



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

**CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN Y ESTRUCTURAS**

**TESIS**

**"CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS EN  
MORTEROS DE CAL"**

**PRESENTA:**

**Ing. José Antonio de Loera Aguilera**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON  
ESPECIALIDAD EN CONSTRUCCIÓN**

**TUTOR:**

**Dr. Miguel Ángel Soto Zamora**

**COMITÉ TUTORAL**

**Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil**

**M. en V. Manuel Andréi Murillo Méndez**

**Aguascalientes, Ags. 20 de Noviembre de 2018**



UNIVERSIDAD AUTONOMA  
DE AGUASCALIENTES  
FORMATO DE CARTA DE VOTO APROBATORIO

**M. EN FIL. OMAR VÁZQUEZ GLORIA**  
DECANO DEL CENTRO DE CIENCIAS  
DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN  
P R E S E N T E

Por medio del presente como Tutor designado del estudiante **JOSÉ ANTONIO DE LOERA AGUILERA** con ID **139861** quien realizó la tesis titulada: **CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS EN MORTEROS DE CAL**, y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia, me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla, y así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 14 de noviembre de 2018.

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora  
Tutor de tesis

Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil  
Asesor de tesis

M. en V. Manuel Andréi Murillo Méndez  
Asesor de tesis

- c.c.p.- José Antonio de Loera Aguilera
- c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León - Secretaría de Investigación y Posgrado
- c.c.p.- Dr. Sergio Ignacio Martínez Martínez - Jefatura del Depto. de Construcción y Estructuras
- c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora - Consejero Académico
- c.c.p.- Archivo



Centro de Ciencias  
del Diseño y de  
la Construcción

Oficio: CCDC-D-485-2018  
Asunto: Conclusión de tesis

Dra. María del Carmen Martínez Serna  
Dirección General de Investigación y Posgrado  
PRESENTE

Por medio de este conducto informo que el documento final de tesis titulado: "CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE AGREGADOS PÉTREOS EN MORTEROS DE CAL". Presentado por el sustentante: José Antonio de Loera Aguilera con ID: 139861, egresado de la Maestría en Ingeniería Civil cumple las normas y lineamientos establecidos institucionalmente. Cabe mencionar que el autor cuenta con el voto aprobatorio correspondiente.

Para efecto de los trámites que al interesado convengan, se extiende el presente, reiterándole las consideraciones que el caso amerite.

ATENTAMENTE  
Aguascalientes, Ags., 20 de noviembre de 2018  
"SE LUMEN PROFERRE"

M. en Fil. Omar Vázquez Gloria  
Decano del Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción

c.c.p.- Dr. Ricardo Arturo López León – Secretario de Investigación y Posgrado del CCDC.  
c.c.p.- Dr. Miguel Ángel Soto Zamora – Secretario Técnico de la Maestría en Ingeniería Civil y Tutor de tesis.  
c.c.p.- Ing. José Antonio de Loera Aguilera – Egresado de la Maestría en Ingeniería Civil.  
c.c.p.- Lic. Delia Guadalupe López Muñoz – Jefe Sección de Certificados y Títulos.  
c.c.p. - Archivo

OVG/tbv

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo económico, sin el cual no me habría sido posible desarrollar mi trabajo de investigación y concluir de manera satisfactoria la etapa de mis estudios de grado, permitiéndome conseguir esta gran meta académica y profesional.

Del mismo modo agradezco al Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción así al Consejo Académico de la Maestría en Ingeniería Civil y especialmente al Dr. Miguel Ángel Soto Zamora por su destacable labor como tutor.

Agradezco también a toda mi familia y amigos por todo el apoyo que me brindaron para lograr realizar este gran objetivo dentro de mi vida académica y personal.

Por último, agradezco a la empresa Cal de Alta Pureza y en particular a su gerente el Ing. Mario Cuan Alarcón por brindarme la oportunidad de realizar mi estancia de investigación en su empresa y por todo el apoyo y la información que me brindo, sin la cual no me habría sido posible entender de manera precisa el comportamiento de la cal.

## DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres que con su guía, ejemplo y apoyo incondicional dieron forma a mi carácter personal y académico, como un reflejo de que gracias a ellos he logrado terminar esta etapa de mi vida, así como a mi hermana que siempre me sirvió como un modelo a seguir.

De la misma manera dedico este trabajo a todos mis amigos que jamás dejaron de alentarme y apoyarme durante toda mi formación.



## ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL .....	6
ACRÓNIMOS .....	13
RESUMEN .....	14
ABSTRACT .....	15
1. INTRODUCCIÓN.....	17
1.1. Prólogo.....	17
1.2. Objetivo General.....	18
Objetivos Particulares .....	18
1.3. Alcances.....	19
1.4. Justificación .....	20
1.5. Hipótesis.....	22
1.6. Metodología .....	22
2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO .....	25
2.1. Morteros.....	25
2.2. Materiales aglomerantes y conglomerantes .....	25
2.1.3. Árido .....	26
2.2. La cal.....	27
2.3. Morteros de cal .....	31
3. MARCO TEORICO.....	37
3.1. Cal en la construcción .....	37
3.2. Granulometría.....	38
3.3. Fluidez .....	39
3.4. Resistencia a la compresión.....	40

3.5. Absorción de agua.....	41
3.6. Peso específico.....	41
3.6. Normatividad .....	41
4. METODOLOGÍA.....	44
4.1. Objetivos de la experimentación .....	44
4.2. Materiales utilizados.....	44
4.3. Análisis Granulométrico.....	48
4.4. Probetas.....	52
5. RESULTADOS .....	61
5.1. AGREGADOS PETREOS.....	61
6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	90
6.1. Evaluación de normalidad de los resultados.....	90
6.2. Justificación de las pruebas estadísticas para la comprobación de hipótesis de investigación .....	95
6.3. La prueba t de 2 muestras independientes .....	95
6.4. Correlación del momento del producto de Pearson.....	96
6.5. Análisis y discusión de los resultados por categoría.....	99
7. CONCLUSIONES .....	126
7.1. Conclusión general.....	126
7.2. Conclusiones particulares .....	127
7.3. Nichos de investigación .....	128
FUENTES DE CONSULTA .....	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia a la compresión de morteros (NMX-C-003-ONNCCE). .....	42
Tabla 2. Ficha técnica cal en polvo.....	45
Tabla 3. Ficha técnica cal en pasta.....	46
Tabla 4. Bancos de material seleccionados. ....	47
Tabla 5. Límites de material que pasa en porcentaje de acuerdo a normativa.....	52
Tabla 6. Código de probetas con su respectivo tipo de cal, arena y proporción..	58
Tabla 7. Códigos y arenas utilizadas para las probetas. ....	61
Tabla 8. Granulometría y módulo de finura de arena A1 .....	62
Tabla 9. Granulometría y módulo de finura de arena A2.....	63
Tabla 10. Granulometría y módulo de finura de arena A3.....	64
Tabla 11. Granulometría y módulo de finura de arena A4.....	65
Tabla 12. Granulometría y módulo de finura de arena A5.....	66
Tabla 13. Valores de densidad y absorción de arena A1 .....	67
Tabla 14. Valores de densidad y absorción de arena A2.....	67
Tabla 15. Valores de densidad y absorción de arena A3.....	68
Tabla 16. Valores de densidad y absorción de arena A4.....	68
Tabla 17. Valores de densidad y absorción de arena A5.....	68
Tabla 18. Clasificación de probetas y tiempos de ensaye.....	69
Tabla 19. Características mecánicas de probetas ensayadas a 14 días.....	74
Tabla 20. Características mecánicas de probetas ensayadas a 28 días.....	77
Tabla 21. Características mecánicas de probetas ensayadas a 2 meses.....	80
Tabla 22. Características mecánicas de probetas ensayadas a 3 meses.....	83
Tabla 23. Características mecánicas de probetas ensayadas a 4 meses.....	86
Tabla 24. Rangos de r para la interpretación de los coeficientes de determinación. .....	99
Tabla 25. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A2.....	100
Tabla 26. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A3.....	101



Tabla 27. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A4.....102

Tabla 28. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A5.....103

Tabla 29. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A3.....105

Tabla 30. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A4.....106

Tabla 31. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A5.....107

Tabla 32. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A4.....108

Tabla 33. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A5.....110

Tabla 34. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A4 y A5.....111

Tabla 35. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con cal en polvo C y cal en pasta O.....112

Tabla 36. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:2.....114

Tabla 37. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:3.....115

Tabla 38. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:2 y 1:3.....116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Absorción de agua contra diámetro de partícula de agregado (Arandigoyen & Álvarez, 2006). .....20

Figura 2. Vista microscópica de óxido de calcio (izquierda) e hidróxido de calcio (derecha) (Arizzi & Cultrone, 2012). .....21

Figura 3. Ciclo de la cal (García Salas, 2016). .....28

Figura 4. Microscopía electrónica de barrido de morteros de cal con áridos silíceo (a) y calcítico (b) (Arizzi & Cultrone, 2012). .....35

Figura 5. Diagrama de medición de diámetro en mesa de fluidez (NMX-C-061-ONNCCE). .....39

Figura 6. Prensa hidráulica para pruebas de compresión. ....40

Figura 7. Bancos de material seleccionados. ....47

Figura 8. Secado al sol de las muestras. ....48

Figura 9. Cribado del material. ....49

Figura 10. Cuarteo de la muestra. ....50

Figura 11. Juego de mallas utilizadas. ....51

Figura 12. Material retenido en malla. ....51

Figura 13. Mezclado de cal y agregado pétreo en seco. ....53

Figura 14. Proceso de mezclado del mortero. ....54

Figura 15. Mesa de impactos preparada para el ensayo. ....54

Figura 16. Mesa de impactos con mortero en estado inalterado antes de iniciar la prueba de fluidez. ....55

Figura 17. Medición del diámetro final del mortero tras finalizar la prueba de fluidez. ....55

Figura 18. Proceso de llenado con mortero de los moldes. ....56

Figura 19. Molde al finalizar su llenado y enrazado. ....56

Figura 20. Probetas de mortero de cal clasificadas. ....57

Figura 21. Probetas de mortero de cal de distintas dosificaciones. ....57

Figura 22. Prueba de compresión de probeta de mortero de cal. ....59

Figura 23. Probeta de mortero de cal luego de su ensayo a compresión. ....59

Figura 24. Grafica logarítmica de granulometría de arena A1. ....62

Figura 25. Grafica logarítmica de granulometría de arena A2. ....63

Figura 26. Grafica logarítmica de granulometría de arena A3. ....64

Figura 27. Grafica logarítmica de granulometría de arena A4. ....65

Figura 28. Grafica logarítmica de granulometría de arena A5. ....66

Figura 29. Gráfica de Análisis de Normalidad por la prueba de Anderson Darling para La Variable dependiente “Y: Resistencia a la compresión”.....91

Figura 30. Gráfica de Análisis de Normalidad por la prueba de Ryan-Joiner para La Variable dependiente “Y: Resistencia a la compresión”.....93

Figura 31. Gráfica de Análisis de Normalidad por la prueba de Kolmogorov-Smirnov para La Variable dependiente “Y: Resistencia a la compresión”.....94

Figura 32. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A2.....100

Figura 33. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A3.....101

Figura 34. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A4.....103

Figura 35. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A5.....104

Figura 36. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A3.....105

Figura 37. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A4.....106

Figura 38. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A5.....108

Figura 39. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A4.....109

Figura 40. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A5.....110

Figura 41. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A4 y A5.....111

Figura 42. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con cal en polvo C y cal en pasta O. ....113

Figura 43. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:2. ....114

Figura 44. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:3. ....116

Figura 45. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:2 y 1:3. ....117

Figura 46. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra su tiempo de fraguado. ....118

Figura 47. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra densidad.....120

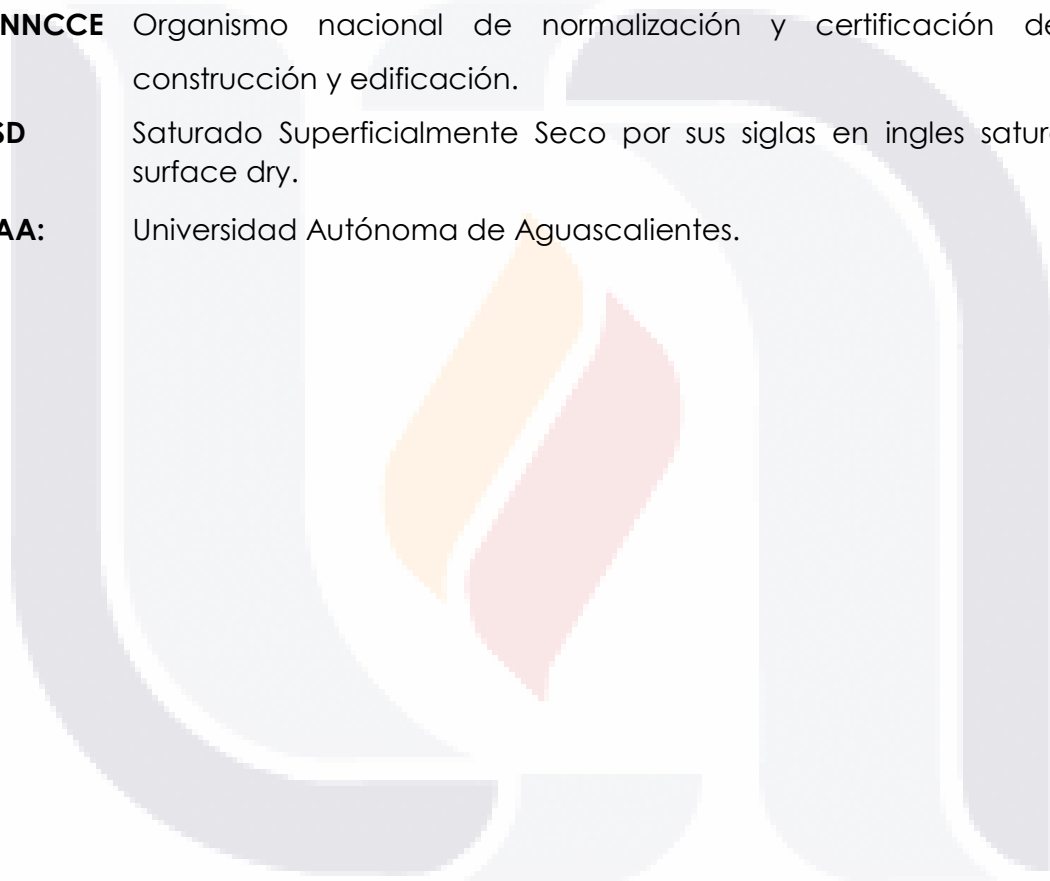
Figura 48. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra el módulo de finura del agregado pétreo con el cual se elaboró. ....121

Figura 49. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra el porcentaje de absorción del agregado pétreo con el cual se elaboró. ....122

Figura 50. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra la densidad del agregado pétreo con el cual se elaboró. ....124

## ACRÓNIMOS

- ASTM:** Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, por sus siglas en ingles American Society for Testing and Materials.
- IPPC** Directiva de Prevención y Control Integrado de la Contaminación por sus siglas en ingles Integrated Pollution Prevention and Control.
- M.F.** Módulo de finura.
- MNX** Norma Mexicana.
- ONNCCE** Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación.
- SSD** Saturado Superficialmente Seco por sus siglas en ingles saturated surface dry.
- UAA:** Universidad Autónoma de Aguascalientes.



## RESUMEN

Con el fin de evaluar si es posible utilizar la cal como material conglomerante de forma individual para la elaboración de morteros para pegado de piezas de mampostería en construcciones modernas, se plantea llevar a cabo una campaña experimental de tipo cuantitativa para obtener las características mecánicas de morteros elaborados a base de cal y agregados pétreos, obteniendo datos concisos que puedan ser comparados contra la normatividad vigente. Además de lo anterior es necesario conocer el comportamiento de los morteros de acuerdo a la dosificación con la cual son elaborados, con el propósito de conocer en qué grado cada variable involucrada durante su elaboración afecta sus características mecánicas finales y poder diseñar mezclas que se adapten a las necesidades de las obras en las cuales intervengan estos morteros de cal.

Para ello, se elaboran probetas de distintos tipos de morteros, variando el agregado pétreo, el tipo de cal, la proporción y por último el tiempo de fraguado de las probetas, esta última siendo la característica fundamental durante el proceso de fraguado de un mortero de cal, dado que estos adquieren su resistencia a lo largo del tiempo por medio del proceso de carbonatación. Con las muestras preparadas, se procede a su ensaye a compresión y se registran la totalidad de los datos para luego ser procesados estadísticamente y analizar en primera instancia si existe una discrepancia entre la resistencia a la compresión de las muestras y posteriormente evaluar si dicha diferencia es estadísticamente

Como resultado se demuestra que las variables que intervienen en la dosificación del mortero de cal, afectan las características mecánicas de dichos morteros, sin embargo, estas variaciones no son significativas para los periodos de tiempo analizados, dando como resultado que estos morteros de cal no cumplen con las normativas de construcción vigentes y por ende solo pueden ser usados en labores de restauración.

**Palabras clave:** Cal, mortero, compresión, densidad, dosificaciones.

## ABSTRACT

In order to evaluate if it is possible to use lime as a binder material individually for the preparation of mortars for bonding masonry pieces in modern buildings, it is proposed to carry out an experimental campaign of quantitative type to obtain the mechanical characteristics of mortars. elaborated based on lime and stone aggregates, obtaining concise data that can be compared against the current regulations. In addition to the above it is necessary to know the behavior of mortars according to the dosage with which they are prepared, with the purpose of knowing in what degree each variable involved during its elaboration affects its final mechanical characteristics and to be able to design mixtures that adapt to the needs of the works in which these lime mortars intervene.

For this, test tubes of different types of mortars are made, varying the stone aggregate, the type of lime, the proportion and finally the setting time of the test pieces, the latter being the fundamental characteristic during the setting process of a mortar lime, since these acquire their resistance over time through the process of carbonation. With the prepared samples, we proceed to its compression test and all the data are recorded and then be processed statistically and analyze in the first instance if there is a discrepancy between the resistance to compression of the samples and then evaluate if this difference is statistically

As a result, it is demonstrated that the variables that intervene in the lime mortar dosage, affect the mechanical characteristics of said mortars, however, these variations are not significant for the periods of time analyzed, as a result of which these lime mortars do not comply with the current construction regulations and therefore can only be used in restoration work.

**Key words:** Lime, mortar, compression, density, dosages.

# CAPÍTULO

1

## INTRODUCCIÓN



# TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Prólogo

La cal fue el principal material conglomerante utilizado en las construcciones humanas durante toda la historia hasta la aparición del cemento, lo cual ha provocado la caída en desuso de la cal. Algunos autores datan el uso de morteros de cal desde los comienzos de la historia del hombre, desde entonces fue el conglomerante por excelencia para todas las construcciones hasta la creación del cemento Portland a inicios del siglo XIX. Aunque los morteros hechos con estos cementos presentan un mayor endurecimiento inicial y una resistencia final más elevada, la cal presenta otras características muy favorables como lo son: buena plasticidad y trabajabilidad, ausencia de retracción, permeabilidad apreciable al vapor de agua (los muros "respiran") y no provocar eflorescencias debido a la ausencia de sales solubles.

Además, según estudios realizados por la Unión Europea presentados en la Ley "IPPC" ("Integrated, Prevention, Pollution and Control"), la producción de cal presenta un menor consumo energético y arroja una menor cantidad de contaminantes a la atmósfera en comparación con la industria del cemento. Esto se torna de vital importancia en estos tiempos en los cuales el hombre está comenzando a hacer conciencia del daño producido al medio ambiente y en los cuales la sustentabilidad ha cobrado un papel fundamental en todas las actividades humanas.

Por todo lo anterior resulta evidente que los morteros de cal son una opción adecuada para cualquier obra que no requiera de grandes resistencias a la compresión, reduciendo así la huella ambiental de la construcción y el costo monetario de la misma.

Es por ello que la presente tesis busca caracterizar los agregados pétreos de la región de Aguascalientes, con el propósito de identificar cómo se comporta cada tipo de mineral en una pasta de cal comercial y una tradicional, además de experimentar con diferentes proporciones de mezclas para poder observar el comportamiento de estos morteros y evaluar cuales son las dosificaciones que cumplen con la normativa vigente y cuáles dosificación son las que arrojan características favorables que cubran las necesidades de la industria de la construcción en la región de Aguascalientes.

## 1.2. Objetivo General.

Evaluar las propiedades mecánicas de morteros a base de cal con diferentes tipos de arenas encontradas en la región de Aguascalientes, mediante experimentos de laboratorio, con el propósito de conocer como cada tipo de arena, granulometría, proporción, tipo de cal y arena afectan en la resistencia a la compresión final del mortero, a fin de evaluar la manera de obtener un mortero apto para ser utilizado en las obras de construcción actuales, de acuerdo a los reglamentos vigentes y, conocer cuáles elementos afectan de manera más significativa la resistencia final de los morteros y de qué forma.

## Objetivos Particulares

- A. Determinar por medio de la investigación documental las principales características de los agregados pétreos empleados en la producción de morteros y conocer por medio de pruebas de laboratorio los valores de dichas características presentes en las arenas de la región de Aguascalientes.
- B. Realizar una investigación documental y en campo en empresas dedicadas a la producción de cal artesanal y cal comercial, para conocer y entender todos los procesos involucrados en su fabricación, así como las diferencias que existen entre ambos tipos de cal y como debería dividirse su uso de la manera más adecuada.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- C. Determinar la resistencia mecánica y densidad por medio de experimentación en laboratorio de especímenes de morteros fabricados con distintos tipos de cal, proporciones y arenas de la región.
  - D. Realizar un análisis estadístico que nos permita evaluar como cada característica involucrada en la elaboración del mortero afecta el nivel de resistencia a la compresión a fin de identificar como se modifica el comportamiento en relación a dichos valores, conociendo también cuáles variables favorecen más a la resistencia y que tipo de relación guardan con esta.

### 1.3. Alcances

El alcance de esta investigación será de una manera descriptiva, destinado a una caracterización físico-mecánica de agregados pétreos y morteros de cal a base de estos. Adicionalmente los alcances para este trabajo estarán limitados por la normativa mexicana vigente en materia de cal, morteros y agregados pétreos, así como por el cronograma del proyecto de tesis, en general el estudio estará acotado por los siguientes aspectos.

- A. Se enfocará en utilizar agregados pétreos de la región y distintos tipos de cal comerciales y tradicionales disponibles en la región.
- B. Se llevarán a cabo los experimentos que permitan evaluar y comparar con la normativa mexicana vigente las características mecánicas, tales como la resistencia mecánica, adherencia, retracción y densidad.

#### 1.4. Justificación

Se sabe que el tipo de agregado pétreo, así como su granulometría impacta de forma importante en el proceso de carbonatación de un mortero de cal y en sus características finales, estudios previos han demostrado que el contenido de agua de un mortero fresco modifica la velocidad de absorción de CO<sub>2</sub> y dicho contenido de agua está en función principalmente de los tamaños de las partículas de áridos (Arandigoyen & Álvarez, 2006).

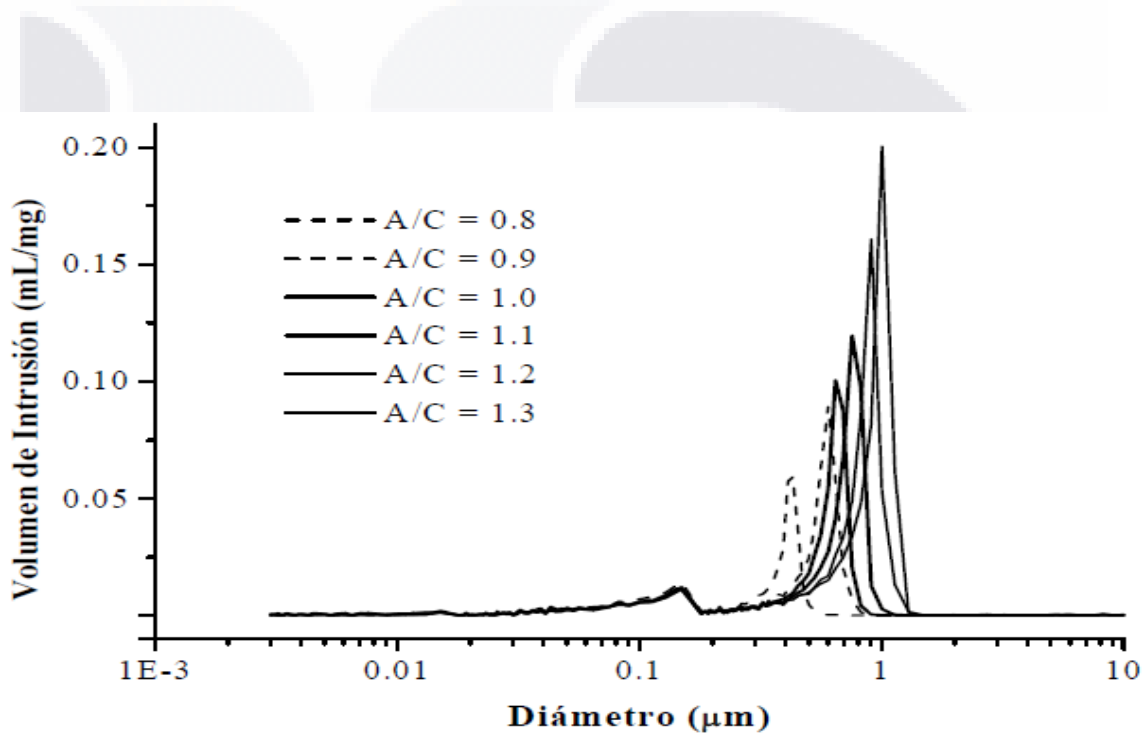
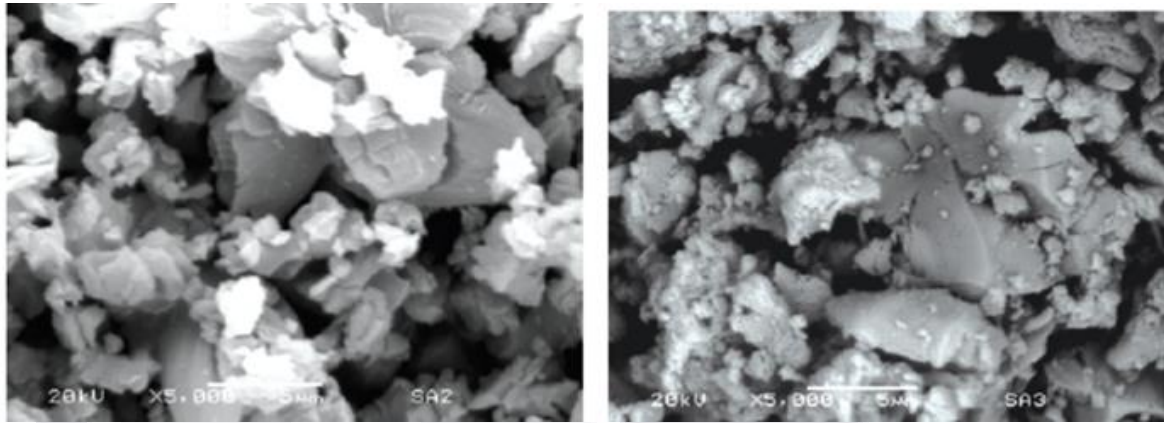


Figura 1. Absorción de agua contra diámetro de partícula de agregado (Arandigoyen & Álvarez, 2006).

Además, otro estudio abordó como la textura de los granos influencia la cohesión de los morteros de cal, concluyendo que áridos de silicio con superficies lisas y redondeadas no permiten una buena cohesión mientras que los de calcificos, gracias a su superficie rugosa, se comportan mejor ante la cohesión. (Arizzi & Cultrone, 2012)



*Figura 2. Vista microscópica de óxido de calcio (izquierda) e hidróxido de calcio (derecha) (Arizzi & Cultrone, 2012).*

Sin embargo, los estudios antes mencionados no abarcan de forma integral la cuestión de los agregados en función de su dosificación y de la resistencia a la compresión, adherencia, retracción, densidad y permeabilidad del mortero, además de que no han sido llevados a cabo con agregados propios de la región de Aguascalientes.

