



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Programa de maestría y doctorado en arquitectura  
Campo de conocimiento Tecnologías

Evaluación de piezas de mampostería ligera con uso estructural

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:  
ARQ. ANTONIO TAHUITON MORA

Director de Tesis  
Dr. Alberto Muciño Vélez  
Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje

Ciudad Universitaria, CDMX, octubre 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA  
Campo de conocimiento Tecnologías

## EVALUACIÓN DE PIEZAS DE MAMPOSTERÍA LIGERA CON USO ESTRUCTURAL

### TESIS

Que para optar por el grado de:  
MAESTRO EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

**ARQ. ANTONIO TAHUITON MORA**

Director de Tesis

**Dr. Alberto Muciño Vélez**

Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje

Ciudad de México, octubre 2018

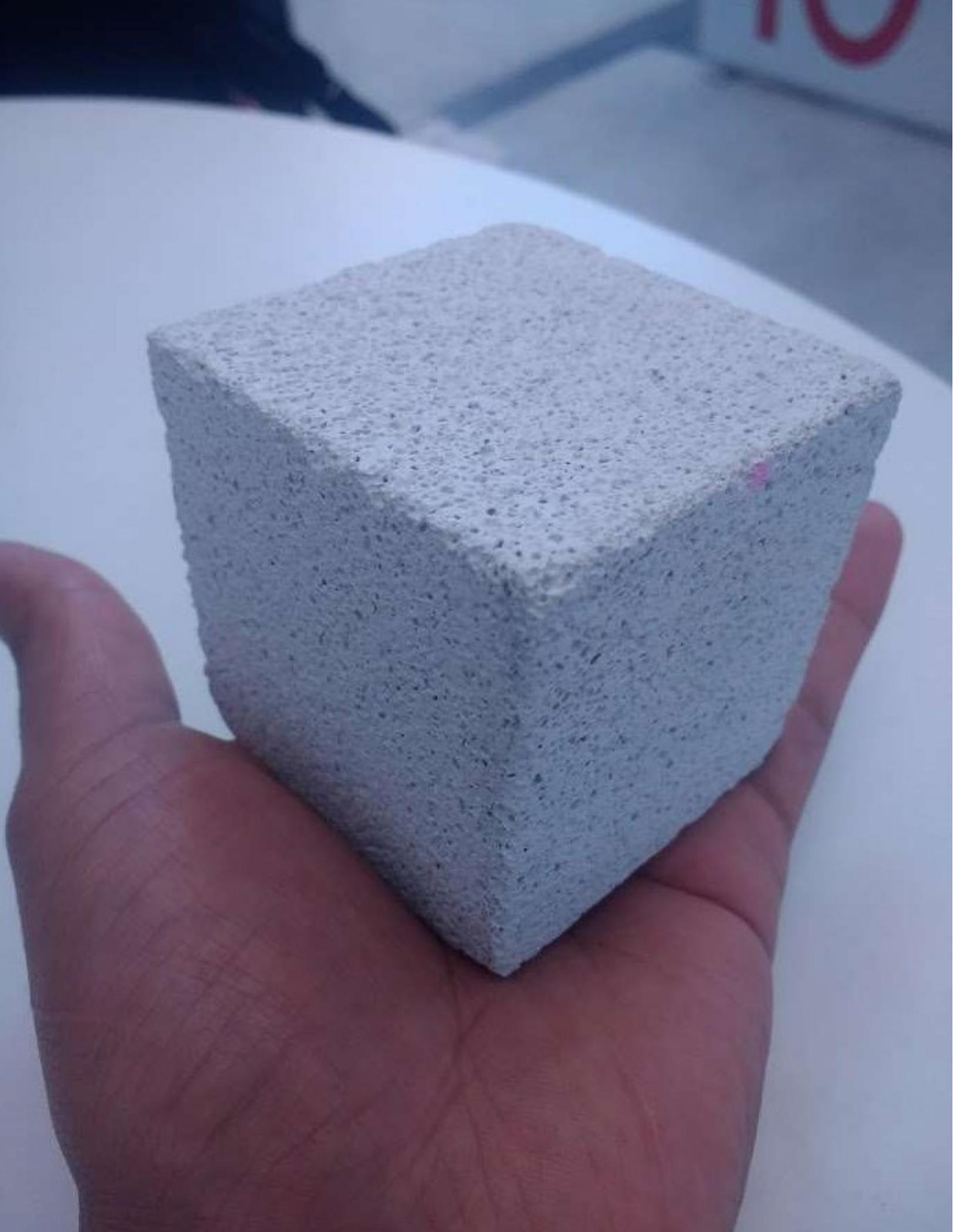


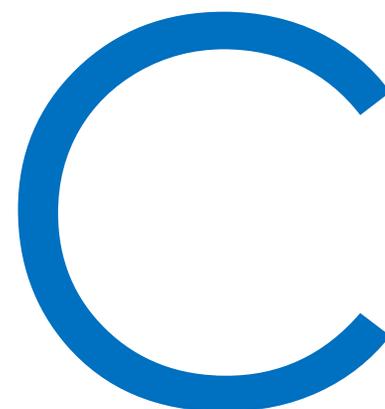
UN/M  
POSGRADO  
Arquitectura



INSTITUTO  
DE INVESTIGACIONES  
HISTÓRICAS







## COMITÉ TUTOR

### **Director de tesis:**

**Dr. Alberto Muciño Vélez**

Centro de Investigaciones en Arquitectura, Urbanismo y Paisaje (CIAUP)  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

### **Codirector de tesis:**

**Dr. Eligio Alberto Orozco Mendoza**

Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales, Instituto de Física, UNAM  
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

**Mtra. En Ing. Perla Santa Ana Lozada**

Facultad de Arquitectura, UNAM

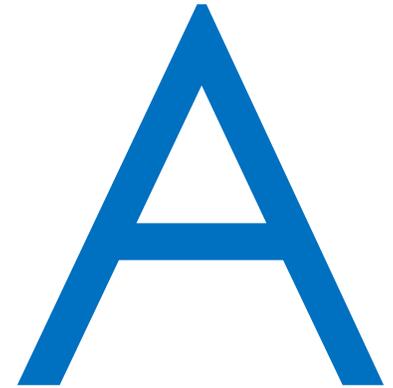
**Dra. Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino**

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura, UNAM

**Dr. Lauro Bucio Galindo**

Laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales, Instituto de Física, UNAM





## AGRADECIMIENTOS

Las palabras no son suficientes para expresar la dicha que siento al contar con el apoyo de los que me rodean y los que me rodean saben que soy una persona de pocas palabras.

A mis padres Juan y Leonor, ustedes saben que siempre han sido mi modelo que seguir, gracias por sus enseñanzas, sin menospreciar a nadie, pero ustedes han sido los mejores maestros de mi vida, mostrándome que no depende de nosotros donde empezamos, pero si hasta donde queremos llegar. A mis hermanos, Fide, Juanis, Manolo, y Lety, es sorprendente como la familia nos acompaña siempre a pesar de la distancia.

Nathanael, recuerda que no somos amigos, *simplemente nos toleramos*. Chente, Charly y Ecatl, gracias por estar en las buenas y en las malas. A mis amigos y compañeros de laboratorio, Sofi, Erika, Cesar, Manuel, Edrey.

Al Dr. Muciño, por aceptar dirigir esta investigación, al Dr. Eligio, Mtra. Perla, Dra. Gemma y Dr. Lauro. Por sus aportaciones para la realización y conclusión de este trabajo. Edgar, Laura, sin duda faltaran muchos nombres, una disculpa y espero que esta omisión no los ofenda.

# AGRADECIMIENTOS



Al Laboratorio Nacional de Ciencias para la Investigación y Conservación del Patrimonio Cultural sede Instituto de Investigaciones Estéticas.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante esta investigación.

# AGRADECIMIENTOS



Mi agradecimiento a las siguientes instituciones, programas académicos y personas:

Al proyecto PAPIIT IN100417, al laboratorio de Cristalofísica y Materiales Naturales del Instituto de Física de la UNAM.

Al proyecto PAPIIT IN404218, al Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

Al programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura de la Facultad de Arquitectura de la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitir realizar dicha investigación, así como el apoyo para poder asistir a la V Reunión Nacional de Difractometría.

A los Doctores A. Muciño y E. Orozco por aceptar dirigir esta investigación, a la Mtra. Perla Losada, a la Dra. Gemma Verduzco y al Dr. Lauro Bucio, por sus aportaciones para la realización y conclusión de este trabajo.

A Gaby, Ere, Ángel, Germáin, por su amistad y apoyo técnico.





# ÍNDICE

**INTRODUCCIÓN**

**ESTADO DEL ARTE**

**PRIMER CAPÍTULO** *Mezclas Ligeras* ..... 7

- 1.1. Características
- 1.2. Aplicaciones en la construcción
- 1.3. Limitaciones en la construcción
- 1.4. La mampostería y los sismos

**SEGUNDO CAPÍTULO** *Materiales* ..... 13

- 2.1. Morteros
  - 2.1.1. Características
  - 2.1.2. Clasificación



- 2.1.3. Consideraciones
- 2.1.4. Relación Agua – Cemento – Agregado

## **2.2. Cementos**

- 2.2.1. Clasificación

## **2.3. Las arenas como agregado fino**

- 2.3.1. Clasificación
- 2.3.2. Curva Granulométrica
- 2.3.3. Módulo de Finura
- 2.3.4. Composición de las arenas
- 2.3.5. Su importancia en la resistencia de las mezclas de mortero

## **2.4. Aditivo**

- 2.4.1. Clasificación de los aditivos

## **TERCER CAPÍTULO** *Diseño experimental* ..... 31

### **3.1. Diseño experimental**

- 3.1.1. Materiales Utilizados
  - 3.1.1.1. Cemento
  - 3.1.1.2. Arena
  - 3.1.1.3. Agregado Aligerante (Sílica Gel)
  - 3.1.1.4. Agua

### **3.2. Diseño de la Experimentación**

- 3.2.1. Diseño de Mezcla
- 3.2.2. Moldes
- 3.2.3. Numero de Probetas

### **3.3. Técnicas de caracterización**

- 3.3.1. *Pruebas Mecánicas*



- 3.3.2. *Microscopia Óptica*
- 3.3.3. *Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)*
- 3.3.4. *Pruebas de pH*

## **CUARTO CAPÍTULO** *Análisis y Discusión de Resultados* ..... 49

### **5.1 Granulometría**

### **5.2 Pruebas de Compresión**

#### 5.2.1 Gráfica Esfuerzo Deformación

### **5.3 Relación entre la densidad y la resistencia a la compresión de las mezclas**

### **5.4 Análisis de las mezclas mediante Microscopía Óptica**

### **5.5 Análisis morfológico de las mezclas mediante Microscopía Electrónica de Barrido**

### **5.6 Prueba de pH**

<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>79</b>
<b>RECOMENDACIONES</b> .....	<b>83</b>
<b>ÍNDICE DE IMÁGENES</b> .....	<b>85</b>
<b>ÍNDICE DE GRAFICAS</b> .....	<b>88</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>89</b>
<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>91</b>
<b>ABREVIATURAS</b> .....	<b>96</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>97</b>





# INTRODUCCIÓN

Hoy en día se buscan alternativas que modifiquen las propiedades mecánicas de los morteros, para elaborar nuevos materiales mejorando sus características físicas, disminuyendo su densidad aumentando sus características plásticas. La Sílica gel puede ser una alternativa para mejorar las características de las mezclas debido principalmente al peso de este material, sustituyendo parte del agregado fino (*arena*), buscando variantes que ayuden a disminuir las cargas en las edificaciones, por medio de materiales con menor densidad.

Al sustituir el agregado fino del mortero por sílica gel, se obtienen mezclas más ligeras. Sin embargo, por su alto grado de absorción de agua, se desconoce su comportamiento dentro de un entorno saturado de agua, como lo son dichas mezclas. Ya que, el grado de absorción del material influye en las características de los morteros,<sup>1</sup> uno de los principales factores a considerar es la energía liberada durante la hidratación. La sílica gel, libera grandes cantidades de calor al momento de ser hidratada. La excesiva ganancia y posterior pérdida de calor, ocasiona agrietamientos, resultando en deformaciones del elemento.<sup>2</sup> Lo anterior se minimiza utilizando sílica gel saturada de agua previamente. La Sílica o también conocida como Sílica gel, es un material absorbente de humedad o en su defecto de agua. Es inerte, insoluble en agua y químicamente estable.

En el presente trabajo se investigó el efecto de agregar Sílica gel a mezclas de morteros, para determinar su comportamiento y como esto puede contribuir en la disminución de la densidad de las mezclas de mortero convencionales, elaboradas principalmente a base de cemento y arena.

Con la finalidad de poder dar respuestas más concretas sobre el comportamiento de la sílica dentro de la mezcla de mortero se analizó el material bajo distintas técnicas de caracterización. Dentro de la arquitectura y las aplicaciones constructivas, las condiciones mecánicas adquieren gran relevancia. Enfocándose al contexto de dicha disciplina, se realizaron diferentes muestreos para determinar el diseño de mezclas con mejores características, que posteriormente fueron evaluadas por medio de pruebas mecánicas para determinar su resistencia máxima a la compresión. Siempre cruzando esa información con la densidad que presentaban dichas muestras, tanto en las mezclas de referencias como los diseños propuestos.

Un material de menor densidad podría ser implementado en secciones mayores a las convencionales, actualmente una pieza de mampostería convencional se maneja en medidas estándar de 40cm de largo por 15cm de ancho y 20cm de alto, ya que no es posible elaborar

---

<sup>1</sup> Chan Yam, José Luis; Solís Carcaño, Rómel; Moreno, Éric Iván; "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto". Ingeniería (2003), pág. 39-46.

<sup>2</sup> Arthur H. Nilson, (2001), Diseño de Estructuras de Concreto. Colombia, Mc Graw Hill, pág. 49



pizas de mayores dimensiones por consecuencia de su peso, dificultando su desplazamiento en sentido vertical, así como su manipulación por los trabajadores de la construcción. Elementos de mayores dimensiones permitirían reducir los tiempos de edificación, así como el ahorro de material para la junta por contar con menores piezas por m<sup>2</sup>.

De esta manera será posible proponer un material, capaz de ser empleado en la elaboración de piezas de mampostería las cuales presentarían igual o mayor resistencia que las comercializadas actualmente, pero con la cualidad de tener una menor densidad, logrando una disminución en las cargas de las estructuras. Se optó por la elaboración de piezas de mampostería por ser el recurso más demandado por la industria de la construcción<sup>3</sup>, aún por encima del concreto, ya que las piezas de mampostería permiten una construcción progresiva al ser capaz de acoplar piezas nuevas con otras de mayor edad, algo muy complicado en los casos donde se utiliza el concreto.

Todos los resultados de la experimentación se compararon con los obtenidos por una mezcla de mortero convencional o mezcla de control, ya que la mezcla propuesta se asemeja más a un mortero que a un concreto.

A continuación, se aborda la problemática que da origen a este trabajo, marcando la pauta dentro de la arquitectura y la construcción para determinar las variables que influyen en el estudio del material y como se aplica posteriormente en la edificación, y de esta forma dar estructura al diseño experimental que nos dirija al cumplimiento de los objetivos establecidos. Dentro de los objetivos se establecen los alcances y limitaciones por aspectos de tiempo y técnicos. Desarrollando una hipótesis, misma que se pretende sea respuesta por medio de una caracterización física y mecánica de las mezclas de morteros convencionales, comparando dichos resultados con los obtenidos al sustituir parcialmente el agregado fino y su posible aplicación para la elaboración de elementos de mampostería.

---

<sup>3</sup> Meli, Roberto; (1994) “Mampostería estructural, la práctica, la investigación y el comportamiento sísmico observado en México” Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 5



# PROBLEMÁTICA

En México el sistema constructivo de mayor demanda para la fabricación de vivienda es a base de muros de mampostería, los cuales pueden ser los tabiques de barro recocido de manera artesanal, los tabiques de barro industrializados o los blocks de cemento arena. Este sistema puede tener dos variables, una donde la mampostería es reforzada con elementos verticales siempre y cuando se este utilizando un tabique o block hueco. Otra modalidad es la mampostería confinada por marcos rígidos, el cual implementa elementos de cerramiento tales como castillos como elemento vertical y dalas como cerramiento horizontal, siendo esta ultima la más utilizada en la construcción con muros de mampostería.

La normativa establecida en el Reglamento de Construcciones del Distrito Federan, determina los parámetros de resistencia y densidad con los que deberán de contar los tabiques, si es que se consideraran como elementos estructurales. En las viviendas unifamiliares la gran mayoría de los muros de mampostería se consideran como muros de carga, sin embargo, se desconoce si las resistencias que presentan los tabiques o blocks son las que marca la norma para este fin.

La densidad que presentan las piezas de mampostería utilizadas en la construcción llega a ser hasta de 290 kg/m<sup>2</sup> de construcción y una resistencia de 60kg/cm<sup>2</sup><sup>4</sup>, es decir, se tienen materiales densos y poca resistencia. Después de los tabiques o blocks, el concreto es el material más demandado para la edificación de vivienda, primordialmente por su resistencia mecánica.<sup>5</sup> Razón por la cual, elementos de mampostería con densidades menores a las ofertadas actualmente, podría disminuir gran parte de las cargas, favoreciendo a las estructuras, reduciendo el desgaste físico de los trabajadores de la construcción, incrementando la velocidad de edificación por m<sup>2</sup> al poder utilizar piezas de mayor volumen, pero con un peso que permita ser manipulado manualmente, todo lo anterior como una opción para disminuir la demanda de concreto.

Desafortunadamente los materiales y técnicas para la elaboración de muros de mampostería siguen siendo los mismos desde hace ya varias décadas,<sup>6</sup> lo cual ha cumplido satisfactoriamente los requerimientos básicos en los ahorros en el costo de los materiales y tiempo de ejecución,<sup>7</sup> sin embargo, ha evitado que las construcciones se adapten a las exigencias particulares de cada proyecto, tales como los materiales de los que se disponen en la zona, así

---

<sup>4</sup> <http://construsupply.com.mx/productsestru.htm>, verificado el 2 de octubre del 2018

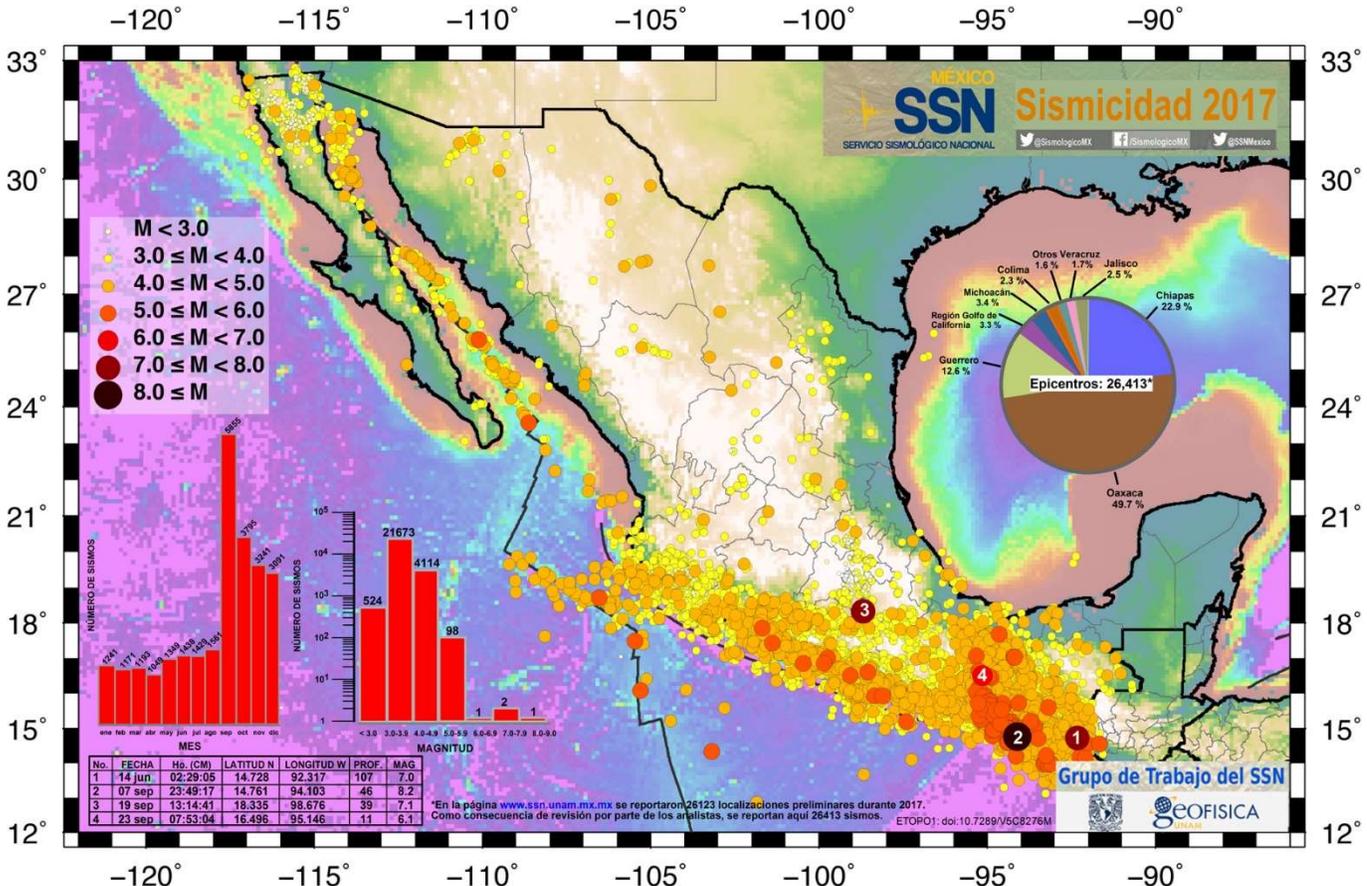
<sup>5</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), El concreto y otros materiales para la construcción. 2º edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág. 33

<sup>6</sup> Meli, Roberto; (1994) "Mampostería estructural, la práctica, la investigación y el comportamiento sísmico observado en México" Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 5

<sup>7</sup> Tena Colunga, Arturo; Juárez Ángeles, Artemio; Salinas Vallejo, Víctor Hugo; (2007). "Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales". Revista de Ingeniería Sísmica, núm. enero-junio, pág. 29



como las cuestiones climatológicas e inclusive cuestiones estructurales ante efectos sísmicos, tomando en cuenta que buena parte del territorio mexicano se ve afectada por estos fenómenos *Imagen 1*.<sup>8</sup>



*Imagen 1* Mapa de Actividad Sísmica del año 2017, reportado por el Servicio Sismológico Nacional

La utilización de sílica gel como agregado fino por presentar una densidad 56% menor en comparación a la arena convencional, podría disminuir la densidad de las mezclas, pero no es posible determinar si puede sustituir la totalidad de los finos y si el material cumplirá los requerimientos que le permitan poder ser utilizado para la elaboración de mamposterías. Al remplazar a las arenas por sílica gel, se obtendría un nuevo proceso para la elaboración de mezclas ligeras, con características similares a las encontradas en los concretos celulares, mismos que se comercializan actualmente en el mercado enfocados a la fabricación de muros de mampostería, pero cuyos procesos de producción tienen muchas restricciones. La

<sup>8</sup> <http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/mapas-de-sismicidad-anual/> verificado el 02 de octubre del 2018



implementación de sílice como agregado fino, permitirá la elaboración de elementos de mampostería con menores densidades, por medio de procesos convencionales, donde el trabajador, apoyado de herramientas manuales mezcla los agregados hasta obtener una mezcla homogénea, vaciándola en moldes y dejando secar al sol.

## JUSTIFICACIÓN

La densidad que presentan los tabiques o blocks de cemento arena convencionales aportan cargas a la estructura y su resistencia a la compresión se encuentra por debajo de los parámetros establecidos, generando elementos constructivos más robustos.<sup>9</sup> Todo lo anterior se refleja en costos más elevados, tanto por el material requerido, como las estructuras que soportarán tales cargas. Por lo que las viviendas que se desarrollan en las zonas conurbadas de las ciudades y zonas urbanas están optando por nuevos sistemas constructivos que les permitan reducir los costos de construcción mediante la disminución de materiales utilizados y los tiempos de ejecución.<sup>10</sup> En la búsqueda de satisfacer la demanda de un material ligero, pero capaz de ser utilizado en la industria de la construcción surge el hoy denominado concreto celular, desafortunadamente es un producto que se comercializa en sectores muy específicos de la población derivando en un desconocimiento del producto.

Al disminuir el peso de los muros, por medio de la implementación de mamposterías de menor densidad, es posible disminuir las secciones de los elementos de confinamiento, como lo son los castillos y dadas, disminuyendo la cantidad de material empleado para su edificación, considerando que el costo de la estructura, incluyendo la cimentación, representa entre el 50% y 70% del presupuesto.<sup>11</sup> De igual modo, elementos constructivos ligeros, permiten un transporte manual más eficiente. La baja densidad de un material de construcción favorece a la estructura que lo soporta. Sin embargo, estos materiales presentan una resistencia a la compresión menor en comparación con los materiales convencionales, así como una considerable contracción por secado llegando inclusive al 40% del volumen.<sup>12</sup>

Mezclando materiales de construcción convencionales como el cemento y la arena con otros que presenten una menor densidad se obtendrían nuevos elementos capaces de ser utilizados en la elaboración de sistemas constructivos. Razón por la cual, se elaborará un diseño de mezcla que presente una menor densidad sin perder gran parte de su resistencia, para

---

<sup>9</sup> Cervantes Abarca, A. (2008), "Nuevas tecnologías en concretos, concreto celular, concreto reforzado con fibras, concreto ligero estructural", Congreso nacional de administración y tecnología para la arquitectura, ingeniería y diseño. Memorias 2008, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco. México, pág. 142

<sup>10</sup> Tena Colunga, Arturo; Juárez Ángeles, Artemio; Salinas Vallejo, Víctor Hugo; (2007). "Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales". Revista de Ingeniería Sísmica, núm. enero-junio, pág. 29

<sup>11</sup> R. Meli, S.M. Alcocer y L.A. Díaz-Infante Ch; (1994) "Características estructurales de la vivienda de interés social en México" Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 33

<sup>12</sup> Valdés Constantino, S. (2010) "Recomendaciones para el diseño estructural de concreto ligero" Tesis de Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, pág. 8



fabricar piezas de mampostería, mismas que pudieran llegar a presentar las cualidades de los materiales ligeros, pero con resistencias que no limiten su implementación tanto en elementos estructurales como no estructurales.

Desafortunadamente en México la fabricación y utilización de piezas de mampostería como los tabiques o blocks no se encuentra normalizada, por lo cual se encuentran mampostería de diferentes resistencias comercializadas como uso estructural. Dicha investigación se enfoca a los materiales y sistemas constructivos de la ciudad de México, por lo que los resultados arrojados podrán ser considerados únicamente como referencia para investigaciones similares, pero en otras regiones del país, recordando que el territorio mexicano cuenta con distintos climas y una solución constructiva en la zona norte no tendrá los mismos beneficios en la zona sur o centro del país, sin mencionar que no se cuenta con los mismos materiales. La arquitectura tiene que satisfacer las necesidades de vivienda, considerando los requerimientos particulares del lugar donde se edifica y los materiales de la región, esto permitiría un mejor aprovechamiento de los recursos, disminuyendo los costos de transportar materiales de otras regiones.

Es necesario empezar a proyectar una arquitectura que se adapte al entorno apoyada de una correcta selección de materiales, lo cual no podrá ser posible si se siguen empleando los mismos productos. La investigación de nuevos materiales permitirá cambiar la forma en la cual se proyecta la arquitectura actualmente.

## HIPÓTESIS

***Al sustituir la arena de un mortero por otros agregados es posible disminuir la densidad de la mezcla hasta un 20%, al ser comparadas con morteros convencionales; manteniendo una resistencia de 100kg/cm<sup>2</sup>, para su implementación en la fabricación de piezas de mampostería de uso estructural y estas puedan ser implementadas en sistemas constructivos.***



# OBJETIVOS

## GENERAL

***Generar un diseño de mezcla que sustituya parcialmente el agregado fino por partículas de sílica gel generando un mortero ligero para su implementación en la elaboración de elementos de mampostería con fines estructurales en la Ciudad de México.***

## PARTICULARES

- *Determinar la cantidad de sílica gel necesaria para obtener una mezcla con las condiciones óptimas de trabajabilidad.*
- *Conocer la relación entre la densidad y la resistencia de las mezclas propuestas.*
- *Identificar si es necesario la utilización de aditivos a la mezcla.*
- *Determinar el comportamiento de las partículas de sílica gel dentro de la mezcla.*
- *Identificar las afectaciones de la granulometría del agregado fino en las resistencias de las mezclas.*
- *Determinar si las arenas utilizadas para la construcción en la ciudad de México cumplen con la granulometría establecida en la norma ASTM C-33.*





# 1

## PRIMER CAPÍTULO

En el siguiente capítulo son mencionadas las características generales que ofrecen los materiales ligeros, tanto físicas o mecánicas. Algunas de las aplicaciones que han tenido estos materiales al incursionar en el campo de la arquitectura y los usos que tienen dentro de la arquitectura regional mexicana. De igual modo se abordan las limitaciones de estos materiales, para conocerlas y considerarlas al momento de ser propuestos como material en la elaboración de elementos y sistemas constructivos.

