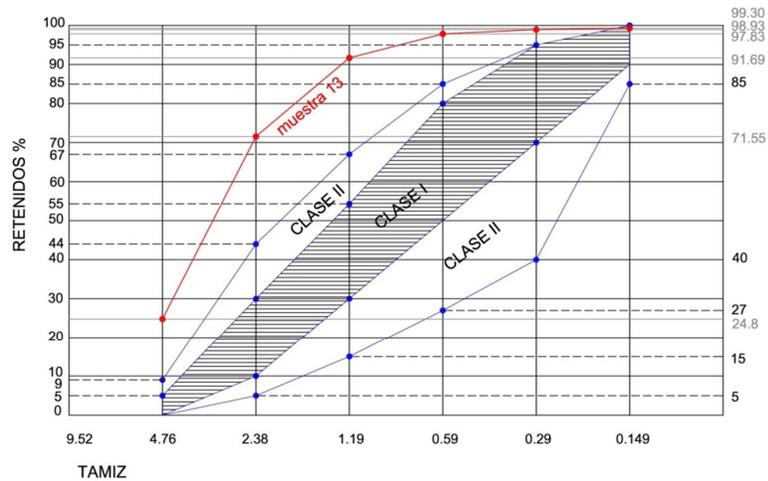
MUESTRA 13

N° de muestra: 13	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: gravillín	405,5	405,5	4,76	98,30	102,80	24,26	25,34	1,08	24,80	24,80	4,84	4,76
Cantera: Silva Redonda			2,38	182,30	196,80	44,99	48,51	3,52	46,75	71,55		
Procede de: Barraca Olivieri			1,19	84,00	79,30	20,73	19,55	1,18	20,14	91,69		
			0,59	30,30	19,50	7,48	4,81	2,67	6,14	97,83		
			0,3	5,40	3,50	1,33	0,86	0,47	1,10	98,93		
			0,15	1,90	1,10	0,47	0,27	0,20	0,37	99,30		
			Resto	3,00	2,70	0,74	0,67	0,07	0,70	100,00		
Suma verificación						405,20	405,70	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%		

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 13.

\* La norma UNIT 48:47 define como tamaño máximo nominal de un agregado al lado de la malla a través del cual pasa en forma acumulada el 95% del peso total del material; el agregado que compone la muestra 13 es gravillín, de allí que para usarlo como agregado fino para micro-hormigón fue previamente tamizado y se dejó la fracción todo lo que como máximo tenía tamaño 4,76mm; de allí que se puede considerar que 4,76mm es la dimensión máxima característica del gravillín empleado en esta Tesis

GRAFICA N° MUESTRA 13



Curva representativa para Muestra 13.



Distribución granulométrica M1-Muestra 13.

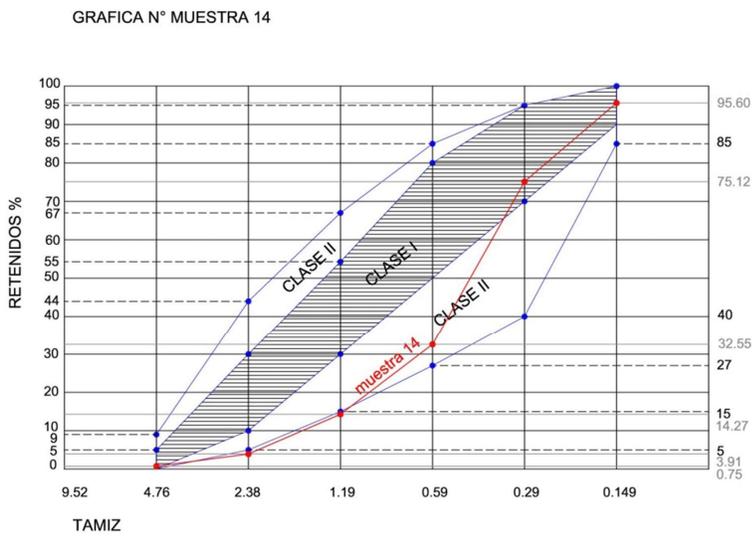


Distribución granulométrica M2-Muestra 13.