Esta falta de información confiable ha provocado la caída en desuso de la cal por parte de la industria de la construcción en el estado de Aguascalientes, aun cuando esta genera una menor huella ambiental en comparación con otros materiales cementantes como el cemento portland, y aún más, la cal presenta costos menores que permiten un ahorro considerable del recurso económico en una construcción.

Es por ello que el presente trabajo busca brindar los conocimientos necesarios para que la cal pueda volver a ser considerada como una opción viable para la industria de la construcción en la región de Aguascalientes.

## 1.5. Hipótesis

“El tipo de mineral que conforma el agregado pétreo, así como su granulometría y dosificación afectan las propiedades mecánicas de los morteros a base de cal.”

## 1.6. Metodología

Esta investigación tendrá un carácter cuantitativo y se enfocará en realizar una caracterización mecánica de agregados pétreos en morteros a base de cal, utilizando distintos agregados de la región de Aguascalientes y diferentes tipos de cal comerciales y tradicionales. Para lo lograr lo anterior se plantea la realización de las siguientes fases:

- A. La ejecución de una exhaustiva revisión del estado del arte, ubicando las investigaciones pertinentes, referentes a la cal, sus propiedades, los morteros de cal y sus comportamientos, así como de los agregados pétreos.
- B. La definición del marco teórico a partir de los conocimientos disponibles en artículos científicos y tesis de actualidad en materia de cal, agregados y morteros.
- C. Se tomarán muestras de arenas de diversos bancos de materiales de la zona, buscando recolectar diferentes tipos de arenas y granulometrías, con la finalidad de obtener muestras representativas de los áridos más comunes en la región.
- D. El diseño de probetas que permitan realizar las pruebas necesarias al mortero de cal de la forma más eficiente y económica dependiendo cada tipo de experimento, a fin de poder llevar a cabo el mayor número de experimentos.
- E. Los ensayos de compresión, adherencia, retracción, densidad, permeabilidad y comportamiento térmico de acuerdo a los procedimientos que dictan las normas mexicanas aplicables a cementantes y morteros, utilizando los recursos disponibles en el laboratorio de mecánica de suelos de la UAA y en caso de requerirse un equipo que no se encuentre en las instalaciones se buscara una estancia de

investigación que permita acceder a los recursos necesarios. Dichas pruebas se realizarán a morteros elaborados con diferentes tipos de áridos y en diferentes proporciones, a fin de poder observar que características y cantidades de agregado pétreo brindan morteros con comportamientos mecánicos más favorables. Además, se tendrá en cada una de las pruebas un mortero comercial como testigo con el propósito de comparar los resultados obtenidos.

- F. El análisis exhaustivo de los resultados obtenidos de la experimentación para posteriormente realizar un análisis estadístico de dichos resultados, con la finalidad de llevar a cabo inferencias acerca de las propiedades mecánicas de los diversos morteros ensayados. Además, se determinará si alguno es viable para la industria de la construcción en la región de Aguascalientes dentro de los parámetros marcados por la normativa vigente.

# CAPÍTULO

# 2

## ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO



## 2. ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

### 2.1. Morteros

Se define como "la mezcla de aglomerante y/o conglomerante inorgánico (cal, cemento, yeso, arcillas...), árido y agua; a veces el mortero puede contener otros componentes orgánicos y/o inorgánicos que mejoran sus propiedades (aditivos). Todos estos componentes se mezclan en tales proporciones que permitan que la masa resultante sea trabajable cuando está fresca, con unas propiedades físico-mecánicas aceptables (resistencia a la rotura, deformabilidad, adherencia, porosidad y permeabilidad al agua entre otras), y que tenga cierta resistencia al endurecerse". (Cazalla Vázquez, 2002)

### 2.2. Materiales aglomerantes y conglomerantes

Se definen como "los componentes principales de un mortero y los responsables de unir adecuadamente los elementos estructurales en una construcción ya que permiten el fraguado y endurecimiento del mismo; deben estar formados por partículas muy finas y ser más reactivos químicamente que el resto de los componentes". (Cazalla Vázquez, 2002)

Tanto aglomerantes como conglomerantes son materiales que tienen la propiedad de adherirse, pegarse y unirse a otros, empleándose para unir materiales generalmente pétreos, como son las gravas, las arenas, unir materiales cerámicos, etc., para formar y construir diferentes elementos como pueden ser obras de fábrica, recubrir éstas con revestimientos, formar mezclas plásticas (pastas, morteros y hormigones), que después de endurecer adquieren un estado sólido. (Gómez Domínguez, 2007)

#### 2.2.1. Aglomerantes

Según el Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua, el aglomerante: "Aplicase al material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efectos de tipo exclusivamente físico. Son aglomerantes el betún, el barro o arcilla, etc.".

Entre los aglomerantes se encuentran todos los materiales que mediante procesos "físicos" de secado, de evaporación de un disolvente, produce un endurecimiento que aglutina a los elementos y une cohesionando "pegando" a los mismos; pero su composición química permanece inalterable. (Gómez Domínguez, 2007)

### 2.2.2. Conglomerantes

Sin embargo, define "conglomerante" como: "Aplicase al material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto por efecto de transformaciones químicas en su masa, que originan nuevos compuestos.

En un conglomerante el proceso de unión se realiza por procedimientos químicos, hay reacciones internas en el conglomerante que modifican su composición química, se hidratan y adquieren otras características tanto químicas como físicas. Es el caso del yeso, la cal o el cemento. Por este motivo estos elementos no son aglomerantes, sino conglomerantes. (Gómez Domínguez, 2007)

### 2.1.3. Árido

Se define como "el material pétreo natural manipulado, cuyo tamaño está comprendido entre 0.075 y 5 mm; requisito este del tamaño que permite diferenciar a los morteros de los concretos. Su misión principal es la de estabilizar el volumen, hacer de relleno y disminuir la retracción durante el secado del mortero. Además, proporcionan color y textura. El árido debe ser resistente desde el punto de vista físico y químicamente inerte. (Cazalla Vázquez, 2002)

### 2.1.4. Agua

Es el componente que permite agrupar al resto de los elementos del mortero, permitiendo a demás que este pueda ser trabajable, y en contacto con aglomerantes hidráulicos comienza el proceso de fraguado.

## 2.2. La cal

La cal (hidróxido cálcico o magnésico) es un producto químico que puede encontrarse de forma natural, el cual el hombre ha utilizado como material conglomerante prácticamente desde los inicios de la historia, cuando éste empezó a usar el fuego para calentarse en cuevas de rocas calizas o cuando se preparaba la comida en hogares construidos de dicho material. La caliza calcinada se apagaba en contacto con la humedad o la lluvia, y el polvo resultante presentaba propiedades ligantes de materiales. (Alvarez, Martin, & Garcia Casado, 1995)

Una definición más amplia de la cal, presentada por Arredondo en su estudio de materiales es la siguiente: "Todo producto, sea cual fuere su composición y aspecto físico, que proceda de la calcinación de piedras caliza. Después del proceso de calcinación hay que proceder a la extinción o apagado del producto anhídrido, con lo cual se obtiene un material hidratado den forma pulverulenta o pastos, según la cantidad de agua añadida". (Arredondo, 1972)

### 2.2.1. Ciclo de la cal

La materia prima para la producción de cal son las piedras calizas, rocas de formación sedimentaria compuestas en su mayoría por carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) y en menor cantidad algunos otros compuestos químicos a los cuales se les considera impurezas, como lo son el carbonato de magnesio ( $\text{MgCO}_3$ ) y las arcillas de sílice, para que la cal pueda ser considerada de buena calidad, es decir, que mantenga sus propiedades ligantes dichas impurezas deben mantenerse por debajo del 5%. (García Salas, 2016)

Desde que esta materia prima es extraída hasta el momento en que es utilizada dentro de la construcción, la cal atraviesa una serie de procesos conocidos como "ciclo de la cal" (Figura 1).



Figura 3. Ciclo de la cal (García Salas, 2016).

Como podemos observar en la imagen anterior que describe todo el ciclo de transformación de la cal, el primer proceso al cual es sometida la piedra caliza es el de calcinación, en el cual la piedra es sometida a temperaturas de entre 900 °C y 1200 °C, lo cual logra una disociación química que desprende Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) a la atmosfera y arroja Oxido de Calcio ( $\text{CaO}$ ), conocido comúnmente como cal viva, la cual aún carece de propiedades cementantes.

A continuación, es necesario someter a la cal viva al proceso de hidratación o apagado, el cual consiste en agregar cantidades de agua de forma controlada para conseguir que se convierta en Hidróxido de Calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), al cual se le conoce como cal hidratada o apagada. Este proceso genera una reacción exotérmica que libera energía en forma de calor la cual evapora una parte del agua, dicho proceso no resulta contaminante puesto que solo genera una emisión de vapor de agua a la atmosfera. La cantidad de agua añadida determinará si la cal apagada será una en forma de polvo si se añadió solo la cantidad justa de agua o una pasta de cal si se agrega un exceso de agua. (Rodríguez Haro, 2016)

La cal hidratada es la más utilizada dentro de la industria de la construcción puesto que presenta propiedades más favorables y no es tan agresiva como la cal viva, es mezclada con áridos y se le agrega agua para permitir el amasado y dar como resultado una mezcla trabajable que adquirirá resistencia al secarse.

Es importante señalar que dependiendo de la composición química de la piedra caliza es posible llegar a obtener dos tipos de cal, las cuales presentaran diferentes propiedades y aplicaciones. Estos dos tipos corresponden a la cal aérea, un cementante área y a la cal hidráulica, un cementante hidráulico. (García Salas, 2016)

### 2.2.2. Cal aérea

Esta cal es el producto de la calcinación de calizas con porcentaje de impurezas menor al 5%. Su nombre proviene de su capacidad de endurecer mediante la exposición al aire, lo cual lleva a cabo el proceso de carbonatación, mediante el cual la cal reacciona con el Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ) de la atmosfera formando Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ) completando el ciclo de la cal. El carbonato cálcico formado mejora la resistencia debido a la modificación microestructural. (García Salas, 2016)

### 2.2.3. Cal hidráulica

Esta cal es el producto de la calcinación de rocas calizas con un contenido de impurezas entre 10% y 20%. Se le da ese nombre dado que después de ser amasada, endurece tanto por el proceso de carbonatación al contacto con el aire, como al contacto con el agua. Esta propiedad le confiere la capacidad de fraguar en ambientes húmedos o de inmersión total en agua. Además, esta cal presenta resistencias mecánicas más elevadas y en menores tiempos que la cal aérea. (García Salas, 2016)

### 2.2.4. Proceso de producción de la cal

A continuación, se describe el proceso de producción de la cal hidráulica, extraído de la empresa Calidra (2011).

A) Extracción. Se retira material vegetal, procediendo a perforar según el plan de minado diseñado, cargando después los explosivos para el tumbado, se carga el material ya fragmentado y se transporta al sistema triturador.

Trituración. Los fragmentos de roca se reducen de tamaño tamizándolos, ya homogéneos, se transportan mediante bandas hacia los hornos; para rotatorios se requieren tamaños pequeños.

B) Calcinación. La cal se produce por cocción de las rocas calizas mediante flujos de aire caliente que circula en los huecos o poros de los fragmentos rocosos; las rocas pierden bióxido de carbono produciéndose el óxido de calcio.

Debido al tamaño y forma homogénea de los fragmentos, la cocción ocurre de la periferia hasta el centro quedando perfectamente calcinada la roca.

C) Enfriamiento. Posteriormente se somete a un proceso de enfriamiento para que la cal pueda ser manejada y los gases calientes regresen al horno como aire secundario.

D) Inspección. El proceso siguiente es la inspección cuidadosa de muestras para evitar núcleos o piezas de roca sin calcinar.

E) Cribado. Se somete a cribado separando a la cal viva en trozo y segmentos de la porción que pasará por un proceso de trituración y pulverización.

F) Trituración y pulverización. Este paso se realiza con el objeto de reducir aún más el tamaño y así obtener cal viva molida y pulverizada, la cual se separa de la que será enviada al proceso de hidratación.

G) Hidratación. Consiste en agregar agua a la cal viva para obtener la cal hidratada. A la cal viva y la cal alta en calcio se le agrega agua y es sometida a un separador de residuos para obtener cal hidratada normal. Únicamente la cal viva pasa por un hidratador a presión y posteriormente a molienda para obtener cal siderúrgica hidratada a presión.

H) Envase y embarque. La cal es llevada a una tolva de envase e introducida en sacos y transportada a través de bandas hasta el medio de transporte que la llevará al cliente.

### 2.3. Morteros de cal

La cal como ya vimos fue el conglomerante por excelencia para la fabricación de morteros hasta la aparición del cemento portland que la desplazo casi en su totalidad de la industria de la construcción, sin embargo, en la actualidad sigue siendo la más empleada en la fabricación de morteros con propósitos de restauración dado que presenta múltiples ventajas, como las que enuncia a continuación:

- A. Buena plasticidad y trabajabilidad.
- B. Ausencia de retracción.
- C. Permeabilidad apreciable al vapor de agua (los muros "respiran"). Evita condensaciones.
- D. No provoca eflorescencias debido a la ausencia de sales solubles.

- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- E. Buen aislamiento térmico y acústico.
  - F. Realización capas más finas consiguiendo unos resultados inalcanzables con otros materiales.

La mezcla de cal con agua y otros productos, hace que se produzcan dos fenómenos:

- I. Al tiempo de mezclarlos (diferente según la mezcla), se produce un aumento de la viscosidad debido a la unión de estos materiales comenzando fraguado. El FRAGUADO es el proceso en el cual se empieza a producir la transformación de los componentes desde la colocación en estado semilíquido o plástico hasta llegar al estado sólido.
- II. Final del fraguado la mezcla alcanza el estado sólido comenzando el ENDURECIMIENTO, mediante el cual el material empieza a adquirir resistencia. Dependiendo de los materiales, se tardarán más o menos días en alcanzar la máxima resistencia. Por ejemplo en el hormigón el fraguado puede tardar 2-3 días y el tiempo que transcurre desde la puesta en obra hasta adquirir la resistencia característica es de 28 días mientras que en el caso de cal el proceso de endurecimiento provocado por la carbonatación puede durar siglos enteros.

La doctora (Cazalla Vázquez, 2002) como parte de su tesis enfocada en la aplicación de morteros de cal en el patrimonio histórico busco crear distintos tipos de morteros de restauración teniendo en cuenta la disponibilidad de los materiales en el terreno con el fin de facilitar la labor de los profesionales con competencias en la conservación del patrimonio arquitectónico, además de poner a punto un método de elaboración de probetas normalizadas para este fin. Logro recopilar y construir una importante base de datos acerca de las características composicionales y texturales de los morteros, así como numerosos parámetros relativos a sus propiedades físicas y mecánicas. Concluyo que los morteros elaborados con cal dolomítica en polvo como morteros de restauración, dado su mal comportamiento en los ensayos efectuados.



Observo que el mortero con mejor comportamiento físico-mecánico fue el elaborado con cal envejecida, es decir, una pasta de cal elaborada de forma tradicional con un tiempo de añejamiento alto. Aunque esta tesis arroja resultados muy importantes dentro del campo de los morteros de cal, y utiliza tres tipos de áridos para sus ensayos, árido silíceo, dolomítico y calcítico, no abarca en su totalidad los cambios en las propiedades de un mortero debido a la dosificación de agregados, dado que solo se utilizaron dosificaciones de 1:4 y 1:3, se observó que efectivamente la proporción de agregado modifica los resultados de los ensayos, pero no se abarcó a detalle que dosificación presentaría las características más óptimas. Lo cual abre el camino para la presente tesis que busca crear una metodología propia para el diseño de mezclas.

Los investigadores españoles (Arandigoyen & Álvarez, 2006) realizaron un trabajo en el cual evalúa el proceso de carbonatación en pastas de cal con distinta relación agua conglomerante, experimento con la carbonatación teniendo en cuenta la variación del peso como consecuencia de la absorción de CO<sub>2</sub>. Observo que el agua contenida en las pastas de cal se encuentra exclusivamente adsorbida sobre la superficie de los poros motivo por el cual no hay diferencia en el contenido en agua entre pastas con diferente relación A/C. Concluyo que, por tanto, el contenido en agua es sólo función de la humedad relativa y del tamaño de partícula.

El doctor (Rosell, 2013) como parte de su tesis realizó una investigación enfocada en la caracterización a nivel microscópico de la cal y en el comportamiento deformacional en estado fresco. Al mismo tiempo, se centró en verificar la aplicabilidad de distintas herramientas de medida para caracterizar las pastas de cal y la cal en pasta.

Para su realización escogió algunas de los diferentes tipos de cal disponibles en el mercado español y que pudieran servir de ejemplo de las distintas maneras de fabricar y de producir este material, y estudio: la caracterización de las partículas que componen las pastas de cal mediante la granulometría láser, la Difracción de Rayos X (DRX) y la microscopía electrónica, también estudio el

comportamiento deformacional de la cal a partir de la medida de la viscosidad. Llego a la conclusión de que las pastas de cal añejadas presentan en general una mayor viscosidad que la cal hidráulica comercial, observo además que el proceso de apagado es una variable que afecta el tamaño de las partículas generadas, lo cual termina por modificar la viscosidad que tendrá el mortero de cal. Este trabajo aporta información basta para poder explicar el porqué de las características físico mecánicas de un mortero de cal, puesto que estudia la cal y el agregado desde un punto de vista microscópico, lo cual, si bien no es de vital interés para la industria de la construcción que solo busca emplear el mortero mas adecuado, si se vuelve una información de importancia para los investigadores del ramo, misma que puede permitir desarrollar un entendimiento mayor sobre como poder realizar morteros con características más efectivas.

Los investigadores Galván Ruiz y Velázquez Castillo (2011) de la universidad de Querétaro llevaron a cabo una caracterización de morteros de cal tomando en cuenta que estos morteros son materiales dinámicos, continúan interactuando con el ambiente después de endurecer durante el proceso de carbonatación y se adaptan a los cambios en las estructuras. Por ello realización pruebas que les permitieran identificar las características químicas de los morteros a lo largo de las diferentes etapas del ciclo de la cal, esto les permitió observar las etapas que experimentas los materiales dentro del ciclo de la cal y la reactividad de los componentes químicos que se forman en cada fase. Comprobaron la naturaleza heterogénea en composición química que presenta la piedra caliza y la relativa abundancia de elementos pesados dentro de una producción de cal hidratada. Concluyeron a raíz de sus resultados que la Norma Mexicana NMX-C-003-ONNCCE-1996 debería dejar de ser voluntaria y pasar a ser de carácter obligatorio dado que considera características muy pobres para la cal hidratada.

En la universidad los investigadores Arizzi & Cultrone, 2012 estudiaron la influencia de la interface de árido y matriz en mortero de cal, para ello utilizaron morteros de cal aérea elaborados con áridos silíceo y calcítico en proporciones de 1:3, 1:4y 1:6 y estudiaron sus propiedades físico-mecánicas. Esto les permitido observar que

la cohesión entre matriz y árido está principalmente influenciada por la textura de los granos del árido. Se probó que los granos de áridos silíceo, caracterizados por una superficie lisa y redondeada, no permiten una buena adhesión de las partículas de la matriz. Por otro lado, los granos de árido calcítico permiten una mejor cohesión, sobre todo gracias a su superficie rugosa.

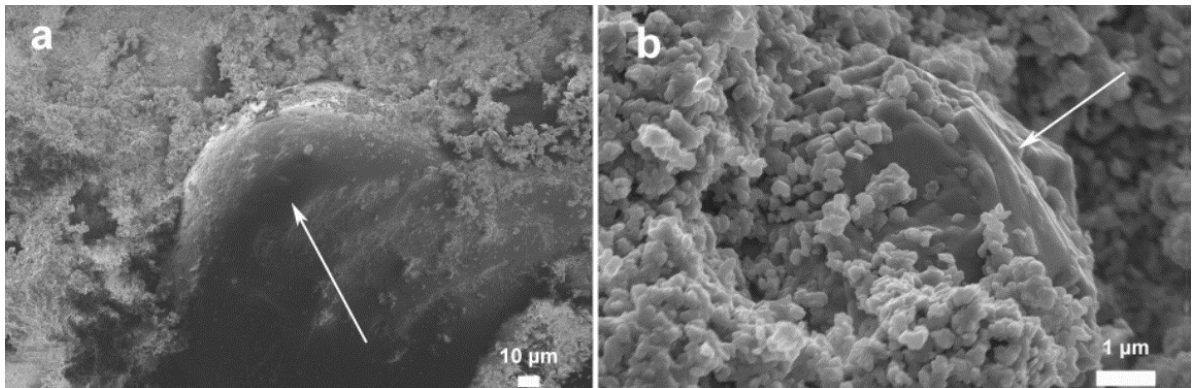


Figura 4. Microscopía electrónica de barrido de morteros de cal con áridos silíceo (a) y calcítico (b) (Arizzi & Cultrone, 2012).

En este trabajo se ha demostrado que las características de la interface entre matriz y árido de morteros de cal tiene una influencia considerable en las morfología, textura, mineralogía y propiedades físico-mecánicas de estos materiales. La investigación demuestra la importancia de seleccionar cuidadosamente los materiales para el diseño de morteros, lo que es posible solo gracias a un conocimiento detallado de las características de los mismo.

# CAPÍTULO

3

MARCO TEÓRICO

### 3. MARCO TEORICO

Dentro de las prestaciones que ofrece un mortero debemos distinguir dos etapas diferenciadas por su estado físico, que se denominan estado fresco y estado endurecido. La primera responde a la fase del mortero una vez mezclado y amasado. Su duración varía de acuerdo con el tiempo de fraguado requerido por la proporción que integra la mezcla, así como por la temperatura, humedad, etc. En esta etapa el mortero es plástico y trabajable, lo que permite su puesta en obra. Superada esta fase el mortero endurece hasta consolidarse. Por ello, es preciso diferenciar diversas propiedades y exigencias en función del estado en que se encuentre el mortero.

Las propiedades relativas al estado fresco se relacionan con la puesta en obra e influirán principalmente en el rendimiento y la calidad de la ejecución. Los requisitos derivados, por tanto, responden a las exigencias del constructor y operarios.

Las propiedades en estado endurecido son estipuladas por las características de los proyectos y por el cumplimiento de las exigencias normativas.

#### 3.1. Cal en la construcción

Un requisito esencial en toda restauración de un edificio del Patrimonio Histórico es la utilización de materiales compatibles.

La cal es por excelencia el material utilizado desde tiempos remotos y a lo largo de toda la geografía en construcciones históricas. El amplio abanico de la utilización de cal, abarca desde la pintura al fresco, pasando por su función de aglomerante en estructuras constructivas hasta los revestimientos. (De la Garza, 1991)

El proceso general de obtención de cal, comienza por la calcinación de la piedra caliza en un intervalo de temperaturas de 800 °C a 1200 °C, conformada por  $\text{CaCO}_3$  e impurezas propias de la formación de la piedra caliza. El producto

obtenido de la calcinación es el óxido de calcio CaO, conocido también, como cal viva debido a la reactividad que tiene dicha sustancia química. El CaO es "apagado" con agua para la formación de cal apagada Ca(OH)<sub>2</sub>.

Sin embargo, a nivel industrial el proceso de obtención sufre modificaciones, algunas industrias prefieren tener el control del proceso desde la materia prima y otras en la etapa del "apagado", donde también varía la presentación final de la cal ya sea en pasta o cal en polvo. Por dichas variaciones en el proceso, la cal adquiere diferentes propiedades tanto físicas como químicas siendo esenciales su conocimiento, ya que influye decisivamente en el comportamiento de la aplicación del patrimonio edificado.

### 3.2. Granulometría

"La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades mecánicas.

La granulometría y el tamaño máximo de agregado afectan las proporciones relativas de los agregados, así como los requisitos de agua y cemento, la trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto.

Como se menciona en la misma definición de granulometría esta característica puede afectar de manera directa el peso volumétrico de un concreto, de la misma forma que afecta un mortero, y si se tiene una curva granulométrica suave, o bien un módulo de finura adecuado el agregado que se emplea puede ayudar a una mejor distribución de esfuerzos dentro del mismo mortero lo que eventualmente puede llegar a incrementar la resistencia a la compresión de los morteros una vez que estos se endurecen; también si se tiene una curva granulométrica suave se puede suponer que aumentaría la densidad de un material que sea creado a partir del agregado ya que la granulometría está directamente ligada a la porosidad de un material o bien del contenido de

vacíos que se genera al encontrar las partículas en un estado de compactación al que se pretende llegar un mortero o concreto.

### 3.3. Fluidez

Es la prueba que se le realiza al mortero para determinar de manera indirecta el contenido mínimo del agua que requiere para que la mezcla sea lo suficientemente fluida para su uso como mortero de pega o de relleno.

Esta prueba consiste en obtener el porcentaje que aumenta el diámetro original de la base de un cono truncado formado previamente con un molde al centro de una mesa de fluidez, la medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas (25) por medios mecánicos. La normativa NMX-C-061-ONNCCE nos indica que el diámetro del mortero para pegado de piezas deberá rondar entre un 105 a 130 % de su diámetro original.

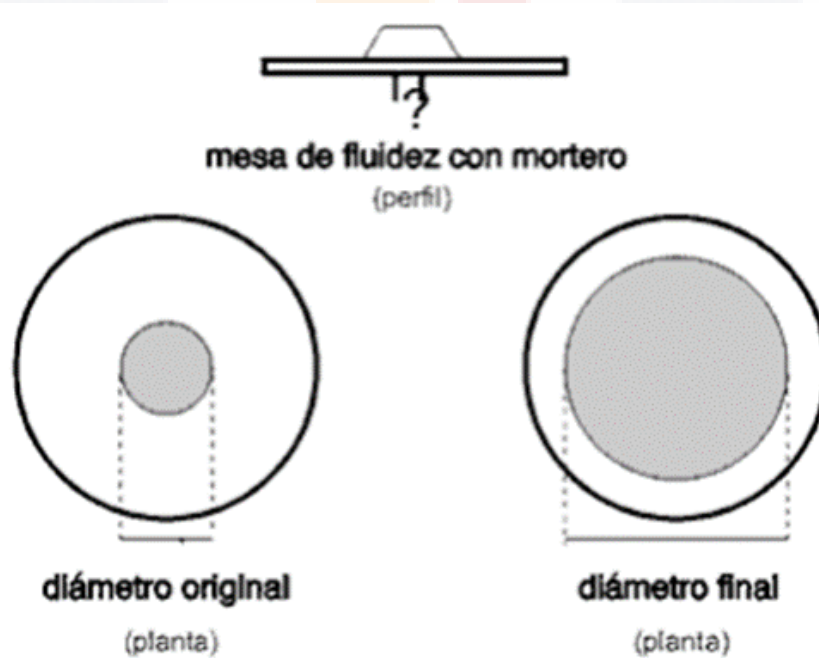


Figura 5. Diagrama de medición de diámetro en mesa de fluidez (NMX-C-061-ONNCCE).

### 3.4. Resistencia a la compresión

Es una prueba mecánica para determinar la resistencia de un material a la compresión, en este caso, mortero de pasta de cal hidratada. Esta prueba está basada y sustentada por la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE 2002, la cual nos dice que para el ensaye en una prensa hidráulica se debe aplicar la carga sobre el espécimen con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga.



Figura 6. Prensa hidráulica para pruebas de compresión.



### 3.5. Absorción de agua

La absorción es el contenido de humedad presente en un agregado cuando este se encuentra en el estado de SSD (cuando este tiene agua en su interior, pero no en su exterior) y esto influye directamente en la cantidad de agua de mezclado que se añadirá a un mortero y a su vez reflejará tanto la trabajabilidad como la contracción de los especímenes y su durabilidad. Su importancia radica en que la absorción determina la permeabilidad del mortero que forma las juntas. Si el mortero es permeable al agua, transmitirá ésta hacia el interior originando la consiguiente aparición de humedades por filtración. Además, con la succión del agua exterior se favorece el tránsito de partículas o componentes no deseables para la durabilidad del conjunto constructivo, como en el caso de las eflorescencias. (ASTM C-128-97)

La absorción depende de la estructura capilar del material, por tanto, cuanto más compacto sea un mortero, menor será la red capilar y, en consecuencia, menor absorción presentará.