Los materiales ligeros surgen como una solución para disminuir las cargas que los materiales convencionales generan a los inmuebles, derivando en cimientos y elementos estructurales como castillos y dalas de secciones más robustas. Lo anterior ocasiona un mayor consumo de recursos y tiempos de ejecución, encareciendo la obra. En la búsqueda por obtener materiales con menores densidades, se han utilizado diferentes técnicas como la sustitución de sus agregados por elementos de menor densidad, llegando a utilizar desechos de otras industrias. Pero dentro de los materiales ligeros; el concreto ha sido el principal objetivo para los investigadores, por su importancia en la industria de la construcción.





El concreto es el segundo material más demandado por la industria de la construcción de vivienda unifamiliar en México ocupando el 40% del mercado, encontrándose únicamente por debajo de los elementos de mampostería.<sup>13</sup> Razón por la cual se han centrado las investigaciones en generar concretos y piezas de mampostería con menores densidades, considerando que estos dos materiales pueden llegar a abarcar gran parte del mercado de la construcción. Una de las variantes más conocida dentro de los concretos ligeros, es el llamado concreto celular, sin embargo, a pesar de ser denominado como concreto, no se utiliza en elementos estructurales, retomando la relación de la resistencia y la densidad de un material, el concreto celular por ser un material muy ligero no es posible ofrecer una buena resistencia demandando una mayor cantidad de acero de refuerzo.<sup>14</sup> Cualidades que han fomentado su uso en cada vez más elementos arquitectónicos, pero que, por su propia naturaleza, su uso con fines estructurales se encuentra limitado.

## 1.1. Características

Una de las principales características de los materiales ligeros, es la reducción del peso propio, al permitir que las estructuras tengan secciones más pequeñas, en comparación de aquellos casos donde se emplean materiales de densidades normales. De igual modo se optimizan los tiempos en el acarreo del material y la manejabilidad al transportar piezas prefabricadas con estos materiales reduce los tiempos de ejecución de las obras disminuyendo los costos<sup>15</sup>. Otra de las características que ha favorecido el uso de los materiales ligeros dentro de la arquitectura, es la conductividad térmica. La conductividad térmica de un material será inversamente proporcional a la cantidad de poros que esté presente, es decir que, para mejorar la conductividad térmica, es necesario incrementar la cantidad de poros, al mismo tiempo que se garantiza la reducción en la densidad del material<sup>16</sup>.

El concreto celular puede mantenerse a fuego directo por más tiempo que otros concretos similares dependiendo del espesor, manteniendo la relación que, a menor densidad, será mayor la resistencia a altas temperaturas<sup>17</sup>. Eso podría indicar que los poros internos del material, los cuales son causantes de la baja densidad, de igual manera ayudan a disipar el calor al cual se encuentran expuestos por medio del aire que se encuentra en su interior.

---

<sup>13</sup> Sánchez Alejandro, A. (2013) “Comportamiento sísmico de muros de concreto para vivienda” Tesis de Doctorado en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. pág. 6

<sup>14</sup> Emilio Jiménez, R. (2014) “Concreto aireado en autoclave, estado actual de la técnica y perspectivas de futuro” Maestría en Tecnología de la Arquitectura, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, pag. 10

<sup>15</sup> Elizondo Fócil, A. (2006) “Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada” Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, pág. 22

<sup>16</sup> Emilio Jiménez, R. (2014) “Concreto aireado en autoclave, estado actual de la técnica y perspectivas de futuro” Tesis de Maestría en Tecnología de la Arquitectura, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, pág. 20

<sup>17</sup> Elizondo Fócil, A. (2006) “Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada” Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, pág. 25



## 1.2. Aplicaciones en la construcción

Las aplicaciones de materiales ligeros en la construcción se ven limitadas por su baja resistencia a la compresión, sin embargo, si se contara con la resistencia necesaria para ser considerado con uso estructural, este tipo de materiales tendrán aplicaciones en zonas sísmicas, ya que gran parte de la república mexicana se encuentra en esta condición. Por su localización geográfica en relación con las placas tectónicas, las construcciones deberán de ser diseñadas para resistir este tipo de esfuerzos, y un material ligero podría ser una solución para la elaboración de viviendas unifamiliares. La utilización de materiales de baja densidad en zonas sísmicas, como lo pueden ser las mamposterías ligeras, ha favorecido a las construcciones por presentar menores fuerzas inerciales durante un movimiento telúrico, lo que evita daños físicos en las estructuras. Y por su peso volumétrico bajo, la remoción de escombros durante las actividades de reconstrucción, una vez sucedido el siniestro, serán más rápidos.<sup>18</sup>

Las mezclas de mortero, así como los materiales ligeros pueden ser utilizados para generar elementos de mampostería de menor densidad volumétrica, los cuales soportarían cargas no menores a  $100\text{kg/cm}^2$ , si se consideran para su implementación en edificaciones de no más de dos niveles de construcción los cuales representan el 60% de las viviendas en México<sup>19</sup> ya que este tipo de viviendas son construidas utilizando un sistema de muros de carga y marcos rígidos, favoreciendo la implementación de este tipo de materiales. Un diseño de mezcla de mortero ligero, además de piezas de mampostería, también se puede implementar en la fabricación de paneles y elementos prefabricados, los cuales demandarían estructuras menos robustas y facilitarían su montaje. Por su baja conductividad térmica,<sup>20</sup> pueden llegar a ser una alternativa, ya que su implementación puede ser muy útil en regiones donde se busca conservar los niveles de temperatura, como lo que ocurre en la región norte del país, estados donde en el día se busca tener una baja o nula ganancia térmica, mientras que en las noches esto se invierte, buscando no tener una pérdida excesiva de calor en los casos más extremos. Lo anterior es aplicable si se considera a los elementos constructivos, como un medio pasivo para regular la temperatura interna del inmueble.

Los materiales ligeros pueden ser utilizados como recubrimientos de estructuras metálicas o todas aquellas que se encuentren comprometidas al ser expuestas a altas

---

<sup>18</sup> Elizondo Fócil, A. (2006) “Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada” Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, pág. 22

<sup>19</sup> R. Meli, S.M. Alcocer y L.A. Díaz-Infante Ch; (1994) “Características estructurales de la vivienda de interés social en México” Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 33

<sup>20</sup> Elizondo Fócil, A. (2006) “Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada” Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, pág. 101



temperaturas por determinado lapso. Tal es el caso particular de los concretos celulares curados en autoclave, donde su punto de fusión se encuentra alrededor de los 1,200°C.<sup>21</sup>

### 1.3. Limitaciones en la construcción

La porosidad que presentan los materiales ligeros resulta perjudicial en la durabilidad de estos materiales. Al no tener una óptima resistencia a los ambientes agresivos, como las aguas freáticas, agentes corrosivos, así como entornos contaminados y escurrimientos.<sup>22</sup> Lo anterior no significa que no se puedan utilizar este tipo de materiales, pero se tendrán que hacer consideraciones para una correcta aplicación y funcionamiento de estos, limitando su campo de aplicación.

Los bloques de concreto celular empleados en la elaboración de muros de mampostería resultan económicamente no rentables si se compara con piezas de mampostería convencional, además de tener una red de distribución muy limitada, lo anterior ocasiona una baja implementación en la construcción de vivienda unifamiliar. Para la elaboración de elementos prefabricados de concreto celular, es necesario contar con una infraestructura que limita su producción a un pequeño sector, además de demandar una mano de obra especializada, resultando en un proceso más costoso.<sup>23</sup>

### 1.4. La Mampostería y los sismos

Como se mencionó previamente, el territorio mexicano se encuentra afectado por una falla tectónica que abarca desde Canadá hasta Chile conocido como *anillo de fuego*, razón por la cual se tienen que tomar consideraciones muy particulares cuando se proyecta bajo estas condiciones. Si bien, las construcciones a base de muros de mampostería son las más demandadas en la arquitectura local, se necesita conocer cómo se comportan estos elementos ante fuerzas sísmicas.

El arquitecto Gernot Minke nos dice que una de las principales desventajas de los muros de mampostería confinada ante los sismos es su tendencia al colapso, para lo cual propone un incremento en los elementos de confinamiento tanto verticales como horizontales, lo cual deriva en un aumento de material y acero de refuerzo, aceptando que es una solución

---

<sup>21</sup> Emilio Jiménez, R. (2014) “Concreto aireado en autoclave, estado actual de la técnica y perspectivas de futuro” Tesis de Maestría en Tecnología de la Arquitectura, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, pág. 29

<sup>22</sup> Elizondo Fócil, A. (2006) “Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada” Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, pág. 26

<sup>23</sup> Elizondo Fócil, A. (2006) “Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada” Tesis de Maestría en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México, pág. 30



costosa y muy rígida, perdiendo la ventaja de ductilidad<sup>24</sup>. Esto se podría evitar si se utilizaran materiales más dúctiles para la elaboración de este tipo de construcciones.

El uso del tabique de barro de fabricación artesanal en la elaboración de muros de mampostería, ocupado el 44% del mercado, sin embargo, la utilización de tabiques de barro industrializado abarca el 25% del mercado y los blocks huecos de cemento presentan un uso del 27%<sup>25</sup>. Lo anterior se podría atribuir a la comercialización de estos productos, inclusive podría ser una consecuencia en la densidad del material ya que una pieza de ladrillo rojo tendrá una menor densidad que una pieza de block cemento-arena, por lo cual, las piezas de block hueco tienen una presencia considerable en el mercado.

Por cuestiones normativas, en lugares como las costas de Guerrero, por ser una zona de mayor riesgo sísmico, se llega a requerir hasta un 20% del área en planta de muros, considerando un sistema convencional de mampostería, volviendo muy complicada la funcionalidad de los espacios. Razón por la cual se han buscado materiales de mayor resistencia para poder responder a este tipo de requerimientos, inclusive combinando muros de concreto y mampostería, teniendo repercusiones económicas significativas<sup>26</sup>.

La solución estructural, al combinar muros de mampostería y muros de concreto reforzado se hace presente en las zonas de moderado y alto riesgo sísmico, ocupando el 14% del mercado, sin embargo, la utilización de muros de mampostería confinada sigue siendo el sistema más utilizado con un 44% en regiones de media y alta actividad sísmica y un 65% considerando todo el territorio mexicano, como se aprecia en la **Tabla 1**

Sistema Estructural	Región Sísmica		Total (%)
	A	B, C y D	
<b>Mampostería Confinada</b>	21%	44%	65%
<b>Mampostería Reforzada</b>	8%	12%	20%
<b>Mampostería y Muros de Concreto</b>	0%	14%	14%
<b>Muros de Concreto</b>	0%	1%	1%

**Tabla 1** Sistemas estructurales usados en los muros para distintas regiones sísmicas <sup>27</sup>

<sup>24</sup> Gernot, Minke (2001), “Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra”, Alemania, Universidad de Kassel, pág. 27

<sup>25</sup> R. Meli, S.M. Alcocer y L.A. Díaz-Infante Ch; (1994) “Características estructurales de la vivienda de interés social en México” Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 34

<sup>26</sup> R. Meli, (1994) “ Mampostería estructural. La práctica, la investigación y el Comportamiento sísmico observado en México,” Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 21

<sup>27</sup> R. Meli, S.M. Alcocer y L.A. Díaz-Infante Ch; (1994) “Características estructurales de la vivienda de interés social en México” Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17, México, pág. 36



# 2

## SEGUNDO CAPÍTULO

El siguiente capítulo aborda las variables que influyen en el diseño de una mezcla de mortero ligera. Los materiales que intervienen para la creación de un mortero, entre los cuales encontramos los agregados finos, más comúnmente referidos como arenas, el cemento como material aglutinante y finalmente el agua utilizada para hidratar al cemento. Mencionando las generalidades de estos agregados y como pueden llegar a modificar las propiedades físicas y mecánicas debido a la composición, cantidad y origen de estos agregados.





## 2.1. Morteros

Los morteros son materiales versátiles dentro del mundo de la construcción, en algunos lugares son utilizados como materiales de revoque o repellado, como material para la junta de muros de mampostería y en los últimos años, se ha empleado en la mampostería estructural<sup>28</sup>. Es imperativo hacer una diferenciación entre el cemento de albañilería y el mortero como una mezcla de cemento-arena-agua. El cemento de albañilería es un material cuyo proceso de fabricación determina características de plasticidad, adherencia y trabajabilidad distintas a las proporcionadas por el cemento portland, por lo cual se utiliza para pegar tabiques y aplanados<sup>29</sup>.

La empresa CEMEX, menciona que, al utilizar el cemento de albañilería en la producción de morteros, se obtienen mezclas con gran plasticidad, adherencia, trabajabilidad y resistencia a la compresión<sup>30</sup>. Pero este tipo de cemento no se puede utilizar en la fabricación de concretos. Por lo que, entenderemos al mortero como una mezcla homogénea de un material aglomerante, que podrán ser cementos o cales, agregado fino o arena y agua<sup>31</sup>. Para fines de esta investigación, se entenderá al mortero como la mezcla uniforme entre el cemento portland como material aglutinante, arenas como agregado fino, y agua *Imagen 2*. Otros autores definen a los morteros como, una mezcla homogénea entre un material aglutinante, utilizando el cemento principalmente, y un material de relleno o agregado con determinada finura, agua y de ser necesario, se puede emplear algún tipo de aditivos, por lo que, en ocasiones se llega a considerar al mortero como un concreto, carente del agregado grueso<sup>32</sup>.



**Imagen 2** Agregados para mezclas de mortero A) Cemento portland B) Arena C) Agua

<sup>28</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2° edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales pág. 114

<sup>29</sup> CEMEX Concretos, *Manual del constructor*. México, CEMEX S.A. de C.V. pág. 41

<sup>30</sup> CEMEX Concretos, *Manual del constructor*. México, CEMEX S.A. de C.V. pág. 41

<sup>31</sup> Sanjuán, M.A. y P. Castro (2001), *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C, pág. 38

<sup>32</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2° edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág.115



### 2.1.1. Características

Los morteros empleados para la edificación de muros de mampostería representan entre el 10 y 20% del volumen total del elemento<sup>33</sup>. Para poder considerarse una buena mezcla, debería de cumplir con las siguientes características:

- *Trabajabilidad*: entendiéndolo como la combinación adecuada de consistencia, fluidez, peso y adherencia, mismas que aportaran la rigidez, durabilidad y resistencia requeridas.
- *Plasticidad*: Propiedad que le permite mantenerse blando y moldeable por un tiempo determinado, ya que una pérdida acelerada de la plasticidad podría generar un fraguado prematuro.
- *Adherencia*: es el grado de fuerza con la cual se unen la mezcla de mortero y las piezas sobre las cuales fue aplicado. El grado de adherencia otorga la resistencia a la flexión, la cual es la fuerza necesaria para separar dichas piezas, una vez que el mortero ha fraguado.
- *Durabilidad*: Capacidad de los morteros y concretos, para soportar la acción del intemperismo. Si consideramos que los morteros son empleados como aislantes entre exterior-interior, dicha cualidad resulta de suma importancia.
- *Resistencia*: entendiéndolo como la capacidad de resistir los esfuerzos de compresión a los que será sometido.
- *Apariencia*: Capacidad del mortero para conservar, a través del tiempo, la apariencia que se le dio originalmente<sup>34</sup>.

### 2.1.2. Clasificación

Los morteros se clasifican en dos grupos, considerando su endurecimiento. Los morteros aéreos son aquellos donde se gana la resistencia a temperatura ambiente, al perder agua por el efecto de secado, este tipo de morteros fraguan lentamente por un proceso de carbonatación. Los morteros hidráulicos o acuáticos son aquellos que endurecen o fraguan bajo el agua, gracias a su composición que les permite desarrollar resistencias iniciales relativamente altas<sup>35</sup>. El Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (R.C.D.F), los clasifica como mortero para pegar piezas, siendo aquel que se emplea en elementos estructurales de mampostería, buscando utilizar la menor cantidad de agua posible, y cuya resistencia a la compresión no será menor a 40kg/cm<sup>2</sup>. Los morteros de relleno son empleados en elementos huecos de mampostería, utilizando la menor cantidad de agua posible, pero a diferencia de los primeros, se permite adicionar aditivos que mejoren la trabajabilidad de la mezcla, con una

---

<sup>33</sup> Salamanca Correa, Rodrigo, (2001), “La tecnología de los morteros” en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, número 11, diciembre 2001, pág.42

<sup>34</sup> CEMEX Concretos, *Manual del constructor*. México, CEMEX S.A. de C.V. pág. 42

<sup>35</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2° edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág. 115



resistencia no menor a  $125\text{kg/cm}^2$  <sup>36</sup> sin embargo, el reglamento de construcciones no especifica si pueden o no ser considerados como morteros estructurales.

La norma ASTM-270 clasifica a los morteros en cinco grandes grupos, de acuerdo con sus características mecánicas y la dosificación de los materiales, como se representa en la **Tabla 2**.

Tipo de Mortero	Resistencia a la compresión			Cemento Portland	Cemento Albañilería	Cal	Agregado fino suelto
	(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )	(P.S.I.)				
<b>M</b>	17.2	175	2500	1 1	1 -	0.25	Entre 2.25 y 3 veces la suma de cemento y cal utilizado
<b>S</b>	12.4	126	1800	0.5 1	1 -	0.25 a 0.50	
<b>N</b>	5.2	53	750	- 1	1 -	0.50 a 1.25	
<b>O</b>	2.4	25	350	- 1	1 -	1.25 a 2.50	

**Tabla 2** Clasificación de los Morteros de acuerdo con la norma ASTM-270

En la tabla anterior se especifican las proporciones de los agregados, los cuales están en función al peso del cemento, dicho proporciona miento modificara las características finales del material resultando en las siguientes, como las reporta Salamanca Correa, Rodrigo, (2001).

**Mortero tipo M:** Es una mezcla de alta resistencia, ofreciendo mayor durabilidad y es recomendado para mamposterías sometidas a grandes cargas de compresión, cargas laterales, fuertes vientos, así como temblores.

**Mortero tipo S:** Presenta el mayor grado de adherencia en su tipo, es empleado en elementos cuyo esfuerzo a la compresión sea normal, pero requieran una alta adherencia, se emplea en aquellos casos donde el mortero es el único elemento de adherencia con la pared como el caso de los revestimientos cerámicos.

**Mortero tipo N:** Es un mortero de propósito general, manteniendo un equilibrio entre la resistencia, trabajabilidad y economía

<sup>36</sup> Arnal Simón, L. (2005), *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal: reglamento, normas técnicas, Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, ilustraciones y comentarios, graficas, planos y lineamientos*. México, Trillas S.A. de C.V. pág. 679-680



*Mortero tipo O*: Es un mortero de baja resistencia y una alta cantidad de cal, son usuales en construcciones de uno o dos niveles, utilizado en paredes sin carga y muros divisorios.

### 2.1.3. Consideraciones

Las mezclas de mortero comparten similitudes con las mezclas utilizadas para la elaboración de blocks de cemento arena empleados en sistemas de muros de mampostería, pero al adicionar un agregado distinto o modificar sus características de tamaño, densidad, porosidad o dosificación, es tienen que realizar pruebas a la mezcla en estado fresco y pruebas de compresión al material en estado seco para determinar si las condiciones físicas de la mezcla cumplen con las condiciones de trabajabilidad, adherencia y plasticidad, así como la resistencia a la compresión resultante del diseño de mezcla. Algunas de las variables que modifican las condiciones físicas y mecánicas de las muestras son las siguientes, las cuales son un extracto de lo reportado por Gutiérrez de López, Libia (2003).

- Al agregar cierto porcentaje de limos o arcillas a los morteros, tendrán una mejor trabajabilidad, desafortunadamente su resistencia será muy baja.
- Si la mezcla carece de cemento, esta tendrá una textura áspera y de baja trabajabilidad, como consecuencia de la fricción entre las partículas de las arenas, por no tener suficiente pasta de cemento que pueda actuar como lubricante.
- Si fuera el caso opuesto, donde la mezcla fuera rica en cemento, ocasionaría una alta resistencia, al igual que un elevado índice de retracción por secado, con tendencias a agrietamientos. Por lo que se llega a limitar su implementación<sup>37</sup>.
- El contenido de agua influye, al ser mezclas más secas, se obtienen mejores resistencias, en comparación con un mortero húmedo<sup>38</sup>.

---

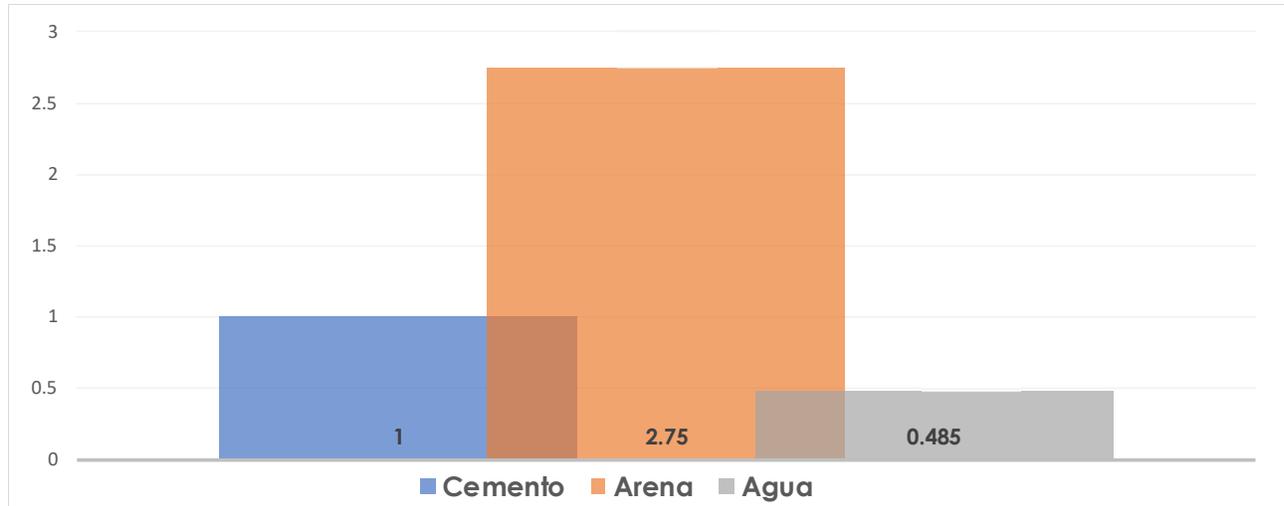
<sup>37</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2º edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. pág. 117-118

<sup>38</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2º edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. pág. 121



### 2.1.4. Relación Agua – Cemento – Agregado

La norma ASTM C-109 nos indica que la relación agua-cemento ideal es de 1:0.485, y cemento agregado de 1:2.75 **Gráfica 1**. Como ya fue mencionado, un exceso o carencia de agua tendrá repercusiones principalmente en la resistencia y durabilidad de las mezclas.



**Gráfica 1** Dosificación para mezclas de mortero de acuerdo con la norma ASTM C-109

Una carencia de agua en la mezcla derivara en mezclas de poca trabajabilidad. Con una mezcla poco fluida, resulta muy complicado el vaciado para la elaboración de elementos estructurales, donde la presencia del acero de refuerzo evita un correcto asentamiento, dando como resultado cavidades o bolsas de aire al interior de este. Estos poros serán una causa en las fallas de los materiales, por permitir que la humedad penetre hasta entrar en contacto con el acero de refuerzo, fomentando la oxidación. Si se utilizada un exceso de agua, se obtendrá una mezcla demasiado fluida, la cual tendría una excelente compactación donde el acero de refuerzo limita el uso de medios mecánicos para un correcto llenado del elemento. Sin embargo, esto tendrá como consecuencia una disminución en la resistencia de la mezcla. En estos tipos de mezclas no es posible garantizar una correcta distribución de los agregados al interior del elemento. En mezclas tan fluidas es común que se presente la segregación del material, es decir que el agregado pétreo descienda o flote con relación a su peso.

Del 100% del volumen de agua utilizado para la hidratación del cemento, únicamente el 23% de esta se combina químicamente con el cemento, dando paso a la reacción de hidratación de este. El 77% de agua restante, es absorbida por el compuesto generado en la hidratación del cemento. Las consideraciones anteriores, contemplan la utilización de arenas convencionales, cuyas características se encuentran igualmente normalizadas, pero al sustituir



la arena por otro elemento, es necesario la elaboración de un muestreo previo para determinar si las relaciones establecidas se pueden implementar o realizar ajustes en la dosificación.

Si es necesario incrementar la fluidez de las mezclas, o reducir la cantidad de agua, sin afectar la trabajabilidad, no se recomienda modificar la relación agua-cemento; para estos casos se puede optar en otras soluciones, como lo es la implementación de aditivos, según las demandas técnicas del proyecto.

## 2.2. Cementos

Los cementos son un material que ofrece propiedades cohesivas y adhesivas. En el mundo de la construcción los materiales denominados como cementos, se limitan únicamente a un producto aglutinante. Una de las más importantes cualidades del cemento empleado para la fabricación de concretos, es la propiedad de fraguar o endurecer sumergido total o parcialmente en el agua, por lo cual se denomina cemento hidráulico.<sup>39</sup> Es un material conformado por varios tipos de piedras minerales, que al entrar en contacto con el agua e hidratarse, genera una reacción química, fraguando y endureciéndose<sup>40</sup>. Logrando una alta resistencia a la compresión sin deformarse, convirtiéndolo en uno de los materiales más demandado por la industria de la construcción.

El cemento es la parte fundamental para la creación de morteros y concretos, al funcionar como elemento aglutinante, unificando en una mezcla homogénea los agregados pétreos, los cuales posteriormente pasaran a conocerse como concreto. El cemento es la materia prima del concreto, sin embargo, es empleado de igual medida para la producción de mortero, entendiéndose al mortero como una mezcla homogénea entre la pasta de cemento y un agregado fino<sup>41</sup>, donde se emplean arenas como agregado fino, para la producción de dichas mezclas. Recordando que la fabricación de tabicónes es básicamente una mezcla entre cemento y agregados finos. El cemento al ser parte fundamental en las mezclas determina las propiedades de estas.

---

<sup>39</sup> Adam M. Neville (2013), Tecnología del concreto. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 1

<sup>40</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), Concreto para técnicos de la construcción. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 9

<sup>41</sup> IMCYC. (2012), Terminología del cemento y del concreto. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 46



### 2.2.1. Clasificación

Desde el punto de vista mecánico, los materiales cerámicos son muy duros, resistentes a altas cargas de compresión, pero de igual forma, llegan a ser frágiles<sup>42</sup>. Para el caso de México la industria cementera identifica sus productos ofertados haciendo referencia a la Norma Mexicana **NMX C 414** *Tabla 3*, la cual establece una clasificación de seis tipos de cementos, con cuatro características especiales y cinco resistencias distintas. En el territorio mexicano, la clasificación es una combinación entre la NMX C-414 y la norma ASTM C-150, siendo posible encontrar cementos con la clasificación **CPC Tipo II 30R**.

Para la investigación se utilizó un cemento tipo II con clasificación **CPC 30R RS**, se trata de un cemento portland compuesto con una resistencia de 30 MPa resistente a sulfatos, se eligió esta clasificación por ser el tipo de cemento con mayor presencia en el mercado, favoreciendo su abasto para satisfacer la demanda.

Denominación	Tipo	Uso
<b>Cemento Portland Ordinario</b>	CPO	CPO 20: General, no sujeto a agentes agresivos. CPO 30 y CPO 30R: En concreto estructural, donde se desee endurecimiento y resistencia rápida en ambientes no agresivos. COP 40 y CPO 40R: Concreto estructural de endurecimientos y resistencia muy rápida en ambientes no agresivos.
<b>Cemento Portland Puzolánico</b>	CPP	Todas las clases resistentes: General, excepto concreto pretensado, ambiente poco agresivo o donde se desee moderado claror de hidratación.
<b>Cemento Portland con escoria granulada de altos hornos</b>	CPEG	Todas las clases resistentes: Concreto masivo o donde se desee bajo calor de hidratación
<b>Cemento Portland compuesto</b>	CPC	Como los cementos CPEG o Cementos CPP
<b>Cemento Portland con humo de Sílice</b>	CPS	En todas sus clases resistentes: General con aditivo superfluidificante excepto en concretos pretensados, concreto en tiempo de heladas y ambientes agresivos.
<b>Cemento con escoria granulada de altos hornos</b>	CEG	En todas sus clases resistentes: Concreto masivo, donde se desee bajo calor de hidratación o resistencia a sulfatos.