MUESTRA 14

N° de muestra: 14	Peso	Peso	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
	M1 (g)	M2 (g)		M1	M2							
Tipo: arena terciada	408,4	408,4	4,76	2,80	3,30	0,69	0,81	0,12	0,75	0,75	2,22	2,38
Cantera: Arnel			2,38	11,20	14,60	2,74	3,58	0,84	3,16	3,91		
Procede de:			1,19	39,10	45,50	9,57	11,15	1,58	10,36	14,27		
Barraca Panamericana			0,59	72,50	76,80	17,74	18,82	1,08	18,28	32,55		
			0,3	176,10	171,60	43,09	42,05	1,04	42,57	75,12		
			0,15	88,60	78,70	21,68	19,28	2,39	20,48	95,60		
			Resto	18,40	17,60	4,50	4,31	0,19	4,41	100,01		
Suma verificación				408,70	408,10	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 14.



Curva representativa para Muestra 14.



Distribución granulométrica M1-Muestra 14.

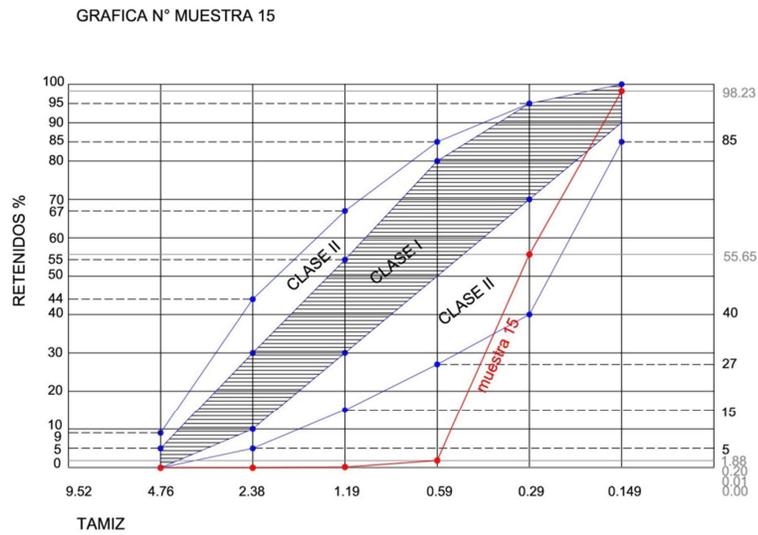


Distribución granulométrica M2-Muestra 14.

MUESTRA 15

N° de muestra: 15	Peso		Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
	M1 (g)	M2 (g)		M1	M2							
Tipo: arena terciada fina Cantera: Darmix Procede de: Darmix	405	405	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,56	0,59
			2,38	0,00	0,10	0,00	0,02	0,01	0,01			
			1,19	0,80	0,70	0,20	0,17	0,19	0,20			
			0,59	6,70	6,90	1,65	1,70	0,05	1,68			
			0,3	211,80	223,70	52,31	55,22	2,91	53,77			
			0,15	178,40	166,50	44,06	41,10	2,96	42,58			
			Resto	7,20	7,20	1,78	1,78	0,00	1,78			
Suma verificación				404,90	405,10	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 15.



Curva representativa para Muestra 15.



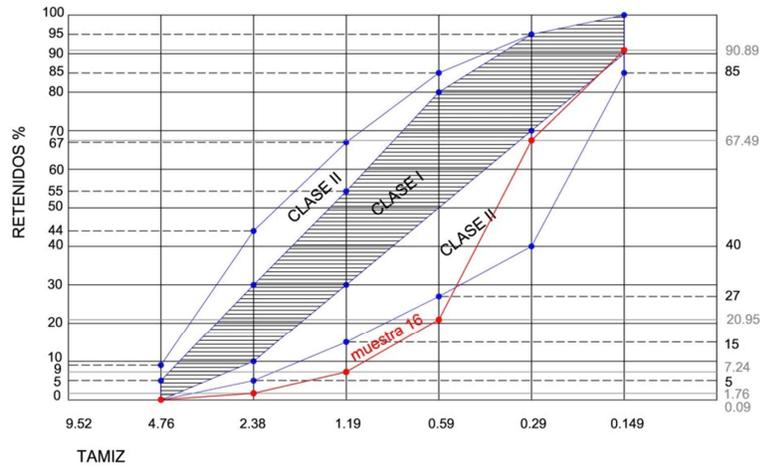
Distribución granulométrica M1-Muestra 15.