### 3.6. Peso específico

Es el vínculo existente entre el peso de un cierto material y su volumen correspondiente.

El peso específico de los materiales empleados para la elaboración de un mortero tendrá un impacto inmediato en la densidad del mortero en estado fresco, que a su vez puede o no influir en su trabajabilidad, pero tendrá un fuerte impacto en la densidad y peso volumétrico del mortero en su estado endurecido.

### 3.6. Normatividad

La prueba de que no existe suficiente investigación que respete a la cal como material aglomerante único en morteros es que no hay mención en las "NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS PARA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA" en México.

En dicha norma se menciona que los morteros que pueden ser empleados deben de utilizar cemento; sin embargo, se permite el uso de la cal hidratada en la elaboración de morteros mientras se emplee cal hidratada que cumpla con los requisitos especificados en la norma NMX-C-003-ONNCCE.

Los morteros que se empleen en elementos estructurales de mampostería según lo indican las normas técnicas deberán cumplir con los requisitos siguientes:

- a) Su resistencia a compresión será por lo menos de 4 MPa (40 kg/cm<sup>2</sup>).
- b) Siempre deberán contener cemento en la cantidad mínima que se indica en la siguiente tabla.

*Tabla 1. Resistencia a la compresión de morteros (NMX-C-003-ONNCCE).*

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena	Resistencia a la compresión (Kg/cm <sup>2</sup> )
I	1	-	0 a 1/4	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	125
I	1	0 a 1/2	-		125
II	1	-	0 a 1/4		75
II	1	1/2 a 1	-		75
III	1	-	1/2 a 1 1/4		40

- c) La relación volumétrica entre la arena y la suma de cementantes se encontrará entre 2.25 y 3. El volumen de arena se medirá en estado suelto.
- d) Se empleará la mínima cantidad de agua que dé como resultado un mortero fácilmente trabajable.

# CAPÍTULO

4

## METODOLOGÍA

## 4. METODOLOGÍA

La finalidad de esta campaña experimental fue realizar una caracterización de las propiedades mecánicas de los morteros de cal hidratada dosificados con diferentes tipos y granulometrías de áridos, a fin de evaluar como impactan en las características finales de los morteros.

### 4.1. Objetivos de la experimentación

Caracterizar físicamente diferentes tipos de áridos comunes en la región de Aguascalientes para posteriormente fabricar probetas con estos distintos tipos de agregados y obtener los resultados a compresión de la pruebas, con el propósito de evaluar si es posible dosificar un mortero de cal que cumpla con las normatividades vigentes en materia de construcción y observar si es posible proponer una metodología de dosificación que permita predecir el comportamiento mecánico del mortero a base de cal.

### 4.2. Materiales utilizados

Los materiales utilizados para la realización de este proyecto fueron: cal en pasta con 6 meses de añejamiento, de la marca OXICAL ®, cal hidratada en polvo de la marca CALIDRA ®, arena de río la lavada y sin lavar, y arena producto de trituración, ambos tipos de arenas obtenidas de diversos bancos de la región de Aguascalientes, lo anterior con la finalidad de obtener distintos tipos de granulometrías.

#### 4.2.1. Cal en polvo

Es el nombre comercial del hidróxido de calcio, que se forma al agregarse agua al óxido de calcio o cal viva para que una vez apagada (hidratada) pueda utilizarse. Los albañiles, cuando vierten agua sobre cal viva, dicen que la “apagan”. Cal apagada es el nombre vulgar del hidróxido de calcio. El apagado exotérmico; es decir, que en este proceso se desprende gran cantidad de calor que evapora parte del agua utilizada. La cal “apagada” tiene un volumen tres veces mayor que el de la cal viva.

Tabla 2. Ficha técnica cal en polvo.

<b>Nombre comercial: Cal Hidratada</b>			
Marca:	Calidra		
Formula Química:	Ca(OH) <sub>2</sub>		
Nombre Químico:	Hidróxido de Calcio		
Características Químicas:			
Ca(OH) <sub>2</sub>	%	82	
Análisis Químico:			
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≤	0.40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	≤	0.15
MgO	%	≤	1.00
SO <sub>3</sub>	%	≤	1.00
SiO <sub>2</sub>	%	≤	1.20
Características Físicas:			
Granulometría	Retenido		
malla #200	%	10	
malla #100	%	0	
Densidad	Kg/m <sup>3</sup>	600	

#### 4.2.2. Cal en pasta

Óxido de Calcio de Alta Pureza (CaO) apagado en artesa tradicional y cernido, apagado recién salido del horno para evitar así su carbonatación precoz.

Tabla 3. Ficha técnica cal en pasta.

<b>Nombre comercial:</b>		<b>Cal Hidratada</b>	
Marca:	Oxical		
Formula Química:	Ca(OH)2		
Nombre Químico:	Hidróxido de Calcio		
Características Químicas:			
Ca(OH)2	%	92	
Análisis Químico:			
Al2O3	%	≤	0.01
Fe2O3	%	≤	0.10
MgO	%	≤	0.05
SO3	%	≤	0.20
SiO2	%	≤	0.10
Características Físicas:			
Granulometría	Retenido		
mall #200	%	5	
mall #100	%	0	
Densidad	Kg/m3	700	

#### 4.2.3. Agregados pétreos

Se utilizaron arenas de río y triturada, procedente de diversos bancos de materiales de la región de Aguascalientes para la elaboración de los morteros. Se tomaron muestras de los siguientes bancos de materiales del estado:

Tabla 4. Bancos de material seleccionados.

CODIGO	ARENA	NOMBRE BANCO	NÚMERO DE BANCO	LOCALIZACIÓN	X	Y
A1	ARENA LAVADA DE RIO 1	EL TANQUE	AG-003	COMUNIDAD TANQUE DE LOS JIMÉNEZ	769668	2403795
A2	ARENA LAVADA DE RIO 2	BANCO ORANGEL	AG-52	KM 2 DE LA CARRETERA CALVILLO	772525.09	2423637.94
A3	ARENA SIN LAVAR	BANCO ORANGEL	AG-52	KM 2 DE LA CARRETERA CALVILLO	772525.09	2423637.94
A4	ARENA TRITURADA RIOLITA	BANCO DE RIOLITA	AGS-071	CARR. JESÚS MARÍA - LOS ARQUITOS KM. 3	770500	2430405
A5	ARENA TRITURADA CALIZA	BANCO TEPEZA	AG-047	KM 1.84, MARGEN DERECHO CARRETERA TEPEZALA -ASIENTOS	793080	2426702

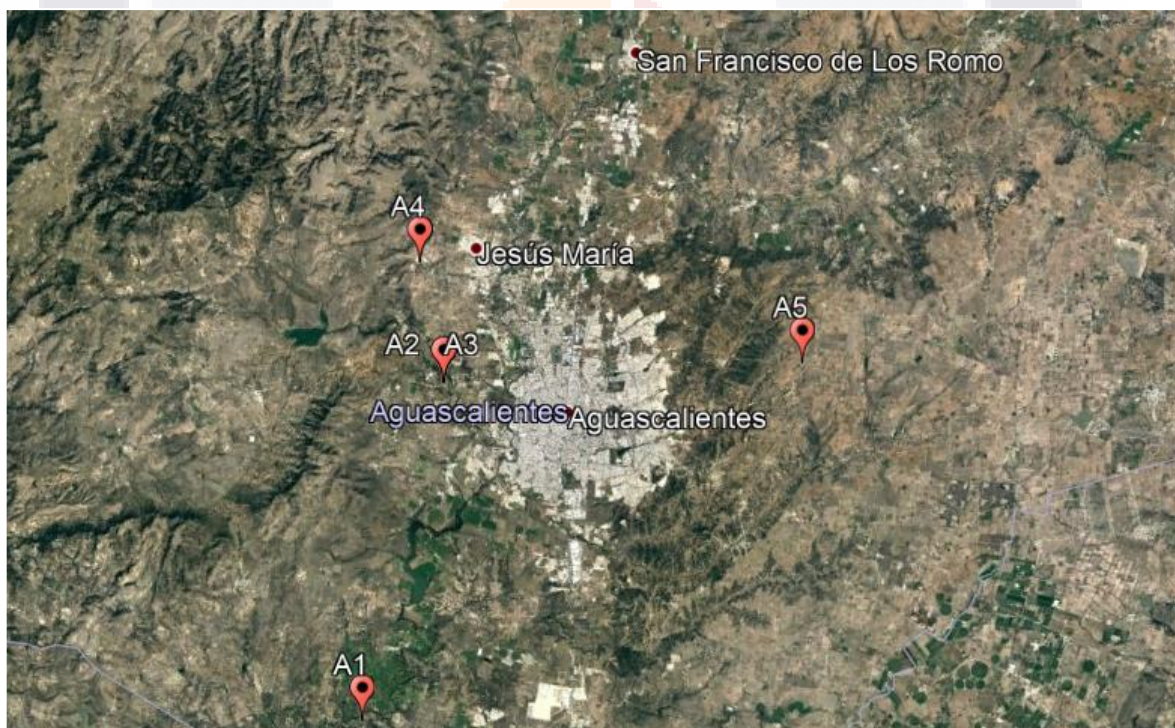


Figura 7. Bancos de material seleccionados.

Se consideró que el conjunto de estas muestras era suficiente para generalizar las características de las arenas presentes en la región de Aguascalientes ya que se contaba con arenas trituradas, así como arenas de río tanto lavadas como sin lavar, considerando que no es fácil encontrar arenas que difieran mucho a estas y que en su mayoría se utilizan arenas de río para obras que fabriquen sus propios morteros y concretos, mientras que las arenas trituradas son más utilizadas en concretaras que lleven un mejor control de sus agregados.

#### 4.3. Análisis Granulométrico

Inicialmente se llevó a cabo un proceso de preparación de las muestras de arena que se recolectaron el cual consistió en realizar el secado de las mismas dado que estas presentaban contenido de humedad, para ello, se extendieron sobre charolas para evitar su contaminación, las cuales se dejaron a la intemperie permitiendo de este modo que el sol acelerara el secado, además de revolver periódicamente el material.



Figura 8. Secado al sol de las muestras.



Se disgrega el material una vez seco, a continuación, se criba con el propósito de separar los agregados gruesos que pudiera contener y posteriormente se cuartearon las muestras para obtener porciones representativas del tamaño adecuado que requerían los ensayos, siendo este de alrededor de 2.5 kg. El procedimiento consistió en traspalear al material en forma continua sobre una superficie plana y limpia, hasta obtener una muestra de aspecto homogéneo; enseguida se formó un cono, depositando el material con la pala en el vértice del mismo, dejando que rodaran en forma libre las partículas así depositadas. Una vez formado el cono se truncó por la parte superior colocando la pala en este punto y haciéndola girar hasta disminuir su altura hasta unos 20 cm. Con una regla se dividió la muestra en cuatro secciones en forma de cuadrantes y se tomó un cuadrante para realizar el análisis granulométrico. El procedimiento anterior se implementó para cada una de las 5 muestras de material.



*Figura 9. Cribado del material.*



*Figura 10. Cuarteo de la muestra.*

Ya con las muestras de material preparadas se procedió a la Determinación de la composición granulométrica mediante el uso de mallas, para esto se optó por utilizar las mallas que requieren las normas N-CMT-2-01-004/02 de la SCT que trata sobre morteros para infraestructura y la ASTM-C-33 que se enfoca en agregados finos para concretos. Ambas implican el uso del mismo tipo de mallas y esto permitirá comparar los resultados con estas normas y evaluar el agregado pétreo dentro de un marco de referencia.

Dicha prueba consistió en separar por tamaños las partículas de material, pasándolo a través de una sucesión de mallas de aberturas cuadradas y en pesar las porciones retenidas en cada una de ellas, expresando dichos retenidos como porcentajes en peso de la muestra total.



Figura 11. Juego de mallas utilizadas.



Figura 12. Material retenido en malla.

A continuación, se presenta la serie de mallas utilizadas y los límites de material retenido en peso que marcan las normas N-CMT-2-01-004/02 y ASTM-C-33.

Tabla 5. Límites de material que pasa en porcentaje de acuerdo a normativa.

Tamiz	Abertura (mm)	ASTM-C-33		N-CMT-2-01-004/02	
		Porcentaje que pasa en peso	Porcentaje que pasa en peso	Porcentaje que pasa en peso	Porcentaje que pasa en peso
#4	4.75	95	100	100	0
#8	2.36	80	100	95	100
#16	1.18	50	85	80	90
#30	0.60	25	60	55	70
#50	0.30	10	30	25	50
#100	0.15	2	10	5	30

Finalmente se calculó el FM del agregado, conforme a la norma ASTM-C-125, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en toda la serie de mallas y dividiendo la suma entre 100. El módulo de finura es un índice de la finura del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura. El módulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto.

#### 4.4. Probetas

Se realizaron 15 probetas cúbicas de 5 cm de lado, de mezcla mortero cal 1:3, 1:2 y 1:1 por cada tipo de arena recolectada y con cada uno de los tipos de cal, dichas muestras se ensayaron a compresión en una máquina universal.

Para la elaboración de las probetas se procedió en primer lugar a mezclar la cal con el agregado pétreo en proporcionando el mortero en base a volúmenes, se homogeneizo el material y se le agrego agua de manera gradual hasta llegar a la consistencia optima, esta se media en la mesa de impactos, siendo la utilizada cuando tras 25 golpes el diámetro inicial del mortero había aumentado en un 105%, se optó por utilizar el límite inferior que marca la normativa dado que aunque la cantidad de agua no influye en la resistencia del mortero de cal endurecido si afecta la retracción de este durante su proceso de secado inicial, al llegar a esta consistencia se pasó a llenar los moldes en dos etapas, golpeándolos con la finalidad de extraer el volumen de aire que hubiera podido quedar atrapado y por último se enrazaban para asegurar dimensiones uniformes en todas las probetas.



*Figura 13. Mezclado de cal y agregado pétreo en seco.*



Figura 14. Proceso de mezclado del mortero.



Figura 15. Mesa de impactos preparada para el ensayo.



Figura 16. Mesa de impactos con mortero en estado inalterado antes de iniciar la prueba de fluidez.



Figura 17. Medición del diámetro final del mortero tras finalizar la prueba de fluidez.



Figura 18. Proceso de llenado con mortero de los moldes.



Figura 19. Molde al finalizar su llenado y enrazado.





Figura 20. Probetas de mortero de cal clasificadas.



Figura 21. Probetas de mortero de cal de distintas dosificaciones.

Tabla 6. Código de probetas con su respectivo tipo de cal, arena y proporción.

Código	Tipo de Cal	Arena	Proporción Cal-Arena
C3A1	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:3
O3A1	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:3
C2A1	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:2
O2A1	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:2
C1A1	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:1
O1A1	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:1
C3A2	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:3
O3A2	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:3
C2A2	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:2
O2A2	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:2
C1A2	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:1
O1A2	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:1
C3A3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:3
O3A3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:3
C2A3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:2
O2A3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:2
C1A3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:1
O1A3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:1
C3A4	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:3
O3A4	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:3
C2A4	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:2
O2A4	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:2
C1A4	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:1
O1A4	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:1
C3A5	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:3
O3A5	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:3
C2A5	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:2
O2A5	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:2
C1A5	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:1
O1A5	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:1



Figura 22. Prueba de compresión de probeta de mortero de cal.



Figura 23. Probeta de mortero de cal luego de su ensayo a compresión.

# CAPÍTULO

# 5

## RESULTADOS

## 5. RESULTADOS

### 5.1. AGREGADOS PETREOS

Para el desarrollo de la campaña experimental se recolectaron 5 muestras de distintas arenas de diversos bancos de material presentes en el estado de Aguascalientes, los cuales se describen a continuación:

Tabla 7. Códigos y arenas utilizadas para las probetas.

<b>CODIGO</b>	<b>ARENA</b>
A1	ARENA LAVADA DE RIO 1
A2	ARENA LAVADA DE RIO 2
A3	ARENA SIN LAVAR
A4	ARENA TRITURADA RIOLITA
A5	ARENA TRITURADA CALIZA

#### 5.1.1. GRANULOMETRÍA

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas de granulometría aplicadas a las 5 muestras de arenas, así como su módulo de finura y una comparación con los límites marcados por las normas N-CMT-2-01-004/02 y ASTM-C-33.

Tabla 8. Granulometría y módulo de finura de arena A1.

Tamiz	W tamiz (g)	Abertura (mm)	Tamiz + muestra (g)	W muestra	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
#4	568.26	4.75	570.38	2.12	0.69	0.69	99.31
#8	525.88	2.36	598.24	72.36	23.41	24.10	75.90
#16	366.00	1.18	452.15	86.15	27.88	51.98	48.02
#30	327.06	0.60	404.56	77.50	25.08	77.05	22.95
#50	418.53	0.30	462.27	43.74	14.15	91.21	8.79
#100	397.36	0.15	413.95	16.59	5.37	96.57	3.43
Charola	458.30	-	468.89	10.59	3.43	<b>M.F.=</b>	<b>3.42</b>
Sumatoria	3061.39	-	3370.44	309.05	100.00		
W muestra c/charola(g)	W charola (g)	W muestra (g)	Error permitido 2% en g	g de error	% de error obtenido		
<b>404.99</b>	98.15	306.84	6.18	2.21	0.72%		

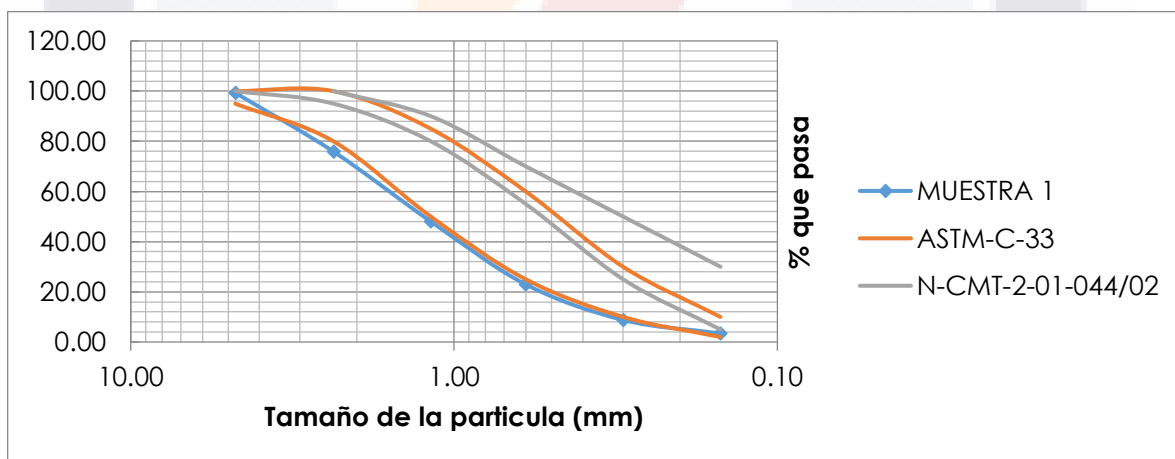


Figura 24. Grafica logarítmica de granulometría de arena A1.

Tabla 9. Granulometría y módulo de finura de arena A2.

Tamiz	W tamiz (g)	Abertura (mm)	Tamiz + muestra (g)	W muestra	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
#4	441.08	4.75	447.29	6.21	1.96	1.96	98.04
#8	526.00	2.36	593.72	67.72	21.36	23.32	76.68
#16	475.39	1.18	549.14	73.75	23.26	46.57	53.43
#30	327.05	0.60	395.29	68.24	21.52	68.10	31.90
#50	418.68	0.30	472.77	54.09	17.06	85.16	14.84
#100	400.00	0.15	427.38	27.38	8.64	93.79	6.21
Charola	457.91		477.60	19.69	6.21	<b>M.F.=</b>	<b>3.19</b>
Sumatoria	3046.11		3363.19	317.08	100.00		
W muestra c/charola(g)	W charola (g)	W muestra (g)	Error permitido 2% en g	g de error	% de error obtenido		
415.92	101.11	314.81	6.34	2.27	0.72%		

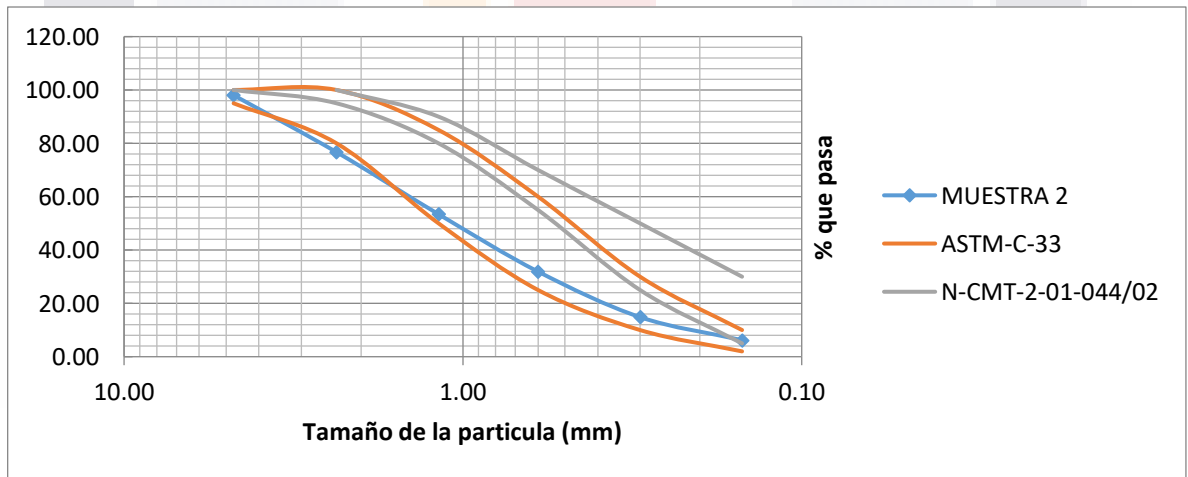


Figura 25. Grafica logarítmica de granulometría de arena A2.

Tabla 10. Granulometría y módulo de finura de arena A3.

Tamiz	W tamiz (g)	Abertura (mm)	Tamiz + muestra (g)	W muestra	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
#4	568.59	4.75	576.75	8.16	2.60	2.60	97.40
#8	525.86	2.36	570.47	44.61	14.21	16.80	83.20
#16	365.64	1.18	422.95	57.31	18.25	35.05	64.95
#30	326.78	0.60	389.82	63.04	20.07	55.13	44.87
#50	418.36	0.30	490.31	71.95	22.91	78.04	21.96
#100	396.77	0.15	435.03	38.26	12.18	90.22	9.78
Charola	458.37		489.07	30.70	9.78	<b>M.F.=</b>	<b>2.78</b>
Sumatoria	3060.37		3374.40	314.03	100.00		
W muestra c/charola(g)	W charola (g)	W muestra (g)	Error permitido 2% en g	g de error	% de error obtenido		
411.23	98.74	312.49	6.28	1.54	0.49%		

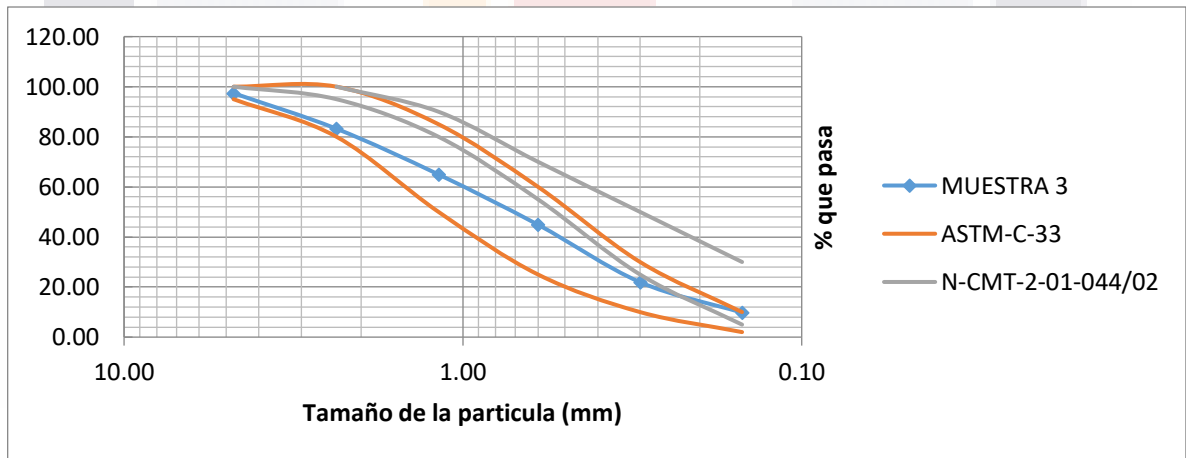


Figura 26. Grafica logarítmica de granulometría de arena A3.



Tabla 11. Granulometría y módulo de finura de arena A4.

Tamiz	W tamiz (g)	Abertura (mm)	Tamiz + muestra (g)	W muestra	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
#4	568.24	4.75	569.51	1.27	0.38	0.38	99.62
#8	525.88	2.36	614.59	88.71	26.30	26.68	73.32
#16	366.41	1.18	435.82	69.41	20.58	47.26	52.74
#30	326.74	0.60	381.54	54.80	16.25	63.51	36.49
#50	418.65	0.30	459.80	41.15	12.20	75.71	24.29
#100	397.23	0.15	424.56	27.33	8.10	83.81	16.19
Charola	458.35		512.94	54.59	16.19	<b>M.F.=</b>	<b>2.97</b>
Sumatoria	3061.50		3398.76	337.26	100.00		
W muestra c/charola(g)	W charola (g)	W muestra (g)	Error permitido 2% en g	g de error	% de error obtenido		
435.21	98.77	336.44	6.75	0.82	0.24%		

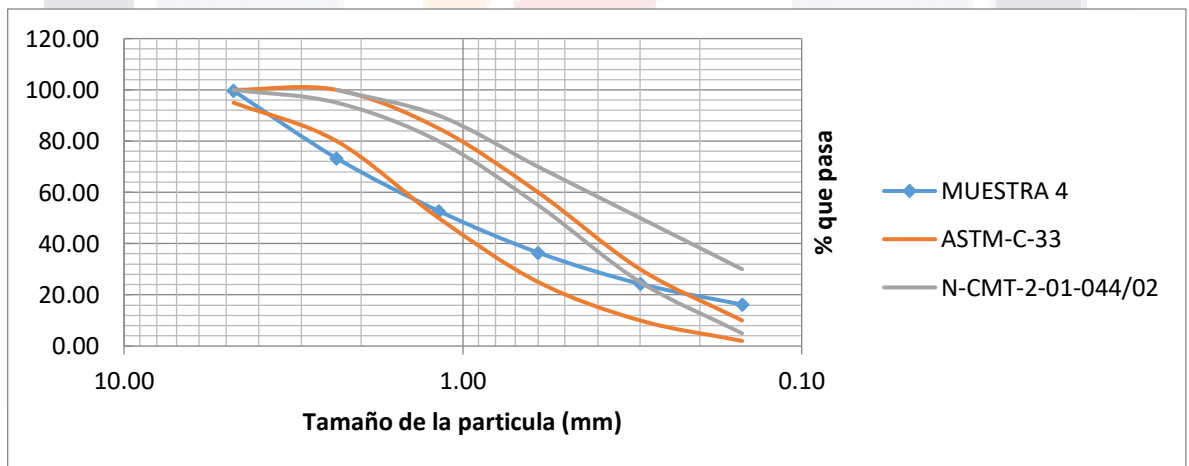


Figura 27. Grafica logarítmica de granulometría de arena A4.

Tabla 12. Granulometría y módulo de finura de arena A5.