*Tabla 3 Tipos de cementos de acuerdo con la NMX C-414* <sup>43</sup>

<sup>42</sup> William D. Callister Jr. (1995), *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 1*. Editorial Reverté S.A. de C.V. Barcelona pág. 4

<sup>43</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 11



## 2.3. Las arenas como agregado fino

La norma ASTM C-33, define a las arenas o agregados finos, como aquellos fragmentos de roca cuyo tamaño de partícula se encuentra entre 0.15mm y 4.75mm. Al material que se encuentre por encima de este rango se conoce como agregado grueso, o gravas. Y al material que se encuentre por debajo de dicho rango se conoce como limos<sup>44</sup>. En la producción de mezclas de mortero y concreto, las arenas juegan un parte muy importante, abaratando el costo final de las mezclas. Además de otorgar propiedades de trabajabilidad y resistencia. Por ello es necesario dejar de considerar a las arenas como simples agregados de relleno, cuidando la calidad y composición de estas, al momento de ser implementadas en la construcción.

### 2.3.1. Clasificación

Al igual que un agregado grueso, las arenas pueden ser obtenidas primordialmente por medio de dos procesos, naturales y artificiales, determinando características muy puntuales. Pueden ser de minas o bancos, o resultado de la trituración de otras piedras naturales. Un agregado artificial, podrá ser manipulado en sus características físicas y por ser resultado de un proceso de molienda o trituración, puede presentar una densidad mayor o menor, de acuerdo con lo demandado<sup>45</sup>.

Las arenas por ser materiales pétreos, y dependiendo de su lugar de procedencia o fabricación, al igual que las condiciones de transporte y almacenaje previos a ser utilizados en las mezclas, llegan a contener cierta cantidad de agua o humedad en su interior<sup>46</sup>. Los materiales de origen artificial, como proceso de la molienda, tendrán un índice de absorción de humedad menor comparada contra un material de origen natural. Lo anterior como consecuencia del intemperismo sobre la superficie del material, derivando en la formación de poros. Concluyendo que una piedra triturada absorberá menor cantidad de agua que una piedra sin triturar de las mismas características<sup>47</sup>. Una de las principales funciones de las arenas y en general de los agregados, es economizar las mezclas, incluidas las de mortero, gracias a que los agregados llegan a constituir entre el 70% y 80% del volumen final de la mezcla<sup>48</sup>. Las arenas son relativamente económicas comparadas con los costos del cemento. Además de no presentar reacciones químicas complejas al entrar en contacto con el agua, llegando a contener altos niveles de humedad, sin que esto afecte su estructura.

<sup>44</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 75

<sup>45</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 76

<sup>46</sup> Donald R. Askeland (1998) *Ciencia e ingeniería de los materiales*. 3ra edición, International Thomson Editores S.A. de C.V. México, pág. 562

<sup>47</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 89

<sup>48</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 14



Sin embargo, gracias a los crecientes estudios sobre los agregados que intervienen en las mezclas. Se han hecho descubrimientos de como estos influyen para determinar características primordiales de las mezclas, llegando a cuestionar el uso de los agregados como un simple material de relleno<sup>49</sup>. Para una correcta dosificación de mezclas, es necesario conocer, entre otros aspectos, el grado de absorción del material y el peso volumétrico de los agregados. En el caso de los concretos de alto desempeño, los agregados empleados requieren de consideraciones especiales, llegando a influir significativamente en las resistencias y en otras propiedades del concreto<sup>50</sup>. La gran mayoría de las arenas de origen natural o artificial, tienen un peso volumétrico que va desde los 1,520 hasta los 1,680 kg/m<sup>3</sup> <sup>51</sup>.

### 2.3.2. Curva Granulométrica

*Granulometría: "Es la distribución de las partículas de materiales granulares de varios tamaños, que generalmente se expresa en términos de porcentajes acumulados mayores o menores"*<sup>52</sup>

Entiéndase como granulometría a la distribución de los tamaños de las partículas del agregado *Imagen 3*, los cuales determinaran las características de la pasta en términos de trabajabilidad y resistencia, así como la durabilidad del concreto<sup>53</sup>. La granulometría es el tamaño de las partículas de un agregado, dichos tamaños estarán determinados según la clasificación del material, es decir entre arenas y gravas. Las medidas de los diámetros para las arenas están determinadas por los tamices de acuerdo con la norma ASTM C-33 *Tabla 4*.

---

<sup>49</sup> Mehta, K. y P. Monteiro, (1998) *Concreto, estructuras, materiales y propiedades*. 1ra edición. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. pág. 165

<sup>50</sup> IMCYC. (2013), *Guía para seleccionar las proporciones para concretos de alta resistencia con cemento portland y ceniza volante*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 5

<sup>51</sup> Mehta, K. y P. Monteiro, (1998) *Concreto, estructuras, materiales y propiedades*. 1ra edición. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. pág. 165

<sup>52</sup> Mehta, K. y P. Monteiro, (1998) *Concreto, estructuras, materiales y propiedades*. 1ra edición. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. pág. 177

<sup>53</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 17



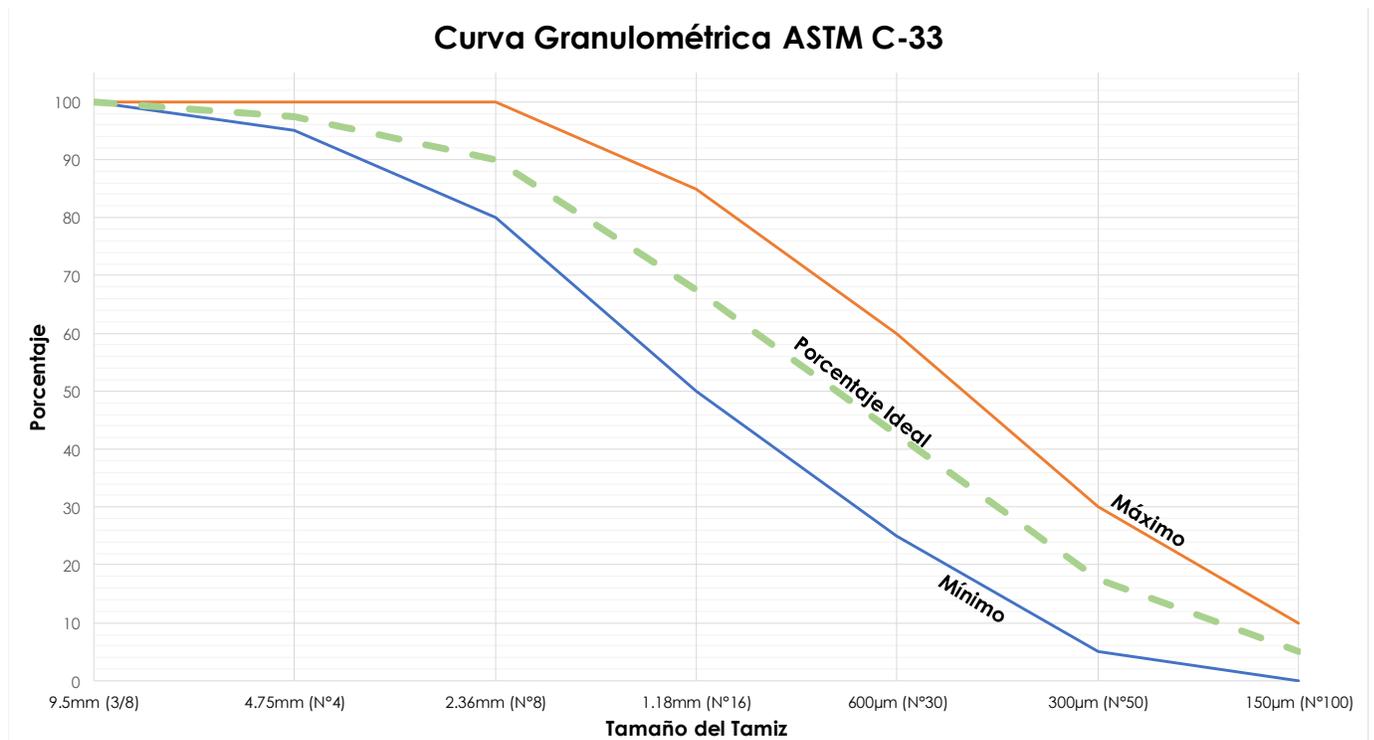
**Imagen 3** Distintos tamaños de partículas de las arenas, el tamaño va en función al tamiz: el #4 menor a 4.75mm y mayor a 2.36mm, #8 menor a 2.36mm y mayor a 1.18mm, #16 menor a 1.18mm y mayor a 0.60mm, #30 es menor a 0.60mm y mayor a 0.30mm, el # 50 es menor a 0.30mm y mayor a 0.15mm y el #100 es menor a 0.15mm y mayor a 0.075mm

Requerimientos de granulometría para agregados finos			
Malla o tamiz	Porcentaje Mínimo	Porcentaje Máximo	Porcentaje Ideal
9.5mm (3/8)		100	2.5
4.75mm (No. 4)	95	100	7.5
2.36mm (No. 8)	80	100	22.5
1.18mm (No. 16)	50	85	25
600µm (No. 30)	25	60	25
300µm ((No. 50)	5	30	12.5
150µm (No. 100)	0	10	5

**Tabla 4** Curva Granulométrica para agregados finos. ASTM C-33



Al graficar la tabla 4 se obtiene el siguiente resultado expresado en la *Gráfica 2*



**Gráfica 2** Curva Granulométrica para agregados finos. ASTM C-33

Al realizar la prueba de tamizado en los agregados finos, la norma ASTM C-33 establece que no deberá de retenerse más de 45% de volumen de la muestra entre dos tamices consecutivos<sup>54</sup>. El tamaño de los agregados influye directamente en la mezcla, con relación a la absorción de agua, la trabajabilidad, cantidad de cemento, porosidad y durabilidad. En la construcción, la granulometría de los agregados juega un papel muy importante. Una buena combinación en los tamaños del agregado resulta en una mejor distribución de las partículas y una mayor resistencia a los esfuerzos de compresión<sup>55</sup>. Una mezcla donde únicamente se utilice un solo tamaño de partícula, tendrá una taza mayor de espacios vacíos o cavidades.

Adicional a la granulometría de los agregados, otras características tales como: La forma, textura, porosidad, absorción, adherencia, densidad y resistencia, influyen directamente

<sup>54</sup> Steven H. K. et al. (2004) *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association, pág. 120

<sup>55</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2° edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág. 29



en las propiedades de las mezclas, tanto en estado plástico como endurecido<sup>56</sup>. Las dimensiones de los agregados determinarán las cualidades de la mezcla, mientras que las arenas muy finas no son costeables por demandar una mayor cantidad de cemento, las arenas gruesas pueden ocasionar una mezcla de baja trabajabilidad<sup>57</sup>. Además de la distribución, un análisis granulométrico determina valores utilizados para el diseño de mezclas, en función de las características que demande el elemento o mezcla, lo ideal es utilizar una combinación de los distintos tamaños de partículas del agregado, al igual que los porcentajes recomendados en la normativa (*ASTM*), con la finalidad de disminuir la cantidad de cavidades entre las partículas del agregado y la pasta de cemento, lo cual propicia en la optimización de la cantidad de pasta de cemento requerida, mejorando con ello la durabilidad de las mezclas<sup>58</sup>.

### 2.3.3. Módulo de Finura

El módulo de finura (MF) es un índice de la finura de los agregados el cual se calcula siguiendo los lineamientos de la norma ASTM C-125. Este consiste en sumar los porcentajes de material acumulado y retenido en cada uno de los tamices y dividiendo la suma entre 100. Para el caso de los agregados finos, la norma ASTM C-33 determina que el módulo de finura deberá de ser mayor a 2.3 y menor a 3.1<sup>59</sup>. Entre menor sea el módulo de finura (MF) nos indicara que se trata de una arena gruesa, mientras que un MF alto significara que nos encontramos con una arena fina<sup>60</sup>.

### 2.3.4. Composición de las arenas

La literatura no hace referencia directa a la composición mineralógica de las arenas, sin embargo, la misma nos dice que la composición de los agregados pétreos, al tratarse de una arena de origen natural o por medio de la trituración de la piedra, conservará las características mineralógicas de la roca o región que le dio origen. Las cuales anteriormente se les consideraba como materiales inertes al no interactuar con las pastas de cemento. Pero ahora se ha visto que es todo lo contrario<sup>61</sup>. Los minerales más comunes encontrados en la composición de los agregados son, silicatos, feldespatos, sulfatos, sulfitos de hierro y óxidos de hierro, como lo reporta

<sup>56</sup> Chan Yam, José Luis; Solís Carcaño, Rómel; Moreno, Éric Iván; "Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto". Ingeniería (2003): 39-46.

<sup>57</sup> Mehta, K. y P. Monteiro, (1998) *Concreto, estructuras, materiales y propiedades*. 1ra edición. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. pág. 178

<sup>58</sup> Mather, Bryant & Ozyildirim, Celik. (2004), *Cartilla del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 14

<sup>59</sup> Steven H. K. et al. (2004) *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association, pág. 120

<sup>60</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 17

<sup>61</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2º edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág. 17



Muciño Castañeda (2013)<sup>62</sup>. La durabilidad de las mezclas dependerá de la composición química del agregado, recordando que la pasta de cemento es un material alcalino, se encontrará vulnerable ante la mayoría de los ácidos<sup>63</sup>.

La norma ASTM C-294 nos proporciona una descripción más detallada de los materiales más comunes presentes. Encontrando minerales de sílice, cuarzo, ópalo, calcedonia, tridimita y cristobalita. Así como feldespatos, minerales micáceos, minerales de carbonato, minerales de sulfato, minerales de sulfuro de hierro, minerales de ferromagnesio, zeolitas, minerales de óxido de hierro y minerales de arcilla<sup>64</sup>. Lo anterior puede generar reacciones químicas perjudiciales entre los componentes activos de la sílice del agregado y los álcalis del cemento. Siendo el ópalo, calcedonia y tridimita las partes reactivas de la sílice, la reacción comienza con el ataque de los hidróxidos alcalinos del cemento por los minerales silíceos del agregado, formando un gel de álcali-silicato, llegando inclusive a destruir la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento que lo rodea <sup>65</sup>

### 2.3.5. Su importancia en la resistencia de las mezclas de mortero

Las características del agregado fino, como lo es la granulometría, módulo de finura, forma y textura de las partículas, incluida la cantidad de materia orgánica que lleguen a contener, entiéndase esta última a las raíces, ramas y hojas. Llegan a jugar un papel decisivo en las características del material<sup>66</sup> principalmente en las fallas mecánicas de las mezclas. Inicialmente se consideró que el 16.2% de las fallas o deterioros presentes en estructuras de concretos eran ocasionadas por una mala selección de los agregados. Sin embargo, estudios más recientes han aumentado esta cantidad hasta en un 30%. Dando un panorama de la importancia de una correcta selección de los agregados, desde la etapa de diseño<sup>67</sup>.

La implementación de las arenas está condicionado a la cercanía con la obra, respondiendo primordialmente a aspectos de la región. Por lo que, la selección de una arena, cuya curva granulométrica se encuentre dentro de las normativas, sus indicadores de humedad,

---

<sup>62</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 14

<sup>63</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 105

<sup>64</sup> Adam M. Neville (2010), *Tecnología del concreto*. México, Trillas, 1998, pág. 39

<sup>65</sup> Adam M. Neville (2010), *Tecnología del concreto*. México, Trillas, 1998, pág. 99

<sup>66</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2° edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág. 117

<sup>67</sup> Sanjuán, M.A. y P. Castro (2001), *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 1



absorción y adherencia sean los adecuados, influirá en la resistencia, compactación y trabajabilidad de las mezclas, favoreciendo directamente en la durabilidad de estas<sup>68</sup>.

Otra de las funciones que cumplen las arenas, es proporcionar una buena manejabilidad a la mezcla, además de tener injerencia en la apariencia final de la mezcla. Una carencia de arenas se ve reflejada en una superficie áspera o porosidad al interior de los elementos. Un exceso de arenas en las mezclas aumenta la cantidad de agua requerida, modificando las relaciones agua-cemento, influyendo de manera negativa con relación a la cantidad de cemento utilizado<sup>69</sup>.

## 2.4. Aditivo

La razón primordial que da pie a la utilización de este tipo de compuestos es para modificar una o varias propiedades de las mezclas en estado fresco, incrementando sus cualidades. Dichas modificaciones pueden ser por medios físicos, químicos o químico-físico<sup>70</sup>. Uno de los sectores más fructíferos para su implementación son las mezclas de concreto, llegando al grado que entre el 70 y 80% del concreto fabricado, integra por lo menos un tipo de aditivo en su diseño<sup>71</sup>.

### 2.4.1. Clasificación de los aditivos

Su clasificación es variada, como variada es la literatura, pero para fines de dicha investigación nos apoyaremos en la siguiente clasificación, **Tabla 5**. Dicha clasificación cumple con los alcances de la investigación, pero si se necesitara una clasificación más amplia y detallada, se recomienda consultar la investigación de otros autores, como el caso de Adam M. Neville (2013)<sup>72</sup> y su libro *Tecnología del concreto*, donde el autor destina un capítulo de su libro a los aditivos, clasificación y características.

---

<sup>68</sup> Sanjuán, M.A. y P. Castro (2001), *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 6

<sup>69</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2º edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, pág. 49

<sup>70</sup> Sanjuán, M.A. y P. Castro (2001), *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 8

<sup>71</sup> Mehta, K. y P. Monteiro, (1998) *Concreto, estructuras, materiales y propiedades*. 1ra edición. México. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. pág. 185

<sup>72</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.



Clasificación de aditivos de uso común en el concreto		
Aditivo	Compuesto químico	Efecto primario
<b>Plastificantes</b>	Lignosulfonatos Ácidos hidrocarboxílicos Carbohidratos	Manteniendo la misma docilidad permiten reducir el contenido de agua: hasta un 6.5%
<b>Superplastificantes</b>	Compuesto de Melamina y formaldehído Compuesto de Naftaleno sulfonado Lignosulfonatos modificados Copolímeros acrílicos	Manteniendo la misma docilidad permiten reducir el contenido de agua: de un 12% hasta un 16%
<b>Retardador de Fraguado</b>	Azúcares Ácidos hidrocarboxílicos Lignosulfonatos	Modifican la velocidad de fraguado. Su acción depende de la cantidad de aditivo, del tipo de cemento y la temperatura.
<b>Acelerador de Fraguado y Aceleradores de Resistencia</b>	Nitrito cálcico Nitratos Tiosulfatos Trietanolamina	Modifican la velocidad de fraguado. Su acción depende de la cantidad de aditivo, del tipo de cemento y la temperatura.
<b>Agentes aireantes</b>	Ácidos y sales de resina de la madera Sales orgánicas Hidrocarburos sulfonados	Forma burbujas de aire por reacciones de adsorción en la interfase aire-agua.
<b>Inhibidores de corrosión</b>	Nitrito cálcico	Control de la corrosión.

**Tabla 5** Clasificación de aditivos de uso común en el concreto <sup>73</sup>

Pero para cuestiones más prácticas la norma ASTM- C494-92 clasifica a los aditivos en grupos según las funciones que cumplen dentro de la mezcla, como lo expresa la **Tabla 6**

Clasifican de aditivos Norma ASTM C-494-92	
Tipo	Función
Tipo A	Reductores de Agua
Tipo B	Retardantes
Tipo C	Acelerantes
Tipo D	Reductores de Agua y Retardantes
Tipo E	Reductores de Agua y Acelerantes
Tipo F	Reductores de agua de alto rango y superplastificantes
Tipo G	Reductores de agua de alto rango y retardantes, o superplastificantes y retardantes

**Tabla 6** Clasifican de aditivos Norma ASTM C-494-92 <sup>74</sup>

Si bien todos los tipos cumplen funciones muy específicas, los aditivos reductores de agua tienen la función de reducir la cantidad de esta en la mezcla, usualmente entre un 5 a un 10 por ciento, pero en casos muy particulares pueden lograr una reducción del 15%. En el

<sup>73</sup> Sanjuán, M.A. y P. Castro (2001), *Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 7

<sup>74</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 167-168



apartado 2.1.4 se indicó la relación agua-cemento ideal, pero esta puede modificarse para cumplir funciones particulares<sup>75</sup>.

Al disminuir la cantidad de agua utilizando este tipo de productos es posible obtener mezclas que conservan la trabajabilidad deseada o mejorando la trabajabilidad de una mezcla previamente diseñada, obteniendo los beneficios en algunos casos de un incremento en su resistencia, así como una baja segregación y buena plasticidad.

Otra variable de aditivos reductores de agua son los denominados superfluidificantes, los cuales son polímeros orgánicos solubles de agua, llegando a incrementar el revenimiento de 7.5cm hasta los 20cm manteniendo una mezcla cohesiva. Por lo que este tipo de aditivos se utiliza con dos finalidades, la primera es obtener una mezcla muy fluida capaz de colocarse en secciones donde el acero de refuerzo se encuentra muy próximo entre sí, la segunda en la elaboración de mezclas con trabajabilidad normal, pero con una resistencia alta gracias a una reducción considerable en la relación agua/cemento llegando hasta 0.2<sup>76</sup>

---

<sup>75</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 173

<sup>76</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 177



# 3

## TERCER CAPÍTULO

En este capítulo se abarcan todos los aspectos de la experimentación. Una vez conociendo las características del material que se pretende obtener y las cualidades de los agregados, es posible justificar el uso de cada uno de ellos. Para que dicha experimentación cuente con una validez, se seguirán procesos para el muestreo ya establecidos previamente en las normativas vigentes. Para las pruebas de los materiales, se utilizarán las normas ASTM por ser de carácter internacional, y puedan ser replicados sin complicaciones posteriormente. La normativa de diseño será con base a las normas mexicanas, ya que, las aplicaciones serán locales.

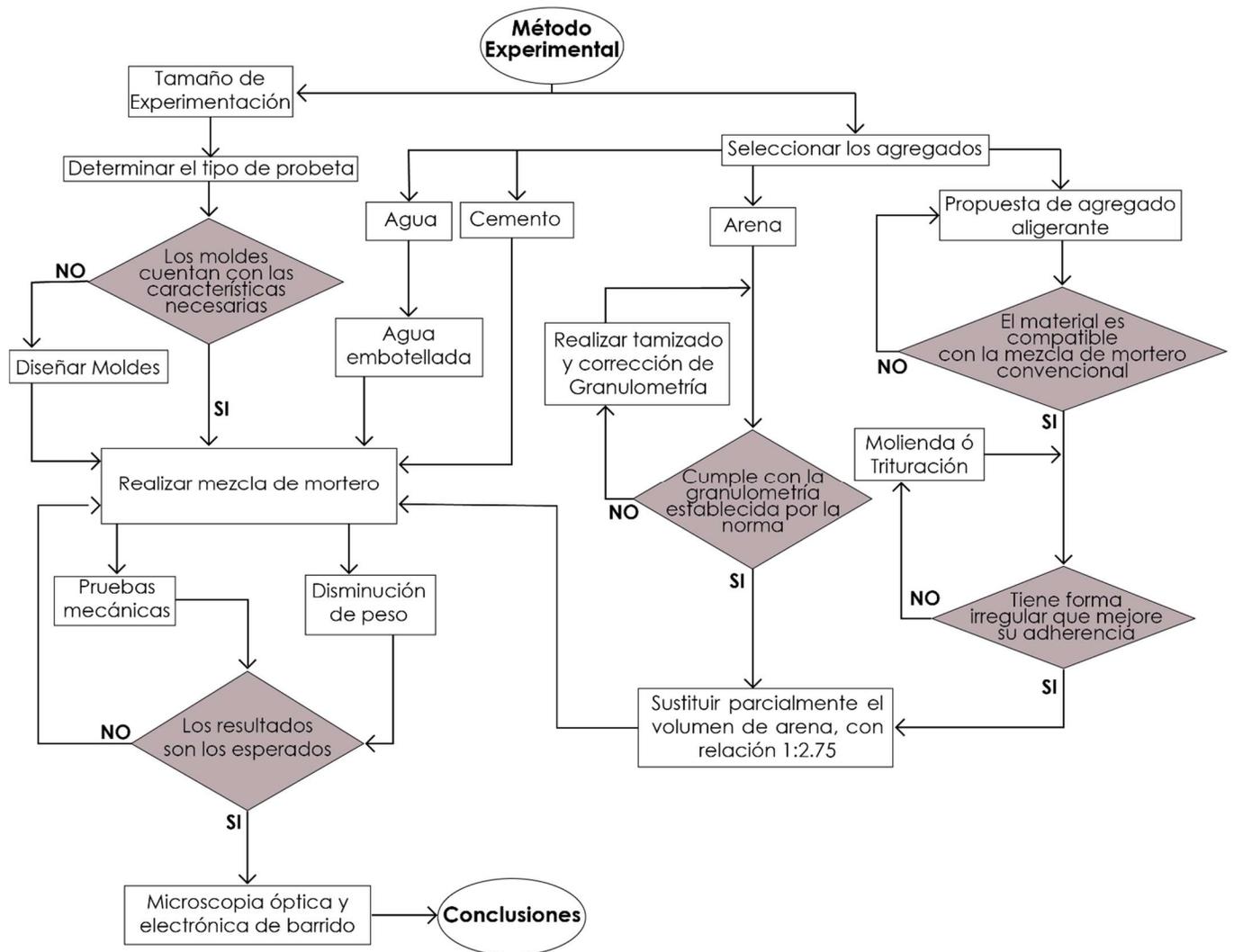
Los materiales empleados serán cementos y arenas locales, cuyas características estarán controladas, con lo cual se obtendrá un material de menor densidad, comparado con el equivalente comercial. Los alcances establecidos en los objetivos se enfocan a determinar la cantidad necesaria de sílica gel para disminuir la densidad de las mezclas. Así como conocer su resistencia a fuerzas de compresión. Por lo cual se realizará una mezcla de referencia, para establecer los parámetros de comparación. Otro compromiso del presente trabajo es el determinar las afectaciones o consecuencias de utilizar una arena que no cumpla con la granulometría establecida por la norma previamente mencionada.





### 3.1. Diseño experimental

A continuación, se muestra un diagrama en el cual se refleja la organización del método a implementar, *Imagen 4*, indicando los pasos a seguir para cumplir los objetivos establecidos. La experimentación es lineal, sin embargo, en los recuadros sombreados se describen los momentos de la experimentación que, en caso de ser necesario, tendrían que reconsiderarse para poder continuar con la secuencia.



*Imagen 4* Procedimiento experimental para la obtención de un diseño de mezcla ligera, sustituyendo parcialmente el volumen de arena por sílica como material aligerante.

Con la finalidad de dotar de certeza a los datos recabados en la experimentación, se reunieron las consideraciones necesarias para validar el proceso. Para ello las pruebas realizadas cumplieron con la normativa establecida. Para las pruebas mecánicas realizadas a las mezclas, por tratarse de un material cerámico, se utilizaron los criterios de las normas ASTM, cuyos parámetros se encuentran normalizados internacionalmente; sin embargo, se tomaron en cuenta la normatividad de diseño establecida por el R.C.D.F.

Uno de los requisitos para la validación de los resultados, es contar con equipo e instrumentos de mediciones, previamente calibrados. Garantizando la certeza de los datos. Siguiendo los lineamientos de una norma vigente en conjunto con equipos debidamente calibrados y un correcto control en el manejo de los agregados, la experimentación puede ser replicable de ser necesario.

### 3.1.1. Materiales Utilizados

Los materiales implementados para la elaboración del muestreo y las probetas para dicha investigación fueron los siguientes:

#### 3.1.1.1. Cemento



**Imagen 5** Cemento portland tipo II 30R RS

Se utilizó **Cemento portland tipo II 30R RS**, **Imagen 5**. Por ser el que presentó mejores resultados en investigaciones previas como el de Vargas López S. (2017) y Salgado Cruz, E. (2016).

Si se utilizara otro tipo de cemento, este deberá de cumplir con la Norma Mexicana NMX-X-414 ONNCCE y la Norma Norteamericana ASTM C-595. Empleado como material conglomerante, se utilizó este tipo de cemento, por ser de fácil comercialización. Además de ser un material con un alto grado de compatibilidad con otros materiales empleados en la

construcción, un cemento tipo II tiene una moderada resistencia a los sulfatos<sup>77</sup> por lo cual, el cemento empleado en la experimentación proporciona resistencia a los sulfatos, además de su

<sup>77</sup> Metha, K. y P. Monteiro. (1998), Concreto: estructuras, propiedades y materiales. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 147



compatibilidad con todos los materiales de construcción convencionales como las arenas y gravas de mina o piedra de río triturada, mármol, cantera y tezontle<sup>78</sup> por mencionar algunos.

### 3.1.1.2. Arena

Como agregado fino se utilizó arena rosa de la zona oriente de la ciudad de México, *Imagen 6*, por ser una de las de mayor uso en la construcción, al igual que por su amplia oferta en la zona<sup>79</sup>. Para evitar alteraciones en las mezclas, las arenas utilizadas tendrán que haber sido lavadas previamente y estar libre de materia orgánica o algún otro residuo que la contamine. Además de garantizar su abastecimiento, se seleccionó a la arena rosa para la experimentación sobre la arena gris, por presentar un incremento en la resistencia del mortero, de acuerdo con lo reportado por Vargas López, S. (2017), donde la arena rosa presentó mejores resultados mecánicos en pruebas a la compresión<sup>80</sup>. De dicha investigación, se obtuvo que este tipo de arena cumple con los parámetros establecidos en la normativa para su implementación como agregado en las mezclas de mortero por estar libre de cloruros, sulfatos y sales.