MUESTRA 16

N° de muestra: 16	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena terciada fina Cantera: La Barra Procede de: Barraca Aguirre	406,4	406,4	4,76	0,00	0,70	0,00	0,17	0,17	0,09	0,09	1,88	2,38
			2,38	6,30	7,30	1,55	1,80	0,25	1,67	1,76		
			1,19	22,00	22,50	5,41	5,54	0,13	5,48	7,24		
			0,59	53,40	58,00	13,14	14,28	1,14	13,71	20,95		
			0,3	184,60	193,50	45,42	47,65	2,23	46,54	67,49		
			0,15	100,80	89,30	24,80	21,99	2,81	23,40	90,89		
			Resto	39,30	34,80	9,67	8,57	1,10	9,12	100,01		
Suma verificación				406,40	406,10	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 16.

GRAFICA N° MUESTRA 16



Curva representativa para Muestra 16.



Distribución granulométrica M1-Muestra 16.



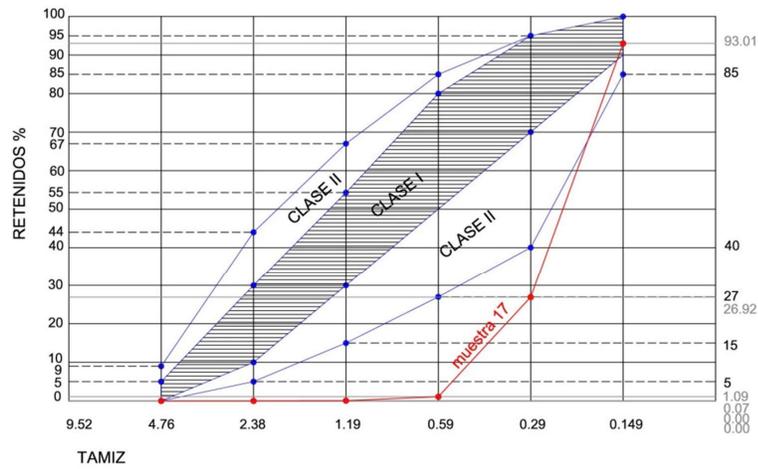
Distribución granulométrica M2-Muestra 16.

MUESTRA 17

N° de muestra: 17	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena fina	408,3	408,3	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,21	0,59
Cantera: Jonimar			2,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		
Procede de:			1,19	0,30	0,30	0,07	0,07	0,00	0,07	0,07		
Schmidt Premoldeados S.A.			0,59	4,20	4,10	1,03	1,00	0,02	1,02	1,09		
			0,3	106,00	105,00	25,95	25,72	0,23	25,83	26,92		
			0,15	268,10	271,70	65,63	66,54	0,91	66,09	93,01		
			Resto	29,90	27,20	7,32	6,66	0,66	6,99	100,00		
Suma verificación				408,50	408,30	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 17.

GRAFICA N° MUESTRA 17



Curva representativa para Muestra 17.



Distribución granulométrica M1-Muestra 17.