Tamiz	W tamiz (g)	Abertura (mm)	Tamiz + muestra (g)	W muestra	% Retenido	% Retenido acumulado	% Que pasa
#4	568.09	4.75	570.09	2.00	0.64	0.64	99.36
#8	525.97	2.36	601.09	75.12	24.05	24.69	75.31
#16	366.05	1.18	438.75	72.70	23.27	47.96	52.04
#30	326.95	0.60	380.89	53.94	17.27	65.22	34.78
#50	418.74	0.30	464.80	46.06	14.74	79.97	20.03
#100	397.16	0.15	429.80	32.64	10.45	90.42	9.58
Charola	458.27		488.21	29.94	9.58	<b>M.F.=</b>	<b>3.09</b>
Sumatoria	3061.23		3373.63	312.40	100.00		
W muestra c/charola(g)	W charola (g)	W muestra (g)	Error permitido 2% en g	g de error	% de error obtenido		
410.19	98.90	311.29	6.25	1.11	0.36%		

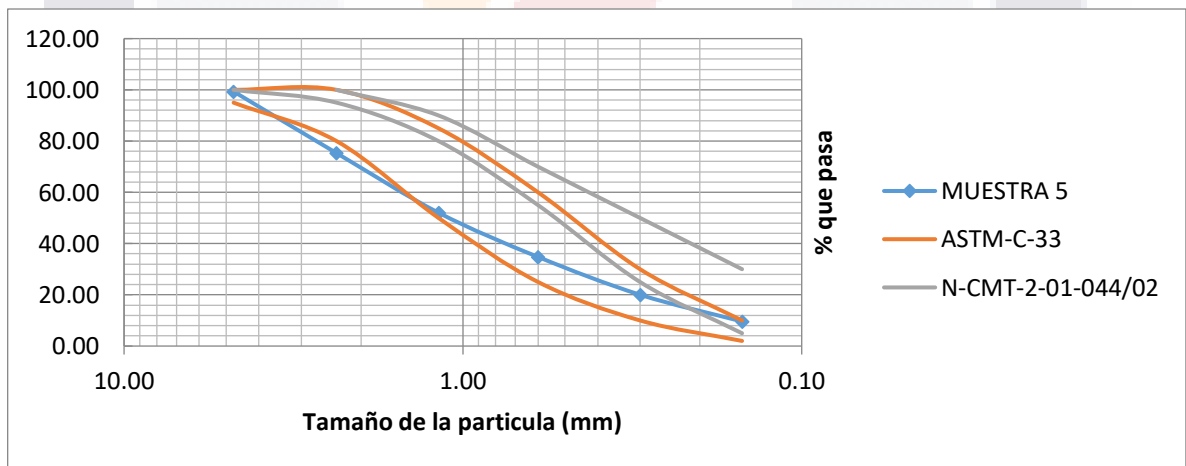


Figura 28. Grafica logarítmica de granulometría de arena A5.

### 5.1.2. Absorción y Densidad

En las siguientes tablas se muestran los resultados de las pruebas de absorción y peso específico realizadas a las 5 muestras de arenas.

Tabla 13. Valores de densidad y absorción de arena A1.

Densidad			Absorción	
W	88.45	gr	W	90.99 gr
W+mat	388.15	gr	W+mat	463.81 gr
mat	299.7	gr	mat	372.82 gr
V0	500	ml	w+mat seco	450.96 gr
Vf	625	ml	mat seco	359.97 gr
Vol	125	ml	Ww	12.85 gr
<b>y</b>	<b>2.40</b>		<b>Abs</b>	<b>3.57%</b>

Tabla 14. Valores de densidad y absorción de arena A2.

Densidad			Absorción	
W	88.42	gr	W	90.82 gr
W+mat	449.35	gr	W+mat	516.11 gr
mat	360.93	gr	mat	425.29 gr
V0	500	ml	w+mat seco	500.25 gr
Vf	645	ml	mat seco	409.43 gr
Vol	145	ml	Ww	15.86 gr
<b>y</b>	<b>2.49</b>		<b>Abs</b>	<b>3.87%</b>

Tabla 15. Valores de densidad y absorción de arena A3.

Densidad			Absorción		
W	90.81	gr	W	89.22	gr
W+mat	668.99	gr	W+mat	671.97	gr
mat	578.18	gr	mat	582.75	gr
V0	500	ml	w+mat seco	642.8	gr
Vf	745	ml	mat seco	553.58	gr
Vol	245	ml	Ww	29.17	gr
<b>y</b>	<b>2.36</b>		<b>Abs</b>	<b>5.27%</b>	

Tabla 16. Valores de densidad y absorción de arena A4.

Densidad			Absorción		
W	88.5	gr	W	88.78	gr
W+mat	557.76	gr	W+mat	632.82	gr
mat	469.26	gr	mat	544.04	gr
V0	500	ml	w+mat seco	608.07	gr
Vf	695	ml	mat seco	519.29	gr
Vol	195	ml	Ww	24.75	gr
<b>y</b>	<b>2.41</b>		<b>Abs</b>	<b>4.77%</b>	

Tabla 17. Valores de densidad y absorción de arena A5.

Densidad			Absorción		
W	90.87	gr	W	88.49	gr
W+mat	505.94	gr	W+mat	579.39	gr
mat	415.07	gr	mat	490.9	gr
V0	500	ml	w+mat seco	559.11	gr
Vf	680	ml	mat seco	470.62	gr
Vol	180	ml	Ww	20.28	gr
<b>y</b>	<b>2.31</b>		<b>Abs</b>	<b>4.31%</b>	

## 5.2. Probetas

En la siguiente tabla se presenta la nomenclatura de las distintas probetas de morteros elaboradas, en ella se especifica el código de probeta, la cantidad, el tipo de cal, la arena, la proporción y el tiempo al cual fueron ensayadas.

Tabla 18. Clasificación de probetas y tiempos de ensaye.

Código	Cant.	Tipo de Cal	Arena	Proporción Cal-Arena	Tiempo
C3A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:3	14 Días
O3A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:3	14 Días
C2A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:2	14 Días
O2A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:2	14 Días
C1A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:1	14 Días
O1A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:1	14 Días
C3A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:3	14 Días
O3A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:3	14 Días
C2A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:2	14 Días
O2A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:2	14 Días
C1A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:1	14 Días
O1A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:1	14 Días
C3A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:3	14 Días
O3A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:3	14 Días
C2A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:2	14 Días
O2A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:2	14 Días
C1A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:1	14 Días
O1A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:1	14 Días
C3A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:3	14 Días
O3A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:3	14 Días
C2A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:2	14 Días
O2A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:2	14 Días
C1A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:1	14 Días
O1A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:1	14 Días
C3A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:3	14 Días
O3A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:3	14 Días

Código	Cant.	Tipo de Cal	Arena	Proporción Cal-Arena	Tiempo
C2A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:2	14 Días
O2A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:2	14 Días
C1A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:1	14 Días
O1A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:1	14 Días
C3A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:3	28 Días
O3A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:3	28 Días
C2A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:2	28 Días
O2A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:2	28 Días
C1A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:1	28 Días
O1A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:1	28 Días
C3A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:3	28 Días
O3A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:3	28 Días
C2A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:2	28 Días
O2A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:2	28 Días
C1A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:1	28 Días
O1A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:1	28 Días
C3A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:3	28 Días
O3A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:3	28 Días
C2A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:2	28 Días
O2A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:2	28 Días
C1A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:1	28 Días
O1A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:1	28 Días
C3A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:3	28 Días
O3A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:3	28 Días
C2A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:2	28 Días
O2A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:2	28 Días
C1A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:1	28 Días
O1A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:1	28 Días
C3A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:3	28 Días
O3A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:3	28 Días
C2A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:2	28 Días
O2A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:2	28 Días
C1A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:1	28 Días
O1A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:1	28 Días
C3A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:3	2 Meses

Código	Cant.	Tipo de Cal	Arena	Proporción Cal-Arena	Tiempo
O3A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:3	2 Meses
C2A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:2	2 Meses
O2A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:2	2 Meses
C1A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:1	2 Meses
O1A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:1	2 Meses
C3A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:3	2 Meses
O3A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:3	2 Meses
C2A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:2	2 Meses
O2A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:2	2 Meses
C1A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:1	2 Meses
O1A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:1	2 Meses
C3A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:3	2 Meses
O3A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:3	2 Meses
C2A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:2	2 Meses
O2A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:2	2 Meses
C1A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:1	2 Meses
O1A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:1	2 Meses
C3A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:3	2 Meses
O3A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:3	2 Meses
C2A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:2	2 Meses
O2A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:2	2 Meses
C1A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:1	2 Meses
O1A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:1	2 Meses
C3A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:3	2 Meses
O3A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:3	2 Meses
C2A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:2	2 Meses
O2A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:2	2 Meses
C1A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:1	2 Meses
O1A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:1	2 Meses
C3A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:3	3 Meses
O3A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:3	3 Meses
C2A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:2	3 Meses
O2A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:2	3 Meses
C1A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:1	3 Meses
O1A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:1	3 Meses

Código	Cant.	Tipo de Cal	Arena	Proporción Cal-Arena	Tiempo
C3A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:3	3 Meses
O3A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:3	3 Meses
C2A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:2	3 Meses
O2A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:2	3 Meses
C1A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:1	3 Meses
O1A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:1	3 Meses
C3A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:3	3 Meses
O3A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:3	3 Meses
C2A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:2	3 Meses
O2A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:2	3 Meses
C1A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:1	3 Meses
O1A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:1	3 Meses
C3A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:3	3 Meses
O3A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:3	3 Meses
C2A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:2	3 Meses
O2A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:2	3 Meses
C1A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:1	3 Meses
O1A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:1	3 Meses
C3A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:3	3 Meses
O3A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:3	3 Meses
C2A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:2	3 Meses
O2A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:2	3 Meses
C1A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:1	3 Meses
O1A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:1	3 Meses
C3A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:3	4 Meses
O3A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:3	4 Meses
C2A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:2	4 Meses
O2A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:2	4 Meses
C1A1	3	Cal en Polvo CALIDRA	A1	1:1	4 Meses
O1A1	3	Cal en Pasta OXICAL	A1	1:1	4 Meses
C3A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:3	4 Meses
O3A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:3	4 Meses
C2A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:2	4 Meses
O2A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:2	4 Meses
C1A2	3	Cal en Polvo CALIDRA	A2	1:1	4 Meses



Código	Cant.	Tipo de Cal	Arena	Proporción Cal-Arena	Tiempo
O1A2	3	Cal en Pasta OXICAL	A2	1:1	4 Meses
C3A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:3	4 Meses
O3A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:3	4 Meses
C2A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:2	4 Meses
O2A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:2	4 Meses
C1A3	3	Cal en Polvo CALIDRA	A3	1:1	4 Meses
O1A3	3	Cal en Pasta OXICAL	A3	1:1	4 Meses
C3A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:3	4 Meses
O3A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:3	4 Meses
C2A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:2	4 Meses
O2A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:2	4 Meses
C1A4	3	Cal en Polvo CALIDRA	A4	1:1	4 Meses
O1A4	3	Cal en Pasta OXICAL	A4	1:1	4 Meses
C3A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:3	4 Meses
O3A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:3	4 Meses
C2A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:2	4 Meses
O2A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:2	4 Meses
C1A5	3	Cal en Polvo CALIDRA	A5	1:1	4 Meses
O1A5	3	Cal en Pasta OXICAL	A5	1:1	4 Meses

### 5.2.1. Resistencia a la Compresión y Densidad

La tabla siguiente presenta las mediciones realizadas a las probetas de mortero en sus distintas dosificaciones, además de la densidad y resistencia a la compresión.

Tabla 19. Características mecánicas de probetas ensayadas a 14 días.

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A1	1	49.02	49.60	49.93	215.06	1,771.51	4.69
C3A1	2	49.44	49.58	50.27	216.22	1,754.70	4.85
C3A1	3	49.63	49.55	49.70	217.99	1,783.58	4.22
O3A1	1	50.18	49.61	49.22	203.44	1,660.33	5.61
O3A1	2	50.17	49.73	49.29	200.14	1,627.47	4.55
O3A1	3	49.77	49.33	49.63	207.77	1,705.14	6.00
C2A1	1	49.52	49.99	49.69	215.07	1,748.43	5.32
C2A1	2	49.51	50.14	50.47	223.59	1,784.60	5.68
C2A1	3	49.38	49.72	50.16	216.11	1,754.83	5.37
O2A1	1	49.13	49.85	49.50	183.36	1,512.47	3.68
O2A1	2	49.58	49.26	48.90	177.98	1,490.26	3.11
O2A1	3	49.41	49.25	49.64	181.36	1,501.37	3.85
C1A1	1	50.28	50.16	50.90	205.42	1,600.19	6.93
C1A1	2	49.78	49.70	50.80	210.15	1,672.07	6.66
C1A1	3	49.74	49.33	49.97	200.14	1,632.33	6.41
O1A1	1	48.26	48.38	47.84	163.82	1,466.64	5.11
O1A1	2	48.18	48.19	48.02	162.85	1,460.64	4.58
O1A1	3	49.06	48.26	47.97	162.32	1,429.18	5.34
C3A2	1	49.60	49.60	50.05	215.00	1,746.11	6.08
C3A2	2	49.44	49.73	49.81	213.56	1,743.84	6.04
C3A2	3	49.57	49.59	49.84	213.52	1,742.80	7.00
O3A2	1	49.67	49.91	50.13	200.30	1,611.76	5.88
O3A2	2	49.29	49.01	50.32	198.30	1,631.32	5.77
O3A2	3	49.83	49.74	49.84	201.30	1,629.56	5.99
C2A2	1	49.84	49.10	49.80	199.12	1,633.90	3.78
C2A2	2	49.70	50.28	48.34	195.44	1,617.91	4.53
C2A2	3	49.93	50.23	50.70	218.79	1,720.66	6.47
O2A2	1	48.86	48.96	50.16	190.82	1,590.27	4.49
O2A2	2	48.81	49.13	50.46	193.27	1,597.21	4.60
O2A2	3	48.96	49.06	49.05	183.03	1,553.51	3.91
C1A2	1	50.31	49.16	49.59	198.88	1,621.55	7.94
C1A2	2	50.29	49.50	49.41	201.97	1,642.05	6.97
C1A2	3	50.17	49.14	49.86	197.34	1,605.40	6.32
O1A2	1	47.80	48.45	47.67	157.04	1,422.47	5.84
O1A2	2	48.25	48.14	47.95	163.74	1,470.15	6.35
O1A2	3	47.42	49.14	48.06	156.09	1,393.78	6.28
C3A3	1	51.21	49.15	49.46	212.93	1,710.43	6.40

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m3)	F'c (kg/cm2)
C3A3	2	51.09	49.46	49.61	216.11	1,723.91	6.41
C3A3	3	50.22	50.14	49.76	220.78	1,762.05	6.19
O3A3	1	49.68	48.86	48.98	199.65	1,679.25	7.82
O3A3	2	49.56	48.97	48.82	201.47	1,700.40	5.84
O3A3	3	49.66	48.77	48.89	199.86	1,687.90	6.68
C2A3	1	50.44	49.13	49.13	207.26	1,702.34	5.86
C2A3	2	49.68	49.56	49.74	208.80	1,704.95	4.72
C2A3	3	49.42	49.93	49.78	213.46	1,737.79	5.66
O2A3	1	49.98	49.48	49.37	198.85	1,628.68	3.07
O2A3	2	49.40	49.71	49.62	192.96	1,583.58	3.05
O2A3	3	49.20	49.46	48.91	183.95	1,545.55	3.64
C1A3	1	49.53	48.92	50.16	196.85	1,619.66	5.86
C1A3	2	50.30	49.07	49.41	197.40	1,618.63	4.72
C1A3	3	49.55	49.20	49.08	195.85	1,636.86	5.66
O1A3	1	48.28	48.35	48.57	165.22	1,457.24	2.82
O1A3	2	47.36	48.56	48.75	162.04	1,445.30	3.85
O1A3	3	47.26	48.45	48.40	159.58	1,439.94	4.86
C3A4	1	49.86	49.58	50.37	213.07	1,711.16	5.73
C3A4	2	49.36	49.64	49.73	211.16	1,732.95	5.07
C3A4	3	50.49	49.99	49.82	217.48	1,729.53	5.98
O3A4	1	49.57	49.35	49.00	203.49	1,697.62	4.72
O3A4	2	49.51	49.28	49.18	200.70	1,672.61	4.57
O3A4	3	49.15	49.61	48.97	200.32	1,677.65	4.58
C2A4	1	49.27	48.78	49.41	205.17	1,727.73	5.37
C2A4	2	49.85	49.29	49.62	206.48	1,693.55	5.83
C2A4	3	49.42	49.71	49.28	205.32	1,695.95	5.47
O2A4	1	49.72	49.52	48.73	216.22	1,802.14	9.22
O2A4	2	49.77	49.02	48.79	212.22	1,782.85	9.21
O2A4	3	49.85	48.76	48.96	211.44	1,776.71	9.25
C1A4	1	49.36	49.00	49.44	217.83	1,821.66	9.49
C1A4	2	50.01	48.86	48.84	216.09	1,810.71	7.79
C1A4	3	49.41	49.81	50.10	221.32	1,794.95	8.65
O1A4	1	48.52	47.69	48.38	196.42	1,754.57	7.39
O1A4	2	48.70	47.67	47.96	197.03	1,769.62	9.33
O1A4	3	49.10	47.70	47.81	195.95	1,749.95	10.71
C3A5	1	50.27	49.51	49.90	224.17	1,804.99	9.28
C3A5	2	50.36	49.96	49.83	224.96	1,794.35	10.10
C3A5	3	49.98	49.74	49.79	220.99	1,785.37	9.23
O3A5	1	49.90	47.28	49.18	210.55	1,814.63	7.80

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
O3A5	2	48.15	50.24	49.44	209.31	1,750.11	8.38
O3A5	3	49.93	48.98	49.40	206.34	1,707.95	7.75
C2A5	1	48.69	47.12	58.99	216.47	1,599.46	9.09
C2A5	2	48.64	47.28	50.06	217.24	1,887.03	10.00
C2A5	3	50.88	49.81	49.58	212.18	1,688.63	8.95
O2A5	1	49.23	48.70	50.20	225.72	1,875.46	15.50
O2A5	2	47.93	50.40	47.11	224.00	1,968.33	16.06
O2A5	3	48.82	50.74	49.58	222.91	1,814.99	15.14
C1A5	1	49.03	47.15	49.73	227.85	1,981.92	14.66
C1A5	2	49.74	48.23	49.45	230.86	1,946.07	16.06
C1A5	3	47.16	48.22	50.15	225.59	1,978.10	14.49
O1A5	1	50.82	49.54	49.74	205.77	1,643.18	15.40
O1A5	2	49.78	48.54	48.77	207.75	1,762.92	16.26
O1A5	3	48.65	48.60	49.66	206.60	1,759.56	15.32

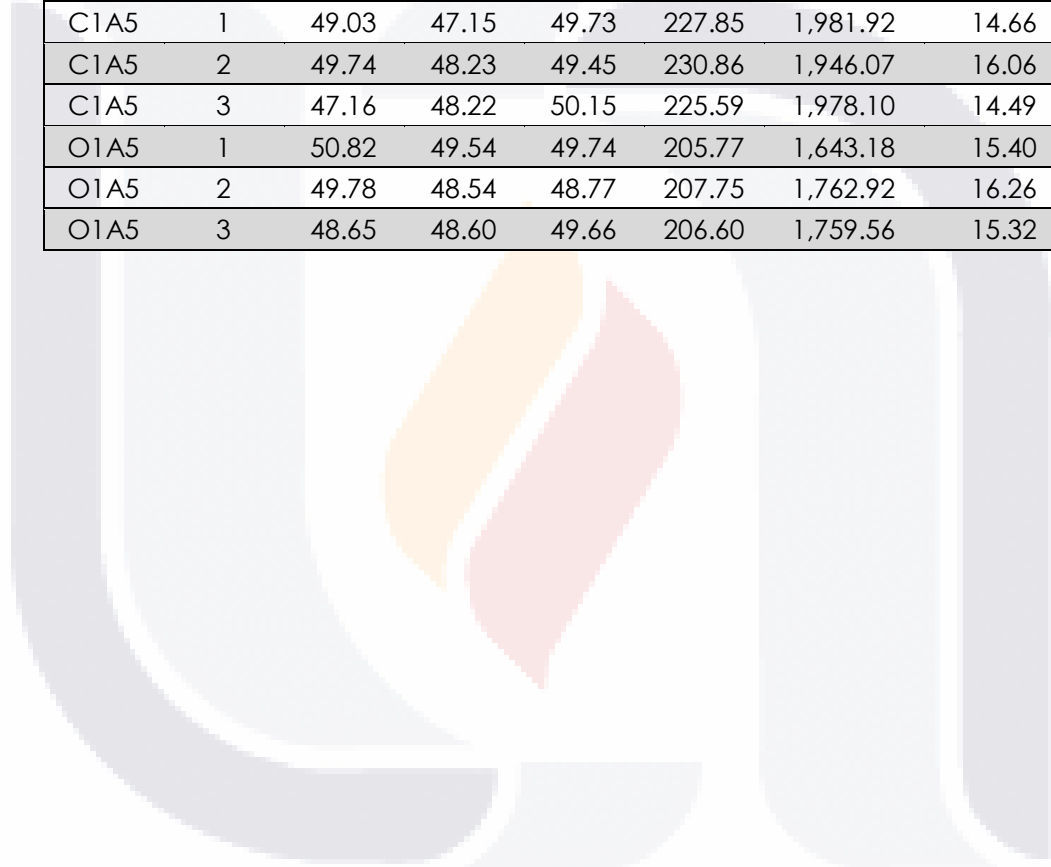


Tabla 20. Características mecánicas de probetas ensayadas a 28 días.

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A1	1	50.01	50.24	49.81	218.32	1,744.50	4.80
C3A1	2	50.10	50.31	49.90	219.51	1,745.27	5.03
C3A1	3	49.74	48.97	49.80	219.84	1,812.35	6.36
O3A1	1	49.95	50.02	49.48	203.42	1,645.45	4.11
O3A1	2	50.64	49.52	50.03	207.03	1,650.17	4.55
O3A1	3	49.79	49.94	49.67	204.51	1,655.88	4.13
C2A1	1	49.95	48.15	49.78	210.90	1,761.53	6.97
C2A1	2	50.07	49.27	49.91	216.81	1,760.89	7.11
C2A1	3	49.66	49.76	49.72	218.53	1,778.66	7.25
O2A1	1	49.48	48.10	49.20	181.60	1,550.87	3.95
O2A1	2	49.64	48.03	49.34	183.74	1,561.93	4.36
O2A1	3	49.62	47.81	49.49	183.11	1,559.62	4.86
C1A1	1	49.72	50.48	49.53	207.89	1,672.30	10.93
C1A1	2	49.58	50.83	49.09	206.70	1,670.79	9.67
C1A1	3	49.64	50.47	49.08	206.08	1,675.97	10.64
O1A1	1	48.31	48.44	48.28	164.78	1,458.47	6.56
O1A1	2	48.10	48.30	48.36	166.47	1,481.69	6.54
O1A1	3	48.27	47.86	48.20	166.24	1,492.93	8.69
C3A2	1	50.08	49.97	50.55	224.01	1,770.81	8.02
C3A2	2	49.37	48.86	50.29	212.07	1,748.16	7.43
C3A2	3	49.92	49.99	49.87	220.09	1,768.49	8.50
O3A2	1	49.62	49.96	49.14	199.01	1,633.66	6.55
O3A2	2	49.24	50.13	49.14	198.36	1,635.32	6.73
O3A2	3	49.66	49.75	49.28	199.05	1,634.90	6.43
C2A2	1	49.64	50.63	50.75	215.01	1,685.71	8.99
C2A2	2	49.59	50.52	50.13	216.25	1,721.87	7.49
C2A2	3	49.77	50.04	49.55	211.06	1,710.32	7.19
O2A2	1	49.26	49.83	49.17	189.97	1,573.98	6.10
O2A2	2	49.30	49.37	48.81	185.56	1,561.94	5.89
O2A2	3	49.15	49.41	48.97	184.18	1,548.72	5.43
C1A2	1	49.35	49.80	48.95	200.84	1,669.48	9.24
C1A2	2	49.77	50.23	49.07	203.60	1,659.70	9.45
C1A2	3	49.35	49.82	49.28	200.88	1,657.96	8.41
O1A2	1	48.09	47.72	48.21	160.65	1,452.07	7.16
O1A2	2	48.35	47.77	47.90	159.81	1,444.50	8.14
O1A2	3	48.10	47.72	48.08	160.43	1,453.70	7.79

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A3	1	50.01	50.49	49.53	221.33	1,769.74	7.44
C3A3	2	49.76	50.90	49.54	219.18	1,746.88	7.36
C3A3	3	49.42	50.53	49.50	217.49	1,759.47	7.39
O3A3	1	49.00	50.59	48.96	201.44	1,659.75	7.17
O3A3	2	48.94	50.02	49.18	200.75	1,667.48	6.88
O3A3	3	48.74	48.98	49.03	196.98	1,682.89	8.07
C2A3	1	49.46	49.92	48.88	208.51	1,727.69	10.38
C2A3	2	50.23	50.16	49.51	214.74	1,721.47	9.07
C2A3	3	49.52	50.31	48.96	209.18	1,714.92	10.23
O2A3	1	48.81	49.74	48.77	194.70	1,644.37	8.10
O2A3	2	48.95	49.36	48.80	189.14	1,604.12	5.36
O2A3	3	48.51	49.75	49.92	194.16	1,611.61	6.47
C1A3	1	48.82	48.99	49.73	193.94	1,630.59	13.09
C1A3	2	49.22	49.90	49.19	199.38	1,650.30	10.63
C1A3	3	48.94	49.15	49.20	194.33	1,642.05	9.97
O1A3	1	48.37	47.74	48.95	166.84	1,476.01	8.36
O1A3	2	48.04	48.45	48.24	164.27	1,463.03	7.47
O1A3	3	48.21	48.43	48.00	160.96	1,436.23	5.59
C3A4	1	49.37	50.31	49.83	213.14	1,722.09	8.48
C3A4	2	49.36	49.44	49.70	210.86	1,738.54	8.17
C3A4	3	50.54	49.70	50.16	219.09	1,738.90	8.58
O3A4	1	48.98	49.44	49.16	203.33	1,708.02	10.49
O3A4	2	49.25	49.32	49.23	200.49	1,676.62	9.93
O3A4	3	49.27	49.11	49.22	201.20	1,689.41	9.23
C2A4	1	48.95	48.79	48.90	201.90	1,728.80	8.23
C2A4	2	48.86	49.73	49.74	206.40	1,707.78	8.05
C2A4	3	49.13	49.64	49.50	205.14	1,699.29	9.73
O2A4	1	48.96	49.86	49.00	192.63	1,610.40	8.53
O2A4	2	49.23	49.28	48.81	194.42	1,641.84	8.85
O2A4	3	48.83	49.67	48.56	193.90	1,646.34	9.16
C1A4	1	49.39	50.18	49.06	192.90	1,586.48	4.91
C1A4	2	49.61	50.42	49.47	197.86	1,598.98	6.69
C1A4	3	48.90	49.15	48.98	190.08	1,614.68	7.12
O1A4	1	47.86	49.01	47.82	165.14	1,472.26	7.79
O1A4	2	48.23	49.31	47.98	169.95	1,489.39	7.20
O1A4	3	47.33	48.43	47.99	163.25	1,484.06	8.26
C3A5	1	49.72	50.46	49.28	207.80	1,680.72	9.86
C3A5	2	49.61	49.94	49.30	206.01	1,686.64	8.96
C3A5	3	49.78	50.13	49.21	206.32	1,680.10	10.79

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
O3A5	1	49.01	49.25	49.65	191.22	1,595.60	11.34
O3A5	2	48.75	49.40	48.49	190.51	1,631.41	10.21
O3A5	3	49.56	48.16	49.16	189.46	1,614.69	12.30
C2A5	1	48.43	47.10	49.88	200.15	1,759.11	10.06
C2A5	2	48.24	47.79	50.08	197.33	1,709.17	9.23
C2A5	3	49.82	49.61	49.73	197.74	1,608.80	10.90
O2A5	1	49.48	49.38	49.28	209.44	1,739.43	12.62
O2A5	2	48.84	49.34	49.78	207.17	1,727.02	11.38
O2A5	3	47.89	47.42	49.80	208.63	1,844.76	13.49
C1A5	1	49.64	49.72	50.14	212.50	1,717.16	12.42
C1A5	2	48.37	47.75	49.81	208.55	1,812.78	11.29
C1A5	3	49.67	49.50	50.08	208.55	1,693.74	14.24
O1A5	1	49.65	49.66	49.58	190.67	1,559.73	11.83
O1A5	2	49.59	49.87	50.03	190.29	1,537.98	10.12
O1A5	3	49.21	47.98	49.50	187.65	1,605.57	12.30

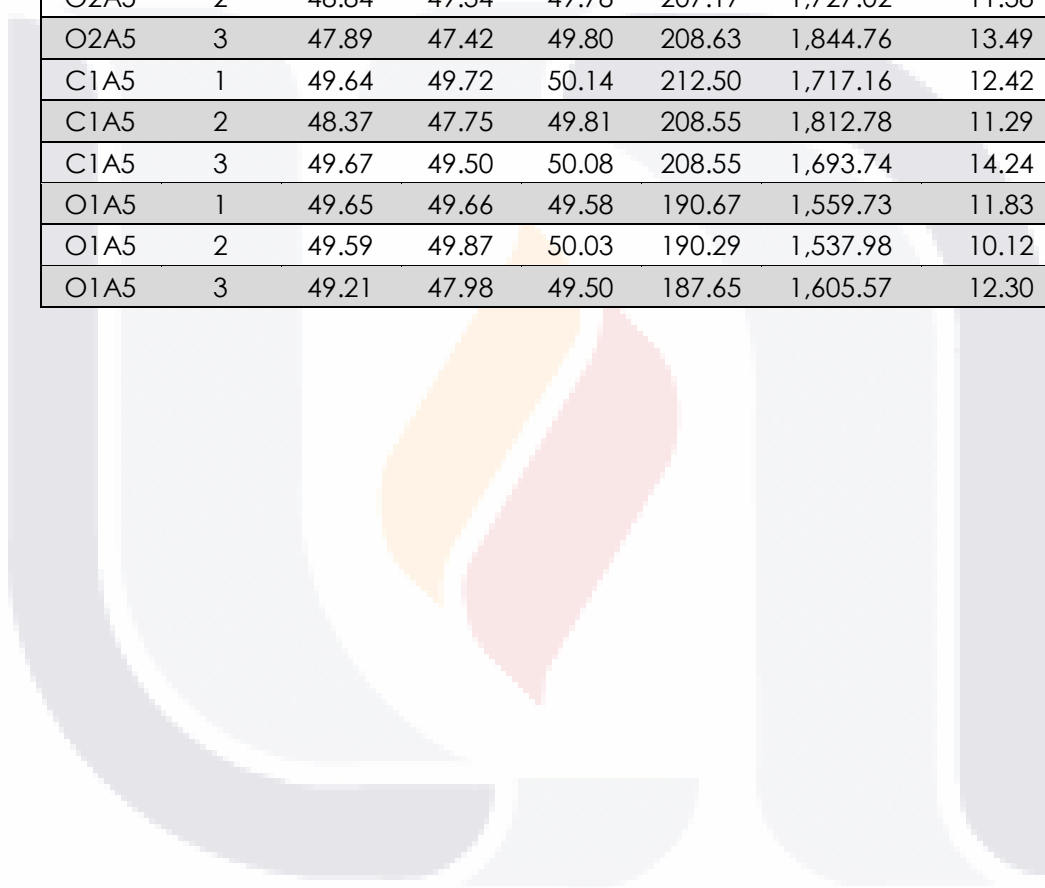


Tabla 21. Características mecánicas de probetas ensayadas a 2 meses.