*Imagen 6* Arena rosa sin tamizar, utilizada en la experimentación

Para cumplir con lo establecido por la norma ASTM C-33 "Standard Specification for Concrete Aggregates", se realizó la prueba de tamizado a la arena rosa, junto a tres distintos tipos de arena empleadas en la construcción, puntualmente en la ciudad de México y zona metropolitana donde se comercializa la arena gris y rosa, el municipio de Nochixtlán, Oaxaca la arena café y el polvo de piedra del estado de Yucatán, que se utiliza en lugar de arena, por ser una región que carece de minas de arena. Para obtener su curva granulométrica y el módulo de finura.

<sup>78</sup> <http://cemento-cruz-azul.com.mx/cemento-tipo-ii/> Verificado el 6 de agosto del 2018

<sup>79</sup> Salgado Cruz, E. (2016) "Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico" Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. pág.63

<sup>80</sup> Vargas López, S. (2017) "Modificación de las propiedades mecánicas del mortero" Tesis de Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.



En la *Imagen 7* se observa la separación de los distintos tamaños de grano como resultado del tamizado, descartando aquellas que por sus dimensiones son considerados como agregados gruesos (izquierda) y los limos (derecha).



*Imagen 7* Tamizado de la arena rosa, separándola por tamaño de grano, establecido por la norma ASTM C-33.

### 3.1.1.3. Agregado Aligerante (Sílica Gel)

Se utilizó Sílica gel, como agregado para sustituir un porcentaje del volumen de la arena en las mezclas de mortero. El cual presenta una forma esférica con un diámetro que va de los 3mm a los 5mm. El color que tiene es de tonalidades naranjas, pero una vez que ha absorbido la humedad del ambiente u otras fuentes cambia a una tonalidad verdosa oscura, *Imagen 8*.



*Imagen 8* Sílica gel saturada de humedad (izquierda) y Sílica gen sin saturar (derecha)

Por la forma esférica de la sílica gel, se dificulta su implementación en las mezclas por dos razones primordiales, la primera es la adherencia que pueda presentar con las pastas de cemento, considerando que entre mayor sea la irregularidad de las partículas, mayor será su grado de adherencia e integración en la mezcla. La segunda es la granulometría, por ser de origen industrial, son controlados los diámetros del material, dificultando una mezcla de distintos tamaños de granos, como el encontrado en las arenas convencionales. Razón por la cual fue necesario someter a la sílica gel a un proceso de trituración mecánica, garantizando contar con una granulometría muy similar a la encontrada en la arena de referencia, *Imagen 9*.



**Imagen 9** *Sílica gel convencional (izquierda) y Sílica gen después del proceso de molienda mecánica (derecha)*

#### 3.1.1.4. Agua

Para descartar al agua como una variable en la experimentación se utilizó agua comercial embotellada, utilizándola durante toda la experimentación con la finalidad de evitar reacción negativa primordialmente con el cemento, si el agua contiene un exceso de impurezas se ve afectado el tiempo de fraguado y la resistencia de las mezclas<sup>81</sup>. Descartando el uso de agua de la red local, considerado que la duración de la experimentación fue mayo a un año, no era posible garantizar las condiciones del agua durante el proceso de experimentación.

---

<sup>81</sup> Muciño Vélez, A. (2015) “Endurecimiento de cementos tipo portland inducido por fosfatos y/o silicatos” Doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. pág. 52



### 3.2. Diseño de la Experimentación

Los criterios para determinar las normas de diseño empleadas en la experimentación están relacionadas al tipo de material y las pruebas de caracterización, por lo cual, son una recopilación de lo establecido previamente en la literatura, con la única finalidad de poder garantizar la certeza de los resultados.

#### 3.2.1. Diseño de Mezcla

Para la dosificación y las proporciones de los agregados en las mezclas, se utilizaron los parámetros establecidos en la norma ASTM C-109, donde se establece una relación cemento-agregado de 2.75 y cemento-agua de 0.485. Tomando estos parámetros para la elaboración de la mezcla de control. Garantizando que los agregados no fueron manipulados previamente. La arena fue empleada como se comercializa, sin modificar su granulometría, y libres de materia orgánica. Se verifico que el cemento utilizado no presentara indicios de humedad o una hidratación previa.

Se realizaron tres diseños de mezcla distintos, en la mezcla de control se utilizó arena convencional sin graduar, para la mezcla tamizada se utilizó la misma cantidad de arena, pero esta fue graduada conforme los parámetros de la norma ASTM C-33, el diseño de la mezcla ligera sustituye parcialmente el volumen de la arena por sílica gel como material aligerante en una relación de 2/3 de arena por 1/3 de sílica, se utilizó un aditivo superplastificante para compensar la demanda de humedad de la sílica . Utilizando el mismo cemento y agua en todos los casos. Las proporciones se muestran en la **Tabla 7**, donde la arena tamizada es la arena rosa, una vez manipulada su granulometría.

Mezcla	Cemento Portland tipo II 30R RS (g)	Arena sin Tamizar (g)	Arena Tamizada (g)	Sílica Gel (g)	Aditivo (ml)
Mezcla de Control	210	577.5	0	0	0
Mezcla Tamizada	210	0	577.5	0	0
Mezcla Ligera	210	0	396.9	180.6	52.5

**Tabla 7** Diseño de la mezcla de control utilizando arena rosa sin manipular previamente, mezcla tamizada empleando arena rosa, la cual ha sido manipulada previamente para modificar su curva granulométrica de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM C-33 y la mezcla ligera en la cual se sustituye parcialmente el volumen de arena rosa cuya curva granulométrica cumple con los parámetros de la norma ASTM C-33 por sílica gel como material aligerante

### 3.2.2. Moldes

Las probetas utilizadas en pruebas de compresión pueden ser de forma cilíndrica con un diámetro de 6" y una altura de 12", también es posible utilizar probetas cúbicas de 6" o 2". Respetando la geometría establecida en la norma ASTM C-109, se fabricaron moldes, *Imagen 10*, manteniendo la forma cubica con dimensiones de 3cm por lado, en acrílico por ser un material que no reacciona con las mezclas y herrajes metálicos, el diseño de los moldes garantiza que el metal de los tornillos no entra en contacto con la mezcla.



*Imagen 10* Moldes cúbicos de 3cm, elaborados con acrílico y herrajes metálicos, respetando la geometría establecida por la norma ASTM C-109

### 3.2.3. Numero de Probetas

La norma ASTM C-109 indica 3 piezas como número mínimo de especímenes por cada día de prueba. Sin embargo, para disminuir la desviación estándar de los resultados, se colaron cinco muestras por cada día de prueba. Y poder descartar el valor más bajo y más alto, si es que estos se encontraran muy distantes del promedio, y aun así mantener el mínimo de especímenes que marca la norma. Por cada día de prueba se elaboraron 5 muestras, las cuales fueron probados a los 7, 14 y 28 días, dando como resultado que, por cada diseño de mezcla propuesto, se colarían mínimo 15 muestras, *Imagen 11*.

La mezcla fue vertida dentro de los moldes en estado fresco y varillada para eliminar o disminuir la cantidad de aire del interior, se dejaron secar a temperatura ambiente durante 24 horas, posteriormente fueron desmoldadas y clasificadas, continuando su proceso de secado a temperatura ambiente hasta el día de la prueba mecánica.



*Imagen 11* Colado de 15 muestras cúbicas de 3cm por cada diseño de mezcla

### 3.3. Técnicas de caracterización

Existen varias técnicas para determinar aspectos muy puntuales de acuerdo con los objetivos que se persiguen. Para cumplir los objetivos planteados, se emplearon técnicas de caracterización, con la finalidad de determinar la interacción de la sílica gel con los demás agregados de la mezcla.

#### 3.3.1. Pruebas Mecánicas

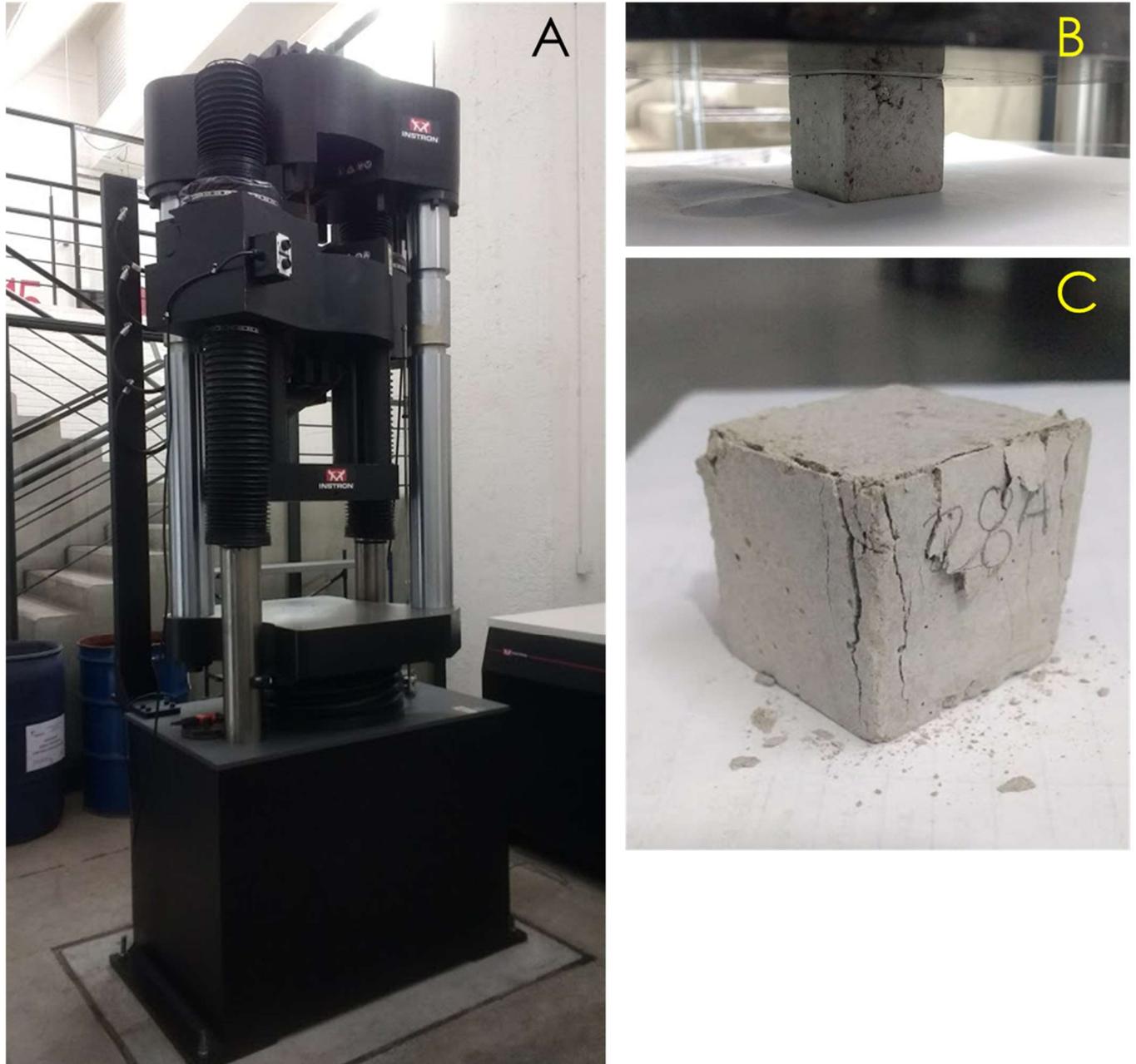
La resistencia de los cilindros o probetas es la única evidencia de la rigidez de la mezcla en estado endurecido <sup>82</sup>, por lo que resulta de gran importancia llevar a cabo este tipo de pruebas. Para ello se requiere de una máquina de pruebas universales. La prueba de compresión se encuentra establecida en la norma ASTM C-109 estableciendo que deberán de ejecutarse a los 3, 7, 14 y 28 días de edad. Sin embargo, para esta experimentación se realizaron pruebas a los 7, 14 y 28 días respectivamente *Imagen 12*. La resistencia a la compresión de una mezcla es la característica más importante, lo cual puede ser utilizado para determinar su calidad <sup>83</sup>.



*Imagen 12* Probetas cúbicas de 3cm utilizadas para las pruebas de compresión a 28 días.

<sup>82</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 38

<sup>83</sup> Gutiérrez de López, L. (2003), *El concreto y otros materiales para la construcción*. 2° edición, Colombia, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. pág. 53



**Imagen 13** A) Máquina de pruebas universales, del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura, UNAM. B) Colocación de la muestra cubica de 3cm para la prueba de compresión. C) Estado de la muestra después del ensayo de compresión.

### 3.3.2. Microscopia Óptica

Para conocer si las partículas de sílica gel se integraron adecuadamente en la mezcla de mortero y presenta una buena adherencia con la pasta de cemento como lo hacen las arenas convencionales, se implementó la técnica de microscopia óptica. Para poder llevar a cabo esta caracterización fue necesario realizar un corte transversal de la muestra, con la finalidad de obtener una mejor perspectiva de la distribución de los agregados en la mezcla, **Imagen 14**. Esta técnica ha sido de gran utilidad en otras investigaciones, para observar cualidades como cantidad, tamaño, forma y color de los agregados.

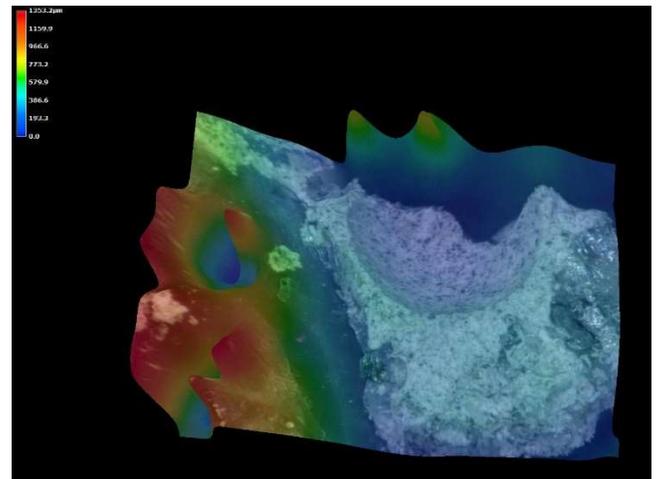


**Imagen 14** Corte transversal de una muestra cubica de 3cm para microscopia Óptica de la mezcla de control y la mezcla ligera, en secciones no mayores de 2mm de espesor

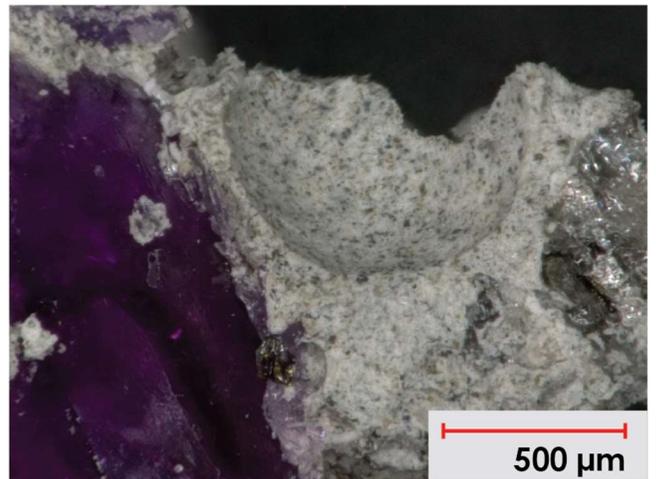


**Imagen 16** Microscopio Óptico, Keyence VHX-5000 del Instituto de Investigaciones Estéticas UNAM

Se utilizó un microscopio óptico **Imagen 16**, el cual proporciona una escala de color para una mejor identificación del relieve **Imagen 15**, y permite observar muestras lisas o irregulares **Imagen 17**. Lo anterior resulta de gran utilidad, considerando que las piezas de muestras ensayadas no pudieron ser cortadas para garantizar una superficie uniforme.



**Imagen 15** Vista tridimensional donde se muestra el relieve de la muestra con escala de color, obtenida con el Microscopio Óptico, Keyence VHX-5000



**Imagen 17** Imagen óptica, con corrección de profundidad, obtenida con el Microscopio Óptico, Keyence VHX-5000

### 3.3.3. Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La microscopía electrónica de barrido SEM (por sus siglas en inglés *Scanning Electron Microscopy*) es una técnica de análisis topográfico, estructural y composicional. Por lo que un equipo SEM presenta una imagen de la muestra, aunque realmente lo que se detecta es la respuesta del material al impacto de un haz de electrones<sup>84</sup>. Por lo que un análisis por este medio nos proporciona información topográfica morfológica, de composición química y cristalografía.



**Imagen 18** Preparación de las muestras, cortadas previamente con un espesor no mayor a 2mm, montadas sobre una platina metálica y fijadas a ella con cinta de carbón para mejor la conductividad de electrones.

<sup>84</sup> Clavijo, J. (2013) “Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)” en *Elementos*, número 3, junio 2013, pág. 134



Para un análisis de microscopía electrónica de barrido fue necesario cortar la muestra en secciones no mayores a 2mm de espesor, además de garantizar que la muestra se encuentra libre de humedad, posteriormente las muestras son montadas sobre una base metálica o platina a la cual se fijan por medio de cintas de carbón, para mejor el flujo de electrones durante el análisis, *Imagen 18*.

Mediante esta técnica, es posible conocer la estructura y orientación del grano del material analizado. Para conocer el acomodo de los cristales dentro de la mezcla, y determinar si la adición de sílica gel, favorece o perjudica la formación de dichos cristales. Se utilizó un Microscopio Electrónico de Barrido JSM – 5600 F, el cual se encuentra en las instalaciones del Laboratorio Central de Microscopía del Instituto de Física de la UNAM, *Imagen 19*.



*Imagen 19* Microscopio Electrónico de Barrido JSM – 5600 F, Laboratorio Central de Microscopía del Instituto de Física de la UNAM.



### 3.3.4. Pruebas de pH

Para determinar si la adición de sílica gel modifica de alguna forma el pH de las mezclas de mortero, se realizaron mediciones del pH que presentaban las muestras de la mezcla de control y la mezcla ligera donde se sustituye un porcentaje del volumen de la arena por sílica. Para realizar esta medición sobre muestras secas se utilizó agua destilada *Imagen 20*, para hidratar la muestra sin que el agua modifique el pH de la muestra, una vez saturada la muestra, se midió el pH con tiras reactivas de papel *Imagen 21*.



*Imagen 20* Agua destilada, utilizada para medir el pH de la mezcla de control y la mezcla ligera posterior a los 28 días de fraguado.



*Imagen 21* Tiras reactivas para la medición de pH



# 4

## CUARTO CAPÍTULO

En el presente capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos en la experimentación.

Tanto la microscopía óptica como la electrónica de barrido se realizaron a dos muestras por cada tipo de mezcla, es decir que, para la **mezcla de control (M.C.)** se analizaron dos muestras, una después de ser sometida a la prueba de compresión y la segunda sin haber sido ensayada mecánicamente, repitiendo el mismo procedimiento con la mezcla ligera. Lo anterior con la finalidad de poder determinar el comportamiento de las mezclas, antes y después de ser sometidos a esfuerzos de compresión y determinar si la sílica gel cumple las mismas funciones mecánicas que las arenas convencionales.



## 5.1 Granulometría

En la práctica, no se le realizan las pruebas para conocer las características granulométricas de las arenas empleadas en la fabricación de morteros. Por lo cual se desconocen las características que estas presentan. Para conocer sus características, se evaluaron cuatro distintos tipos de arena, empleadas en diferentes puntos de la república mexicana como agregados finos para la fabricación de morteros y concretos. Lo anterior por medio de la técnica de tamizado, como lo establece la norma ASTM C-33, determinando si las arenas se encuentran dentro de los parámetros establecidos.

Reportando la granulometría de las arenas, mencionando los resultados obtenidos por las técnicas de caracterización tales como la microscopía óptica, microscopía electrónica de barrido y las pruebas mecánicas, muy puntualmente pruebas a compresión a los 28 días. Las pruebas mecánicas fueron realizadas tanto a la mezcla de control como a la mezcla donde se sustituye parcialmente la arena por *sílica gel*, la cual será mencionada como **mezcla ligera (M.L.)**, en ambos casos se utilizó únicamente arena rosa, por ser la que presentó mejores resultados.

Al obtener la curva granulométrica de las arenas por medio de la técnica de tamizado descrita en la norma ASTM C-33, misma que indica los porcentajes máximos y mínimos del tamaño de grano *Imagen 22*, con los que deberán de contar las arenas, con lo anterior es posible determinar si las arenas analizadas se encuentran dentro de estos parámetros.

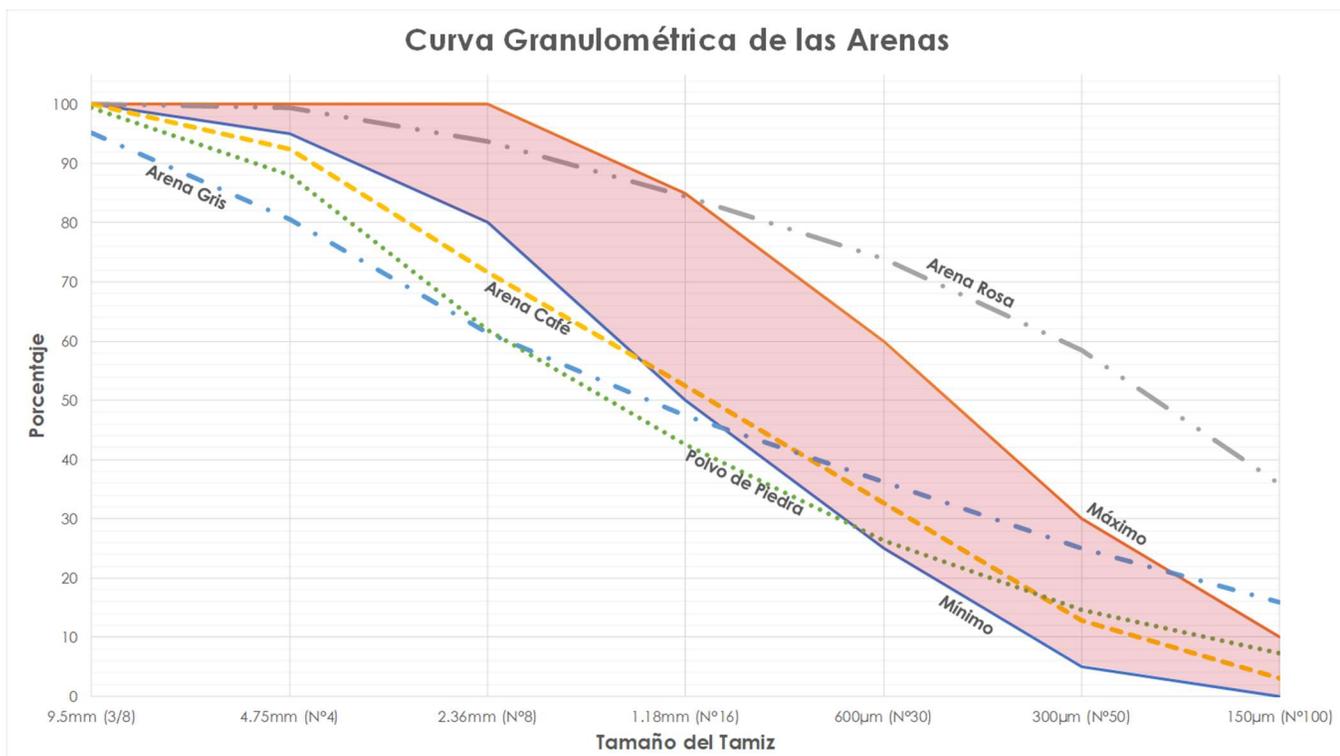


*Imagen 22 Separación de la arena por tamaño de grano como lo establece la norma ASTM C-33.*



Dicha evaluación se realizó a cuatro distintos tipos de arenas. Arena gris y rosa del estado de México y Puebla respectivamente. Del estado de Yucatán se analizó el polvo de piedra, el cual es el resultado de la trituración de piedra caliza y cribado con granulometría de 1/8" a 0" <sup>85</sup>. Y arena café, proveniente del estado de Oaxaca, comercializada en la comunidad de Nochixtlán. La arena rosa, gris y el polvo de piedra se obtuvieron de investigaciones realizadas previamente como lo establece Vargas S. (2017) <sup>86</sup>

La **Gráfica 3** indica los límites máximos y mínimos establecidos por la norma, donde se aprecia que ninguna de las arenas analizadas se encuentra dentro de los parámetros establecidos por la normativa, sin embargo, siguen siendo utilizadas en la industria de la construcción.



**Gráfica 3** Curva Granulométrica de las arenas bajo los parámetros de la norma ASTM C-33

<sup>85</sup> Vargas López, S. (2017) “Modificación de las propiedades mecánicas del mortero” Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México. pág. 40

<sup>86</sup> Vargas López, S. (2017) “Modificación de las propiedades mecánicas del mortero” Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México

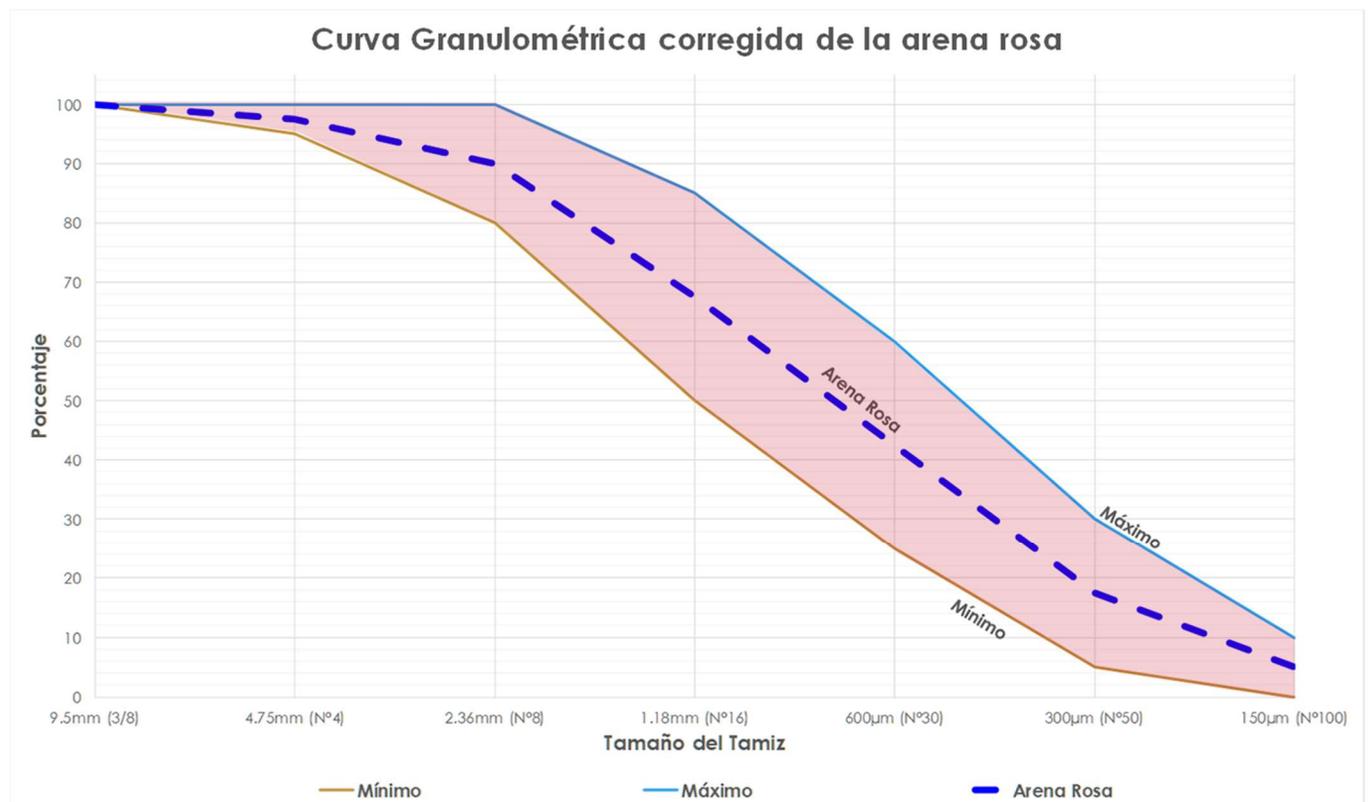


El módulo de finura que se obtuvo de las arenas se muestra en la **Tabla 8**, en el apartado 2.3.3 se indicó que el rango del MF es no menor a 2.3 y no mayor a 3.1.