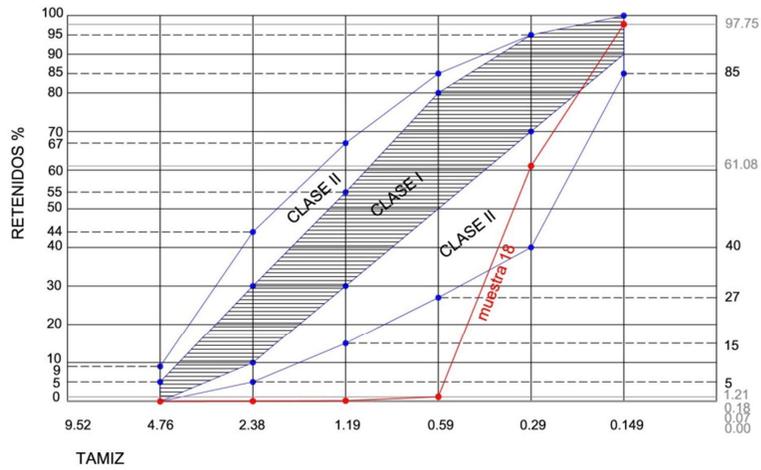
Distribución granulométrica M2-Muestra 17.

MUESTRA 18

N° de muestra: 18	Peso M1 (g)	Peso M2 (g)	Tamiz	Retenidos (g)		% M1	% M2	Diferencia % M1 y M2	% medio	% acumulado	MF	Dim. máx. caract. (mm)
				M1	M2							
Tipo: arena fina Cantera: Silri Procede de: Barraca Olivieri	408,5	408,5	4,76	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,60	0,59
			2,38	0,00	0,60	0,00	0,15	0,15	0,07	0,07		
			1,19	0,50	0,40	0,12	0,10	0,02	0,11	0,18		
			0,59	4,20	4,20	1,03	1,03	0,00	1,03	1,21		
			0,3	251,30	237,70	61,49	58,22	3,27	59,85	61,06		
			0,15	143,40	156,10	35,09	38,23	3,14	36,66	97,72		
			Resto	9,30	9,30	2,28	2,28	0,00	2,28	100,00		
Suma verificación				408,70	408,30	100,00	100,00	no hay diferencia mayor al 4%				

Tabla con resultados de ensayos de granulometría para Muestra 18.

GRAFICA N° MUESTRA 18



Curva representativa para Muestra 18.



Distribución granulométrica M1-Muestra 18.



Distribución granulométrica M2-Muestra 18.

## ANEXO 2

Muestra	Probeta	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	$F_f$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)
2	1	4,55	10,66	10,46	0,57	5,42
	2	4,19	9,82			
	3	4,65	10,90			
3	1	4,55	10,66	10,59	0,18	1,71
	2	4,57	10,72			
	3	4,43	10,38			
7	1	4,93	11,56	11,19	0,34	3,08
	2	4,74	11,12			
	3	4,64	10,88			
8	1	3,83	8,98	8,89	0,17	1,92
	2	3,84	8,99			
	3	3,71	8,69			
9	1	4,74	11,11	11,07	0,31	2,78
	2	4,85	11,35			
	3	4,58	10,74			
11	1	4,21	9,88	9,47	0,40	4,22
	2	3,87	9,08			
	3	4,03	9,46			
12	1	4,80	11,25	10,49	0,71	6,81
	2	4,44	10,40			
	3	4,19	9,83			
14	1	4,71	11,05	10,84	0,23	2,09
	2	4,64	10,87			
	3	4,52	10,60			

Anexo 2 - Tabla ampliada de la tabla 4.3 de los ensayos a flexión para las ocho muestras de la primera etapa.