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A1	1	50.03	48.71	50.00	219.21	1,799.04	6.61
C3A1	2	49.90	49.22	50.08	219.56	1,785.04	6.24
C3A1	3	50.01	49.54	49.72	220.60	1,790.86	6.14
O3A1	1	49.69	50.23	49.34	210.26	1,707.36	5.53
O3A1	2	49.41	49.95	49.56	203.96	1,667.49	5.14
O3A1	3	49.72	50.36	49.50	205.62	1,658.99	4.46
C2A1	1	49.27	50.43	49.60	220.98	1,793.08	9.50
C2A1	2	49.63	49.91	50.12	222.07	1,788.74	8.81
C2A1	3	49.70	49.87	50.38	224.03	1,794.12	9.62
O2A1	1	49.44	48.26	49.39	188.62	1,600.60	5.32
O2A1	2	49.05	48.41	49.22	183.88	1,573.33	4.38
O2A1	3	49.62	48.80	49.25	189.08	1,585.49	6.23
C1A1	1	49.37	49.25	49.17	203.11	1,698.88	12.33
C1A1	2	49.73	49.68	49.21	205.25	1,688.22	12.54
C1A1	3	49.82	50.14	49.31	208.68	1,694.17	13.56
O1A1	1	48.30	48.07	48.29	169.74	1,513.93	7.34
O1A1	2	48.60	47.65	47.98	167.05	1,503.44	7.56
O1A1	3	48.09	47.33	48.04	165.77	1,516.04	7.81
C3A2	1	50.23	49.65	49.90	223.15	1,793.14	10.53
C3A2	2	49.37	49.22	49.53	213.24	1,771.72	8.27
C3A2	3	50.11	49.51	50.23	220.43	1,768.85	9.40
O3A2	1	49.35	49.52	49.44	199.43	1,650.61	6.28
O3A2	2	49.56	49.88	49.70	204.62	1,665.46	7.25
O3A2	3	49.22	49.31	49.45	197.00	1,641.43	6.53
C2A2	1	49.80	49.06	49.77	211.74	1,741.32	8.88
C2A2	2	50.28	50.23	50.09	220.36	1,741.90	8.95
C2A2	3	49.78	50.51	49.45	216.78	1,743.49	8.43
O2A2	1	49.60	49.89	49.31	193.36	1,584.66	6.14
O2A2	2	49.04	49.46	48.72	192.25	1,626.88	7.69
O2A2	3	49.42	48.89	49.11	186.50	1,571.76	5.83
C1A2	1	49.46	50.14	49.02	202.29	1,664.04	12.65
C1A2	2	49.17	50.13	49.14	203.39	1,679.18	11.49
C1A2	3	49.75	49.93	49.21	204.82	1,675.58	12.93
O1A2	1	48.56	48.02	47.82	160.82	1,442.21	9.25
O1A2	2	47.88	47.74	47.95	160.68	1,466.01	9.39
O1A2	3	48.20	47.69	47.73	161.53	1,472.27	9.55
C3A3	1	49.09	49.40	50.43	212.46	1,737.27	7.89



Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A3	2	49.41	50.44	49.39	215.05	1,747.07	6.97
C3A3	3	49.33	49.56	49.66	213.42	1,757.87	7.58
O3A3	1	49.02	49.65	49.18	199.41	1,665.96	7.66
O3A3	2	49.12	49.63	49.11	203.89	1,703.03	9.99
O3A3	3	49.07	49.84	49.05	202.76	1,690.24	9.66
C2A3	1	49.33	50.68	49.13	211.72	1,723.72	12.34
C2A3	2	49.60	49.64	49.00	209.57	1,737.08	12.72
C2A3	3	50.51	49.33	50.23	214.50	1,713.86	12.37
O2A3	1	48.98	48.94	49.31	188.50	1,594.75	7.15
O2A3	2	48.85	50.17	49.04	196.29	1,633.20	8.86
O2A3	3	49.51	49.30	49.24	191.72	1,595.18	6.59
C1A3	1	49.19	49.57	49.03	196.89	1,646.90	15.38
C1A3	2	49.61	49.30	49.35	199.94	1,656.52	14.20
C1A3	3	49.00	50.21	49.22	199.87	1,650.52	12.26
O1A3	1	48.34	48.71	47.92	164.54	1,458.24	9.86
O1A3	2	48.13	48.04	48.01	162.53	1,464.14	10.15
O1A3	3	48.75	48.40	48.52	168.89	1,475.24	9.41
C3A4	1	49.50	49.67	49.65	212.74	1,742.73	10.68
C3A4	2	49.88	50.14	49.90	214.51	1,718.84	9.60
C3A4	3	49.32	48.95	49.39	209.57	1,757.58	9.36
O3A4	1	49.13	49.25	49.28	203.26	1,704.62	10.12
O3A4	2	49.12	49.54	49.34	203.35	1,693.68	11.68
O3A4	3	49.31	50.24	49.27	206.29	1,690.09	11.34
C2A4	1	49.11	49.08	48.91	205.09	1,739.69	11.83
C2A4	2	49.04	49.26	49.05	206.08	1,739.21	11.67
C2A4	3	50.35	49.42	50.61	214.68	1,704.72	11.37
O2A4	1	49.00	49.06	49.27	196.53	1,659.29	12.19
O2A4	2	48.94	49.01	49.47	195.39	1,646.69	11.74
O2A4	3	49.03	49.12	48.76	193.02	1,643.68	11.90
C1A4	1	49.72	50.30	49.48	199.29	1,610.49	9.99
C1A4	2	49.43	49.84	49.30	196.40	1,617.06	10.56
C1A4	3	48.86	50.06	48.85	195.43	1,635.62	11.79
O1A4	1	48.33	49.15	48.08	170.47	1,492.60	12.02
O1A4	2	48.93	49.14	49.56	176.97	1,485.11	11.98
O1A4	3	48.07	48.18	47.95	169.05	1,522.25	13.56
C3A5	1	49.34	49.70	49.35	202.69	1,674.90	12.57
C3A5	2	49.25	49.64	49.29	202.99	1,684.53	14.28
C3A5	3	49.21	50.29	49.13	204.26	1,679.97	13.34
O3A5	1	49.45	47.70	50.33	186.28	1,569.11	14.08

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
O3A5	2	48.65	48.29	50.01	189.02	1,608.83	16.28
O3A5	3	47.92	48.25	50.10	190.92	1,648.16	14.67
C2A5	1	48.69	48.62	49.85	193.90	1,643.08	15.08
C2A5	2	48.53	50.05	50.21	194.62	1,595.82	16.71
C2A5	3	49.64	48.28	50.63	196.25	1,617.35	16.01
O2A5	1	49.45	49.73	49.71	202.01	1,652.51	14.83
O2A5	2	48.65	48.18	58.85	204.06	1,479.32	17.42
O2A5	3	48.93	48.46	48.10	205.68	1,803.38	15.87
C1A5	1	47.78	50.75	48.90	207.48	1,749.79	14.33
C1A5	2	49.04	48.83	47.87	206.38	1,800.39	16.14
C1A5	3	50.92	50.30	47.23	207.72	1,717.13	15.07
O1A5	1	47.21	48.03	50.80	183.08	1,589.39	16.59
O1A5	2	49.33	50.26	48.66	184.83	1,532.03	17.56
O1A5	3	49.58	49.36	49.51	184.83	1,525.45	17.48

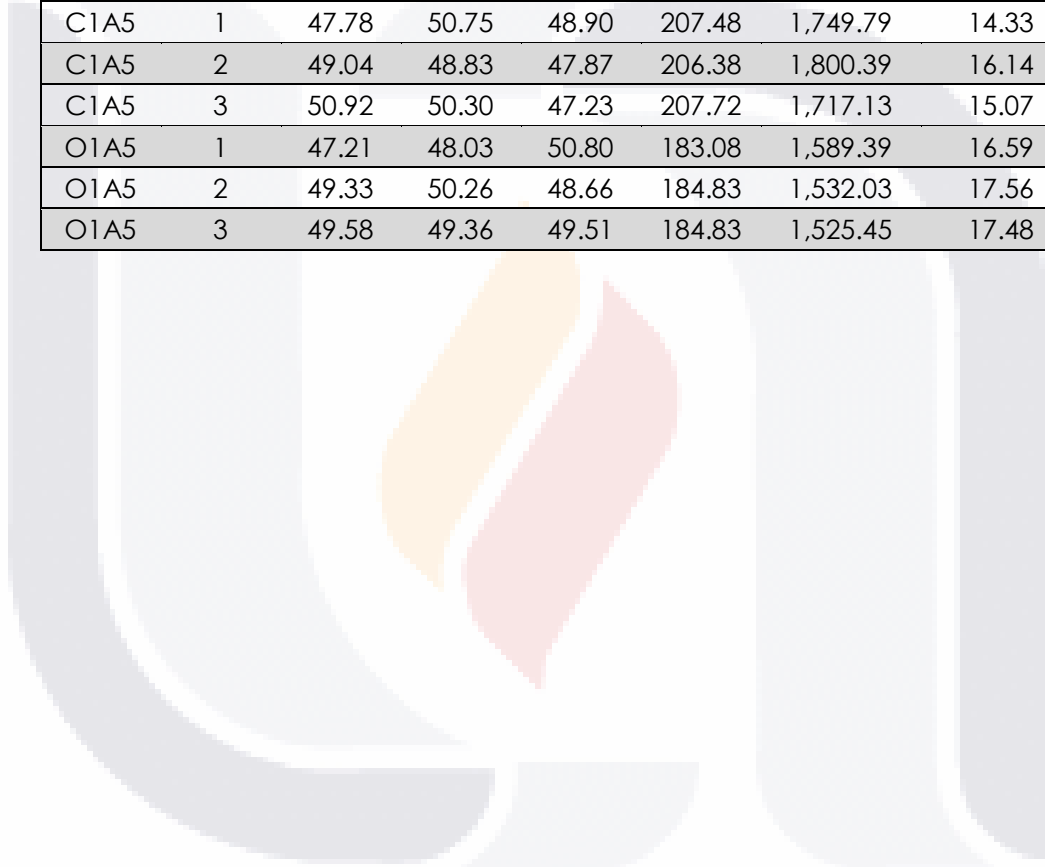


Tabla 22. Características mecánicas de probetas ensayadas a 3 meses.

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A1	1	50.21	49.89	50.03	224.20	1,788.96	5.46
C3A1	2	50.06	49.78	49.61	219.87	1,778.49	6.38
C3A1	3	50.02	48.58	50.07	219.15	1,801.20	6.41
O3A1	1	49.99	48.82	49.44	198.01	1,641.07	4.15
O3A1	2	49.59	50.47	49.49	210.40	1,698.64	5.32
O3A1	3	49.87	50.11	49.73	204.49	1,645.47	5.33
C2A1	1	50.10	49.22	49.73	217.37	1,772.56	10.49
C2A1	2	49.78	50.04	49.72	222.33	1,795.13	9.48
C2A1	3	49.95	50.18	50.17	223.49	1,777.25	9.02
O2A1	1	48.92	48.37	49.39	187.50	1,604.35	4.61
O2A1	2	49.94	49.25	49.22	191.40	1,581.05	5.94
O2A1	3	49.48	48.95	49.91	193.84	1,603.52	5.72
C1A1	1	49.55	50.53	49.27	209.55	1,698.68	13.28
C1A1	2	49.84	50.55	49.23	211.52	1,705.38	13.96
C1A1	3	49.66	49.68	49.71	206.50	1,683.79	14.37
O1A1	1	48.27	48.05	48.63	168.34	1,492.49	7.89
O1A1	2	48.13	48.82	48.35	171.19	1,506.84	8.37
O1A1	3	48.33	48.37	48.50	169.00	1,490.57	7.44
C3A2	1	49.71	49.91	50.06	216.84	1,745.89	7.20
C3A2	2	49.95	49.87	49.65	220.53	1,783.09	8.26
C3A2	3	49.82	49.62	49.91	219.80	1,781.47	8.77
O3A2	1	49.26	49.60	49.39	197.62	1,637.63	6.33
O3A2	2	49.67	49.71	49.63	202.08	1,649.08	6.99
O3A2	3	49.28	48.95	49.39	194.87	1,635.62	5.69
C2A2	1	49.86	49.54	49.35	213.67	1,752.86	8.69
C2A2	2	49.84	50.62	49.71	217.83	1,736.90	9.00
C2A2	3	49.88	50.13	49.51	214.47	1,732.41	8.38
O2A2	1	49.23	50.11	48.94	195.09	1,615.91	6.84
O2A2	2	49.35	50.02	49.01	194.65	1,608.94	7.40
O2A2	3	49.35	49.43	48.86	186.04	1,560.90	6.45
C1A2	1	49.97	49.81	49.93	206.24	1,659.53	12.14
C1A2	2	49.15	49.76	49.84	200.61	1,645.78	11.11
C1A2	3	49.14	50.87	49.12	205.13	1,670.61	10.21
O1A2	1	48.98	48.12	48.58	168.58	1,472.33	10.48
O1A2	2	49.83	47.79	47.83	169.85	1,491.20	10.43
O1A2	3	48.69	48.43	48.52	167.84	1,466.97	10.38
C3A3	1	49.35	50.24	49.41	213.76	1,744.92	7.32

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A3	2	49.15	50.02	49.36	212.83	1,753.84	8.10
C3A3	3	49.78	48.97	49.86	211.24	1,737.96	7.48
O3A3	1	49.05	49.89	49.16	200.60	1,667.50	8.29
O3A3	2	48.97	49.55	49.13	198.99	1,669.21	7.42
O3A3	3	48.98	49.76	49.38	203.66	1,692.21	10.04
C2A3	1	49.30	50.51	49.15	211.58	1,728.73	12.21
C2A3	2	49.53	49.72	49.14	208.29	1,721.21	12.26
C2A3	3	49.18	49.44	49.80	210.05	1,734.71	12.64
O2A3	1	49.26	50.13	48.77	194.51	1,615.09	9.61
O2A3	2	49.42	49.86	49.03	195.93	1,621.75	10.15
O2A3	3	49.21	49.73	48.98	195.10	1,627.67	10.31
C1A3	1	50.04	49.06	50.50	210.00	1,693.88	15.26
C1A3	2	49.17	49.11	48.88	196.29	1,663.02	17.66
C1A3	3	49.55	49.43	49.22	197.92	1,641.78	15.60
O1A3	1	48.33	48.15	48.07	165.11	1,476.00	9.98
O1A3	2	48.44	48.53	47.82	164.75	1,465.55	11.93
O1A3	3	48.43	47.98	48.41	165.62	1,472.32	10.53
C3A4	1	49.62	49.70	49.83	210.55	1,713.37	9.30
C3A4	2	49.95	49.40	49.90	212.95	1,729.48	10.05
C3A4	3	50.02	49.36	49.38	210.36	1,725.41	10.13
O3A4	1	49.30	49.80	49.42	206.46	1,701.60	11.35
O3A4	2	49.74	48.81	49.66	204.35	1,694.94	11.55
O3A4	3	49.74	49.13	49.17	204.13	1,698.85	11.11
C2A4	1	49.11	49.82	49.01	204.95	1,709.19	10.99
C2A4	2	49.08	49.65	49.22	207.60	1,730.86	11.42
C2A4	3	48.93	49.51	48.96	205.83	1,735.40	12.20
O2A4	1	48.92	49.71	48.84	193.60	1,630.04	12.10
O2A4	2	49.41	49.61	49.10	197.00	1,636.82	12.13
O2A4	3	49.57	49.66	48.86	195.73	1,627.34	12.23
C1A4	1	49.40	50.24	49.01	197.45	1,623.29	12.47
C1A4	2	49.23	49.95	49.30	198.88	1,640.51	13.68
C1A4	3	48.88	49.89	49.08	196.50	1,641.77	13.58
O1A4	1	48.46	49.33	48.13	172.63	1,500.40	13.59
O1A4	2	47.85	48.80	47.71	168.04	1,508.35	13.69
O1A4	3	48.84	49.27	48.06	171.55	1,483.37	14.04
C3A5	1	49.59	51.47	49.55	210.90	1,667.57	12.62
C3A5	2	49.43	50.16	49.67	207.01	1,680.93	11.31
C3A5	3	49.52	50.51	49.50	206.98	1,671.73	12.11
O3A5	1	49.69	48.06	49.90	197.05	1,653.57	14.01

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
O3A5	2	50.02	50.06	49.54	191.38	1,542.79	12.67
O3A5	3	47.51	48.89	48.61	193.75	1,715.98	13.44
C2A5	1	48.44	50.18	49.53	203.78	1,692.62	15.27
C2A5	2	48.41	47.59	47.55	200.56	1,830.81	13.12
C2A5	3	50.00	50.12	48.17	198.56	1,644.88	14.65
O2A5	1	47.41	47.03	49.61	213.21	1,927.50	15.52
O2A5	2	50.73	49.87	47.94	206.57	1,703.20	13.80
O2A5	3	49.05	49.93	47.38	207.27	1,786.24	15.26
C1A5	1	47.62	50.58	47.23	216.22	1,900.68	16.78
C1A5	2	49.35	48.96	47.44	212.67	1,855.38	15.04
C1A5	3	48.74	49.87	48.10	210.65	1,801.74	16.59
O1A5	1	48.46	50.20	48.45	195.38	1,657.67	17.67
O1A5	2	47.51	48.44	47.92	193.36	1,753.32	15.72
O1A5	3	48.70	47.11	49.20	189.29	1,676.95	16.35

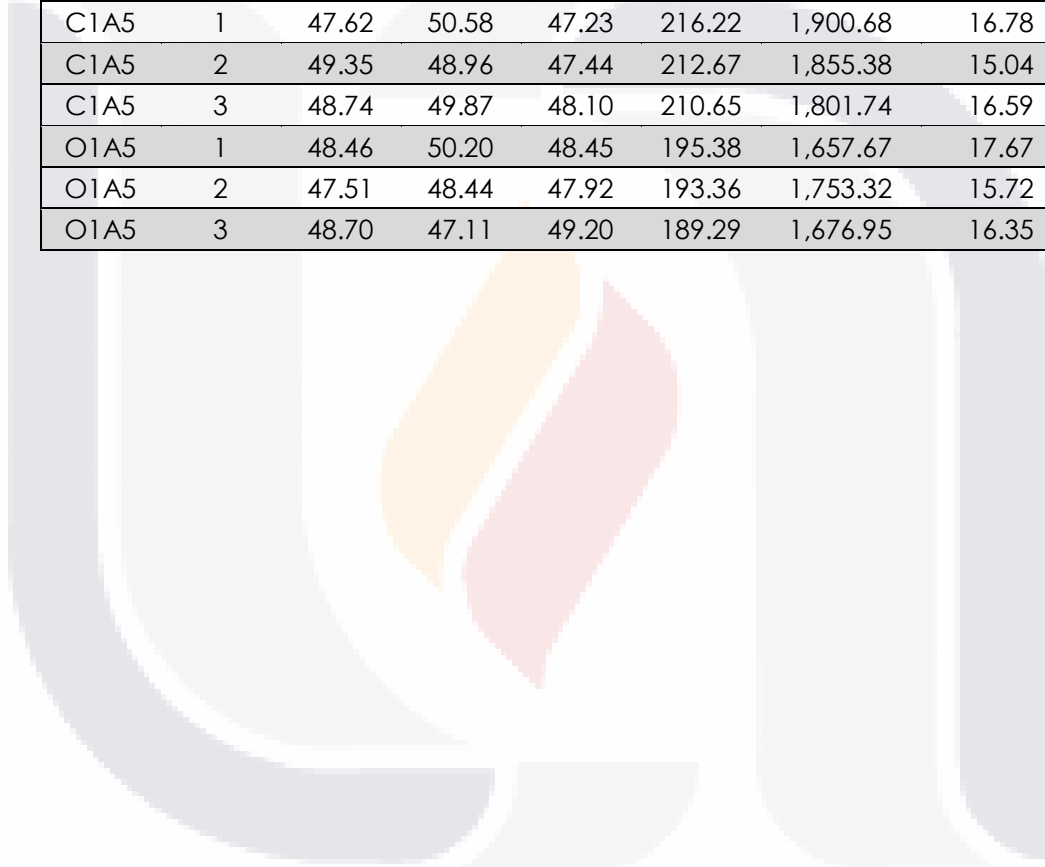


Tabla 23. Características mecánicas de probetas ensayadas a 4 meses.

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A1	1	49.92	49.13	50.02	220.83	1,800.09	5.22
C3A1	2	50.02	50.00	50.07	224.46	1,792.45	5.78
C3A1	3	50.40	49.20	50.24	225.27	1,808.25	5.31
O3A1	1	49.86	48.68	49.24	198.04	1,657.04	4.40
O3A1	2	49.49	48.35	49.34	196.55	1,664.79	4.45
O3A1	3	50.17	50.09	49.80	207.37	1,657.00	4.15
C2A1	1	49.83	49.33	49.84	220.25	1,797.78	8.10
C2A1	2	50.10	49.48	49.91	223.02	1,802.56	8.63
C2A1	3	49.72	50.41	49.77	222.03	1,779.90	8.04
O2A1	1	50.46	49.04	49.63	198.37	1,615.23	5.49
O2A1	2	49.72	48.70	49.66	196.66	1,635.50	5.60
O2A1	3	49.29	47.02	49.21	181.44	1,590.88	4.54
C1A1	1	49.59	50.66	49.04	209.23	1,698.30	13.13
C1A1	2	49.23	49.68	49.12	204.48	1,702.08	11.73
C1A1	3	49.50	50.42	49.05	208.04	1,699.42	13.26
O1A1	1	48.17	48.02	48.35	169.14	1,512.35	7.30
O1A1	2	48.83	47.32	48.26	168.51	1,511.15	7.58
O1A1	3	48.46	47.41	48.24	169.16	1,526.29	8.67
C3A2	1	50.14	49.82	49.97	222.04	1,778.83	8.91
C3A2	2	49.82	49.05	50.08	219.54	1,793.93	8.88
C3A2	3	50.92	49.81	50.39	227.77	1,782.16	9.20
O3A2	1	49.91	49.35	50.58	209.58	1,682.27	6.34
O3A2	2	49.67	49.07	48.94	197.45	1,655.32	6.10
O3A2	3	49.61	49.14	49.00	197.43	1,652.77	6.09
C2A2	1	49.78	50.22	49.46	215.49	1,742.78	7.16
C2A2	2	49.71	50.50	49.48	216.00	1,738.96	7.12
C2A2	3	49.60	49.98	49.80	215.97	1,749.39	7.87
O2A2	1	49.41	49.86	48.97	164.09	1,360.14	7.16
O2A2	2	49.37	49.27	48.83	188.72	1,588.86	7.17
O2A2	3	49.72	48.71	49.27	190.79	1,598.91	5.86
C1A2	1	49.11	49.05	49.60	198.65	1,662.64	10.48
C1A2	2	49.12	49.33	49.22	200.33	1,679.71	10.84
C1A2	3	49.83	49.01	49.35	201.82	1,674.56	10.28
O1A2	1	48.16	48.00	48.33	167.39	1,498.25	8.89
O1A2	2	48.56	47.91	48.24	167.19	1,489.70	8.89
O1A2	3	48.07	47.60	48.06	161.76	1,470.98	8.37
C3A3	1	49.60	50.25	49.41	217.24	1,764.03	7.65

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
C3A3	2	50.00	50.34	49.77	220.87	1,763.14	6.40
C3A3	3	49.89	50.00	49.53	217.72	1,762.16	6.41
O3A3	1	49.03	49.43	48.84	198.50	1,677.00	6.75
O3A3	2	49.11	49.71	49.22	202.14	1,682.27	7.74
O3A3	3	49.07	49.79	48.95	199.11	1,664.88	6.61
C2A3	1	49.75	49.70	49.52	213.36	1,742.54	9.64
C2A3	2	49.58	49.93	49.77	213.71	1,734.56	11.95
C2A3	3	49.13	49.85	49.30	210.15	1,740.49	10.05
O2A3	1	49.53	49.48	48.79	189.20	1,582.31	8.75
O2A3	2	48.91	49.75	48.75	194.67	1,641.09	9.28
O2A3	3	49.01	49.90	48.66	196.22	1,648.87	9.28
C1A3	1	49.33	48.91	48.89	195.75	1,659.48	14.82
C1A3	2	48.96	49.18	49.12	194.98	1,648.55	13.30
C1A3	3	48.94	49.35	48.77	197.27	1,674.78	14.72
O1A3	1	48.45	48.25	48.16	166.35	1,477.56	8.85
O1A3	2	48.34	47.59	48.33	164.08	1,475.76	9.83
O1A3	3	48.40	48.12	48.09	165.24	1,475.33	9.42
C3A4	1	49.13	49.73	49.31	210.93	1,750.81	8.98
C3A4	2	49.56	49.90	49.52	212.89	1,738.37	8.67
C3A4	3	48.97	48.81	49.72	207.53	1,746.27	9.29
O3A4	1	49.39	48.99	49.90	204.60	1,694.57	10.04
O3A4	2	49.31	49.50	49.40	203.62	1,688.70	9.61
O3A4	3	49.58	50.16	49.05	204.03	1,672.60	9.76
C2A4	1	49.08	49.45	49.36	207.30	1,730.43	10.57
C2A4	2	49.32	48.60	49.52	204.36	1,721.69	10.37
C2A4	3	49.01	49.41	49.58	205.78	1,713.95	10.42
O2A4	1	48.80	49.42	49.00	192.09	1,625.50	10.77
O2A4	2	48.64	49.06	48.95	193.07	1,652.88	11.30
O2A4	3	48.81	49.75	49.05	193.76	1,626.76	11.08
C1A4	1	48.39	49.38	48.96	195.67	1,672.54	13.62
C1A4	2	49.05	49.30	49.38	194.06	1,625.17	12.54
C1A4	3	48.98	49.76	49.35	198.01	1,646.27	12.15
O1A4	1	48.08	48.32	47.83	169.67	1,526.91	13.61
O1A4	2	47.94	48.42	47.96	167.78	1,507.09	13.23
O1A4	3	48.20	48.04	47.70	168.03	1,521.31	13.42
C3A5	1	49.67	50.52	49.54	208.00	1,673.21	11.79
C3A5	2	49.59	50.42	49.45	207.27	1,676.38	11.38
C3A5	3	49.40	49.95	49.58	205.17	1,677.05	11.10
O3A5	1	49.84	49.41	49.31	192.15	1,582.39	13.68

Código	Probeta	D1 (mm)	D2 (mm)	D3 (mm)	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
O3A5	2	49.48	49.13	47.63	193.20	1,668.59	13.31
O3A5	3	48.27	49.09	50.15	189.86	1,597.69	13.10
C2A5	1	47.63	47.14	50.26	199.10	1,764.33	14.74
C2A5	2	49.80	47.07	47.30	198.55	1,790.75	14.34
C2A5	3	47.69	50.64	48.37	197.79	1,693.20	13.76
O2A5	1	49.82	49.19	50.83	209.62	1,682.80	15.56
O2A5	2	49.69	50.34	50.59	207.84	1,642.41	14.68
O2A5	3	48.82	48.13	49.87	206.32	1,760.71	14.21
C1A5	1	50.23	49.28	47.62	212.60	1,803.60	15.80
C1A5	2	48.59	47.54	48.95	209.73	1,854.82	16.39
C1A5	3	48.71	48.97	48.45	210.05	1,817.53	15.43
O1A5	1	47.78	49.24	50.69	191.65	1,607.02	15.92
O1A5	2	47.77	47.48	49.92	194.01	1,713.50	15.25
O1A5	3	49.63	48.18	47.87	189.76	1,657.79	14.43



# CAPÍTULO

# 6

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

## 6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1. Evaluación de normalidad de los resultados

Con el fin de determinar la factibilidad de las diversas pruebas estadísticas existentes para la comprobación de las hipótesis es necesario determinar si los resultados de las variables presentan un comportamiento normal, dado que es condición para la selección de cualquiera de estas pruebas estadísticas.