Arena	Arena Rosa	Arena Café	Arena Gris	Polvo de Piedra
<b>Módulo de Finura</b>	<b>4.45</b>	<b>2.65</b>	<b>2.66</b>	<b>2.40</b>

**Tabla 8** Módulo de Finura de las arenas analizadas.

Al no haber cumplido satisfactoriamente con la granulometría establecida, se procedió a corregir la curva de la arena rosa por medio de la técnica de tamizado, como lo describe la norma ASTM C-33 **Gráfica 4**, donde se propone una granulometría ideal, quedando sobre el promedio de los límites máximos y mínimos establecidos por la literatura.



**Gráfica 4** Curva Granulométrica corregida de la arena rosa bajo los parámetros de la norma ASTM C-33

Como resultado se obtuvo arena rosa perfectamente graduada *Imagen 23*, donde es posible apreciar visualmente la diferencia del tamaño y cantidad de granos gruesos y finos, lo anterior podría establecer un criterio para poder determinar si la arena utilizada es muy abundante en finos o, por el contrario, si llegara a carecer de ellos.



*Imagen 23* Arena rosa con muchos finos (izquierda), Arena rosa correctamente graduada (derecha)

La arena obtenida por medio de tamizado y graduada de acuerdo con los parámetros de la norma ASTM C-33 se implementó en la elaboración de una mezcla de mortero denominada **mezcla tamizada (M.T.)** ya que la única variable con respecto a la **mezcla de control (M.C.)** es la granulometría de la arena empleada. Esta mezcla fue sometida a pruebas de compresión a los 28 días, al igual que la mezcla de control (M.C.) y la mezcla ligera (M.L.), con la finalidad de demostrar la influencia de la granulometría del agregado en la resistencia de la mezcla.

Mezcla	Cemento Portland tipo II 30R RS (g)	Arena sin Tamizar (g)	Arena Tamizada (g)	Sílica Gel (g)	Aditivo (ml)	Agua embotellada (g)	Relación Agua/Cemento
Mezcla de Control	210	577.5	0	0	0	168	0.80
Mezcla Tamizada	210	0	577.5	0	0	147	0.70
Mezcla Ligera	210	0	396.9	180.6	52.5	157.5	0.75

**Tabla 9** Diseño de las mezclas utilizadas en la experimentación

Los diseños de mezcla analizados quedaron de la siguiente forma *Tabla 9*, la mezcla de control (M.C.) fue elaborada con cemento, arena sin tamizar como se comercializa y agua, la mezcla Tamizada (M.T.) se realizó con cemento, arena tamizada, corrigiendo la granulometría como lo establece la norma ASTM C-33 y agua para hidratar y la mezcla ligera (M.L.) contiene



cemento, arena tamizada y sílica gel, donde la sílica actúa como material aligerante sustituyendo parcialmente la cantidad de arena, manteniendo la relación cemento/agregado de 1:2.75 adicionalmente se agregó agua y un aditivo para corregir la excesiva demanda de humedad por parte de la sílica gel y garantizar una correcta hidratación del cemento.

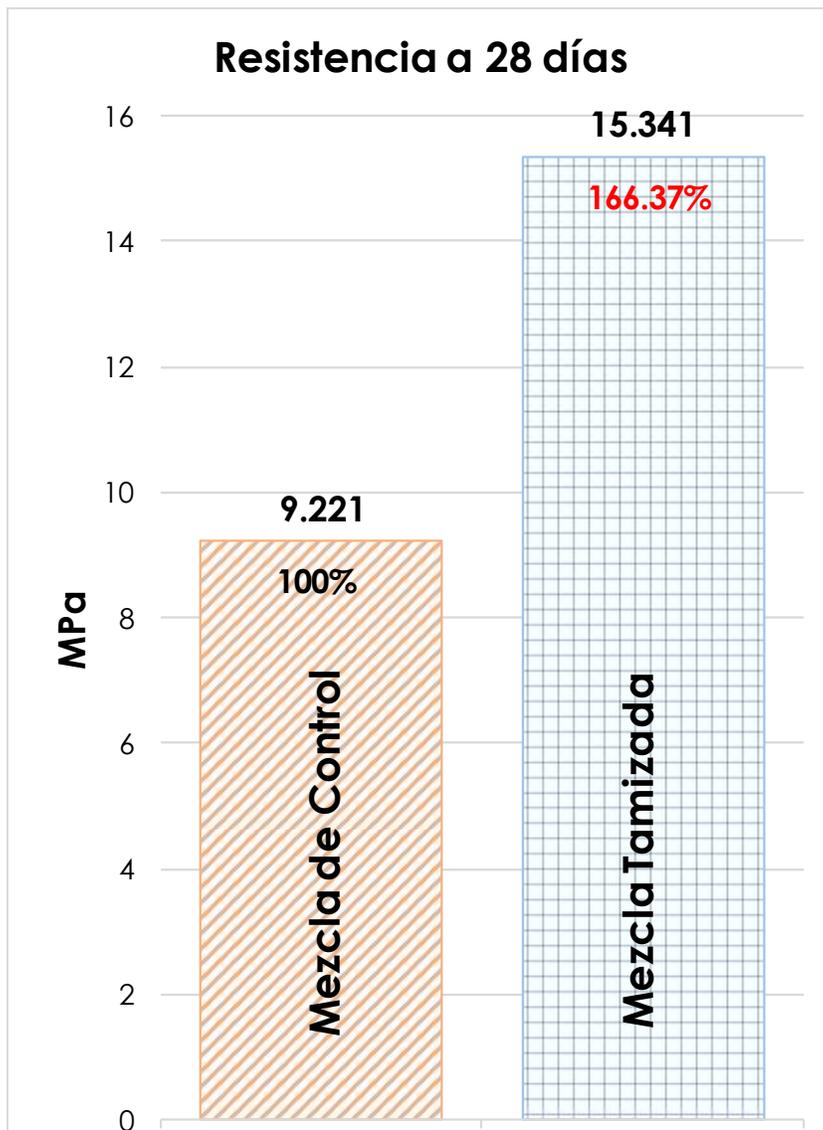
## 5.2 Pruebas de Compresión

Para las pruebas a compresión, se ensayaron las probetas a los 7, 14 y 28 días *Imagen 24*, respectivamente para la mezcla de control, mezcla tamizada y la mezcla ligera, sin embargo, solo se reportan los resultados de los 28 días, por ser el valor de mayor relevancia.<sup>87</sup> También son reportadas y analizadas las curvas esfuerzo deformación, así como la relación entre la densidad y la resistencia del material. Se efectuaron pruebas de compresión a los 28 días apegándose a los lineamientos descritos en la norma ASTM C-109 "Standard Test Método for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars" midiendo los esfuerzos máximos a la ruptura.



**Imagen 24** Probetas cúbicas de 3cm, clasificadas y resguardadas antes de ser ensayadas.

<sup>87</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.



**Gráfica 5** Prueba de Compresión a 28 días  
Mezcla de control Mezcla tamizada

Antes que las probetas fueran ensayadas, se registraron las densidades de las mezclas en estado endurecido para poder determinar el peso volumétrico de estas y poder determinar si presentan una disminución en su densidad. Siendo uno de los objetivos la obtención de una mezcla ligera para su implementación en la elaboración de piezas de mampostería es necesario registrar la resistencia y la densidad de las probetas para posteriormente contrastarlo con los parámetros que muestran las mamposterías que se comercializan actualmente y son uno de los materiales más demandados por la industria de la construcción.

Los resultados de las pruebas de compresión, las cuales fueron elaboradas en el laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura son los siguientes:

En la **Gráfica 5** se observan los valores obtenidos de la mezcla de control a los 28 días, la cual fue de 9.221 MPa y la mezcla tamizada de 15.341

MPa, recordemos que la única variable entre estas mezclas es la granulometría de la arena. El incremento en la resistencia de la mezcla tamizada con relación a la mezcla de control en la prueba de compresión a los 28 días es del 66.37%

Lo anterior significa que, para incrementar la resistencia de las mezclas, no necesariamente se tiene que recurrir a la implementación de aditivos, una opción sería analizar la granulometría de los agregados, buscando que sean lo más próximos a lo establecido por la

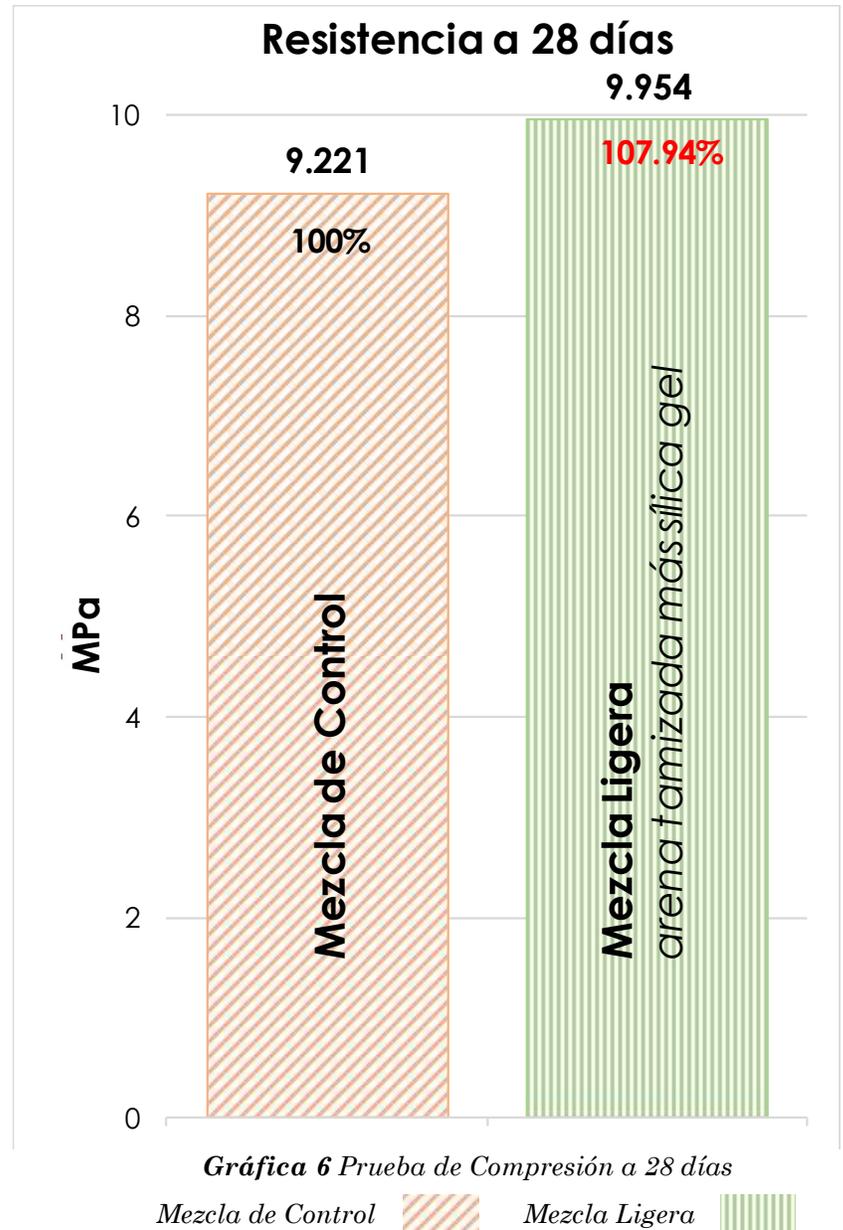


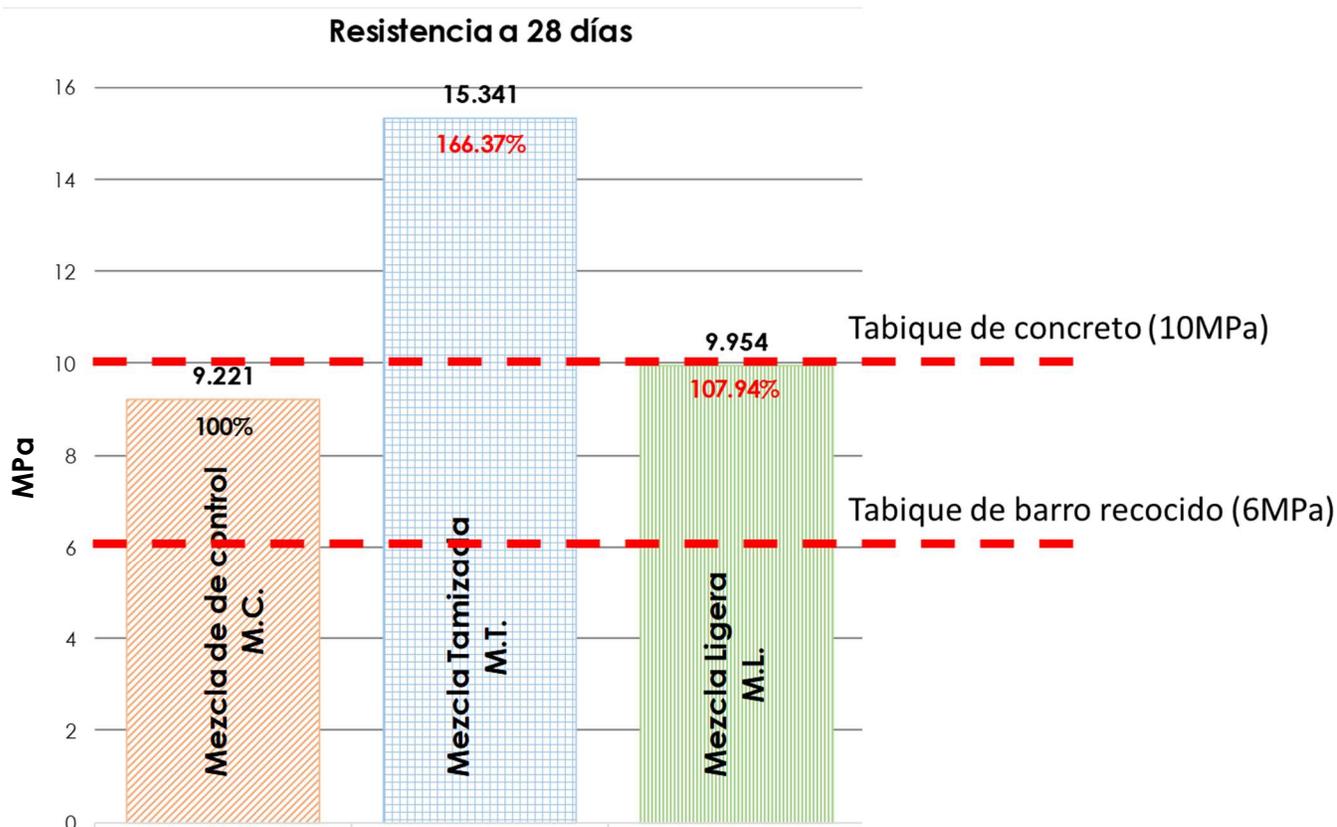
normativa. Razón por la cual, para el diseño de mezcla ligera, se utilizó arena debidamente graduada. Sin embargo, la norma ASTM C-33 establece los estándares que deberán de contar los agregados pétreos, además de su granulométrica para poder obtener un mejor desempeño en la fabricación de mezclas, misma que determina que los agregados deberán de estar libres de materia orgánica y sales entre las cuales se encuentran los nitratos, sulfatos o cloruros.

La prueba presentada en la gráfica 5 fue para determinar el esfuerzo máximo a la compresión y determinar si influye el corregir el tamaño y distribución de los granos de arena y como esto se ve reflejado en la resistencia del material.

Tomado esos criterios, para la elaboración de la mezcla ligera se implementó la arena tamizada, sustituyendo un porcentaje de esta por sílica gel, con la finalidad de obtener una mezcla con menor densidad y evitar una pérdida en la resistencia.

En la *Gráfica 6* se registran los valores obtenidos en la prueba de compresión, donde la mezcla ligera tuvo un incremento del 7.94% con relación a la mezcla de control, al registrar un esfuerzo máximo de 9.954 MPa, en contraste al 9.221 MPa obtenido por la mezcla de control.





Gráfica 7 Resistencia a la compresión para piezas de mampostería, R.C.D.F.

Mezcla de control  Mezcla Tamizada  Mezcla Ligera 

Tomando los parámetros que indica el R.C.D.F. para el diseño de elementos de mampostería, este determina que, la resistencia de un ladrillo de barro recocido tendrá una resistencia de 6 MPa y un bloque de concreto o tabique de concreto tendrán una resistencia de 10 MPa <sup>88</sup> Gráfica 7. Por lo cual se puede determinar que el diseño de mezcla ligera presenta una mayor resistencia en relación con un ladrillo de barro convencional y se encuentra un 0.46% por debajo de la resistencia de un tabique de concreto.

Para observar el comportamiento físico de las muestras después de ser ensayadas, se programó el equipo para detenerse una vez que la probeta tuviera una caída del 40% de la carga máxima, con la finalidad de poder determinar la relación entre la resistencia y la fragilidad del material.

<sup>88</sup> Arnal Simón, L. (2005), *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal: reglamento, normas técnicas, Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, ilustraciones y comentarios, graficas, planos y lineamientos*. México, Trillas S.A. de C.V. pág. 684

Mezcla	Cemento Portland tipo II 30R RS (g)	Arena sin Tamizar (g)	Arena Tamizada (g)	Sílica Gel (g)	Aditivo (ml)	Agua embotellada (g)	Relación Agua/Cemento	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )
Mezcla de Control	210	577.5	0	0	0	168	0.80	1,604.92	94.03
Mezcla Tamizada	210	0	577.5	0	0	147	0.70	1,732.21	156.43
Mezcla Ligera	210	0	396.9	180.6	52.5	157.5	0.75	1,530.33	101.05

**Tabla 10** Dosificación final utilizada en los diseños de mezcla y los resultados de densidad (kg/m<sup>3</sup>) presentada a los 28 días y la resistencia f'c (kg/cm<sup>2</sup>) obtenidos en las pruebas mecánicas de compresión a 28 días



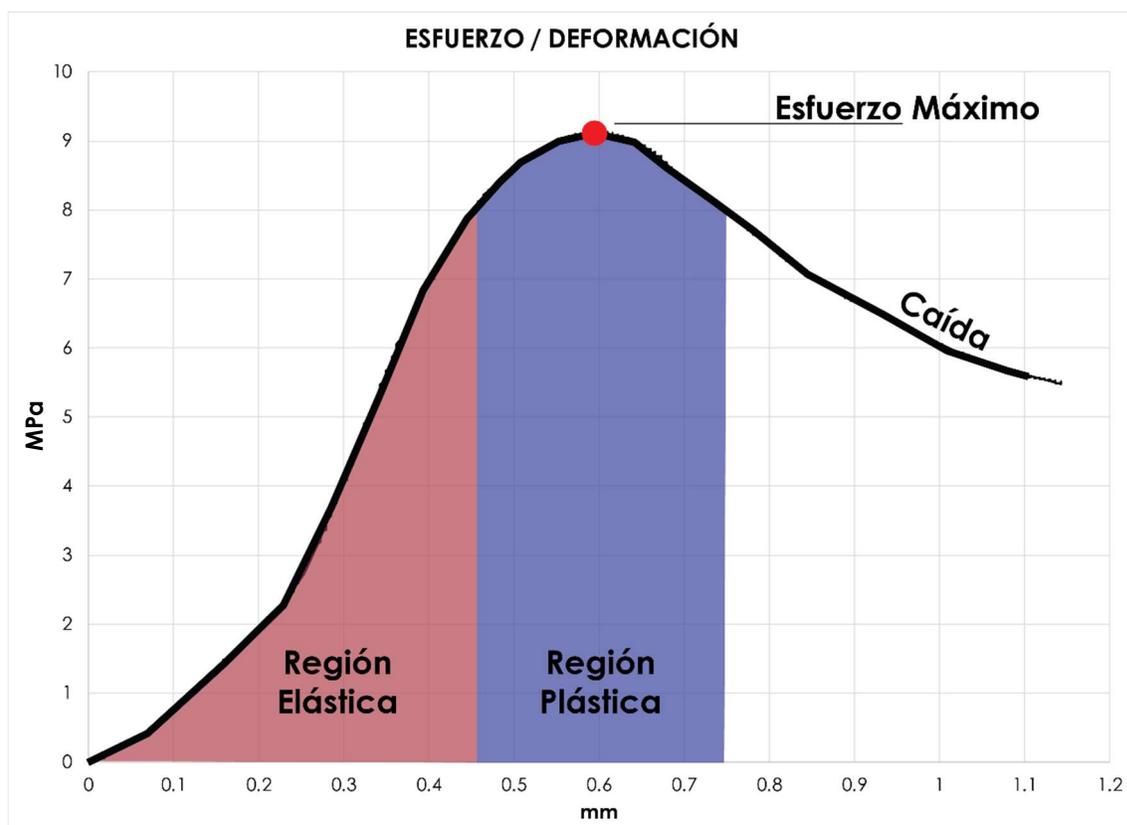
**Imagen 25** Deformación de las probetas cúbicas de 3cm, después de la prueba de compresión, en la cual el equipo se detuvo automáticamente cuando el material mostraba una pérdida del 40% de su resistencia con relación a la carga máxima, esta prueba se realizó en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales, de la Facultad de Arquitectura de la UNAM.

La **Imagen 25** muestra el estado físico de las muestras después de la prueba de compresión, evidenciando el índice de pérdida de material, la mezcla de control es la que menor resistencia presentó y en cuestiones físicas es la mezcla que mayor desprendimiento de material presentó. La mezcla tamizada obtuvo un incremento en la resistencia del 66% con relación a la mezcla de control, se observa un menor desprendimiento del material, sin embargo, se siguen presentando las grietas a lo largo de la probeta. La mezcla ligera presentó un incremento del 8% en la resistencia en comparación con la mezcla de control, pero es la mezcla que presenta el menor grado de pérdida de material por desprendimiento.

Lo anterior podría indicar que la mezcla ligera tiene un comportamiento de mayor ductilidad. En el punto 1.4 se plantea que una posible solución para los problemas de rigidez que presentan los muros ante efectos sísmicos podría solucionarse al implementar materiales con mayor ductilidad.

### 5.2.1 Grafica Esfuerzo Deformación

El comportamiento de una estructura que está sometida a cargas se encuentra estrechamente relacionado al esfuerzo-deformación del material que la conforma. La gráfica esfuerzo deformación se obtiene mediante la medición de la deformación unitaria por medio de pruebas de compresión. Las curvas que se obtienen por este medio comparten las mismas regiones, encontrando una porción o región elástica al inicio de la gráfica, donde el esfuerzo y la deformación unitaria son proporcionales, posteriormente la línea comienza a inclinarse hacia la horizontal o región plástica, alcanzando el esfuerzo máximo o resistencia a la compresión, después de alcanzar el punto máximo de resistencia, la curva presenta una caída en su trayectoria, pudiendo llegar a ser muy rápida, primordialmente para los materiales de mayor resistencia.<sup>89</sup> Lo anterior se puede apreciar en la *Imagen 26*.

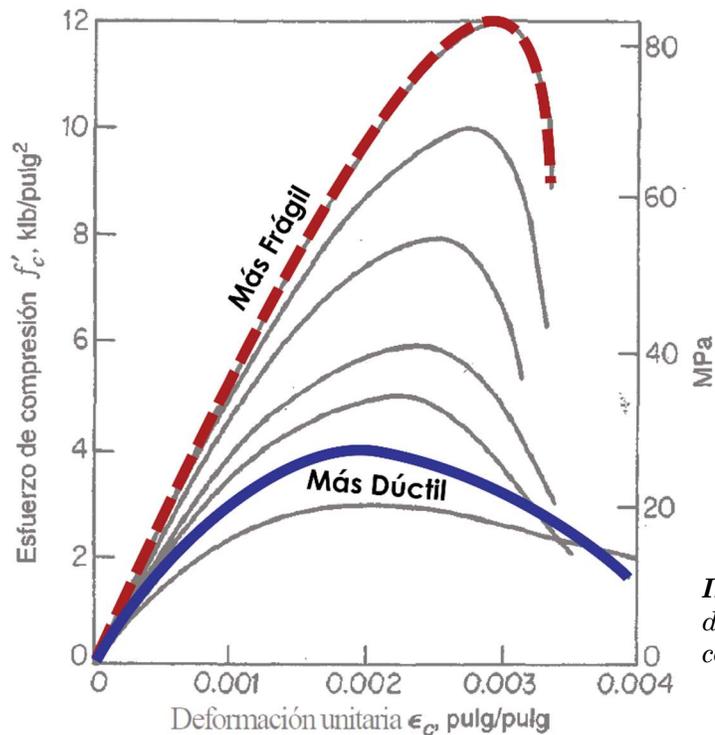


*Imagen 26* Regiones de la curva Esfuerzo-Deformación descritas por Arthur H. Nilson, (2001)

<sup>89</sup> Arthur H. Nilson, (2001), *Diseño de Estructuras de Concreto*. Colombia, Mc Graw Hill. pág. 38-39



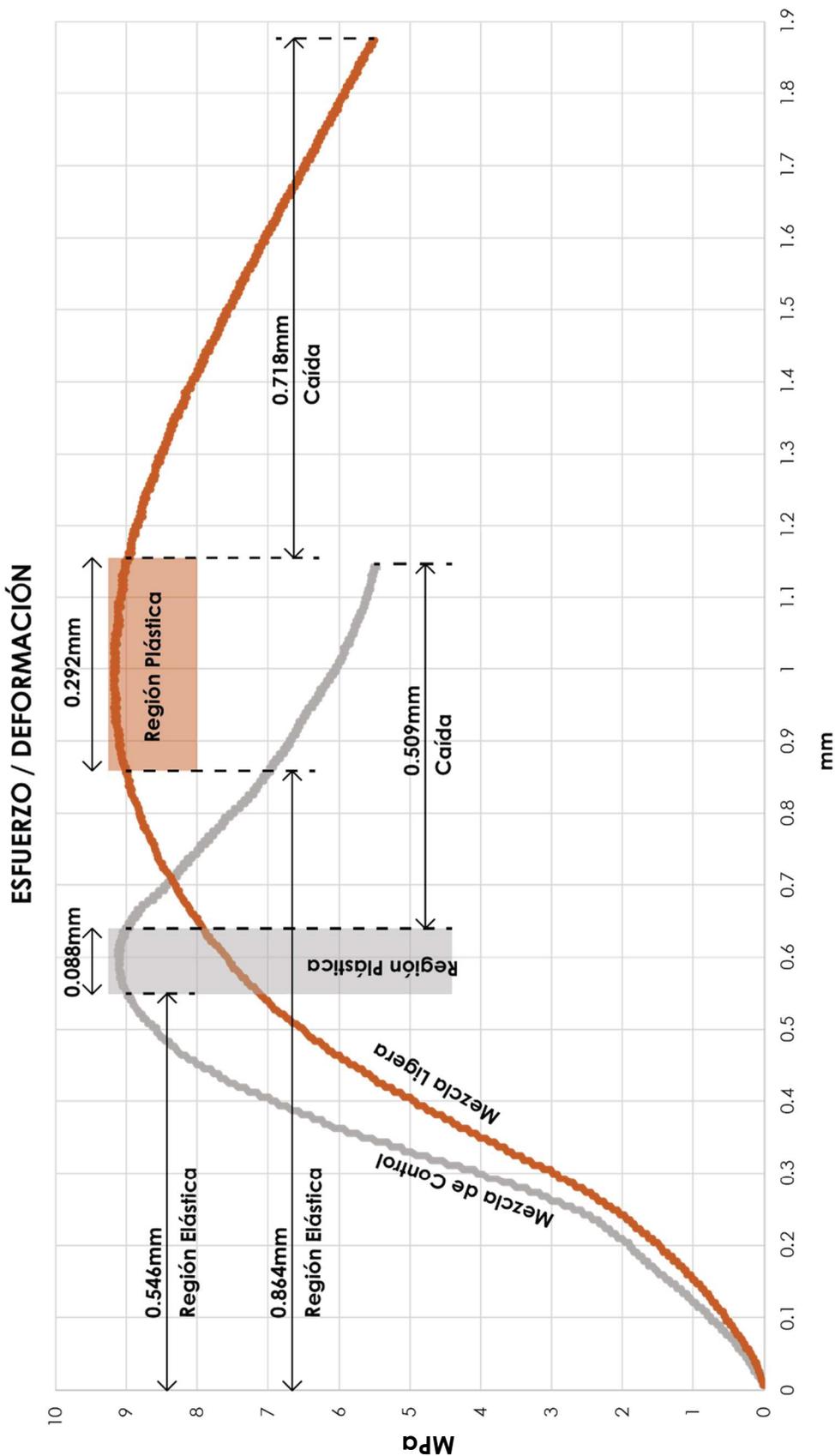
Todas las curvas de esfuerzo-deformación presentaran estas regiones en mayor o menor medida en función al material. Entre mayor sea la resistencia, menor será su región plástica y más rápida será la caída, lo que nos indica que nos encontramos ante un material frágil. Un material de menor densidad tendrá una región plástica mayor y su caída será más pronunciada indicando que es un material más dúctil, como se aprecia en la **Imagen 27**.<sup>90</sup>



**Imagen 27** Curvas esfuerzo-deformación unitaria a la compresión de concretos

Conocer el comportamiento de la curva esfuerzo-deformación de un material permite identificar si este será frágil o dúctil. Al realizar las pruebas de compresión, se obtienen los parámetros para graficar la curva esfuerzo-deformación del material. En las pruebas de compresión se observó que la resistencia máxima de la mezcla ligera es 8% mayor a la obtenida por la mezcla de control. Sin embargo, lo anterior no es un parámetro que permita establecer que el comportamiento de ambos materiales bajo pruebas de compresión sea el mismo, por lo cual fue necesario graficar y comparar las curvas de la mezcla de control y la mezcla ligera, identificando las distintas regiones.