## ANEXO 3

Muestra	Probeta	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	$F_c$ (MPa)	$\sigma$ (MPa)	CV (%)
2	1A-sup.	110,70	69,17	69,87	2,84	4,06
	1B-inf.	118,60	74,10			
	2A-sup.	109,20	68,25			
	2B-inf.	126,50	79,04			
	3A-sup.	113,70	71,09			
	3B-inf.	106,80	66,75			
3	1A-sup.	140,90	88,09	83,56	2,62	3,13
	1B-inf.	130,20	81,36			
	2A-sup.	129,50	80,92			
	2B-inf.	134,20	83,89			
	3A-sup.	132,10	82,58			
	3B-inf.	135,20	84,49			
7	1A-sup.	122,10	76,33	75,70	2,08	2,75
	1B-inf.	124,40	77,76			
	2A-sup.	99,00	61,89			
	2B-inf.	118,80	74,22			
	3A-sup.	116,60	72,88			
	3B-inf.	123,70	77,29			
8	1A-sup.	120,70	75,45	72,85	2,38	3,27
	1B-inf.	120,40	75,26			
	2A-sup.	116,50	72,78			
	2B-inf.	115,20	71,98			
	3A-sup.	110,40	68,97			
	3B-inf.	116,20	72,65			
9	1A-sup.	100,90	63,05	72,02	2,15	2,99
	1B-inf.	118,00	73,74			
	2A-sup.	109,80	68,59			
	2B-inf.	113,90	71,21			
	3A-sup.	117,30	73,22			
	3B-inf.	117,30	73,32			
11	1A-sup.	114,10	71,32	67,36	2,67	3,97
	1B-inf.	101,80	63,61			
	2A-sup.	110,50	69,06			
	2B-inf.	105,00	65,61			
	3A-sup.	107,70	67,29			
	3B-inf.	107,70	67,29			
12	1A-sup.	109,90	68,70	69,14	1,80	2,61
	1B-inf.	93,20	58,25			
	2A-sup.	113,10	70,70			
	2B-inf.	106,70	66,67			
	3A-sup.	113,80	71,11			
	3B-inf.	109,70	68,53			
14	1A-sup.	111,30	69,57	70,78	3,01	4,25
	1B-inf.	120,60	75,35			
	2A-sup.	117,50	73,42			
	2B-inf.	111,90	69,96			
	3A-sup.	107,50	67,22			
	3B-inf.	110,70	69,17			

Anexo 3 - Tabla ampliada de la tabla 4.4 de los ensayos a compresión para las ocho muestras de la primera etapa y con los valores espurios indicados en sombreado.

## ANEXO 4

Muestra	Sub muestra	ar/c	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	F <sub>f</sub> (MPa)	Variación de media (10%)	Media (-10%)	Media (+10%)
3	A	4	0,85	1,98	2,24	0,22	2,02	2,47
	B		1,14	2,66				
	C		0,89	2,09				
	A	3,5	2,53	5,93	5,52	0,55	4,97	6,07
	B		2,42	5,67				
	C		2,12	4,96				
	A	3	3,36	7,88	7,89	0,79	7,10	8,68
	B		3,28	7,69				
	C		3,46	8,10				
	A	2,5	4,03	9,45	9,33	0,93	8,40	10,26
	B		4,04	9,47				
	C		3,87	9,07				
A	2	4,60	10,78	10,58	1,06	9,52	11,64	
B		4,39	10,28					
C		4,56	10,68					
7	A	4	0,31	0,73	0,82	0,08	0,74	0,90
	B		0,36	0,84				
	C		0,38	0,89				
	A	3,5	0,71	1,66	1,21	0,12	1,09	1,33
	B		0,47	1,09				
	C		0,37	0,87				
	A	3	2,08	4,87	4,56	0,46	4,10	5,01
	B		2,11	4,94				
	C		1,65	3,86				
	A	2,5	4,15	9,73	9,83	0,98	8,85	10,81
	B		4,36	10,21				
	C		4,08	9,55				
A	2	4,71	11,03	10,96	1,10	9,86	12,06	
B		4,80	11,24					
C		4,53	10,61					
8	A	4	2,89	6,78	6,79	0,68	6,11	7,47
	B		2,73	6,41				
	C		3,07	7,19				
	A	3,5	3,07	7,20	7,00	0,70	6,30	7,70
	B		3,21	7,52				
	C		2,68	6,28				
	A	3	3,64	8,52	8,71	0,87	7,84	9,58
	B		3,87	9,06				
	C		3,65	8,56				
	A	2,5	3,62	8,48	8,57	0,86	7,72	9,43
	B		3,69	8,64				
	C		3,67	8,60				
A	2	4,02	9,43	9,30	0,93	8,37	10,23	
B		3,95	9,25					
C		3,94	9,23					

Anexo 4 - Tabla ampliada de la tabla 4.8 de los ensayos a flexión para las tres muestras de la segunda etapa con los valores espurios indicados en sombreado.