Los resultados de la prueba de normalidad indican si es posible rechazar o no la hipótesis nula de que los datos evaluados proceden de una población distribuida normalmente. La prueba de normalidad y la gráfica de probabilidad suelen ser las mejores herramientas para juzgar la normalidad de los datos evaluados.

La evaluación de la normalidad se realizó utilizando las rutinas pertinentes del software MINITAB®, considerando las tres pruebas de que este programa permite para la determinación de la normalidad de variables continuas. Las tres pruebas realizadas fueron:

- 1) Prueba de normalidad de Anderson-Darling
- 2) Prueba de normalidad de Ryan-Joiner (Similar a Shapiro-Wilk)
- 3) Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

#### 6.1.1. Prueba de Anderson-Darling

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica de los datos de la muestra con la distribución esperada, si los datos fueran normales. Si la diferencia observada es adecuadamente grande, se rechaza la hipótesis nula de normalidad en la población (MINITAB, 2017).

Se plantearon las hipótesis nulas y de trabajo para la determinación de la normalidad de la variable de estudio. Se consideró para la evaluación de todas las variables un nivel de significación:

$$\alpha = 0.05$$

**Variable Y**

Se plantean las hipótesis a comprobar:

H0= La Variable independiente "Y: Resistencia a la Compresión" presenta una distribución Normal.

H1= La Variable independiente "Y: Resistencia a la Compresión" presenta una distribución distinta a la distribución Normal.

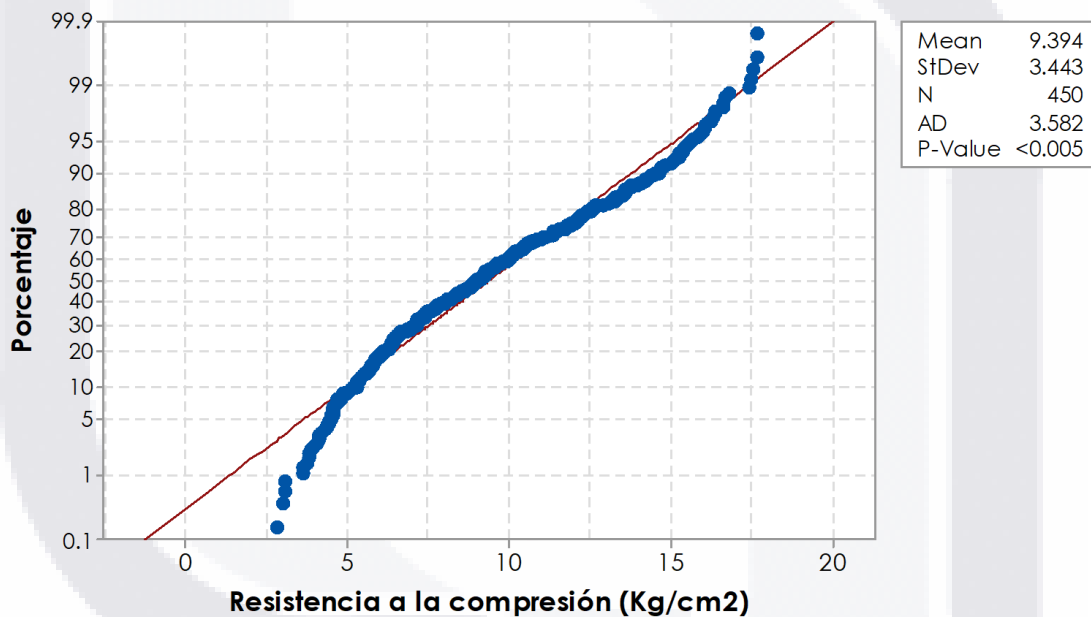


Figura 29. Gráfica de Análisis de Normalidad por la prueba de Anderson Darling para La Variable dependiente "Y: Resistencia a la compresión".

Dado que:

- 1) El valor del estadístico de Anderson-Darling (AD) = 3.582 ≠ 0 y;
- 2) El valor p= 0.005 < α =0.05 por lo que:

Se rechaza la hipótesis nula H0.

∴ La Variable independiente “Y: Resistencia a la Compresión” presenta una distribución distinta a la distribución Normal.

### 6.1.2. Prueba de normalidad de Ryan-Joiner

Esta prueba evalúa la normalidad calculando la correlación entre los datos y las puntuaciones normales de los datos. Si el coeficiente de correlación se encuentra cerca de 1, es probable que la población sea normal. El estadístico de Ryan Joiner evalúa la fuerza de esta correlación; si se encuentra por debajo del valor crítico apropiado, se rechaza la hipótesis nula de normalidad en la población. Esta prueba es similar a la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk (MINITAB, 2017). Se consideró para la evaluación de todas las variables un nivel de significación:

$$\alpha = 0.05$$

#### Variable Y

Se plantean las hipótesis a comprobar:

H0= La Variable independiente “Y: Resistencia a la Compresión” presenta una distribución Normal.

H1= La Variable independiente “Y: Resistencia a la Compresión” presenta una distribución distinta a la distribución Normal.

Dado que:

1) El valor del estadístico de Ryan-Joiner (RJ) =0.986 y;

2) El valor  $p= 0.010 < \alpha =0.05$  por lo que:

Se rechaza la hipótesis nula H0.

∴ La Variable independiente “Y: Resistencia a la Compresión” presenta una distribución distinta a la distribución Normal.

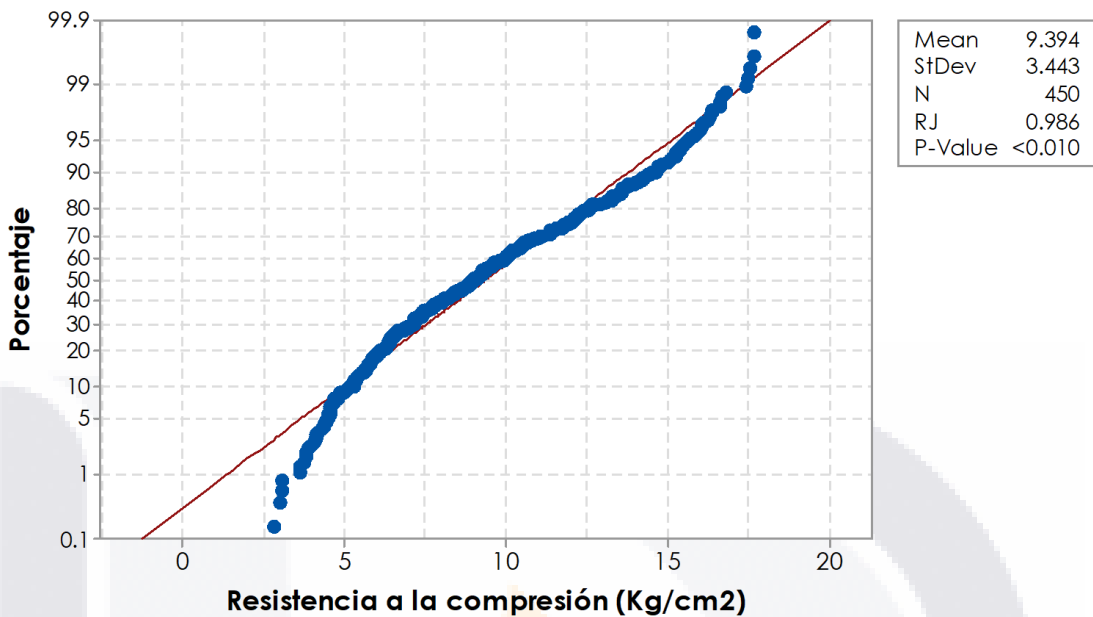


Figura 30. Gráfica de Análisis de Normalidad por la prueba de Ryan-Joiner para La Variable dependiente "Y: Resistencia a la compresión".

### 6.1.3. Prueba de normalidad de Kolmogorov-Smirnov

Esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si esta diferencia observada es adecuadamente grande, la prueba rechazará la hipótesis nula de normalidad en la población. Si el valor p de esta prueba es menor que el nivel de significancia ( $\alpha$ ) elegido, usted puede rechazar la hipótesis nula y concluir que se trata de una población no normal (MINITAB, 2017). Se consideró para la evaluación de todas las variables un nivel de significación:

$$\alpha = 0.05$$

#### Variable Y

Se plantean las hipótesis a comprobar:

H0= La Variable independiente "Y: Resistencia a la Compresión" presenta una distribución Normal.

H1= La Variable independiente "Y: Resistencia a la Compresión" presenta una distribución distinta a la distribución Normal.

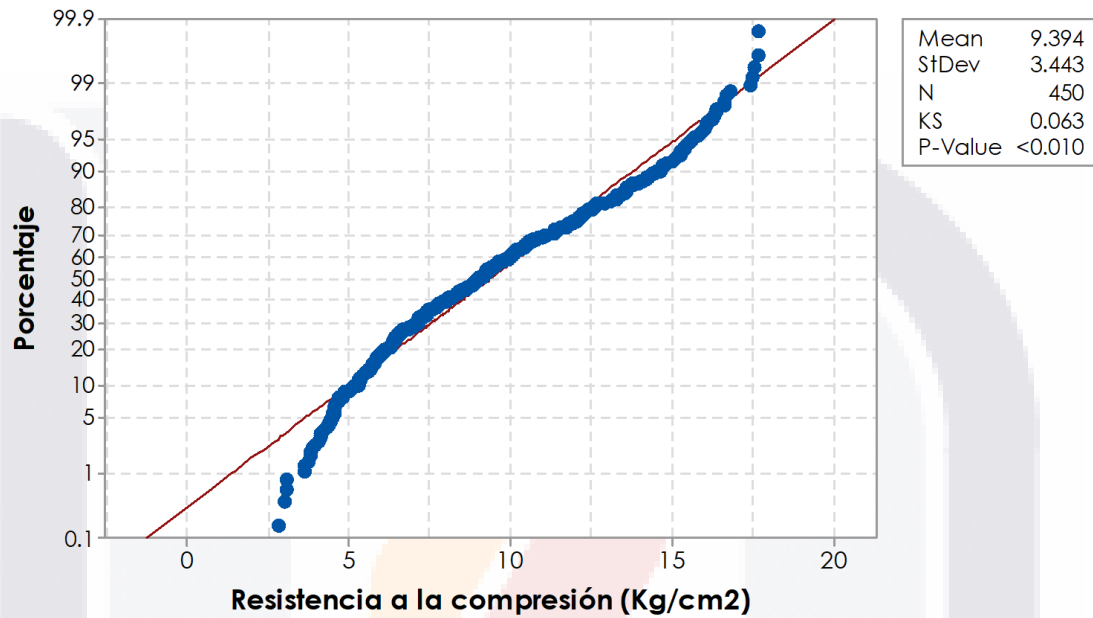


Figura 31. Gráfica de Análisis de Normalidad por la prueba de Kolmogorov-Smirnov para La Variable dependiente "Y: Resistencia a la compresión".

Dado que:

- 1) El valor del estadístico de Kolmogorov-Smirnov (KS) =0.063 y;
- 2) El valor  $p= 0.010 < \alpha =0.05$  por lo que:

Se rechaza la hipótesis nula H0.

∴ La Variable independiente "X1: Nivel de Protección" presenta una distribución distinta a la distribución Normal.

Dados los resultados observados es posible afirmar que los resultados de la variable Y no presentan una distribución normal, ya que la normalidad de dicha variable fue rechazada por las tres pruebas ejecutadas.

## 6.2. Justificación de las pruebas estadísticas para la comprobación de hipótesis de investigación

Habiéndose demostrado la no normalidad de los datos, es necesario seleccionar los instrumentos estadísticos que se utilizan para la evaluación de las hipótesis principales y secundarias. Lo anterior debido a que las pruebas paramétricas que usamos normalmente, generalmente consideran que las distribuciones muestrales de los datos obtenidos del instrumento de medición se ajustan a una distribución normal. Este supuesto de normalidad no siempre se cumple, sin embargo, estos métodos son los más usados puesto que los métodos paramétricos son robustos, además de que tienen una mayor potencia, lo cual en estadística significa que la probabilidad de que la hipótesis nula sea rechazada cuando la hipótesis alternativa es verdadera es mayor, es decir que tienen una menor probabilidad de aceptar falsos positivos.

Para la comprobación de las hipótesis se lleva a cabo una evaluación de correlación entre la variable Y de la resistencia a la compresión contra el tiempo de fraguado, el módulo de finura, el porcentaje de absorción y densidad de las arenas utilizadas. Para los datos categóricos se utiliza una prueba de comprobación de diferencia de medias.

## 6.3. La prueba t de 2 muestras independientes

Esta prueba realiza una prueba de hipótesis de la diferencia entre las medias de dos poblaciones cuando no se conocen las desviaciones estándar y las muestras se extraen de manera independiente entre sí. Para realizar una prueba t de 2 muestras, las dos poblaciones deben ser independientes; esta prueba también funciona adecuadamente cuando se viola el supuesto de normalidad, pero solo si la distribución subyacente no es muy asimétrica.

Con distribuciones no normales o muy asimétricas, podría ser más conveniente usar un procedimiento no paramétrico.

Para la prueba t de 2 muestras, las hipótesis son:

Hipótesis nula

$$H_0: \mu_1 - \mu_2 = \delta_0$$

La diferencia entre las medias de las poblaciones ( $\mu_1 - \mu_2$ ) es igual a la diferencia hipotética ( $\delta_0$ ).

Hipótesis alternativa

Es necesario elegir una de las hipótesis alternativas que representaran las hipótesis del investigador:

$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq \delta_0$  La diferencia entre las medias de las poblaciones ( $\mu_1 - \mu_2$ ) no es igual a la diferencia hipotética ( $\delta_0$ ).

$H_1: \mu_1 - \mu_2 > \delta_0$  La diferencia entre las medias de las poblaciones ( $\mu_1 - \mu_2$ ) es mayor que la diferencia hipotética ( $\delta_0$ ).

$H_1: \mu_1 - \mu_2 < \delta_0$  La diferencia entre las medias de las poblaciones ( $\mu_1 - \mu_2$ ) es menor que la diferencia hipotética ( $\delta_0$ ).

#### 6.4. Correlación del momento del producto de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson "r" permite medir la fuerza y la dirección de la asociación de dos variables cuantitativas aleatorias con una distribución bivariada conjunta. La correlación de Pearson evalúa la relación lineal entre dos variables continuas. Una relación es lineal cuando un cambio en una variable se asocia con un cambio proporcional en la otra variable.

$$Covarianza = \frac{\sum(\bar{X} - X) * (\bar{Y} - Y)}{n - 1}$$



$n$ = Tamaño de la muestra

$\bar{X}$  Media de X

$\bar{Y}$  Media de Y

$$r = \frac{\text{covarianza}}{S_x * S_y}$$

R= Coeficiente de correlación

$S_x$ = Desviación típica x

$S_y$ = Desviación típica y

Una vez realizado el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) se debe evaluar si dicho coeficiente es estadísticamente diferente de cero. Para dicho cálculo se aplica un test basado en la distribución de la  $t$  de student.

La prueba de significación del coeficiente de correlación de Pearson puede plantearse de dos maneras:

1. Bilateral: si se contrasta la hipótesis nula de ausencia de asociación lineal sin especificar de antemano en la hipótesis alternativa la dirección o sentido de la asociación, en caso de que ésta exista.
2. Unilateral: si se contrasta la hipótesis nula especificando de antemano en la hipótesis alternativa la dirección de la asociación. Si se desea un contraste unilateral es necesario activar la opción correspondiente. A nivel muestral (aun en muestras muy grandes), es muy complicado encontrar valor de  $r = 0$  aun cuando las variables sean completamente independientes, de modo que se acepta que mientras más se acerque dicho coeficiente a 1, el grado de relación entre las variables evaluadas será más fuerte.

En este tipo de pruebas se determina  $R^2$  que es el coeficiente de correlación de Pearson, de acuerdo con lo siguiente:

Si  $R \approx 1$  Existe correlación lineal entre los datos analizados.

Si  $R \approx 0$  NO existe correlación lineal entre los datos analizados.

Las hipótesis planteadas para este caso tendrán que ser:

*Hipótesis nula*

$H_0: R \approx 0$  No existe correlación entre las variables analizadas.

*Hipótesis alternativa*

$H_0: R \neq 0$  Existe correlación entre las variables analizadas.

#### 6.4.1. Interpretación de la correlación

Cuando se calcula la correlación entre dos variables interesa saber si la correlación entre ellas es diferente de cero también es importante realizar inferencias sobre la fuerza o el nivel de la correlación entre las variables, esto no siempre resulta sencillo, debido a que, por ejemplo, una correlación de 0.6 sería baja si se trata de la fiabilidad de un cierto test, sin embargo, sería alta si estamos hablando de su validez.

Más interés tiene la interpretación del coeficiente de correlación en términos de proporción de variabilidad compartida o explicada, donde se ofrece una idea más cabal de la magnitud de la relación, dicho coeficiente es conocido también como el coeficiente de determinación, el cual se define como el cuadrado del coeficiente de correlación; esto es, dadas dos variables independientes y dependiente, hace referencia a  $r^2_{xy}$ , y se entiende como una proporción de variabilidades de la regresión y puede entenderse como que tanto pueden explicarse los resultados de una variable en función a las variaciones de la otra.

Tabla 24. Rangos de r para la interpretación de los coeficientes de determinación.

Rango de r <sup>2</sup> / p <sup>2</sup>	Interpretación de la correlación
0.00 - 0.25	Escasa o nula
0.26 - 0.50	Débil
0.51 - 0.75	Entre moderada y fuerte
0.76 - 1.00	Entre fuerte y perfecta

### 6.5. Análisis y discusión de los resultados por categoría

Se realizó una evaluación de cada uno de los resultados, comparando los resultados obtenidos de resistencia a la compresión organizados por cada factor involucrado en el diseño de la mezcla de mortero así para evaluar si dichos factores resultan estadísticamente significativos en la resistencia final de un mortero y en qué grado.

#### 6.5.1. Tipo de arena

Se realizó una prueba de diferencia de medias a los resultados de resistencia a la compresión organizados por cada tipo de arena utilizada para la fabricación de los morteros comparando todas las posibles combinaciones con el fin de conocer cuál de dichas arenas presenta la mayor resistencia y a su vez evaluar si estas diferencias son estadísticamente significativas o solo producto del azar.

#### **Arenas 1 y 2**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A1 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A2.

H1: Los morteros elaborados con la arena A1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A2.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 25. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A2.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A1	90	6.92	2.72	0.29	-0.849
A2	90	7.77	1.92	0.20	
T-Valor		-2.42	P-Valor		0.016

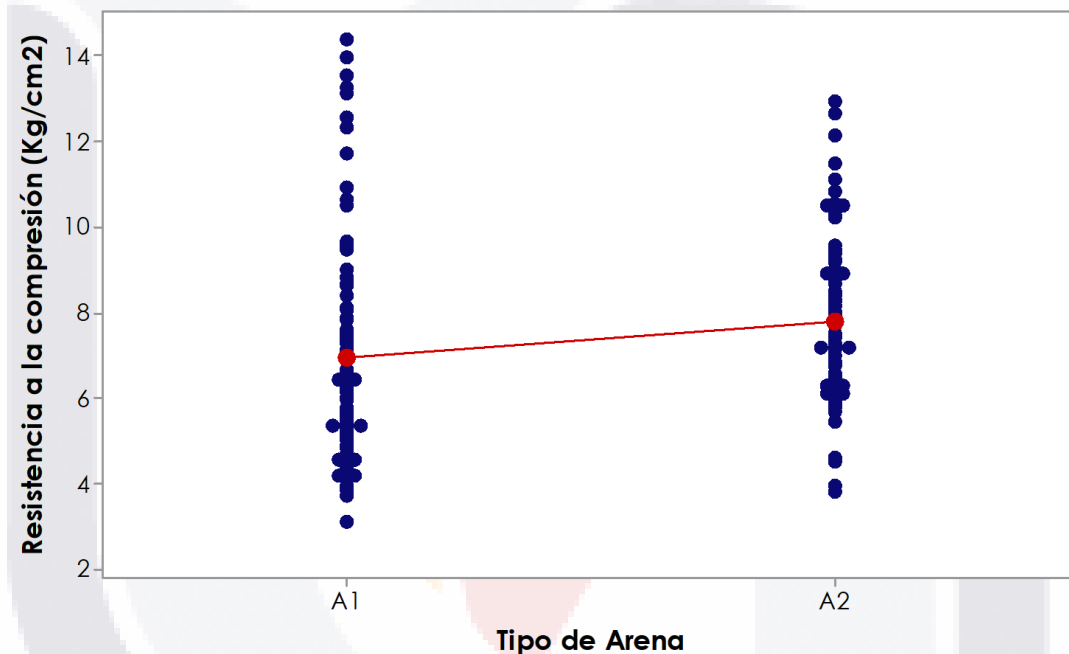


Figura 32. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A2.

Prueba t para dos muestras

$$p\text{-valor} = 0.016 > \alpha = 0.05$$

∴ Se rechazar la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A1 y A2 con un nivel de significancia del 5%.

**Arenas 1 y 3**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A1 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A3.

H1: Los morteros elaborados con la arena A1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A3.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 26. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A3.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A1	90	6.92	2.72	0.29	-1.876
A3	90	8.79	3.09	0.33	
T-Valor	-4.33	P-Valor		0.000	

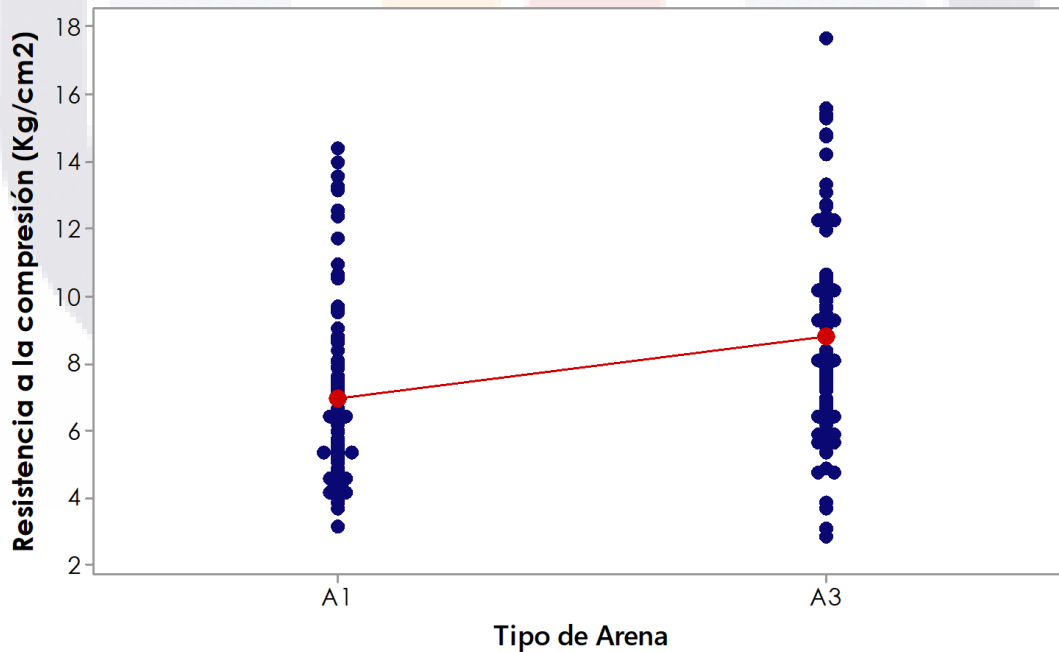


Figura 33. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A3.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A1 y A3 con un nivel de significancia del 5%.

**Arenas 1 y 4**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A1 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A4.

H1: Los morteros elaborados con la arena A1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A4.

Nivel de Significancia  $\alpha$  = 5% = 0.05

Tabla 27. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A4.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A1	90	6.92	2.72	0.29	-3.040
A4	90	9.96	2.42	0.26	
T-Valor		-7.93	P-Valor		0.000

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A1 y A4 con un nivel de significancia del 5%.