<sup>90</sup> Arthur H. Nilson, (2001), *Diseño de Estructuras de Concreto*. Colombia, Mc Graw Hill. pág. 38-39



Gráfica 8 Curva Esfuerzo-Deformación de la Mezcla de Control y la Mezcla Ligera



En la **Gráfica 8** se presentan las curvas obtenidas de la mezcla de control y la mezcla ligera, como se observó en las pruebas de compresión, la resistencia entre la mezcla de control y la mezcla ligera tiene una variación próxima al 8%, razón por lo cual, las crestas o punto máximo a la ruptura de las curvas se encuentran visualmente a la misma altura. Sin embargo, un aspecto muy importante a resaltar es la manera en la cual las regiones elásticas y plásticas de las mezclas se comportan de manera distinta.

La importancia de identificar la región elástica, plástica y caída de la curva es para determinar el comportamiento de un material en particular. La región elástica nos indica el límite de esfuerzo que un material puede soportar antes que su deformación sea permanente<sup>91</sup>. Pero si el esfuerzo aplicado es retirado la deformación será reversible. Pasando el límite elástico la deformación se vuelve permanente, lo que nos indica que nos encontramos en la región plástica, la cantidad de deformación plástica que puede soportar un material antes de llegar al punto de ruptura es una medida de ductilidad<sup>92</sup>. Entendiendo que, mientras mayor sea la región plástica en la curva esfuerzo-deformación, mayor será la ductilidad del material.

Al comparar las deformaciones que sufren las distintas mezclas, se observa que, ambas mezclas resisten cargas muy similares, sin embargo, la región elástica de la mezcla ligera se prolonga más del 50% con relación a la mezcla de control. Lo anterior nos indica que la deformación reversible de la mezcla ligera es mayor. Tomando los datos de la gráfica 8, la mezcla de control soporta una deformación elástica de 0.54 mm y la mezcla ligera es capaz de soportar una deformación de 0.86mm y esta pueda ser reversible.

La región plástica de la mezcla ligera es dos veces la obtenida en la mezcla de control, lo que confirma que una mezcla ligera tendrá una mayor región plástica o será más dúctil, como lo menciona Arthur H. Nilson, (2001). En la arquitectura, un material que presenta una mayor ductilidad responderá mejor a las deformaciones, considerando que un material dúctil puede soportar una gran deformación permanente antes de alcanzar la ruptura.<sup>93</sup>

Esto se traduce en un material en el cual su falla no sucederá en un lapso tan corto, tomando en cuenta que la literatura menciona que, un material al ser más resistente se volverá más frágil<sup>94</sup>. Concluyendo que, la mezcla ligera es casi 8% más resistente que la mezcla de control, y su momento plástico se llega a duplicar. Lo anterior da la posibilidad que el diseño de mezcla propuesto podría responder mejor ante las fuerzas sísmicas.

---

<sup>91</sup> IMCYC. (2012), *Terminología del cemento y del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 40

<sup>92</sup> Metha, K. y P. Monteiro. (1998), *Concreto: estructuras, propiedades y materiales*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 8

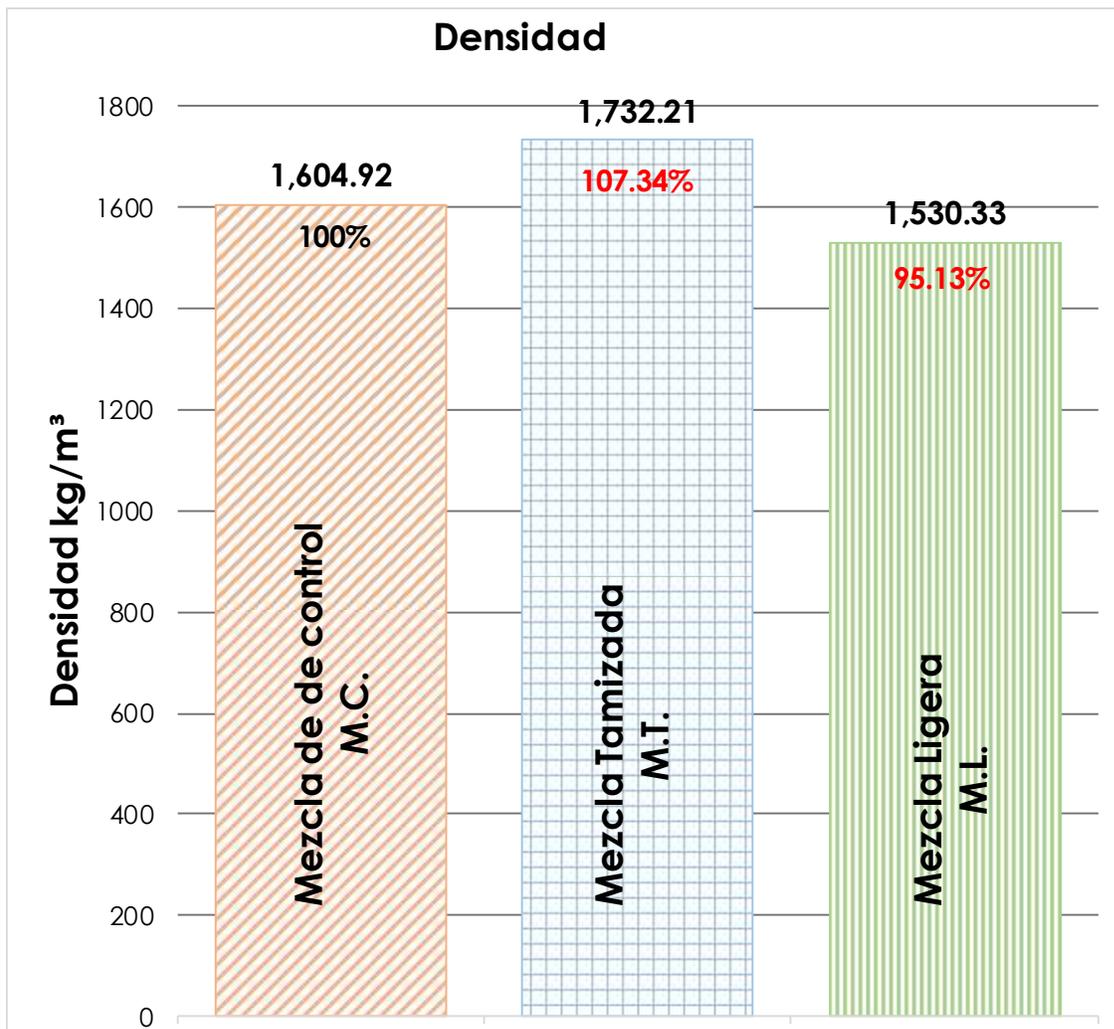
<sup>93</sup> IMCYC. (2012), *Terminología del cemento y del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 28

<sup>94</sup> Arthur H. Nilson, (2001), *Diseño de Estructuras de Concreto*. Colombia, Mc Graw Hill.



### 5.3 Relación entre la densidad y la resistencia a la compresión

El segundo aspecto de mayor peso es conocer la relación de la densidad por  $m^3$  de las mezclas, y cotejar los resultados con su resistencia obtenida en el apartado 5.4. La literatura nos indica que la densidad de un material está ligada a su resistencia, por lo que las mezclas con mayor resistencia serán de mayor peso volumétrico. En las gráficas 4 y 5 se analizaron los incrementos en la resistencia de la mezcla tamizada y mezcla ligera, respecto a la mezcla de control, detectando un incremento del 66.37% y 7.94% respectivamente.

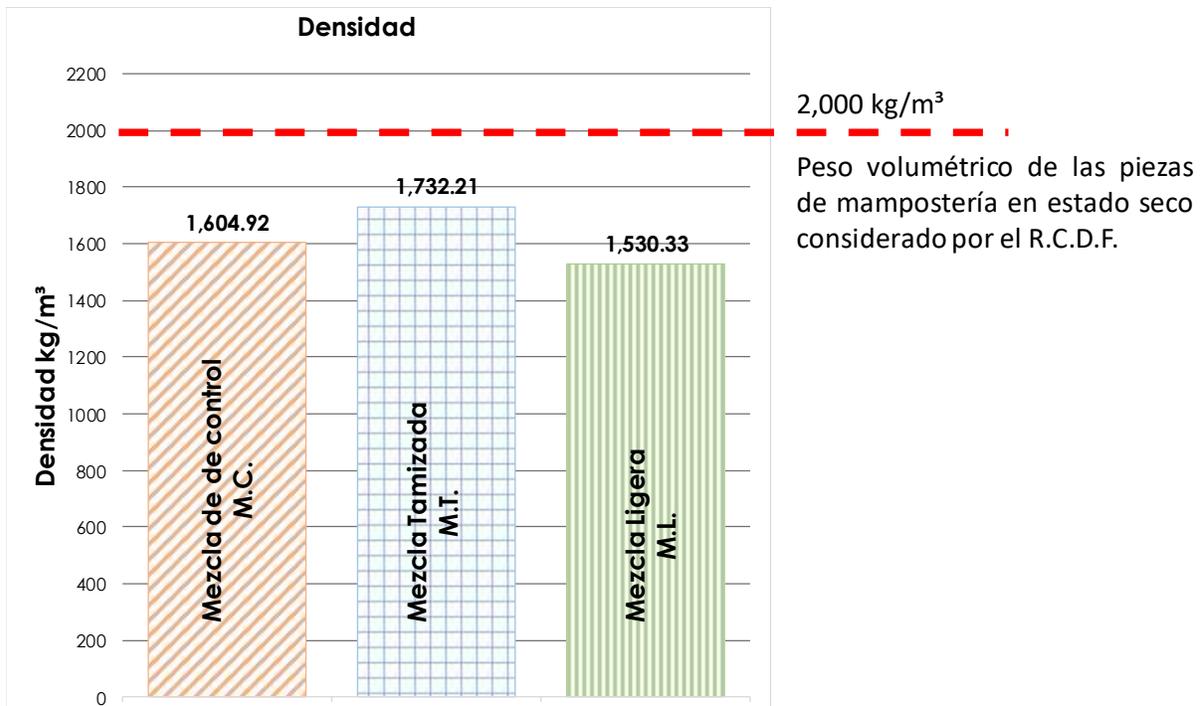


Gráfica 9 Densidad de las mezclas en estado seco a 28 días de su elaboración

Mezcla de control  Mezcla tamizada  Mezcla ligera 



En la **Gráfica 9** se reportan los pesos por  $m^3$  de las mezclas, tomando como el 100% lo registrado en la mezcla de control, la mezcla tamizada tuvo un incremento del 7.34% llegando a pesar  $1,732kg/m^3$ , donde se cumple el argumento que, a mayor resistencia será mayor la densidad. Algo que no sucede con la mezcla ligera, ya que está reporto un incremento en su resistencia del 7.94% y un decremento en su densidad del 4.87%. Si bien estos valores no reflejan una marcada d, logran mostrar una mezcla donde su resistencia será mayor mientras que su densidad se ve disminuida.



**Gráfica 10** Gráfica comparativa entre la densidad de las mamposterías establecida por el R.C.D.F. y las obtenidas por las mezclas de la experimentación

En la gráfica 7 del apartado 5.2 se indicó la resistencia de los elementos de mampostería considerada por el R.C.D.F. para el diseño y cálculo de este tipo de elementos, en el cual la mezcla ligera se encuentra dentro de estos parámetros. La **Gráfica 10** muestra el parámetro de densidad por  $m^3$  que considera el R.C.D.F. para las piezas de mampostería en estado seco, no menor a  $2,000 kg/m^3$  <sup>95</sup>. En el cual las tres mezclas se encuentran por debajo de éste, donde la mezcla ligera muestra una disminución de la densidad en un 23.5%.

<sup>95</sup> Arnal Simón, L. (2005), *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal: reglamento, normas técnicas, Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, ilustraciones y comentarios, graficas, planos y lineamientos*. México, Trillas S.A. de C.V. pág. 684

El diseño de mezcla ligero tiene el objetivo de poder ser empleado en la fabricación de piezas de mampostería, como se mencionó en la gráfica 7 del apartado 5.2, la mezcla se encuentra dentro de los parámetros de resistencia establecidos por el R.C.D.F. y en la gráfica 10 se muestra que la mezcla ligera presenta una disminución en la densidad del 23.5% con relación al valor tomado del R.C.D.F.

Sin embargo, al contrastar los resultados contra un producto que se ofrece en el mercado de la construcción nos encontramos que las piezas de mampostería presentan otros valores, donde el peso por m<sup>2</sup> de construcción es de 292.5 kg y se oferta una resistencia de 60kg/cm<sup>2</sup> *Imagen 28*<sup>96</sup>. Al comparar estos valores con los obtenidos en la investigación nos encontramos que la resistencia ofrecida por el diseño de mezcla es 68% mayor que la ofrecida por el block convencional y la densidad por m<sup>2</sup> de construcción se reduce en un 35% pasando de 292.5 kg que ofrece el fabricante a 216.25 kg que se obtienen con la mezcla ligera propuesta, *Tabla 11*.



Ficha Técnica	
Normas aplicables: NMX-C-404. ONNCE	
ASTM-C-90-93	
Dimensiones: Medida Nominal	15 X 20 X 40
Medida Real	14.3 X 20 X 39.5
Empaque de piezas por tarima:	90
Piezas por M <sup>2</sup>	12.5
Resistencia a la Compresion:	60 kgf/cm <sup>2</sup>
Absorcion de Agua:	12%
Area Bruta(cm <sup>2</sup> ):	N/D
Area Neta(cm <sup>2</sup> ):	N/D
Peso por Pieza:	23.4 kg

*Imagen 28* Ficha técnica de una pieza de block macizo de cemento-arena bajo la denominación de block estructural

	Piezas comerciales	Piezas elaboradas con el diseño de Mezcla ligera	Diferencia
Resistencia a la compresión	60 kgf/cm <sup>2</sup>	101 kgf/cm <sup>2</sup>	El incremento de la resistencia es del <b>68.33%</b>
Piezas por M <sup>2</sup>	12.5	12.5	Se mantiene
Peso por pieza	23.4 kg	17.3 kg	<b>Se reduce un 26.06%</b>
Peso por M <sup>2</sup>	292.5 kg	216.25 kg	

*Tabla 11* Comparativa entre las densidades que ofrecen las piezas comerciales tomadas como parámetro y los valores obtenidos en la investigación

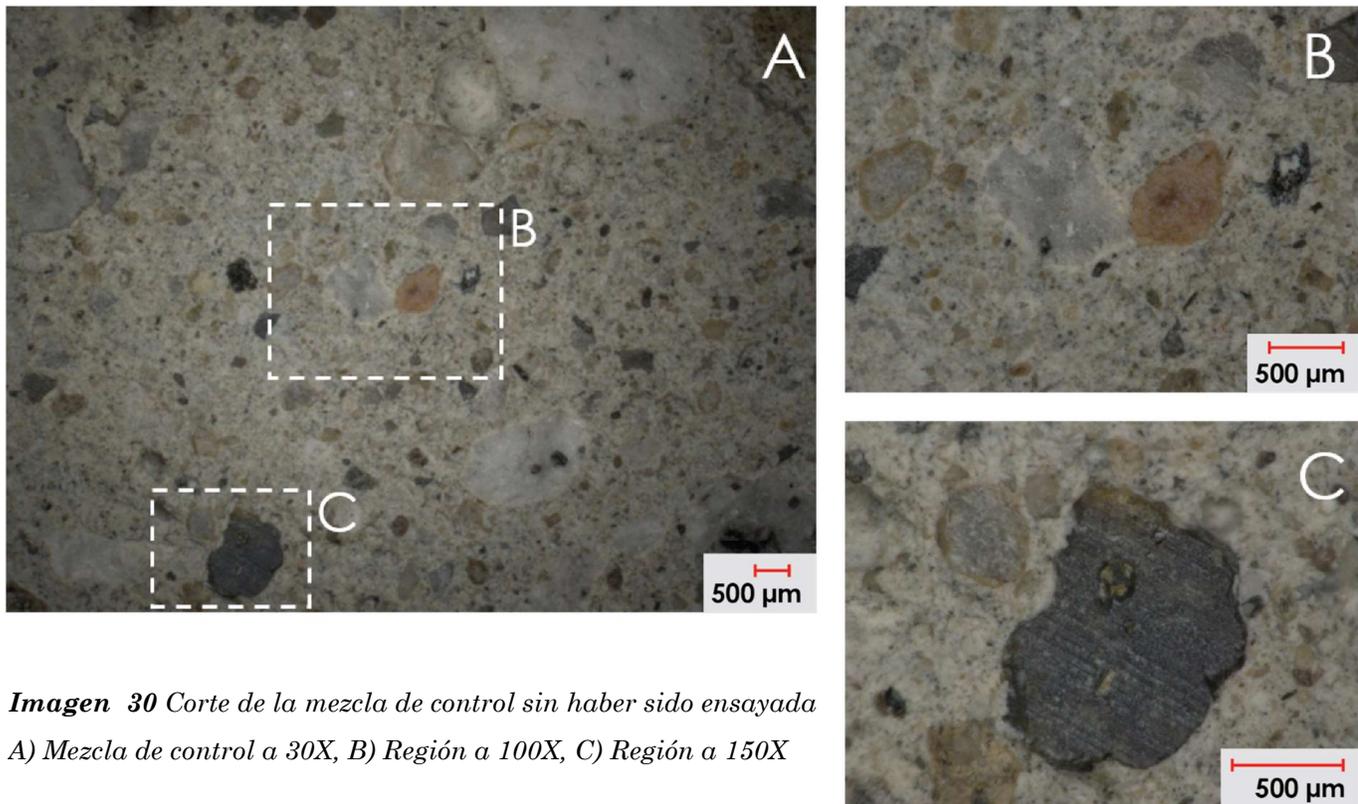
<sup>96</sup> <http://construsupply.com.mx/productsestru.htm> Verificado el 2 de octubre del 2018

## 5.4 Análisis de las mezclas mediante Microscopía Óptica

Por las dimensiones que presentan los agregados en una mezcla de mortero, se dificulta su caracterización para poder determinar la forma y tamaño de los granos y si existe una distribución óptima de estos dentro de la matriz cementante, así como la identificación de la adherencia entre los agregados. Se realizaron cortes de la mezcla de control y mezcla ligera, sin haber sido ensayadas mecánicamente *Imagen 29*. Obteniendo los siguientes resultados:



*Imagen 29* Muestra cubica de 3cm sin haber sido ensayada a compresión, seccionada por medio de un corte paralelo a uno de sus lados.

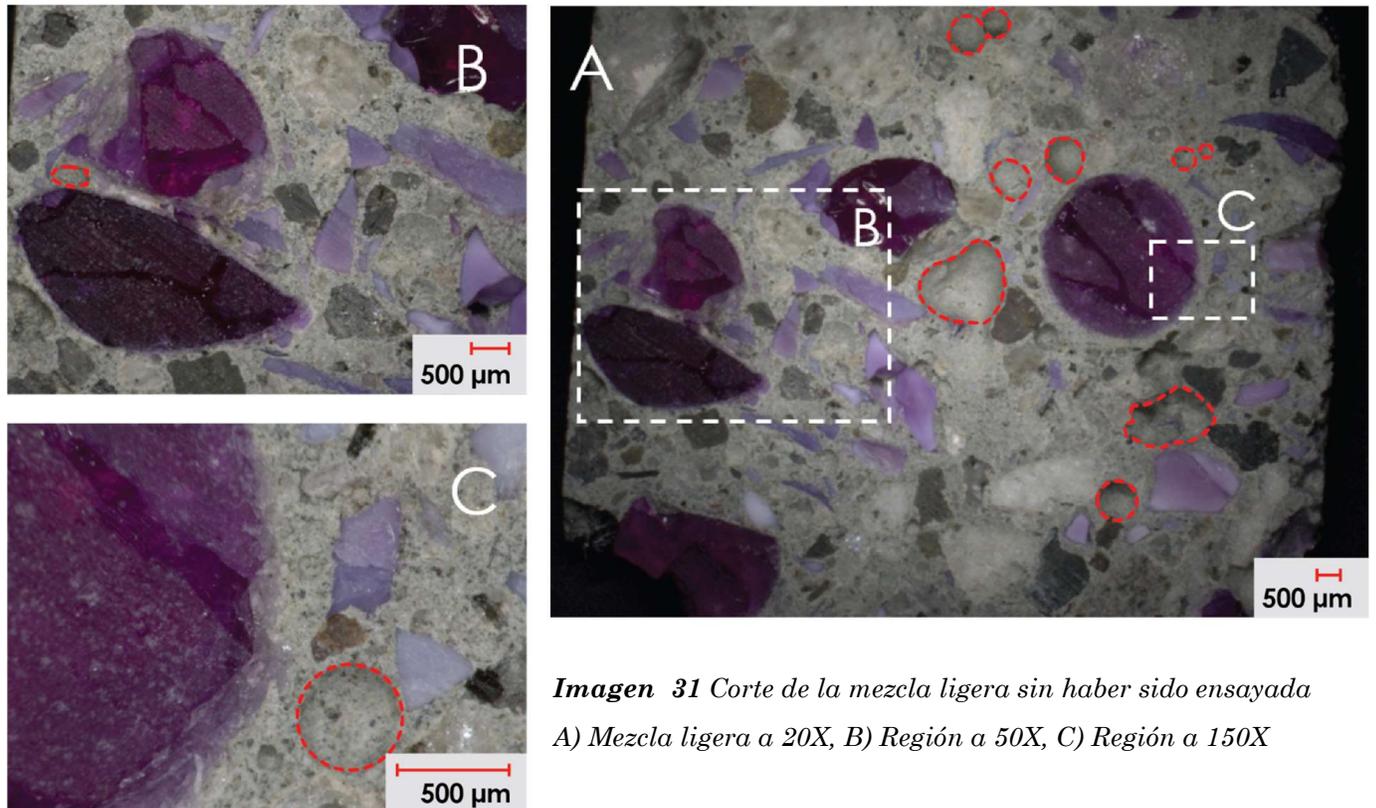


**Imagen 30** Corte de la mezcla de control sin haber sido ensayada  
A) Mezcla de control a 30X, B) Región a 100X, C) Región a 150X

En la **Imagen 30 A** se aprecia como los elementos de mayor tamaño se distribuyen homogéneamente, en la imagen **B** y **C** se observa que, a pesar de que las partículas de la arena se encuentran muy próximas unas de otras, la matriz cementante rodea perfectamente estas, observando una integración de los agregados, sin observar generación de cavidades.

Además de la distribución, es posible corroborar que debido a las formas irregulares que presenta la arena favorece la integración del agregado y la pasta de cemento. Es importante agregar que las arenas no se encuentran constituidas únicamente por un solo mineral, como ya ha sido reportado previamente en la literatura, Neville (2013).

La **Imagen 31 A** corresponde a la mezcla ligera sin haber sido ensayada a pruebas de compresión, observando una distribución entre las partículas de sílica gel y los granos de arena, dentro de la pasta de cemento. Sin embargo, a diferencia de lo observado en la mezcla de control, en la mezcla ligera se aprecian cavidades o poros indicados con la línea punteada de color rojo, los cual se traduce como aire atrapado al interior, mismo que podría ser resultado de la adición de sílica a la mezcla y al calor que libera durante el proceso de hidratación.



**Imagen 31** Corte de la mezcla ligera sin haber sido ensayada

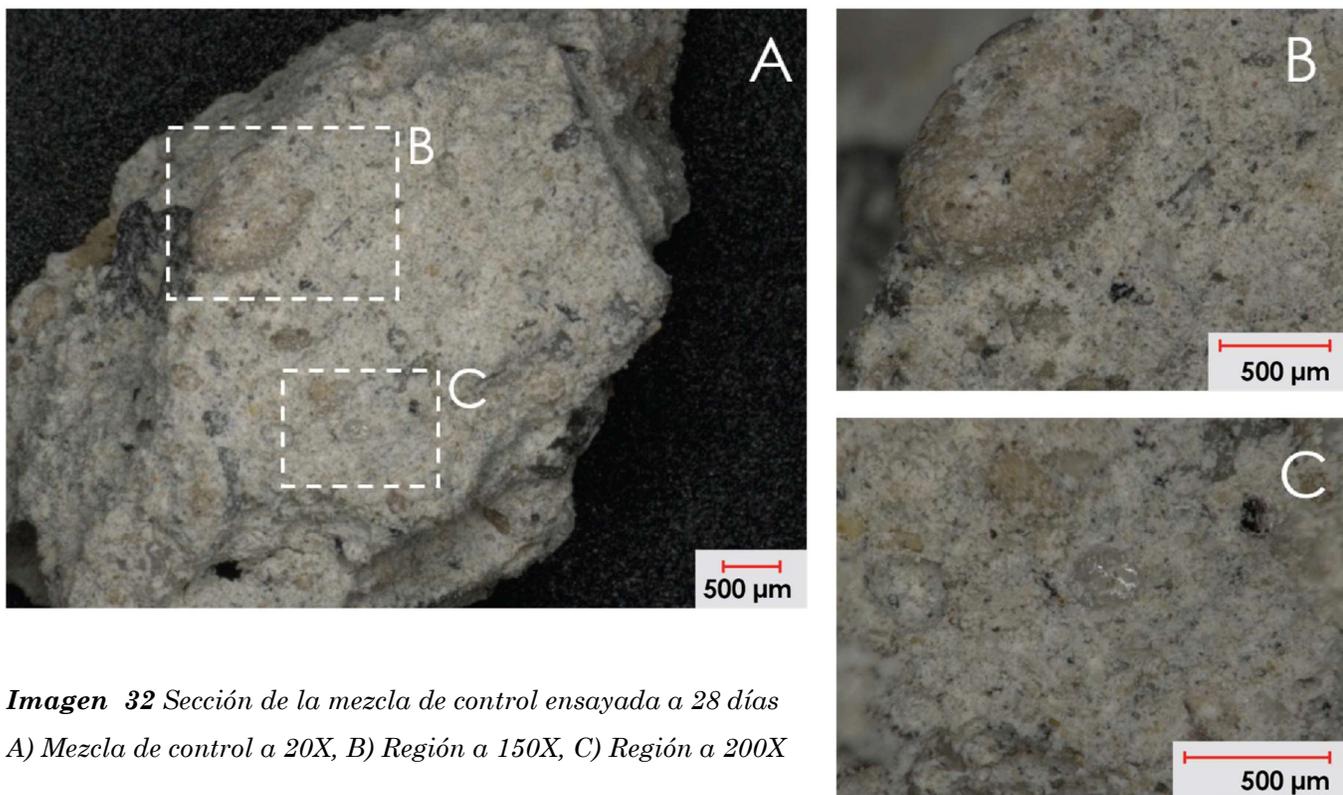
A) Mezcla ligera a 20X, B) Región a 50X, C) Región a 150X

En la imagen **B** se puede observar con mayor detalle que las partículas de sílica tiene distintas tonalidades, esto como consecuencia de la humedad que aún conservan en su interior, ya que al ser de tamaños más pequeños la pérdida de está es más rápido, contrario a lo que sucede con los elementos de mayor tamaño. En la imagen **C** se observa como la esfera de sílica es rodeada por un elemento que no se observó en las mezclas de control, al no rodear la arena que se encuentra próxima a las partículas de sílica, supone que es una reacción propia de este material, la literatura se refiere a esta zona como zona interfacial o zona de transición.