Muestra	Sub muestra	ar/c	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	F <sub>f</sub> (MPa)	Variación de media (10%)	Media (-10%)	Media (+10%)	σ (MPa)	CV (%)
3	A	4	0,85	1,98	2,04	0,20	1,83	2,24	0,08	3,82
	B		1,14							
	C		0,89	2,09						
	A	3,5	2,53	5,93	5,80	0,58	5,22	6,38	0,18	3,17
	B		2,42	5,67						
	C		2,12							
	A	3	3,36	7,88	7,89	0,79	7,10	8,68	0,21	2,60
	B		3,28	7,69						
	C		3,46	8,10						
	A	2,5	4,03	9,45	9,33	0,93	8,40	10,26	0,23	2,42
	B		4,04	9,47						
	C		3,87	9,07						
A	2	4,60	10,78	10,58	1,06	9,52	11,64	0,26	2,50	
B		4,39	10,28							
C		4,56	10,68							
7	A	4	0,31		0,87	0,09	0,78	0,95	0,04	4,09
	B		0,36	0,84						
	C		0,38	0,89						
	A	3,5	0,71		0,98	0,10	0,88	1,08	0,16	15,87
	B		0,47	1,09						
	C		0,37	0,87						
	A	3	2,08	4,87	4,91	0,49	4,41	5,40	0,05	1,01
	B		2,11	4,94						
	C		1,65							
	A	2,5	4,15	9,73	9,83	0,98	8,85	10,81	0,34	3,47
	B		4,36	10,21						
	C		4,08	9,55						
A	2	4,71	11,03	10,96	1,10	9,86	12,06	0,32	2,93	
B		4,80	11,24							
C		4,53	10,61							
8	A	4	2,89	6,78	6,79	0,68	6,11	7,47	0,39	5,74
	B		2,73	6,41						
	C		3,07	7,19						
	A	3,5	3,07	7,20	7,36	0,74	6,62	8,10	0,23	3,07
	B		3,21	7,52						
	C		2,68							
	A	3	3,64	8,52	8,71	0,87	7,84	9,58	0,30	3,45
	B		3,87	9,06						
	C		3,65	8,56						
	A	2,5	3,62	8,48	8,57	0,86	7,72	9,43	0,08	0,97
	B		3,69	8,64						
	C		3,67	8,60						
A	2	4,02	9,43	9,30	0,93	8,37	10,23	0,11	1,18	
B		3,95	9,25							
C		3,94	9,23							

Anexo 4 - Tabla ampliada de la tabla 4.8 de los ensayos a flexión para las tres muestras de la segunda etapa sin los valores espurios y con los valores de media, desviación y coeficiente de variación recalculados.