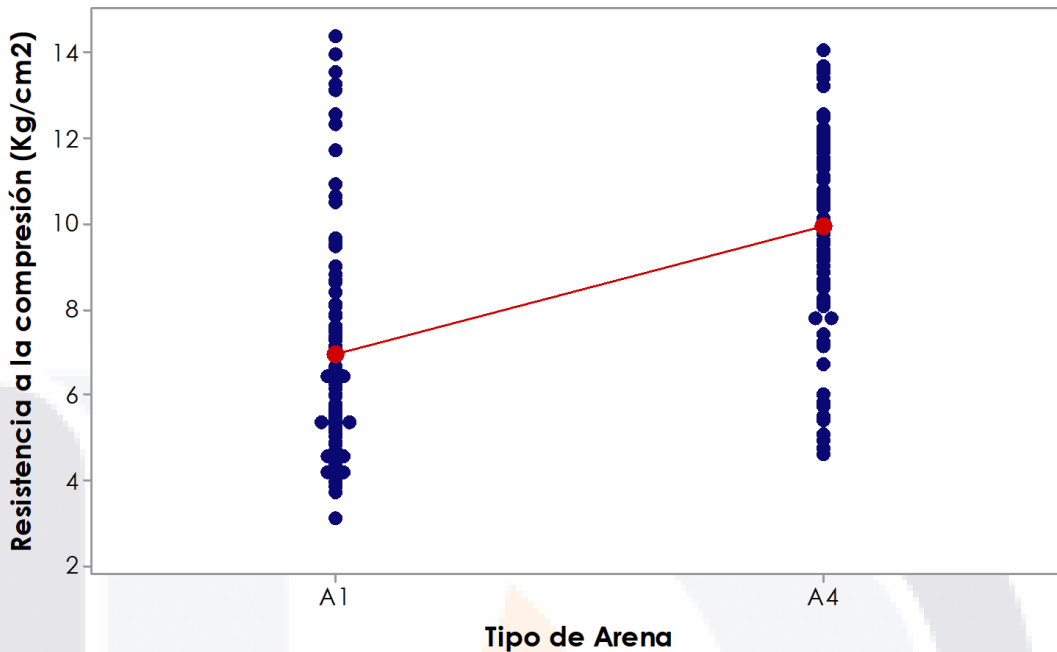


Figura 34. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A4.

### Arenas 1 y 5

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A1 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

H1: Los morteros elaborados con la arena A1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 28. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A5.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A1	90	6.92	2.72	0.29	-6.615
A5	90	13.53	2.55	0.27	
T-Valor	-16.85		P-Valor	0.000	

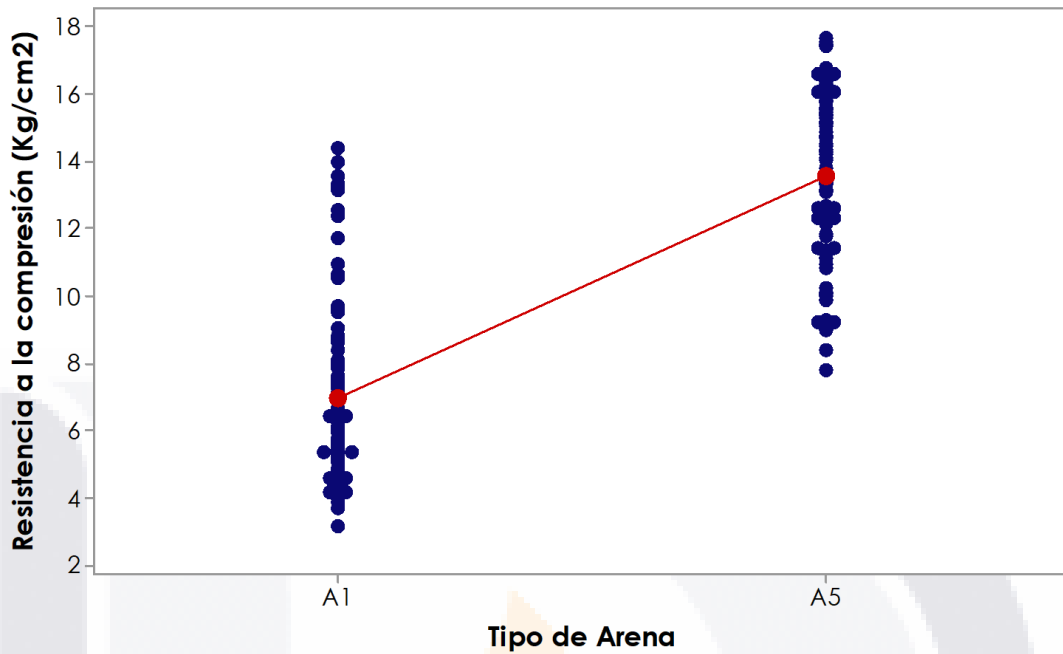


Figura 35. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A1 y A5.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha = 0.05$

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A1 y A5 con un nivel de significancia del 5%.

### Arenas 2 y 3

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A2 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A3.

H1: Los morteros elaborados con la arena A2 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A3.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$



Tabla 29. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A3.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A2	90	7.77	1.92	0.20	-1.027
A3	90	8.79	3.09	0.33	
T-Valor		-2.68	P-Valor		0.008

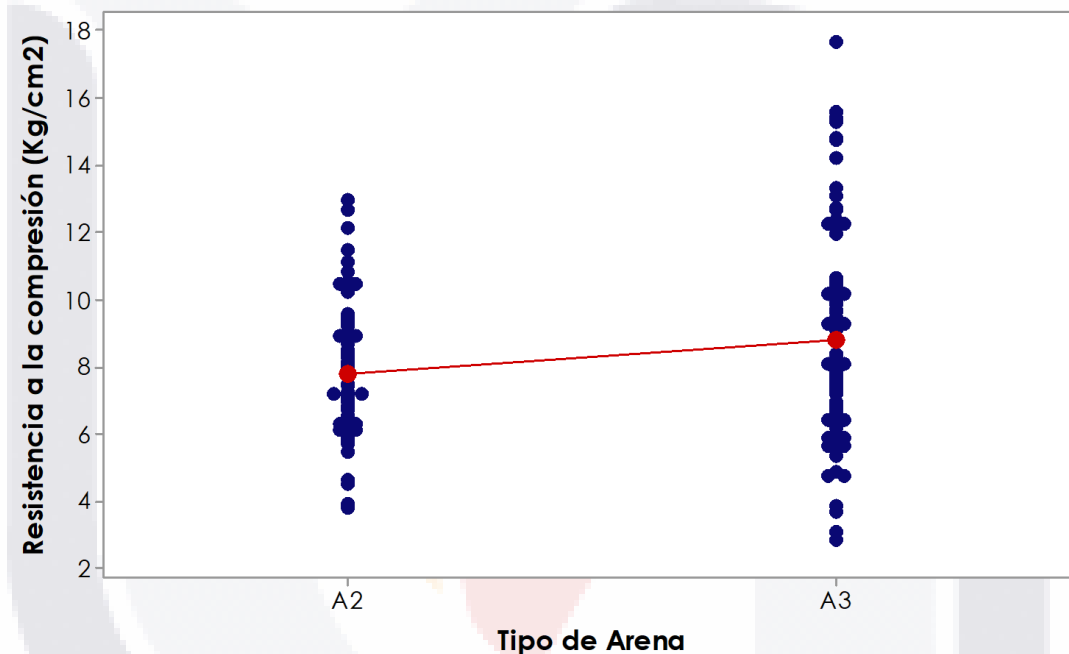


Figura 36. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A3.

Prueba t para dos muestras

$P\text{-valor} = 0.008 < \alpha = 0.05$

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A2 y A3 con un nivel de significancia del 5%.

**Arenas 2 y 4**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A2 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A4.

H1: Los morteros elaborados con la arena A2 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A4.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 30. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A4.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A2	90	7.77	1.92	0.20	-2.191
A4	90	9.96	2.42	0.26	
T-Valor	-6.73	P-Valor		0.000	

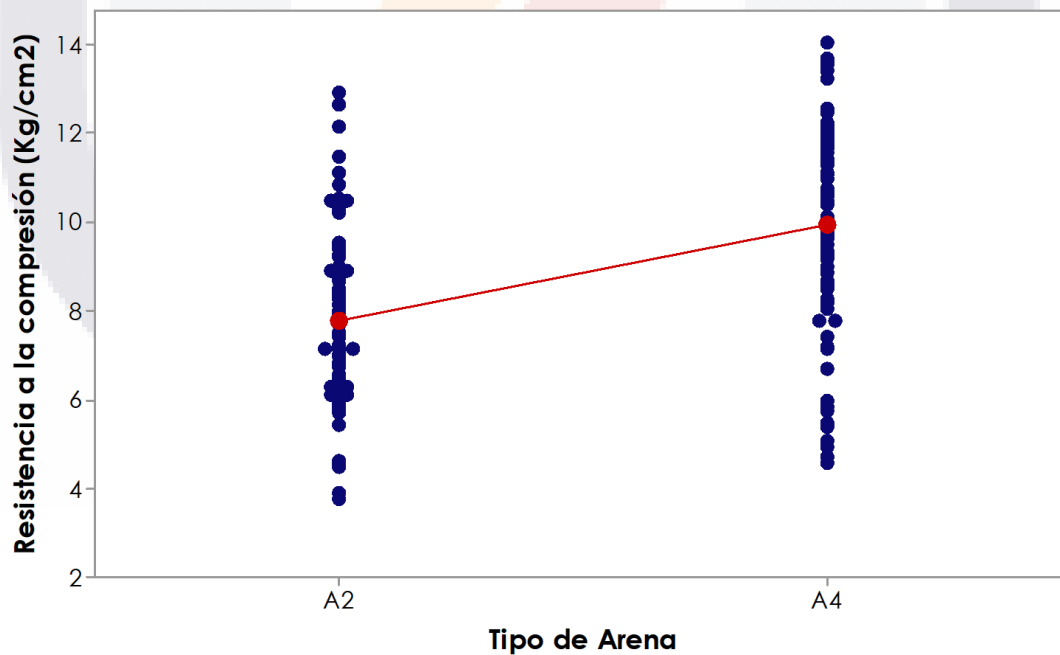


Figura 37. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A4.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A2 y A4 con un nivel de significancia del 5%.

**Arenas 2 y 5**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A2 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

H1: Los morteros elaborados con la arena A2 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

Nivel de Significancia  $\alpha$  = 5% = 0.05

Tabla 31. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A5.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A2	90	7.77	1.92	0.20	-5.766
A5	90	13.53	2.55	0.27	
T-Valor	-17.15	P-Valor		0.000	

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A2 y A5 con un nivel de significancia del 5%.

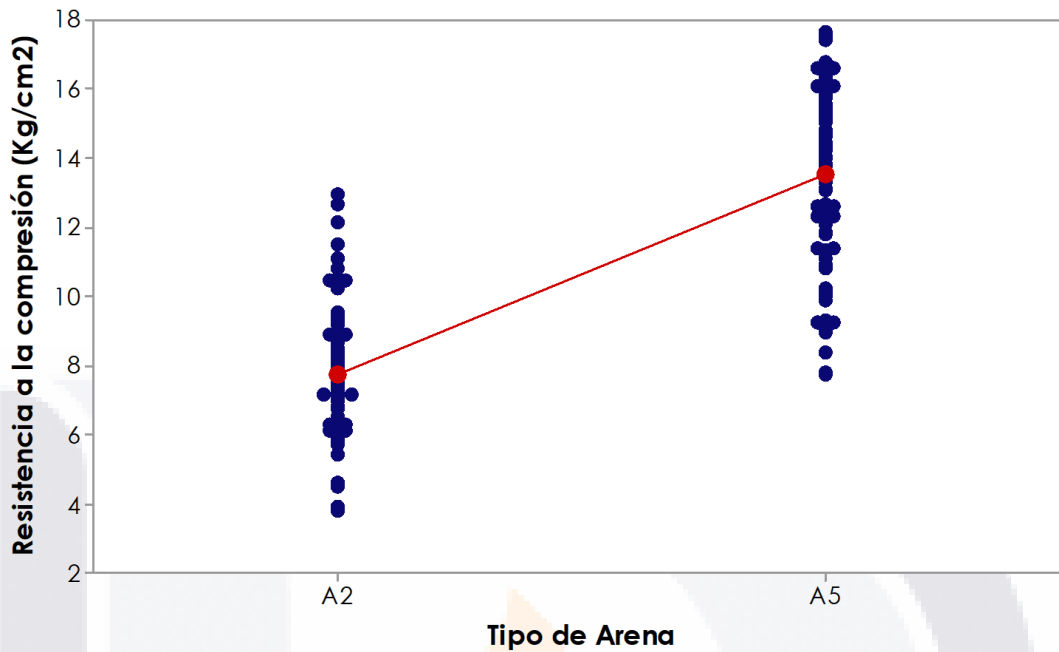


Figura 38. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A2 y A5.

### Arenas 3 y 4

Se plantean las hipótesis:

H<sub>0</sub>: Los morteros elaborados con la arena A3 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A4.

H<sub>1</sub>: Los morteros elaborados con la arena A3 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A4.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 32. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A4.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A3	90	8.79	3.09	0.33	-1.164
A4	90	9.96	2.42	0.26	
T-Valor		-2.82	P-Valor		0.005

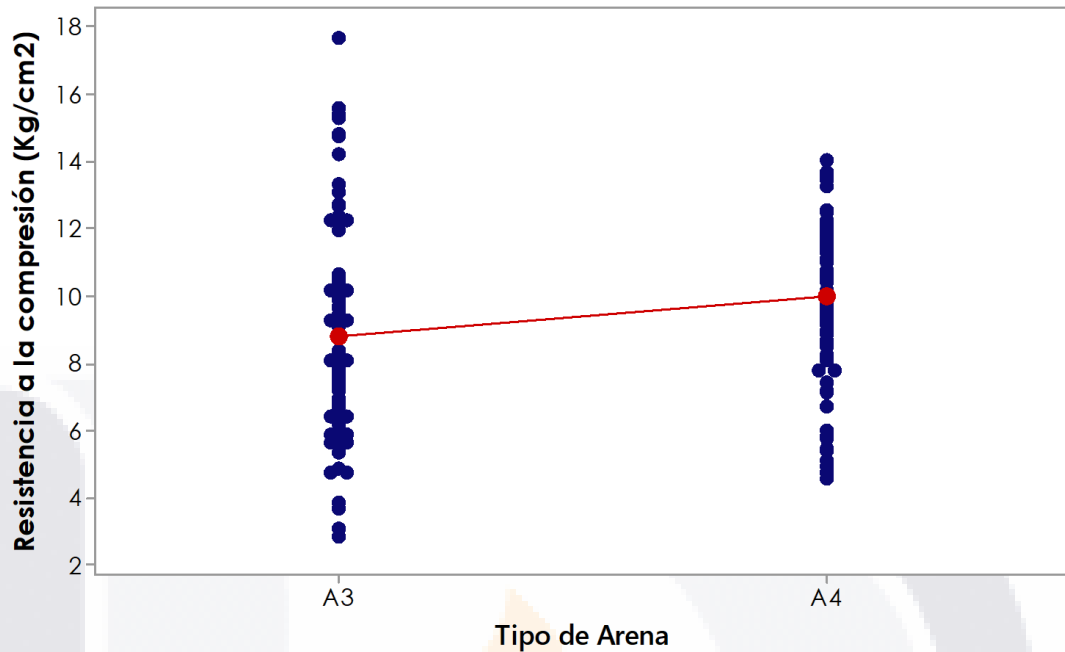


Figura 39. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A4.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.005 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A3 y A4 con un nivel de significancia del 5%.

### Arenas 3 y 5

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A3 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

H1: Los morteros elaborados con la arena A3 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

Nivel de Significancia  $\alpha$  = 5% = 0.05

Tabla 33. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A5.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A3	90	8.79	3.09	0.33	-4.739
A5	90	13.53	2.55	0.27	
T-Valor	-11.23		P-Valor	0.000	

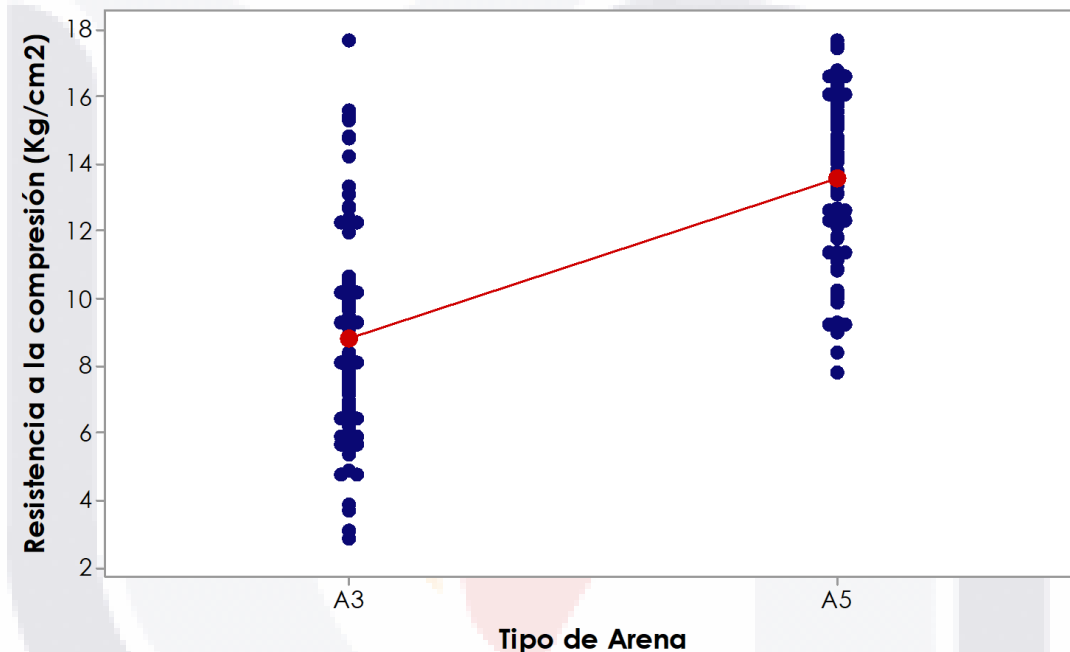


Figura 40. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A3 y A5.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A3 y A5 con un nivel de significancia del 5%.

### Arenas 4 y 5

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la arena A4 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

H1: Los morteros elaborados con la arena A4 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la arena A5.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 34. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A4 y A5.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
A4	90	9.96	2.42	0.26	-3.575
A5	90	13.53	2.55	0.27	
T-Valor	-9.65	P-Valor	0.000		

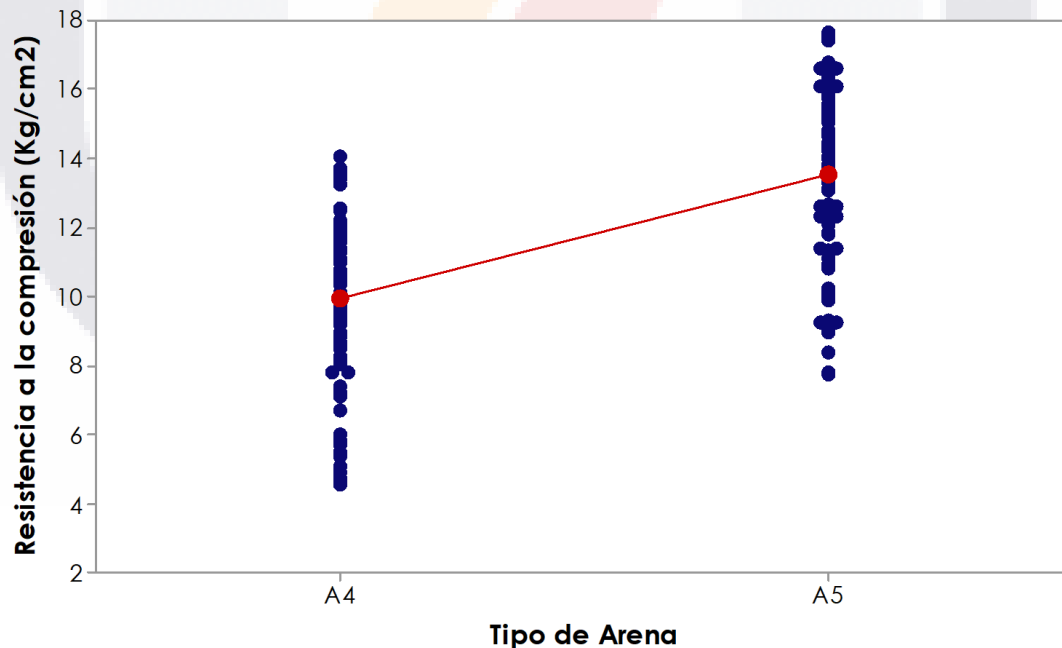


Figura 41. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con arena A4 y A5.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con la arena A4 y A5 con un nivel de significancia del 5%.

### 6.5.2. Tipo de cal

Se realizó una prueba de diferencia de medias a los resultados de resistencia a la compresión de los tipos de cal utilizadas para la fabricación de los morteros, la cal en pasta y la cal en polvo, con el fin de conocer cuál de ambos tipos de cal presenta la mayor resistencia y a su vez evaluar si esta diferencia es estadísticamente significativa o solo producto del azar.

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la cal en polvo presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la cal en pasta.

H1: Los morteros elaborados con la cal en polvo no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con la cal en pasta.

Nivel de Significancia  $\alpha$  = 5% = 0.05

Tabla 35. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con cal en polvo C y cal en pasta O.

	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Error Estándar de la Media</b>	<b>Diferencia de Medias</b>
C	225	9.83	3.18	0.21	0.878
O	225	8.95	3.64	0.24	
T-Valor	2.73		P-Valor	0.007	



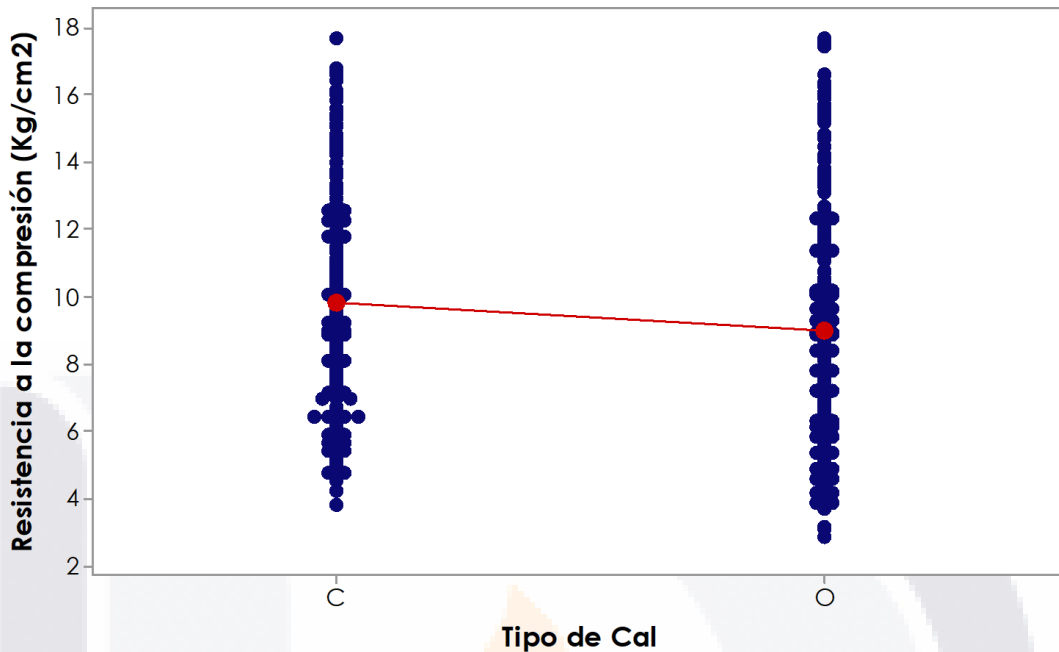


Figura 42. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con cal en polvo C y cal en pasta O.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.007 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con cal en polvo y cal en pasta con un nivel de significancia del 5%.

### 6.5.3. Proporción

Se realizó una prueba de diferencia de medias a los resultados de resistencia a la compresión de los tres tipos de proporción utilizadas para la fabricación de los morteros, con el fin de conocer cuál de estas proporciones presenta la mayor resistencia y a su vez evaluar si esta diferencia es estadísticamente significativa o solo producto del azar.

**Proporción 1:1 y 1:2**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la proporción 1:1 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con una proporción 1:2.

H1: Los morteros elaborados con la proporción 1:1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con una proporción 1:2.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 36. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:2.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
1:1	150	10.92	3.51	0.29	1.764
1:2	150	9.15	3.48	0.28	
T-Valor	4.37		P-Valor		0.000

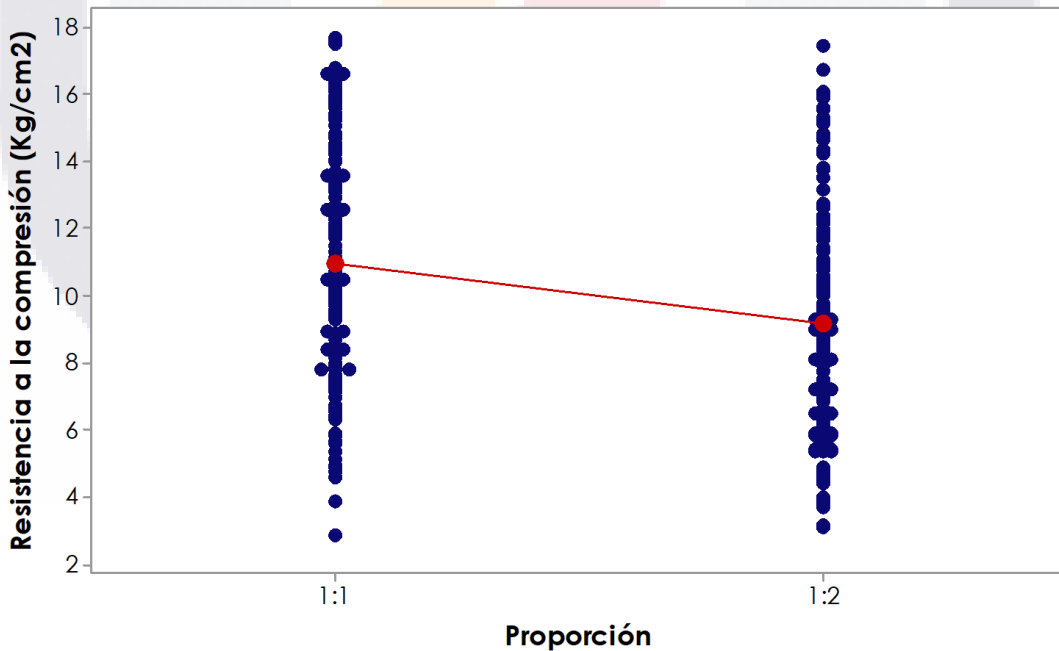


Figura 43. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:2.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y los elaborados con proporción 1:2 con un nivel de significancia del 5%.

**Proporción 1:1 y 1:3**

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la proporción 1:1 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con una proporción 1:3.

H1: Los morteros elaborados con la proporción 1:1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con una proporción 1:3.

Nivel de Significancia  $\alpha$  = 5% = 0.05

*Tabla 37. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:3.*

	<b>N</b>	<b>Media</b>	<b>Desviación Estándar</b>	<b>Error Estándar de la Media</b>	<b>Diferencia de Medias</b>
1:1	150	10.92	3.51	0.29	2.809
1:3	150	8.11	2.69	0.22	
T-Valor	7.78		P-Valor		0.000

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y los elaborados con proporción 1:3 con un nivel de significancia del 5%.

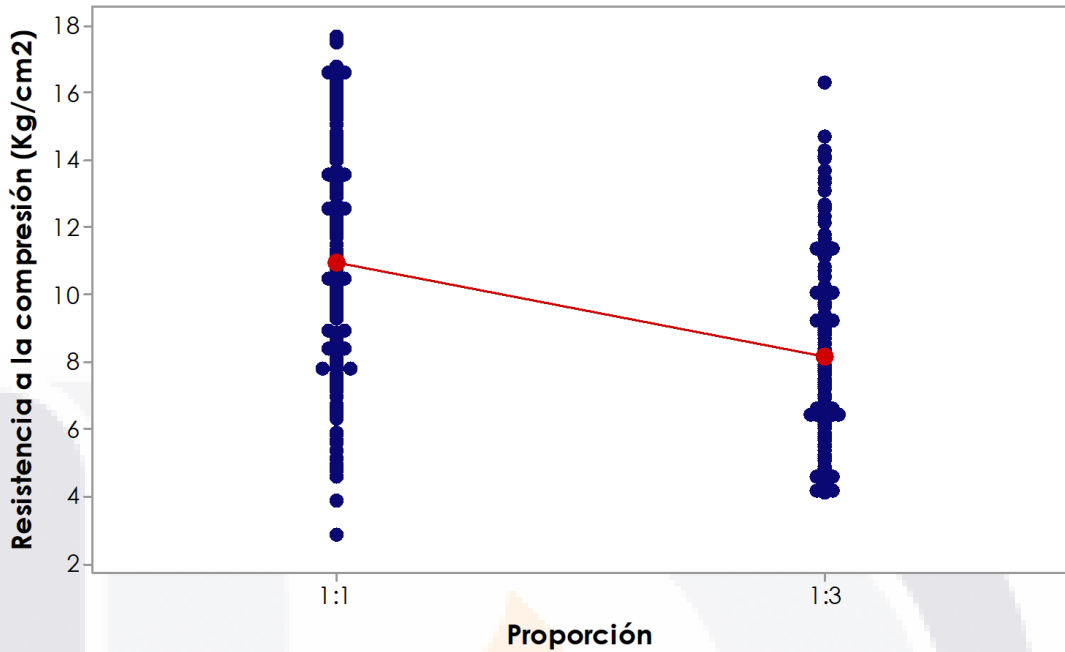


Figura 44. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:1 y 1:3.