Una de las características que presenta esta zona es que su microestructura cambia, presentando una mayor porosidad entre menor sea la distancia con el agregado, y entre mayor sea la distancia hacia el agregado, la porosidad será menor. Las condiciones mineralógicas del agregado tienen afectaciones en la estructura de esta zona. La piedra caliza genera una reacción química entre la caliza y la pasta de cemento fomentando la mayor formación de la

zona interfacial. Sin embargo, un material con una superficie porosa fomenta la adherencia entre la superficie del agregado y la pasta de cemento hidratado. <sup>97</sup>

Para las muestras que fueron ensayadas a compresión, no fue posible realizar un corte, por lo cual se analizó una sección de la probeta, misma que se desprendió después de haber realizado la prueba. En la **Imagen 32 A** se observan algunos granos de la arena que quedaron parcialmente expuestos, observándose con mayor claridad en las secciones **B** y **C**, esto nos sugiere que, los granos de arena tienen buena adherencia con las pastas de cemento. La adherencia entre la pasta de cemento y el agregado influyen en la resistencia de la mezcla, por lo que, una superficie porosa e irregular propiciara una mejor adherencia, algo que también se consigue al mezclar partículas suaves y porosas. <sup>98</sup>



**Imagen 32** Sección de la mezcla de control ensayada a 28 días  
A) Mezcla de control a 20X, B) Región a 150X, C) Región a 200X

La forma en cómo se desprendió la muestra no presenta algún patrón, esto como posible consecuencia de la distribución de los granos de arena al interior de la mezcla. Los granos de arena presentes en las mezclas de control, tanto en las ensayadas como las no ensayadas, no muestran alguna grieta o fisura que haga pensar en un grado de fragilidad, como se pudo apreciar en la muestra de la mezcla ligera no ensayada. Lo cual nos indica que los minerales que contienen las arenas cuentan con la resistencia necesaria para no propagar las

<sup>97</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 206-207

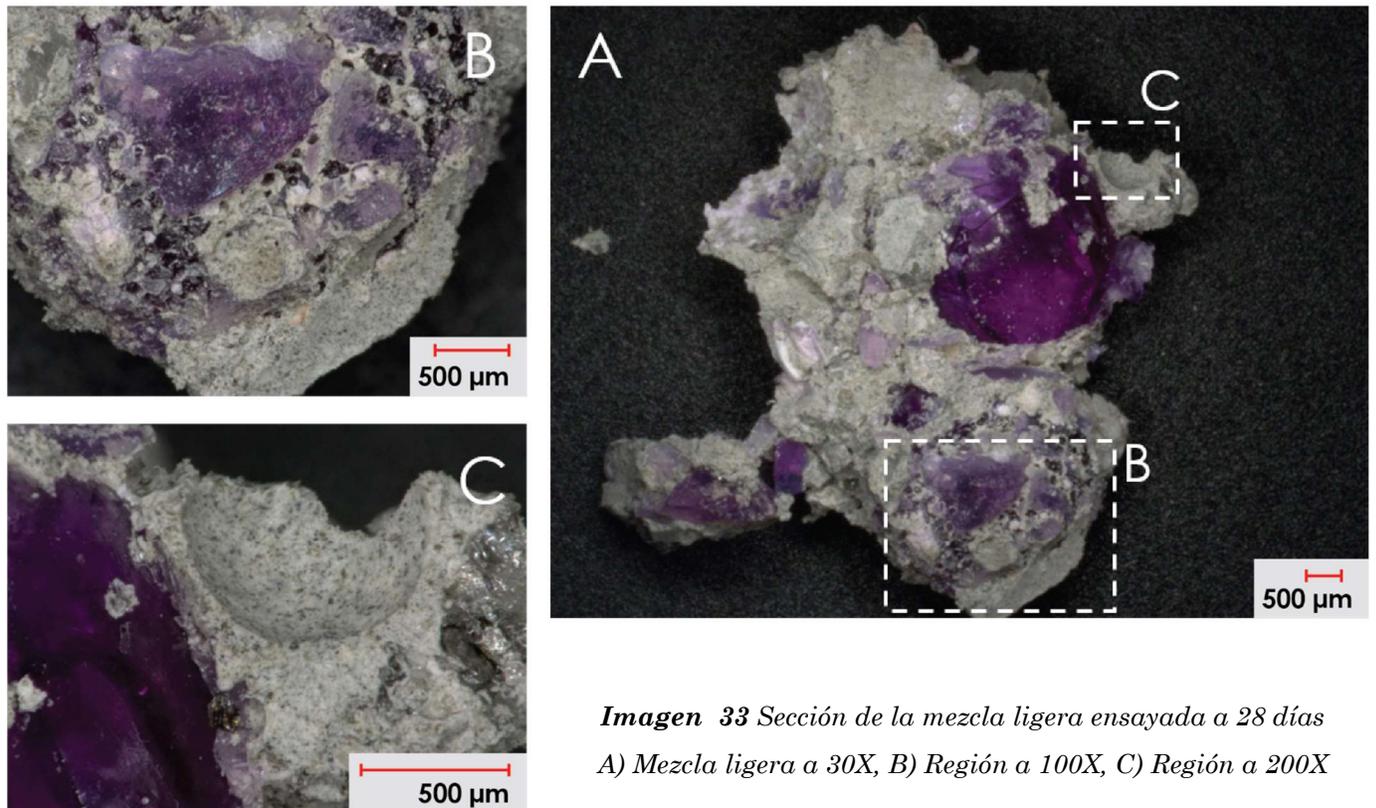
<sup>98</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 81



fisuras al interior de las mezclas, por lo que, los agregados deberán tener entre otras características, una buena resistencia, Arthur H. Nilson, (2001), Gutiérrez de López, L. (2003), Adam M. Neville (2013).

En la *Imagen 33 A* se observa una pequeña sección de la mezcla ligera que se desprendió de la probeta después de haber sido ensayada a prueba de compresión, al igual que sucedió con la mezcla de control, no fue posible realizar un corte. Hay que recordar que los agregados para este diseño de mezcla integra arena rosa y sílica como agregados finos, (consultar apartado 3.2.1), sin embargo, no es posible identificar las partículas de arena en la sección analizada, apreciando únicamente los granos de sílice en color morado.

Se observan partículas de sílica gel expuestas casi en su totalidad, lo cual se podría interpretar como que, la sílica tiene un menor grado de adherencia en comparación con la arena rosa es por ello por lo que, los puntos en los cuales se desprendió el material, fue a lo largo de la superficie de la sílica. Lo anterior sería una consecuencia de la superficie que presenta este material, como lo describe la literatura, Adam M. Neville (2013) y Gutiérrez de López, L. (2003), un material mientras más lisa sea su superficie, menor será su grado de adherencia, razón por la cual se buscó incrementar su adherencia, adicionando sílica triturada con formas irregulares (Imagen 8).



*Imagen 33* Sección de la mezcla ligera ensayada a 28 días  
A) Mezcla ligera a 30X, B) Región a 100X, C) Región a 200X



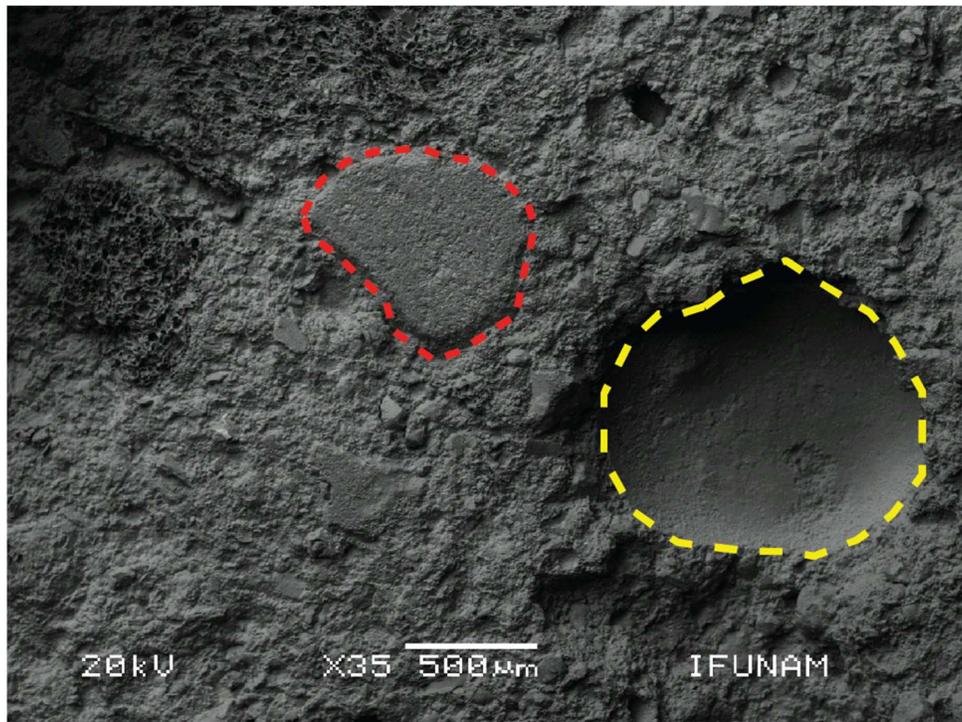
En la imagen **B** se siguen observando una cantidad considerable de poros, tal como se apreció en la muestra no ensayada, sin embargo, en este caso se alcanza a apreciar una clara concentración de estas cavidades alrededor de los granos de sílica de mayor tamaño. Como lo observado en la imagen 28, donde se analizó una sección de mezcla ligera sin haber sido sometida a una prueba de compresión, en la imagen 30A y 30B se observa la aparición de cavidades o porosidad y una disminución en la adherencia entre la pasta de cemento y las partículas de sílica gel, como una consecuencia por la forma esférica y superficie lisa que presenta este material, Adam M. Neville (2013) y Gutiérrez de López, L. (2003).

En la imagen **C** se observa una sección casi perfecta en forma circular, lo cual hace suponer que en ese punto se encontraba una partícula de sílica en forma esférica. La literatura nos indica que, para que un agregado tenga una correcta adherencia con la pasta de cemento, este deberá de contar entre otros aspectos, una forma irregular y una superficie porosa, Arthur H. Nilson, (2001), Gutiérrez de López, L. (2003), Adam M. Neville (2013). Hay que recordar que la sílica se comercializa en formas esférica, razón por la cual se trituro para obtener formas irregulares, sin embargo, no fue posible obtener una superficie porosa, viéndose reducida la adherencia entre el agregado y la pasta de cemento.

## 5.5 Análisis Morfológico de las mezclas mediante Microscopía Electrónica de Barrido

Para determinar la topografía de las mezclas, se observaron por medio de microscopía Electrónica de Barrido, se utilizaron las mismas muestras empleadas en la Microscopía Óptica, obteniendo los siguientes resultados.

La *Imagen 34* corresponde a la mezcla de control que no fue ensayada a prueba de compresión, lo que permitió seccionar la muestra por medio de un corte longitudinal. Por el diseño de esta mezcla únicamente se aprecian las partículas de arena, la cual se encuentra marcada con la línea de color rojo. A diferencia de la microscopía óptica, ahora si es posible apreciar la existencia de porosidad en la muestra, indicada con línea amarilla.



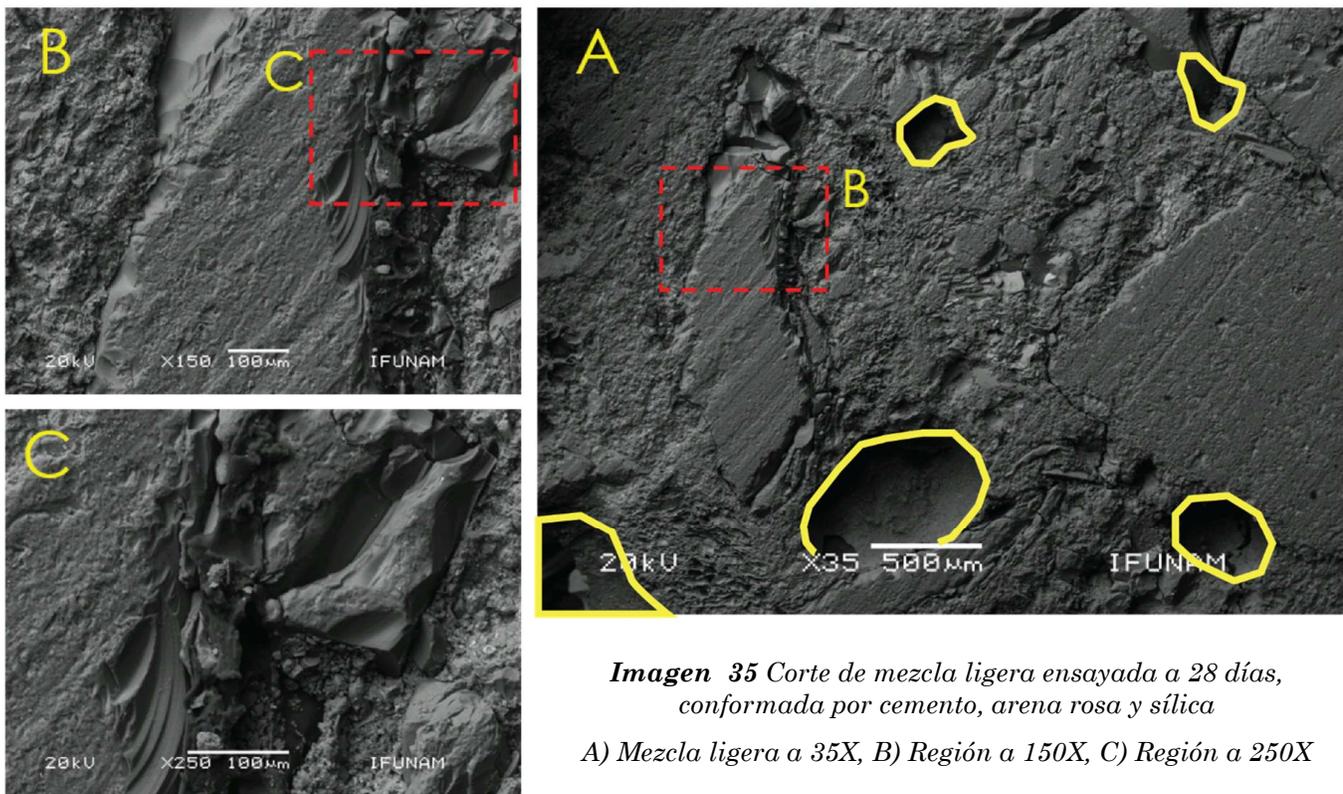
*Imagen 34* Corte de la mezcla de control sin haber sido ensayada observada en bajo vacío

Sin embargo, esta porosidad no es causada por el desprendimiento de algún agregado, en este caso el poro es consecuencia de una burbuja de aire, el cual queda atrapado al momento de vaciar la mezcla al molde<sup>99</sup>. La resistencia de las mezclas se encuentra

<sup>99</sup> Muciño Castañeda, R. (2013), *Concreto para técnicos de la construcción*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.

relacionada al volumen de vacíos en su interior<sup>100</sup> aplicando esta relación únicamente a pasta de cemento o mortero.<sup>101</sup>

En la **Imagen 35 A** se observa una distribución entre los distintos tamaños y formas del agregado fino de la mezcla ligera, conformada por arena rosa tamizada y sílica. Se reafirma la porosidad observada en la microscopía óptica, indicada con líneas de color amarillo. En las imágenes **B** y **C** se aprecia en una tonalidad más oscura, lo que se observó en la microscopía óptica como un recubrimiento de gel que rodea las partículas de sílica. Lo anterior podrían confirmar la formación de la zona interfacial entre las partículas de sílica y la pasta de cemento. Por ser muy similar a lo reportado por M. Etxeberria y E. Vázquez **Imagen 36**.<sup>102</sup>



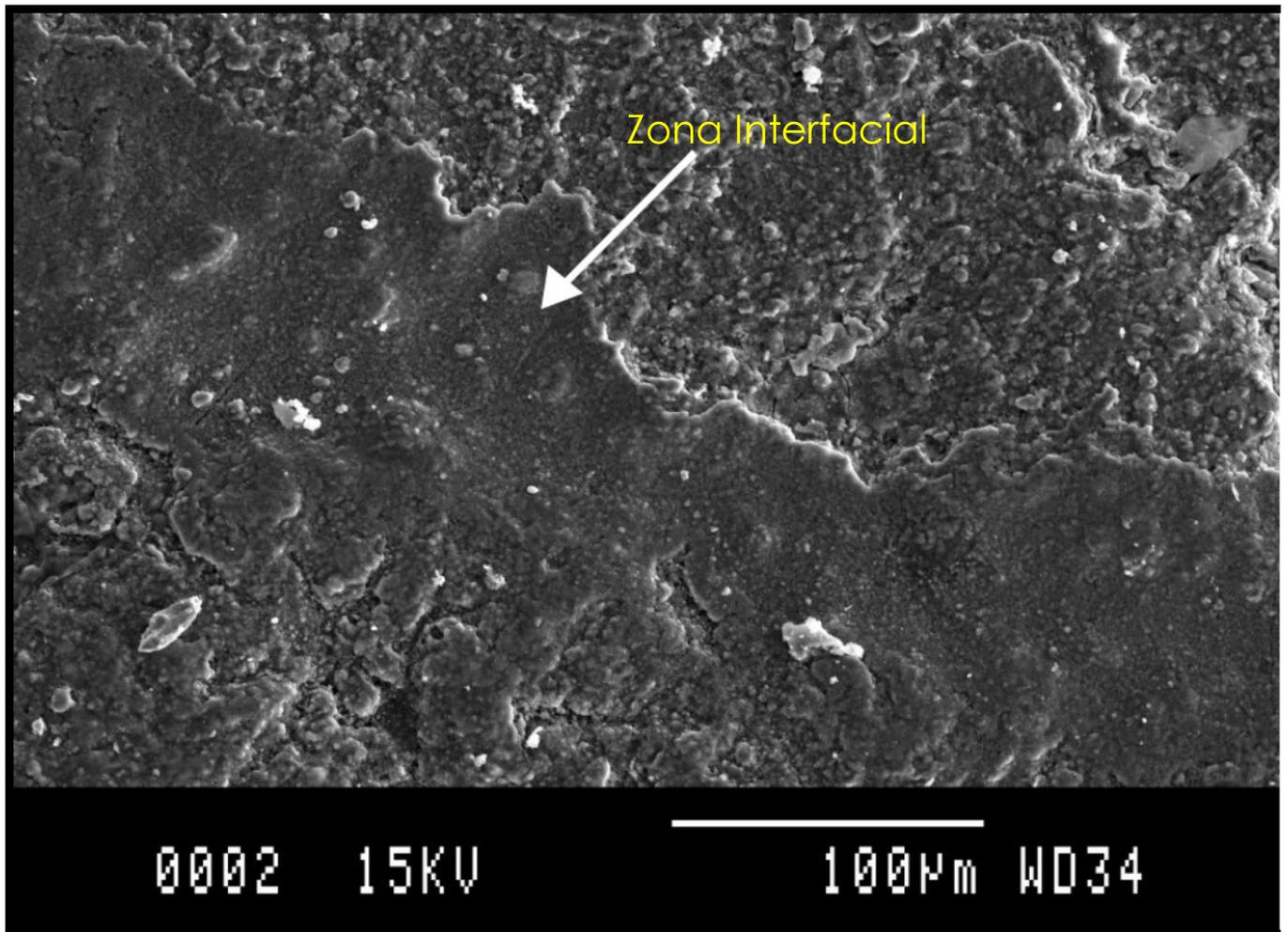
**Imagen 35** Corte de mezcla ligera ensayada a 28 días, conformada por cemento, arena rosa y sílica

A) Mezcla ligera a 35X, B) Región a 150X, C) Región a 250X

<sup>100</sup> Adam M. Neville (2013), *Tecnología del concreto*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 81

<sup>101</sup> Metha, K. y P. Monteiro. (1998), *Concreto: estructuras, propiedades y materiales*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 34

<sup>102</sup> M. Etxeberria y E. Vázquez (2010), *Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado*, pág. 54

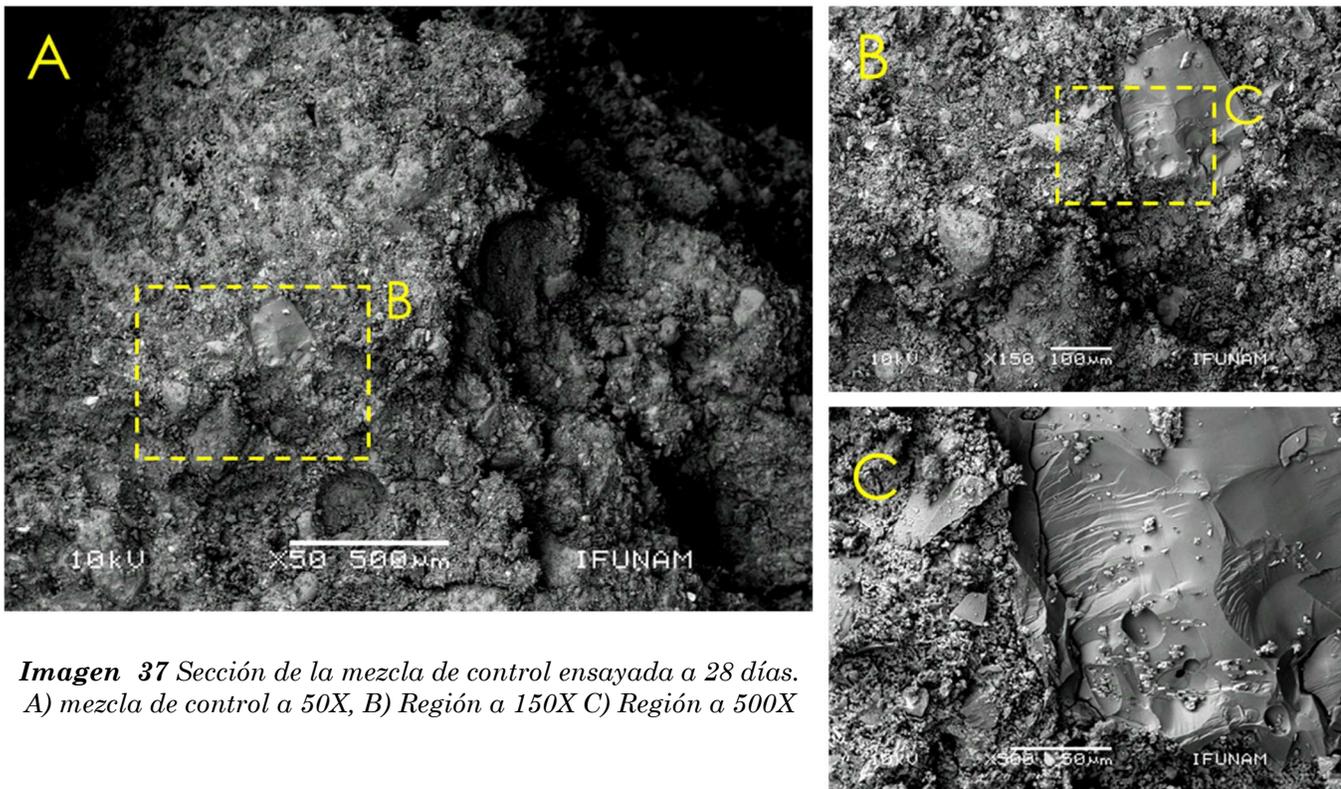


**Imagen 36** Zona interfacial entre el agregado y la pasta de cemento. Reportado por M. Etxeberria y E. Vázquez, reportado en "Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado"

Metha, K. y P. Monteiro. (1998) mencionan que la zona interfacial en mezclas de mortero favorece la resistencia a esfuerzos de compresión, sin embargo, debido a la orientación de los cristales que se forman en dicha zona, se propagan las micro fisuras, perjudicando la resistencia a la tensión, ocasionando el desprendimiento entre agregado y la pasta de cemento.<sup>103</sup>

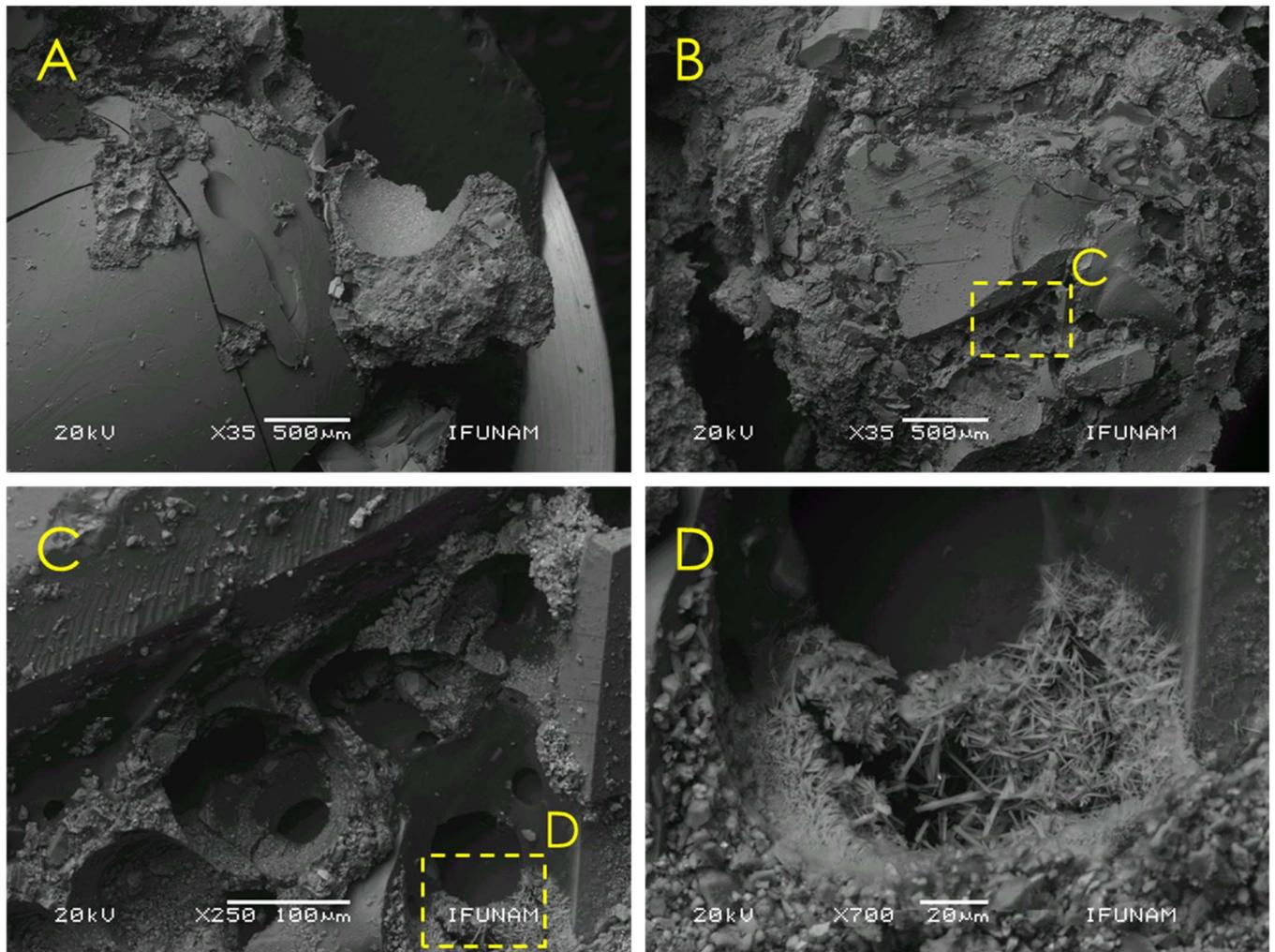
<sup>103</sup> Metha, K. y P. Monteiro. (1998), *Concreto: estructuras, propiedades y materiales*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. pág. 26-29

En la **Imagen 37 A** se observa que la integración entre las partículas de arena y la pasta de cemento es favorable, también se identifica una sección del agregado con una superficie carente de rugosidad al igual que las partículas de sílica empleadas en el diseño de mezclas ligeras, indicando que no toda la arena cuenta con superficies porosas. El desprendimiento del material es aleatorio, pero se puede apreciar que, en aquellas superficies carentes de rugosidad o porosidad, el desprendimiento es uniforme, confirmando que entre menor rugosidad tenga el material, menor será la adherencia con la pasta de cemento, Adam M. Neville (2013) y Gutiérrez de López, L. (2003).



**Imagen 37** Sección de la mezcla de control ensayada a 28 días. A) mezcla de control a 50X, B) Región a 150X C) Región a 500X

En la **Imagen 38 A** se aprecia la superficie de la sílica en forma circular, la cual carece de rugosidad, dificultando la adherencia con la pasta de cemento, separándose de la matriz cementante completamente, como se observa del lado derecho de la misma imagen, dejando una cavidad con una forma casi esférica. La imagen **B** es la misma toma que se aprecia en la *imagen 32-C*, donde la microscopía óptica nos indicaba la existencia de porosidad en la mezcla. En la imagen 37-C y 37-D es posible observar lo que se encuentra al interior de estos poros, evidenciando la formación de cristales como consecuencia del proceso de hidratación del cemento, con ello se puede argumentar que la adición de sílica a las mezclas no interfiere con dichas reacciones.