## ANEXO 5

Muestra	Sub muestra	ar/c	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	F <sub>c</sub> (MPa)	Variación de media (10%)	Media (-10%)	Media (+10%)
3	A-sup	4	39,24	24,52	21,59	2,16	19,43	23,75
	A-inf		34,39	21,49				
	B-sup		26,33	16,46				
	B-inf		33,52	20,25				
	C-sup		34,76	21,72				
	C-inf		40,18	25,11				
	A-sup	3,5	49,46	30,92	38,61	3,86	34,75	42,47
	A-inf		63,80	39,88				
	B-sup		68,96	43,10				
	B-inf		67,75	42,34				
	C-sup		59,27	37,04				
	C-inf		61,38	38,36				
	A-sup	3	77,70	48,53	47,82	4,78	43,04	52,60
	A-inf		75,90	47,42				
	B-sup		75,90	47,45				
	B-inf		79,90	49,91				
	C-sup		72,30	45,21				
	C-inf		77,40	48,39				
	A-sup	2,5	100,40	62,75	60,95	6,09	54,85	67,04
	A-inf		95,60	59,76				
	B-sup		99,10	61,93				
	B-inf		98,30	61,41				
	C-sup		90,90	56,83				
	C-inf		100,80	63,01				
A-sup	2	121,40	75,87	77,46	7,75	69,71	85,20	
A-inf		121,50	75,93					
B-sup		123,00	76,89					
B-inf		127,20	79,52					
C-sup		127,50	76,69					
C-inf		127,80	79,85					
7	A-sup	4	12,39	7,74	8,02	0,80	7,22	8,82
	A-inf		5,96	3,72				
	B-sup		14,83	9,27				
	B-inf		13,90	8,69				
	C-sup		15,38	9,61				
	C-inf		14,52	9,07				
	A-sup	3,5	12,98	8,11	9,59	0,96	8,63	10,55
	A-inf		16,53	10,33				
	B-sup		16,11	10,07				
	B-inf		14,84	9,27				
	C-sup		14,05	8,78				
	C-inf		17,53	10,96				
	A-sup	3	43,61	27,26	22,20	2,22	19,98	24,42
	A-inf		37,75	23,59				
	B-sup		37,37	23,36				
	B-inf		29,22	18,26				
	C-sup		31,05	19,41				
	C-inf		34,08	21,30				
	A-sup	2,5	95,80	59,87	59,32	5,93	53,39	65,26
	A-inf		91,80	57,38				
	B-sup		92,80	57,98				
	B-inf		97,50	60,92				
	C-sup		98,50	61,59				
	C-inf		93,10	58,20				
A-sup	2	110,40	68,97	69,33	6,93	62,40	76,26	
A-inf		108,70	67,93					
B-sup		112,30	70,19					
B-inf		109,80	68,60					
C-sup		112,10	70,06					
C-inf		112,40	70,24					

8	A-sup	4	78,80	49,22	49,82	4,98	44,84	54,80
	A-inf		82,00	51,22				
	B-sup		76,10	47,55				
	B-inf		75,60	47,26				
	C-sup		85,60	53,50				
	C-inf		80,20	50,15				
	A-sup	3,5	92,10	57,58	58,28	5,83	52,45	64,10
	A-inf		90,20	56,38				
	B-sup		98,10	61,29				
	B-inf		90,70	56,71				
	C-sup		95,00	59,39				
	C-inf		93,30	58,31				
	A-sup	3	104,70	65,44	66,21	6,62	59,59	72,83
	A-inf		107,30	67,08				
	B-sup		110,60	69,10				
	B-inf		110,50	69,06				
	C-sup		104,00	64,99				
	C-inf		98,50	61,57				
	A-sup	2,5	117,70	73,59	70,81	7,08	63,73	77,89
	A-inf		112,00	70,01				
B-sup	113,60		71,01					
B-inf	112,70		70,44					
C-sup	116,60		72,86					
C-inf	107,10		66,94					
A-sup	2	108,50	67,83	66,46	6,65	59,81	73,10	
A-inf		109,80	68,61					
B-sup		108,80	68,01					
B-inf		103,80	64,86					
C-sup		100,30	62,66					
C-inf		106,90	66,78					

Anexo 5 - Tabla ampliada de la tabla 4.9 de los ensayos a compresión para las tres muestras de la segunda etapa y con los valores espurios indicados en sombreado.

Muestra	Sub muestra	ar/c	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	F <sub>c</sub> (MPa)	Variación de media (10%)	Media (-10%)	Media (+10%)	σ (MPa)	CV (%)
3	A-sup	4	39,24		21,15	2,12	19,04	23,27	0,79	3,74
	A-inf		34,39	21,49						
	B-sup		26,33							
	B-inf		33,52	20,25						
	C-sup		34,76	21,72						
	C-inf		40,18							
	A-sup	3,5	49,46		39,41	3,94	35,46	43,35	2,27	5,77
	A-inf		63,80	39,88						
	B-sup		68,96							
	B-inf		67,75	42,34						
	C-sup		59,27	37,04						
	C-inf		61,38	38,36						
	A-sup	3	77,70	48,53	47,82	4,78	43,04	52,60	1,57	3,28
	A-inf		75,90	47,42						
	B-sup		75,90	47,45						
	B-inf		79,90	49,91						
	C-sup		72,30	45,21						
	C-inf		77,40	48,39						
	A-sup	2,5	100,40	62,75	60,95	6,09	54,85	67,04	2,33	3,82
	A-inf		95,60	59,76						
B-sup	99,10		61,93							
B-inf	98,30		61,41							
C-sup	90,90		56,83							
C-inf	100,80		63,01							
A-sup	2	121,40	75,87	77,46	7,75	69,71	85,20	1,77	2,29	
A-inf		121,50	75,93							
B-sup		123,00	76,89							
B-inf		127,20	79,52							
C-sup		127,50	76,69							
C-inf		127,80	79,85							