### Proporción 1:2 y 1:3

Se plantean las hipótesis:

H0: Los morteros elaborados con la proporción 1:2 presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con una proporción 1:3.

H1: Los morteros elaborados con la proporción 2:1 no presentan una resistencia a la compresión igual a los elaborados con una proporción 1:3.

Nivel de Significancia  $\alpha = 5\% = 0.05$

Tabla 38. Diferencia de medias de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:2 y 1:3.

	N	Media	Desviación Estándar	Error Estándar de la Media	Diferencia de Medias
1:2	150	9.15	3.48	0.28	1.045
1:3	150	8.11	2.69	0.22	
T-Valor	2.91		P-Valor		0.004

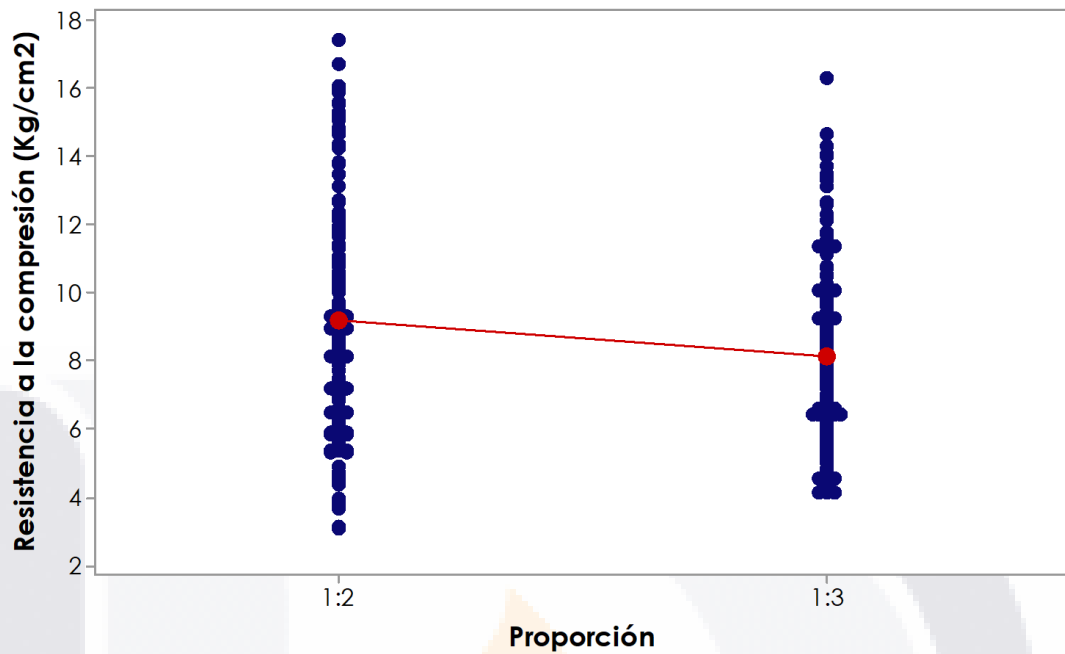


Figura 45. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:2 y 1:3.

Prueba t para dos muestras

P-valor = 0.004 <  $\alpha$  = 0.05

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una diferencia estadística entre la resistencia a la compresión de morteros elaborados con proporción 1:2 y los elaborados con proporción 1:3 con un nivel de significancia del 5%.

#### 6.5.4. Tiempo de fraguado

Se realizó una prueba de correlación entre la resistencia a la compresión de las probetas y su tiempo de fraguado con el fin de evaluar el grado de relación entre ambas variables.

Se plantean las hipótesis:

H0: La resistencia a la compresión de los morteros no está relacionada con el tiempo de fraguado de los mismos.

H1: La resistencia a la compresión de los morteros está relacionada con el tiempo de fraguado de los mismos.

Nivel de Significancia

$$\alpha = 5\% = 0.05$$

Correlación de Pearson = 0.328

$$P\text{-Valor} = 0.000 < \alpha = 0.05$$

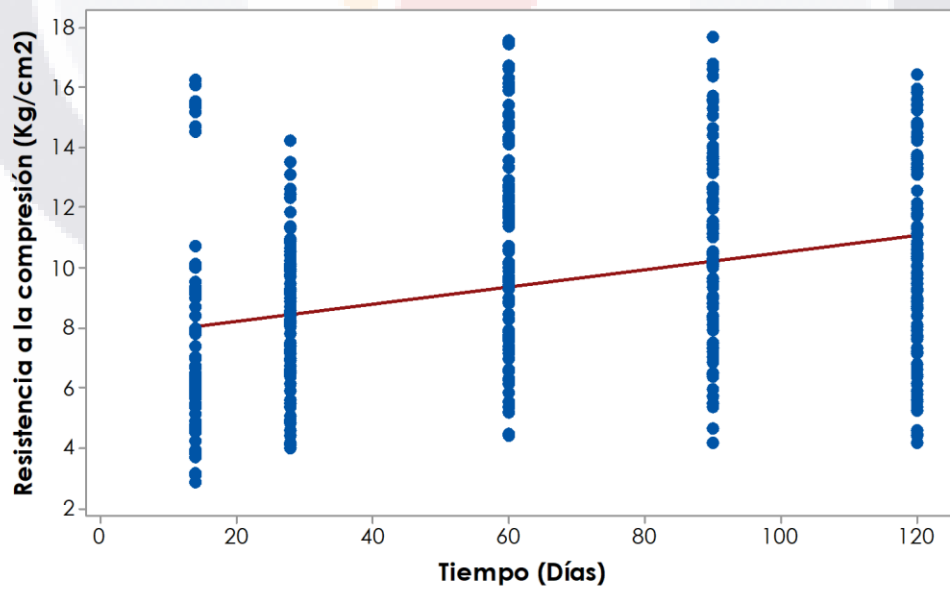


Figura 46. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra su tiempo de fraguado.

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una relación estadística débil entre la resistencia a la compresión de morteros y el tiempo de fraguado de los mismos con un nivel de significancia del 5%.

#### 6.5.5. Densidad

Se realizó una prueba de correlación entre la resistencia a la compresión de las probetas y su densidad con el fin de evaluar el grado de relación entre ambas variables.

Se plantean las hipótesis:

H0: La resistencia a la compresión de los morteros no está relacionada con la densidad de los mismos.

H1: La resistencia a la compresión de los morteros está relacionada con la densidad de los mismos.

Nivel de Significancia

$$\alpha = 5\% = 0.05$$

Correlación de Pearson = 0.189

$$P\text{-Valor} = 0.000 < \alpha = 0.05$$

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una relación estadística escasa entre la resistencia a la compresión de morteros y la densidad de los mismos con un nivel de significancia del 5%.

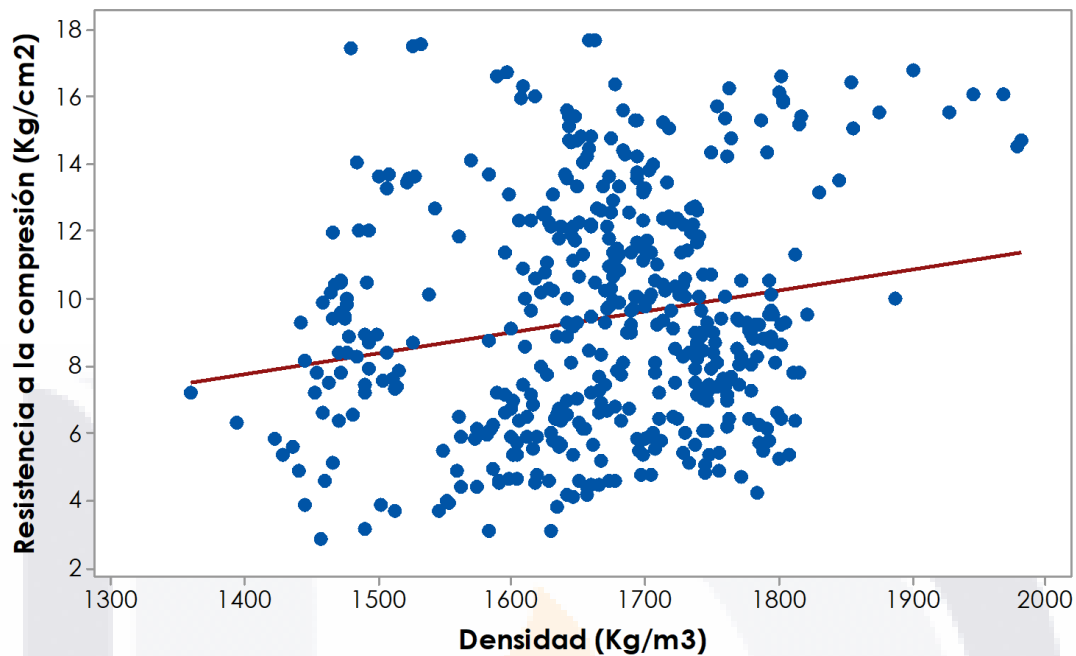


Figura 47. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra densidad.

#### 6.5.6.

#### 6.5.7. Módulo de finura del agregado

Se realizó una prueba de correlación entre la resistencia a la compresión de las probetas y el módulo de finura del agregado con el fin de evaluar el grado de relación entre ambas variables.

Se plantean las hipótesis:

H0: La resistencia a la compresión de los morteros no está relacionada con el módulo de finura del agregado de los mismos.

H1: La resistencia a la compresión de los morteros está relacionada con el módulo de finura del agregado de los mismos.

Nivel de Significancia

$$\alpha = 5\% = 0.05$$



Correlación de Pearson = -0.234

P-Valor = 0.000 <  $\alpha$  = 0.05

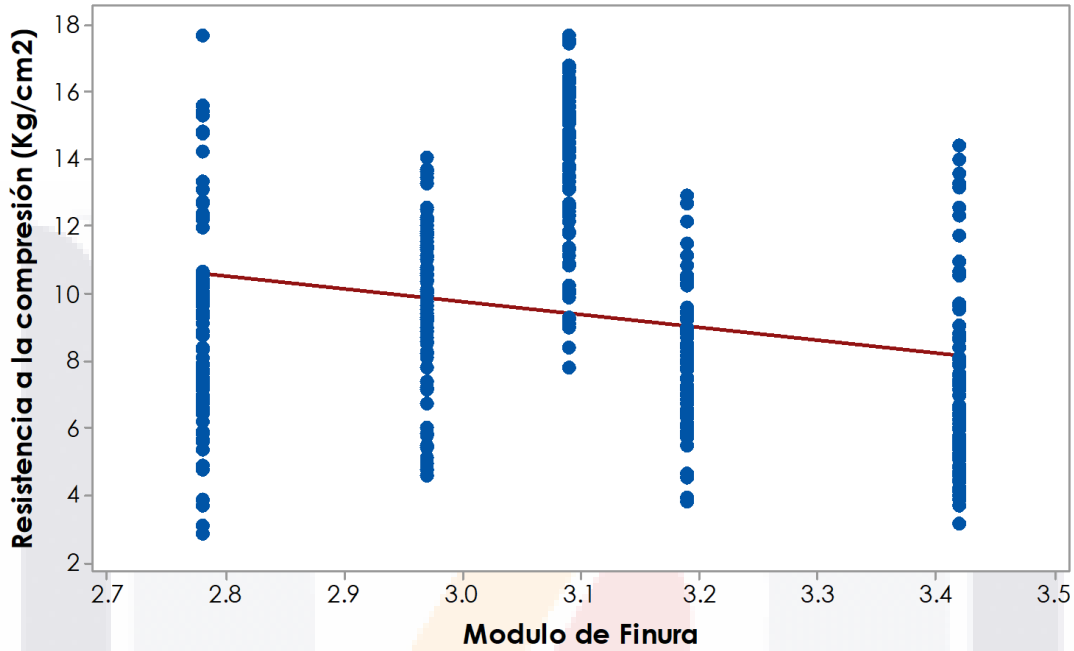


Figura 48. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra el módulo de finura del agregado pétreo con el cual se elaboró.

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una relación estadística inversa de nivel escasa entre la resistencia a la compresión de morteros y el módulo de finura del agregado de los mismos con un nivel de significancia del 5%.

### 6.5.8. Absorción del agregado

Se realizó una prueba de correlación entre la resistencia a la compresión de las probetas y la absorción del agregado con el fin de evaluar el grado de relación entre ambas variables.

Se plantean las hipótesis:

H0: La resistencia a la compresión de los morteros no está relacionada con la absorción del agregado de los mismos.

H1: La resistencia a la compresión de los morteros está relacionada con la absorción del agregado de los mismos.

Nivel de Significancia

$$\alpha = 5\% = 0.05$$

Correlación de Pearson = 0.213

$$P\text{-Valor} = 0.000 < \alpha = 0.05$$

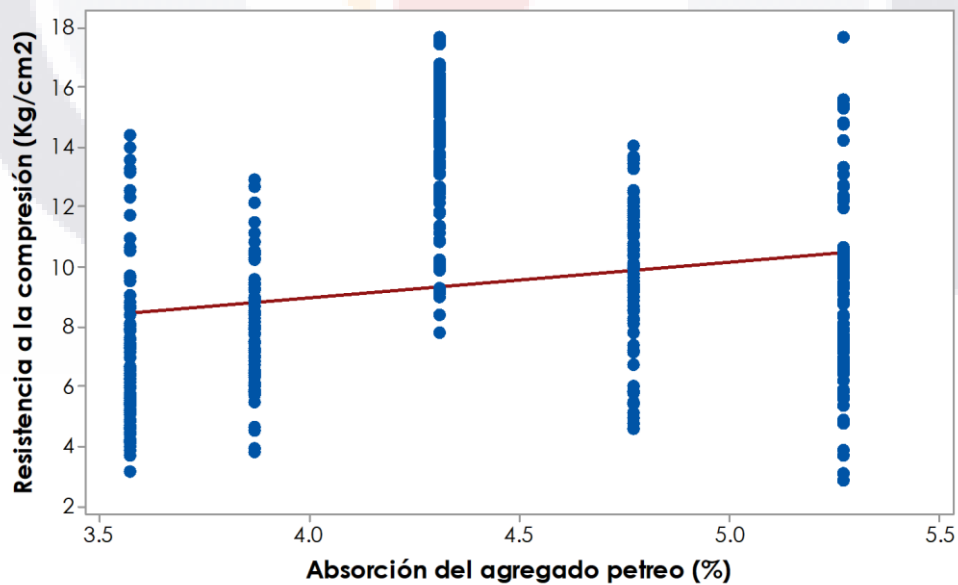


Figura 49. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra el porcentaje de absorción del agregado pétreo con el cual se elaboró.

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una relación estadística escasa entre la resistencia a la compresión de morteros y la absorción del agregado de los mismos con un nivel de significancia del 5%.

#### 6.5.9. Densidad del agregado

Se realizó una prueba de correlación entre la resistencia a la compresión de las probetas y la densidad del agregado con el fin de evaluar el grado de relación entre ambas variables.

Se plantean las hipótesis:

H0: La resistencia a la compresión de los morteros no está relacionada con la densidad del agregado de los mismos.

H1: La resistencia a la compresión de los morteros está relacionada con la absorción del agregado de los mismos.

Nivel de Significancia

$$\alpha = 5\% = 0.05$$

$$\text{Correlación de Pearson} = -0.478$$

$$\text{P-Valor} = 0.000 < \alpha = 0.05$$

∴ Se rechaza la hipótesis nula, existe una relación estadística inversa de nivel débil entre la resistencia a la compresión de morteros y la densidad del agregado de los mismos con un nivel de significancia del 5%.

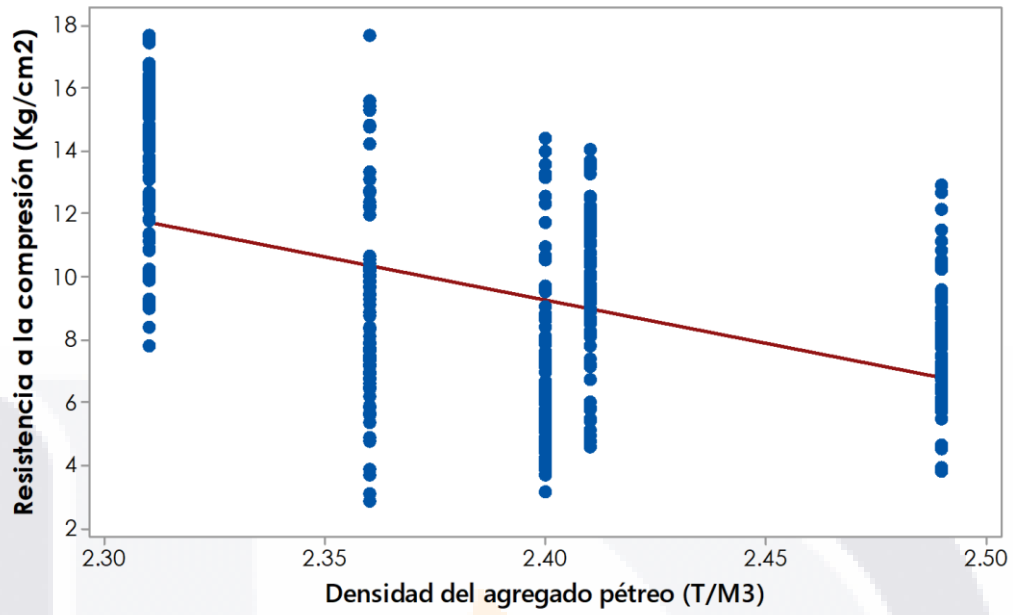


Figura 50. Gráfica de dispersión de resistencia a la compresión de morteros contra la densidad del agregado pétreo con el cual se elaboró.

# CAPÍTULO

7

CONCLUSIONES

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Conclusión general

Como se ha demostrado con la experimentación realizada en esta investigación, es posible afirmar estadísticamente que el tipo de arena utilizada para la fabricación de un mortero de cal, en conjunto con el módulo de finura de la misma tiene un impacto en la resistencia mecánica del mortero en estado endurecido, siendo la arena triturada de piedra caliza la que nos arroja una media mayor resistencia a la compresión, en cuanto a la granulometría podemos observar en las pruebas de correlación que el módulo de finura del agregado pétreo que compone al mortero si presenta una relación inversa con la resistencia a la compresión de nivel escasa, es decir que agregados con mayor cantidad de finos no arrojan niveles de resistencia un poco más elevados.

De forma general podemos afirmar que estos morteros a base de cal no resultan viables para la industria de la construcción actual dado que aun en sus dosificaciones más favorables y luego de un periodo de fraguado de 4 meses no alcanzan a cumplir con los reglamentos modernos de construcción en materia de resistencia para mortero de junteo. Debido a lo anterior tenemos que descartar la opción de introducirlos en los procesos constructivos de obras actuales, sin embargo, aun resultan viables, y la mejor opción para labores de restauración de patrimonio histórico ya que la normativa para este tipo de obras exige la utilización de materiales compatibles con los originales.

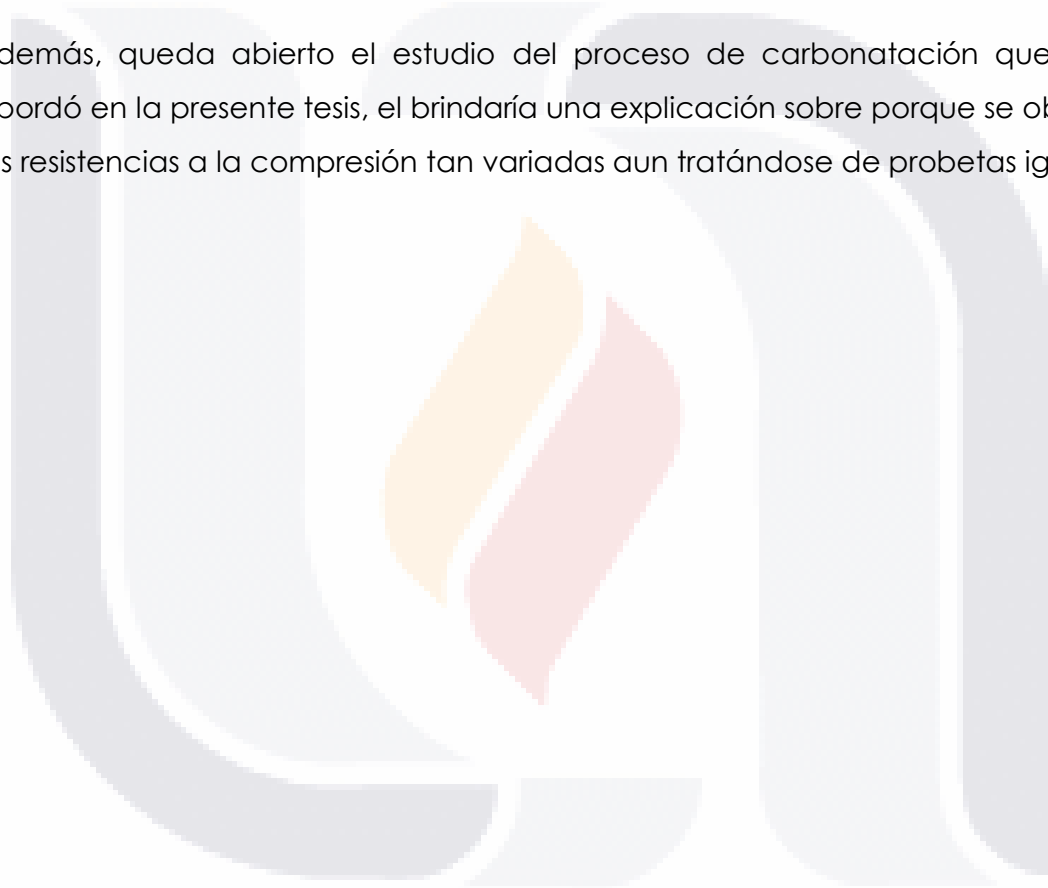
## 7.2. Conclusiones particulares

- A. Como principales características de los agregados pétreos que influyen en la resistencia mecánica final de los morteros de cal tenemos el tipo de roca, lo cual queda comprobado estadísticamente en las pruebas de diferencia de medias, del mismo modo un módulo de finura más bajo sería lo ideal a la hora de proponer la granulometría del agregado, pudiendo mezclar diferentes arenas para conseguir la reducción del tamaño de las partículas. Así mismo tenemos que existe una relación inversa entre la densidad del agregado y la resistencia por lo que deberíamos buscar agregados menos densos con el fin de optimizar nuestro mortero. Por último, tenemos una relación positiva entre porcentaje de absorción del agregado y la resistencia mecánica.
- B. Se observa en los resultados estadísticos que la cal en polvo aun cuando presenta un porcentaje menor de óxido de cal ofrece resistencias superiores a la cal en pasta con alta pureza. Podemos concluir que la cal en polvo sería la ideal para realizar dosificaciones de mortero con fines constructivos convencionales mientras que la cal de alta pureza quedaría reservada únicamente para labores de restauración más específicas.
- C. Apoyados en las pruebas estadísticas podemos afirmar que en efecto el tipo de cal, la proporción, el tipo de arena y el periodo de fraguado son factores que modifican la resistencia mecánica de un mortero, sin embargo, estas diferencias no son lo suficientemente significativas al menos para los periodos de ensayo como para poder proponer una metodología analítica de diseño de mezclas.

### 7.3. Nichos de investigación

Como posibles temas para futuras investigaciones que permitan desarrollar y mejorar la comprensión de las características mecánicas de un mortero de cal se deberían de realizar ensayos durante periodos más largos de tiempo, esto debido a que la cal por su proceso de carbonatación muy lento y continuo podría presentar comportamientos diferentes a largo plazo en comparación con los obtenidos en este estudio.

Además, queda abierto el estudio del proceso de carbonatación que no se abordó en la presente tesis, el brindaría una explicación sobre porque se obtienen las resistencias a la compresión tan variadas aun tratándose de probetas iguales.





## FUENTES DE CONSULTA

- Alvarez, J. I., Martin, A., & Garcia Casado, P. J. (1995). Historia de los morteros, 21.
- Arandigoyen, M., & Álvarez, J. I. (2006). Proceso de carbonatación en pastas de cal con distinta relación agua/conglomerante. *Materiales de Construcción*, 56(281), 5-18.
- Arizzi, A., & Cultrone, G. (2012). La Influencia de la Interfase Árido-Matriz (ITZ) en las Propiedades de Morteros de Cal. *revista de la sociedad española de mineralogía*, 16.
- Arredondo, V. (1972). Estudio de materiales. Madrid, España: Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento.
- ASTM-C33 (2003). Especificación Normalizada de Agregados para Concreto. American Society for Testing and Materials.
- ASTM-C-125 (2003). Terminología relacionada con el concreto y agregados para el concreto. American Society for Testing and Materials.
- ASTM-128 (2001). Método de ensayo estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos. American Society for Testing and Materials.
- Calidra, G. (2011). Grupo Calidra. Recuperado el 23 de Noviembre de 2016, de Grupo Calidra: <http://calidra.com/proceso/diagrama-produccion/>
- Cazalla Vázquez, O. (2002). Morteros de cal. Aplicación en el patrimonio histórico. (Doctor), Universidad de Granada, Granada, España.
- De la Garza, G. (1991). *Materiales y construcción*. México: Trillas.
- Galván Ruiz, M., & Velázquez Castillo, R. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 12.
- García Salas, F. J. (2016). Caracterización técnica-económica de aplanados de mortero de distintas bases químicas utilizadas en el Estado de Aguascalientes. Tesis (maestría en ingeniería civil) Universidad Autónoma de Aguascalientes. Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción. Departamento de Construcción y Estructuras, Aguascalientes, Ags., Méx.
- Gómez Domínguez, J. (2007). *Materiales de construcción*. Departamento de Ingeniería Civil. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey Campus Monterrey.

- MINITAB. (2018). Soporte MINITAB. Recuperado el 08 de noviembre de 2018, de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/basic-statisticsand-graphs/introductory-concepts/normality/test-for-normality/>
- NMX-C-003-ONNCCE (2017). Industria de la Construcción-Cal Hidratada-Especificaciones y Métodos de Ensayo. Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación.
- NMX-C-061-ONNCCE (2015). Industria de la construcción-cementantes hidráulicos-determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos. Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación.
- NMX-C-083-ONNCCE (2017). Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes. Organismo nacional de normalización y certificación de la construcción y edificación.
- N-CMT-2-01-004 (2002). Características de. Los materiales. Parte: 2. Materiales para estructuras. Secretaria de comunicaciones y transportes.
- Rodríguez Haro, E. I. (2016). Caracterización del comportamiento físico-mecánico de morteros de cal hidratada dosificados con agregados orgánicos. Tesis (maestría en ingeniería civil con especialidad en construcción) Universidad Autónoma de Aguascalientes. Centro de Ciencias del Diseño y de la Construcción. Departamento de Construcción y Estructuras, Aguascalientes, Ags., Méx.
- Rosell, J. R. (2013). Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal. Tamaño y formas de las partículas y su viscosidad. (Doctor), Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS

TESIS



ANEXOS



TESIS

TESIS

TESIS

TI

S