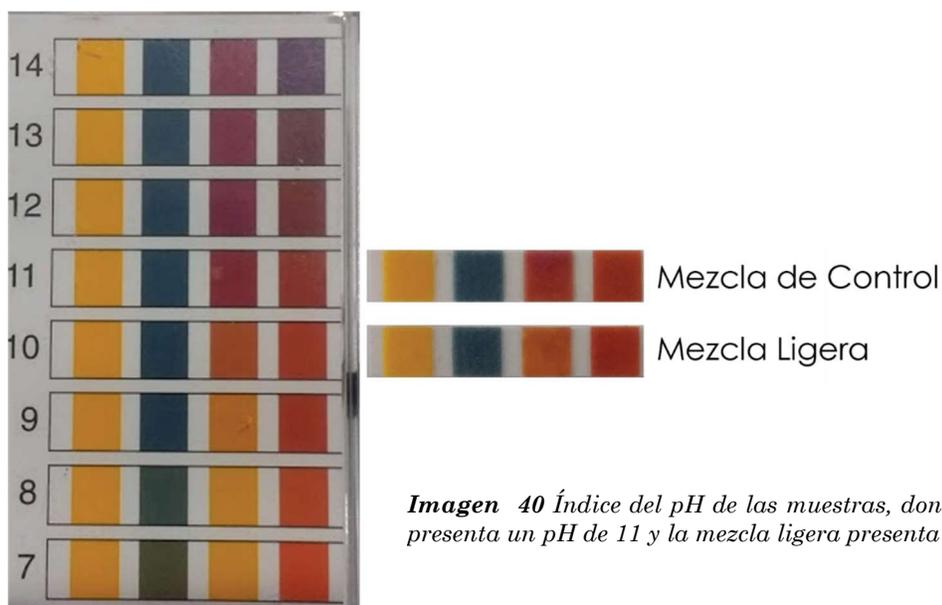
**Imagen 38** Mezcla Ligera ensayada a los 28 días  
 A) Observado a 35X, B) Observado a 35X, C) Observado a 250X y D) observado a 700X

## 5.6 Prueba de pH

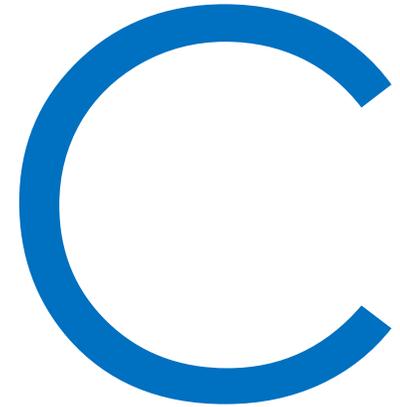
Después de la medición de las mezclas *Imagen 39*, se encontró que la mezcla de control presenta un pH con valor de 11 y la mezcla ligera presenta un valor de 10 *Imagen 40*, por lo cual su alcalinidad no es muy distinta entre sí. Indicando que la adición de sílica en las mezclas de mortero modifica la alcalinidad de la mezcla ya que una mezcla convencional tiene un valor de ph de 11 y la mezcla ligera con adición de sílica presenta una alcalinidad de 10.



*Imagen 39* Medición del ph de las muestras secas, hidratadas al punto de saturación previamente con agua destilada



*Imagen 40* Índice del pH de las muestras, donde la mezcla de control presenta un pH de 11 y la mezcla ligera presenta un pH de 10



## CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos a partir de la experimentación y de su comparación con los objetivos y la hipótesis planteada, las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- 1) Al sustituir una tercera parte del volumen de arena por sílica gel se obtienen los mejores resultados de trabajabilidad en la mezcla ligera.
- 2) Se obtuvo un incremento de 7.94% en la resistencia de la mezcla ligera pasando de 9.221 MPa a 9.954 MPa, y una disminución de 4.87% en la densidad con relación a la mezcla de control pasando de 1,604.92 kg/m<sup>3</sup> a 1,530.33 kg/m<sup>3</sup>.
- 3) Se tiene que utilizar un aditivo para contrarrestar la ganancia de humedad que presenta la sílica gen al utilizarse como agregado en la mezcla ligera.



- 4) La mezcla que contiene sílica presentó un menor desprendimiento de material después de ser sometida a las pruebas de compresión, mientras que la mezcla de control se fractura y fragmenta completamente.
- 5) El comportamiento plástico de la mezcla ligera con sílica gel fue notablemente mayor que el comportamiento de las otras mezclas que se ensayaron mecánicamente.
- 6) Las arena rosa y gris que se comercializan en la ciudad de México y la zona metropolitana para su uso en la industria de la construcción se encuentran fuera de los parámetros de granulometría que establece la normativa.
- 7) Al utilizar una arena rosa perfectamente graduada se incrementa la resistencia de las mezclas de mortero a pruebas de compresión hasta en un 66% en comparación con una mezcla con arena cuya granulometría no está controlada.
- 8) La resistencia de la mezcla ligera, donde se sustituye un porcentaje del volumen de arena por sílica como material aligerante, permite su empleo para la elaboración de piezas de mampostería, ya que su resistencia es solo un 0.46% menor que el valor de bloques de cemento que se establece en el R.C.D.F. para el diseño de elementos de mampostería.
- 9) A través de las observaciones de microscopía óptica y de microscopía electrónica de barrido de la región interfacial entre el agregado y la pasta de cemento, se puede determinar que la adición de sílica gel favorece e incrementa el desarrollo de las fases hidratadas de esta región, con lo que aumenta la resistencia del material a esfuerzos de compresión.



- 10) La densidad por m<sup>3</sup> de la mezcla ligera es un 23.48% inferior a la que establece el R.C.D.F. para las piezas de mampostería.
- 11) La densidad de la mezcla ligera se encuentra un 35.26% por debajo de la densidad de piezas de mampostería comerciales.
- 12) A partir de conocer las propiedades de los materiales empleados en la mezcla, se diseñaron mezclas menos densas que eventualmente se pueden emplear en la construcción de estructuras de menor sección para los espacios arquitectónicos.
- 13) El diseño estudiado se consideró únicamente para la elaboración de piezas de mampostería, sin embargo, al combinarlo con otros elementos de refuerzo como el acero, se podría utilizar en la fabricación de paneles para muros o entrepisos o cubiertas, entre otros elementos.
- 14) El estudio de las propiedades físico-químicas de cualquier material de construcción, requiere de los conocimientos y metodologías de otras disciplinas, cómo las de la Ciencia e Ingeniería de Materiales. Esto permite llevar a cabo trabajos de investigación interdisciplinarios entre expertos de diferentes áreas como la Física, la Química, la Arquitectura y la Ingeniería lo cual redundaría en el desarrollo de tecnologías constructivas novedosas.





# R

## RECOMENDACIONES

- 1) Es necesario monitorear el proceso de hidratación del cemento en conjunto con la sílica en un periodo de tiempo más amplio para descartar futuras reacciones adversas.
- 2) Utilizar el diseño de mezcla obtenido para la elaboración de bloques, para la fabricación de muros y someterlos a pruebas de cortante para determinar si presentan un mejor comportamiento mecánico ante las fuerzas sísmicas.
- 3) Evaluar otras propiedades de esta mezcla, tales como su coeficiente de conductividad térmica y acústica para explotar otras aplicaciones constructivas, por ejemplo, como material aislante.
- 4) Evaluar la permeabilidad de la mezcla propuesta para determinar si la absorción de agua limita su uso en exteriores.



- 5) Analizar cómo se comporta el diseño de mezcla propuesto en la elaboración de concreto.
- 6) Realizar una investigación mas detallada desde el punto de vista básico para entender las interacciones físico-químicas entre los agregados ligeros y las fases hidratadas de cemento para explicar el origen de la resistencia mecánica a la compresión que se encontró y la falta de plasticidad que se observó en los morteros ligeros que se estudiaron en esta investigación.
- 7) Evaluar económicamente las ventajas de utilizar una correcta granulometría en las arenas como medio para incrementar la resistencia a la compresión de las mezclas, con la intención de evitar el empleo de aditivos caros o la sobre dosificación del cemento.
- 8) Es necesario conocer los objetivos de cada diseño de mezcla, identificando si se utilizará como un elemento estructural, divisorio o recubrimiento, para dar soluciones específicas a los requerimientos y dejar de diseñar de una manera generalizada.
- 9) Continuar la investigación de otras mezclas con arenas naturales ligeras que permitan la viabilidad económica de la aplicación de morteros ligeros a la industria de la construcción, en particular, se deben hacer varios diseños de mezclas con distintas granulometrías de las arenas, para determinar su resistencia mecánica y en consecuencia sus aplicaciones arquitectónicas.



# ÍNDICE DE IMÁGENES

- Imagen 1.** Mapa de Actividad Sísmica del año 2017, reportado por el Servicio Sismológico Nacional, [página 2](#)
- Imagen 2.** Agregados para mezclas de mortero A) Cemento portland B) Arena C) Agua, [página 15](#)
- Imagen 3.** Distintos tamaños de partículas de las arenas, el tamaño va en función al tamiz: el #4 menor a 4.75mm y mayor a 2.36mm, #8 menor a 2.36mm y mayor a 1.18mm, #16 menor a 1.18mm y mayor a 0.60mm, #30 es menor a 0.60mm y mayor a 0.30mm, el # 50 es menor a 0.30mm y mayor a 0.15mm y el #100 es menor a 0.15mm y mayor a 0.075mm, [página 24](#)
- Imagen 4.** Procedimiento experimental para la obtención de un diseño de mezcla ligera, sustituyendo parcialmente el volumen de arena por sílica como material aligerante, [página 33](#)
- Imagen 5.** Cemento portland tipo II 30R RS, [página 34](#)
- Imagen 6.** Arena rosa sin tamizar, utilizada en la experimentación, [página 35](#)
- Imagen 7.** Tamizado de la arena, separándola por tamaño de grano, establecido por la norma ASTM C-33, [página 36](#)
- Imagen 8.** Sílica gel saturada de humedad (izquierda) y Sílica gen sin saturar (derecha), [página 37](#)
- Imagen 9.** Sílica gel convencional (izquierda) y Sílica gen después del proceso de molienda mecánica (derecha), [página 38](#)
- Imagen 10.** Moldes cúbicos de 3cm, elaborados con acrílico y herrajes metálicos, respetando la geometría establecida por la norma ASTM C-109, [página 40](#)
- Imagen 11.** Colado de 15 muestras cubicas de 3cm por cada diseño de mezcla, [página 41](#)
- Imagen 12.** Probetas cubicas de 3cm utilizadas para las pruebas de compresión a 28 días, [página 42](#)
- Imagen 13.** A) Maquina de pruebas universales, del Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales de la Facultad de Arquitectura, UNAM. B) Colocación de la muestra cubica de 3cm para la prueba de compresión. C) Estado de la muestra después del ensayo de compresión, [página 43](#)



- Imagen 14.** Corte transversal de una muestra cubica de 3cm para microscopia Óptica de la mezcla de control y la mezcla ligera, en secciones no mayores de 2mm de espesor, [página 44](#)
- Imagen 15.** Microscopio Óptico, Keyence VHX-5000 del Instituto de Investigaciones Estéticas UNAM, [página 45](#)
- Imagen 16.** Vista tridimensional donde se muestra el relieve de la muestra con escala de color, obtenida con el Microscopio Óptico, Keyence VHX-5000, [página 45](#)
- Imagen 17.** Imagen óptica, con corrección de profundidad, obtenida con el Microscopio Óptico, Keyence VHX-5000, [página 45](#)
- Imagen 18.** Preparación de las muestras, cortadas previamente con un espesor no mayor a 2mm, montadas sobre una platina metálica y fijadas a ella con cinta de carbón para mejor la conductividad de electrones, [página 46](#)
- Imagen 19.** Microscopio Electrónico de Barrido JSM – 5600 F, Laboratorio Central de Microscopia del Instituto de Física de la UNAM, [página 47](#)
- Imagen 20.** Agua destilada, utilizada para medir el ph de la mezcla de control y la mezcla ligera posterior a los 28 días de fraguado, [página 47](#)
- Imagen 21.** Tiras reactivas para la medición de ph, [página 47](#)
- Imagen 22.** Separación de la arena por tamaño de grano como lo establece la norma ASTM C-33, [página 51](#)
- Imagen 23.** Arena rosa con muchos finos (izquierda), Arena rosa correctamente graduada (derecha), [página 54](#)
- Imagen 24.** Probetas cubicas de 3cm, clasificadas y resguardadas antes de ser ensayadas, [página 55](#)
- Imagen 25.** Deformación de las probetas cubicas de 3cm después de la prueba de compresión, en la cual el equipo se detuvo automáticamente cuando el material mostraba una pérdida del 40% de su resistencia con relación a la carga máxima, esta prueba se realizó en el Laboratorio de Materiales y Sistemas Estructurales, de la Facultad de Arquitectura de la UNAM, [página 59](#)
- Imagen 26.** Regiones de la curva Esfuerzo-Deformación descritas por Arthur H. Nilson, (2001), [página 60](#)
- Imagen 27.** Curvas esfuerzo-deformación unitaria a la compresión de concretos, [página 61](#)
- Imagen 28.** Ficha técnica de una pieza de block macizo de cemento-arena bajo la denominación de block estructural, [página 66](#)



- Imagen 29.** Muestra cubica de 3cm sin haber sido ensayada a compresión, seccionada por medio de un corte paralelo a uno de sus lados, [página 67](#)
- Imagen 30.** Corte de la mezcla de control sin haber sido ensayada, A) Mezcla de control a 30X, B) Región a 100X, C) Región a 150X, [página 68](#)
- Imagen 31.** Corte de la mezcla ligera sin haber sido ensayada, A) Mezcla ligera a 20X, B) Región a 50X, C) Región a 150X, [página 69](#)
- Imagen 32.** Sección de la mezcla de control ensayada a 28 días, A) Mezcla de control a 20X, B) Región a 150X, C) Región a 200X, [página 70](#)
- Imagen 33.** Sección de la mezcla ligera ensayada a 28 días, A) Mezcla ligera a 30X, B) Región a 100X, C) Región a 200X, [página 71](#)
- Imagen 34.** Corte de la mezcla de control sin haber sido ensayada observada en bajo vacío, [página 73](#)
- Imagen 35.** Corte de mezcla ligera ensayada a 28 días, conformada por cemento, arena rosa y sílica, A) Mezcla ligera a 35X, B) Región a 150X, C) Región a 250X, [página 74](#)
- Imagen 36.** Zona interfacial entre el agregado y la pasta de cemento. Reportado por M. Etxeberria y E. Vázquez, reportado en "Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado", [página 75](#)
- Imagen 37.** Sección de la mezcla de control ensayada a 28 días. A) mezcla de control a 50X, B) Región a 150X C) Región a 500X, [página 76](#)
- Imagen 38.** Mezcla Ligera ensayada a los 28 días, A) Observado a 35X, B) Observado a 35X, C) Observado a 250X y D) observado a 700X, [página 77](#)
- Imagen 39.** Medición del ph de las muestras secas, hidratadas al punto de saturación previamente con agua destilada, [página 78](#)
- Imagen 40.** Índice del ph de las muestras, donde la mezcla de control presenta un ph de 11 y la mezcla ligera presenta un ph de 10, [página 78](#)



## ÍNDICE DE GRAFICAS

- Gráfica 1.** Dosificación para mezclas de mortero de acuerdo con la norma ASTM C-109, [página 19](#)
- Gráfica 2.** Curva Granulométrica para agregados finos. ASTM C-33, [página 25](#)
- Gráfica 3.** Curva Granulométrica de las arenas bajo los parámetros de la norma ASTM C-33, [página 52](#)
- Gráfica 4.** Curva Granulométrica corregida de la arena rosa bajo los parámetros de la norma ASTM C-33, [página 53](#)
- Gráfica 5.** Prueba de Compresión a 28 días, Mezcla de control y Mezcla tamizada, [página 56](#)
- Gráfica 6.** Prueba de Compresión a 28 días, Mezcla de Control y Mezcla Ligera, [página 57](#)
- Gráfica 7.** Resistencia a la compresión para piezas de mampostería, R.C.D.F., Mezcla de control, Mezcla Tamizada y Mezcla Ligera, [página 58](#)
- Gráfica 8.** Curva Esfuerzo-Deformación de la Mezcla de Control y la Mezcla Ligera, [página 62](#)
- Gráfica 9.** Densidad de las mezclas en estado seco a 28 días de su elaboración, Mezcla de control, Mezcla tamizada y Mezcla ligera, [página 64](#)
- Gráfica 10.** Gráfica comparativa entre la densidad de las mamposterías establecida por el R.C.D.F. y las obtenidas por las mezclas de la experimentación, [página 65](#)



# ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Sistemas estructurales usados en los muros para distintas regiones sísmicas, [página 12](#)
- Tabla 2.** Clasificación de los Morteros de acuerdo con la norma ASTM-270, [página 17](#)
- Tabla 3.** Tipos de cementos de acuerdo con la NMX C-414, [página 21](#)
- Tabla 4.** Curva Granulométrica para agregados finos. ASTM C-33, [página 24](#)
- Tabla 5.** Clasificación de aditivos de uso común en el concreto, [página 29](#)
- Tabla 6.** Clasifican de aditivos Norma ASTM C-494-92, [página 29](#)
- Tabla 7.** Diseño de la mezcla de control utilizando arena rosa sin manipular previamente, mezcla tamizada empleando arena rosa, la cual ha sido manipulada previamente para modificar su curva granulométrica de acuerdo con lo establecido por la norma ASTM C-33 y la mezcla ligera en la cual se sustituye parcialmente el volumen de arena rosa cuya curva granulométrica cumple con los parámetros de la norma ASTM C-33 por sílica gel como material aligerante, [página 39](#)
- Tabla 8.** Módulo de Finura de las arenas analizadas, [página 53](#)
- Tabla 9.** Diseño de las mezclas utilizadas en la experimentación, [página 54](#)
- Tabla 10.** Dosificación final utilizada en los diseños de mezcla y los resultados de densidad (kg/m<sup>3</sup>) presentada a los 28 días y la resistencia f'c (kg/cm<sup>2</sup>) obtenidos en las pruebas mecánicas de compresión a 28 días, [página 59](#)
- Tabla 11.** Comparativa entre las densidades que ofrecen las piezas comerciales tomadas como parámetro y los valores obtenidos en la investigación, [página 66](#)





# R

## REFERENCIAS

### LIBROS

1. Adam M. Neville (2010), **Tecnología del concreto**. México, Trillas, 1998 (reimp. 2010).
2. Adam M. Neville (2013), **Tecnología del concreto**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
3. Arnal Simón, L. (2005), **Reglamento de construcciones para el Distrito Federal: reglamento, normas técnicas, Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, Reglamento de la Ley de Desarrollo Urbano del Distrito Federal, ilustraciones y comentarios, graficas, planos y lineamientos**. México, Trillas S.A. de C.V.
4. Arthur H. Nilson, (2001), **Diseño de Estructuras de Concreto**. Colombia, Mc Graw Hill.
5. CEMEX Concretos, **Manual del constructor**. México, CEMEX S.A. de C.V.
6. Donald R. Askeland (1998), **Ciencia e ingeniería de los materiales**. México, 3<sup>ra</sup> edición, International Thomson Editores S.A. de C.V.
7. Gutiérrez de López, L. (2003), **El concreto y otros materiales para la construcción**. Colombia, 2<sup>da</sup> edición, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.



8. Hernández Sampieri, R.; Fernández Collado, C.; Baptista Lucio, P.; (2006), **Metodología de la Investigación**. México, 4ª Edición, Mc Graw Hill
9. IMCYC. (2012), **Terminología del cemento y del concreto**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
10. IMCYC. (2013), **Guía para seleccionar las proporciones para concretos de alta resistencia con cemento portland y ceniza volante**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
11. Mather, Bryant & Ozyildirim, Celik. (2004), **Cartilla del concreto**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
12. Meli, Roberto. (1994), **Mampostería estructural, la práctica, la investigación y el comportamiento sísmico observado en México**. México, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17.
13. Metha, K. y P. Monteiro. (1998), **Concreto: estructuras, propiedades y materiales**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
14. Muciño Castañeda, R. (2013), **Concreto para técnicos de la construcción**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
15. R. Meli, S.M. Alcocer y L.A. Díaz-Infante Ch; (1994), **Características estructurales de la vivienda de interés social en México**. México, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Cuaderno de Investigación N° 17.
16. Sanjuán, M.A. y P. Castro (2001), **Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto**. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
17. Steven H. K. et al. (2004), **Diseño y control de mezclas de concreto**. Portland Cement Association
18. William D. Callister Jr. (1995), **Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales**. Barcelona, 1ª Editorial Reverté S.A. de C.V.

## TESIS

19. Elizondo Fócil, A. (2006), "**Caracterización del Concreto Celular Elaborado con Espuma Preformada**", Maestro en ciencias en ingeniería y administración de la construcción, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, Monterrey, México.



20. Emilio Jiménez, R. (2014), **“Concreto aireado en autoclave, estado actual de la técnica y perspectivas de futuro”**, Maestría en Tecnología de la Arquitectura, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España
21. Muciño Vélez, A. (2015), **“Endurecimiento de cementos tipo portland inducido por fosfatos y/o silicatos”**, Doctorado en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
22. Salgado Cruz, E. (2016), **“Siembra de partículas sub micrométricas de minerales de fósforo en morteros hidráulicos de cemento para mejorar su desempeño mecánico”**, Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
23. Sánchez Alejandro, A. (2013), **“Comportamiento sísmico de muros de concreto para vivienda”**, Doctor en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
24. Valdés Constantino, S. (2010), **“Recomendaciones para el diseño estructural de concreto ligero”**, Maestría en Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.
25. Vargas López, S. (2017), **“Modificación de las propiedades mecánicas del mortero”**, Maestría en Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

## CONGRESOS

26. Cervantes Abarca, A. (2008), **“Nuevas tecnologías en concretos, concreto celular, concreto reforzado con fibras, concreto ligero estructural”**, Congreso nacional de administración y tecnología para la arquitectura, ingeniería y diseño. Memorias 2008, Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco. México, pp. 139-162

## ARTÍCULOS

27. Chan Yam, José Luis; Solís Carcaño, Rómel; Moreno, Éric Iván, (2003), **“Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto”**. Ingeniería 2003, pp. 39-46.
28. Clavijo, J., (2013), **“Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM)”**, en *Elementos*, número 3, junio 2013, pp. 133-146



29. M. Etxeberria y E. Vázquez, (2010), **"Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado"**, en *Materiales de Construcción*, enero-marzo 2010 Vol. 60, año 297, pp. 47-58
30. Salamanca Correa, Rodrigo, (2001), **"La tecnología de los morteros"**, en *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, número 11, diciembre 2001, pp. 41-48. Disponible en: [www.redalyc.com/articulo.oa?id=91101107ER](http://www.redalyc.com/articulo.oa?id=91101107ER)
31. Tena Colunga, Arturo; Juárez Ángeles, Artemio; Salinas Vallejo, Víctor Hugo, (2007), **"Resistencia y deformación de muros de mampostería combinada y confinada sujetos a cargas laterales"**, *Revista de Ingeniería Sísmica*, num. enero-junio, pp. 29-60.
32. VARGAS, Yolanda; Adolfo Eduardo Obaya Valdivia, Guadalupe Iveth Vargas Rodríguez, Virginia Gómez-Vidales, José Alvaro Chávez Carvayar, Arturo García Bórquez, (2013), **"Introducción a la caracterización de materiales, nanomateriales y catalizadores dentro del Observatorio Virtual Ixtli, UNAM"**, *Revista Digital Universitaria* [en línea]. 1 de mayo de 2013, Vol. 14, No.5, Disponible en: <http://www.revista.unam.mx/vol.14/num5/art07/index.html>, ISSN: 1607-6079

## NORMAS

33. ASTM C – 33, **Standard Specification for Concrete Aggregates**
34. ASTM C – 109, **Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens).**
35. ASTM C – 150, **Standard Specification for Portland Cement**
36. ASTM C- 270, **Standard Specification for Mortar for Unit Masonry**
37. ASTM C – 294, **Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates**
38. ASTM C - 494-92, **Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete**
39. ASTM C – 595, **Standard Specification for Blended Hydraulic Cements**
40. Norma Mexicana NMX-C-441-ONNCCE-2013, **Para elementos de mampostería no estructurales**



## Páginas Web

41. Cemento Cruz Azul. (2018), "Productos/Cementos/Cemento Tipo II" [en línea]. México, disponible en: <http://cementocruzazul.com.mx/cemento-tipo-ii/>
42. Construsupply, Block de México. (2018), "Productos/Bock estructural" [en línea]. México, disponible en: <http://construsupply.com.mx/productsestru.htm>



## ABREVIATURAS

**µm** Micrómetro, un micrómetro es una milésima de milímetro

**Al** Aluminio

**ASTM** American Society for Testing and Materials

**C** Carbono

**C<sub>2</sub>S** Silicato dicálcico

**C<sub>3</sub>A** Aluminato tricálcico

**C<sub>3</sub>S** Silicato tricálcico

**C<sub>4</sub>AF** Ferroaluminato tetracálcico

**Ca** Calcio

**EDS** Espectrometría de dispersión de energía de rayos X

**IMCyC** Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto

**K<sub>2</sub>O** Óxido de Potasio

**MF** Modulo de Finura

**Mg** Magnesio

**MgO** Óxido de Magnesio

**Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>** Óxido de Manganeso

**MPa** Mega pascal es la unidad de presión del Sistema Internacional de Unidades. Se define como la presión que ejerce una fuerza de 1 newton sobre una superficie de 1 metro cuadrado normal a la misma.

**Na** Sodio

**O** Oxígeno



**OM** Microscopia óptica

**P.S.I.** del inglés pounds-force per square inch, es una unidad de presión en el sistema anglosajón de unidades, mejor conocido como libra fuerza por pulgada cuadrada

**S** Azufre

**SEM** Microscopía electrónica de barrido

**Si** Silicio

**TiO<sub>2</sub>** Óxido de Titanio

**XRD** Difracción de rayos X

## GLOSARIO

**Adherencia:** Agarre de la pasta de cemento con la superficie del agregado contra la cual se coloca.

**Aditivo:** Material que no sea agua, agregados, cemento ni refuerzo a base de fibras, que se usa como ingrediente de una mezcla cementante para modificar su esta fresco, mezclado, fraguado o propiedades de endurecimiento y se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante su dosificación.

**Agregado Fino:** Agregado que pasa la malla de 4.75mm (#4) y es retenido en la malla de 150µm (#100)

**Arcilla:** Material mineral natural con propiedades plásticas y compuesto por partículas muy finas, los minerales arcillosos son básicamente silicatos hidratados de aluminio u ocasionalmente silicatos hidratados de magnesio.

**Arena:** La porción de un agregado que pasa la malla #4 (4.75mm) y que queda retenida predominantemente en la malla #100 (0.15mm), y que se deriva ya sea de la desintegración natural y abrasión de la roca o de la trituración mecánica de piedra.

**Cemento:** Material de construcción, con presentación en polvo que al mezclarse con agua se genera una pasta blanda, la cual se endurece en contacto con el agua y el aire.

**Ductilidad:** Propiedad de un material para soportar una gran deformación permanente sin que este alcance su punto de ruptura.



**Fraguado:** La condición alcanzada por una mezcla de mortero cuando ha perdido plasticidad, generalmente medido en términos de resistencia a la penetración o deformación.

**Granulometría:** La distribución de partículas del material granular entre varios tamaños; usualmente se expresa en términos de porcentajes acumulativos más grandes o más pequeños que cada uno de la serie de tamaños (abertura de tamiz) o los porcentajes entre ciertos rangos de tamaño (abertura de tamiz).

**Limo:** Material granular derivado de la desintegración de la roca, con granos que en su mayoría pasan la malla de 75  $\mu\text{m}$  (#200), el tamaño de sus partículas se encuentran dentro del rango de 2 a 50  $\mu\text{m}$ .

**Mampostería:** Construcción a base de unidades preformadas o moldeadas, generalmente lo suficientemente pequeñas para ser manejadas por una sola persona, ya que están hechas de tabiques o blocks de cemento arena.

**Mezcla de control:** Mortero elaborado con cemento Portland tipo II 30R RS, arena rosa convencional y agua embotellada.

**Mezcla Ligera:** Mortero elaborado con cemento Portland tipo II 30R RS, arena rosa tamizada y graduada de acuerdo con la norma ASTM C-33, sílica gel, aditivo y agua embotellada.

**Mezcla Tamizada:** Mortero elaborado con cemento Portland tipo II 30R RS, arena rosa tamizada y graduada de acuerdo con la norma ASTM C-33 y agua embotellada.

**Módulo de Finura:** Factor que se obtiene sumando los porcentajes totales de material que son más gruesos que cada una de las mallas siguientes, y dividiendo la suma entre 100.

**Mortero:** Mezcla de pasta de cemento hidratado y agregado fino, el cual podrá ser arena o sílica gel.

**Piezas de mampostería:** Se entenderá como los tabiques de barro recocido o las piezas de block o tabicón de cemento-arena, utilizados para la elaboración de muros de carga.

**Plasticidad:** Propiedad de la pasta de cemento o mortero recién mezclada que determina su resistencia a la deformación o su facilidad de moldeo.

**Tamiz:** Tela tejida de alambre con aberturas regularmente espaciada de tamaño uniforme, montada en un marco de latón para usarse en la separación del material granular de acuerdo con el tamaño de sus partículas.

**Trabajabilidad:** Propiedad del mortero en estado fresco que determina la facilidad en la cual se pueden mezclar, compactar, colocar y terminar en una condición homogénea.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura

Maestría en Arquitectura

Campo de conocimiento: Tecnologías

Ciudad Universitaria, CDMX, octubre 2018