Muestra	Sub muestra	Ar/c	Carga (kN)	Resistencia (MPa)	F <sub>c</sub> (MPa)	Variación de media (10%)	Media (-10%)	Media (+10%)	σ (MPa)	CV (%)
7	A-sup	4	12,39	7,74	8,22	0,82	7,39	9,04	0,67	8,18
	A-inf		5,96							
	B-sup		14,83							
	B-inf		13,90	8,69						
	C-sup		15,38							
	C-inf		14,52							
	A-sup	3,5	12,98		9,61	0,96	8,65	10,57	0,72	7,44
	A-inf		16,53	10,33						
	B-sup		16,11	10,07						
	B-inf		14,84	9,27						
	C-sup		14,05	8,78						
	C-inf		17,53							
	A-sup	3	43,61		22,75	2,28	20,48	25,03	1,26	5,54
	A-inf		37,75	23,59						
	B-sup		37,37	23,36						
	B-inf		29,22							
	C-sup		31,05							
	C-inf		34,08	21,30						
	A-sup	2,5	95,80	59,87	59,32	5,93	53,39	65,26	1,72	2,90
	A-inf		91,80	57,38						
	B-sup		92,80	57,98						
	B-inf		97,50	60,92						
	C-sup		98,50	61,59						
	C-inf		93,10	58,20						
A-sup	2	110,40	68,97	69,33	6,93	62,40	76,26	0,97	1,40	
A-inf		108,70	67,93							
B-sup		112,30	70,19							
B-inf		109,80	68,60							
C-sup		112,10	70,06							
C-inf		112,40	70,24							
8	A-sup	4	78,80	49,22	49,82	4,98	44,84	54,80	2,35	4,72
	A-inf		82,00	51,22						
	B-sup		76,10	47,55						
	B-inf		75,60	47,26						
	C-sup		85,60	53,50						
	C-inf		80,20	50,15						
	A-sup	3,5	92,10	57,58	58,28	5,83	52,45	64,10	1,84	3,15
	A-inf		90,20	56,38						
	B-sup		98,10	61,29						
	B-inf		90,70	56,71						
	C-sup		95,00	59,39						
	C-inf		93,30	58,31						
	A-sup	3	104,70	65,44	66,21	6,62	59,59	72,83	2,86	4,32
	A-inf		107,30	67,08						
	B-sup		110,60	69,10						
	B-inf		110,50	69,06						
	C-sup		104,00	64,99						
	C-inf		98,50	61,57						
	A-sup	2,5	117,70	73,59	70,81	7,08	63,73	77,89	2,35	3,33
	A-inf		112,00	70,01						
	B-sup		113,60	71,01						
	B-inf		112,70	70,44						
	C-sup		116,60	72,86						
	C-inf		107,10	66,94						
A-sup	2	108,50	67,83	66,46	6,65	59,81	73,10	2,28	3,43	
A-inf		109,80	68,61							
B-sup		108,80	68,01							
B-inf		103,80	64,86							
C-sup		100,30	62,66							
C-inf		106,90	66,78							

Anexo 5 - Tabla ampliada de la tabla 4.9 de los ensayos a compresión para las tres muestras de la segunda etapa sin los valores espurios y con los valores de media, desviación y coeficiente de variación recalculados.