



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA  
DE AGUASCALIENTES**

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

**TESIS**

**“Caracterización del comportamiento físico-mecánico de morteros  
de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”**

**PRESENTA**

**Ing. Erika Isela Rodríguez Haro**

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

**TUTOR**

**MIC. Miguel Angel Soto Zamora**

**COTUTORES**

**Dr. Joan Ramon Rosell i Amigó**

**Dr. Gerardo Araiza Garaygordobil**

**AGUASCALIENTES, AGS. A 26 DE MAYO DE 2016**



## **AGRADECIMIENTOS**

Gracias a CONACYT por el apoyo brindado durante el transcurso de la maestría, así como una beca mixta, con lo cual me fue posible realizar una estadía de investigación en Barcelona, España; dándole un auge importante a mi tema.

Gracias a mi madre Rosa Isela Haro Valenzuela, por el apoyo brindado incondicionalmente, a mis hermanas Montserrat Alejandra y Diana Elizabeth, a mis abuelitos Miguel Haro Villa y Elvira Valenzuela que siempre han un cimiento importante en mi vida.

Un especial agradecimiento al Dr. Joan Ramon Rosell, por la aceptación para realizar la estadía y fungir como mi tutor. Sin dudar alguna al Laboratorio de materiales de la EPSEB de la Universidad Politécnica de Cataluña, que siempre me brindaron un apoyo incondicional en la realización de mi campaña experimental.

Gracias a la Dr. Antonia Navarro Ezquerro, quién fue mi madre catalana y mi total respaldo en la realización de este proyecto; a Marc Tous, mi mejor profesor de catalán, a Judith Ramírez Casas, Montse Bosch, Laia Haurie, a la gran salvadora Belén González, Brenda Levano, Andrea Albizurri, y a todos los involucrados de la EPSEB; mil gracias por todo.

## **DEDICATORIAS**

Sin duda alguna, este proyecto de investigación es dedicado a mis abuelitos Elvira Valenzuela Bañuelos y Miguel Haro Villa.

A mi madre Rosa Isela Haro Valenzuela, por siempre brindarme apoyo incondicional en mis logros y fracasos.



## 1. ÍNDICE GENERAL

1.	ÍNDICE GENERAL.....	4
2.	ÍNDICE DE TABLAS.....	7
3.	ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	8
4.	ACRÓNIMOS.....	12
5.	RESUMEN EN ESPAÑOL.....	13
6.	RESUMEN EN INGLÉS.....	14
I.	INTRODUCCIÓN.....	15
1.1	OBJETIVOS.....	17
1.2	ALCANCES.....	18
1.3	HIPÓTESIS.....	18
II.	ESTADO DEL ARTE.....	19
2.1	LA CAL.....	20
2.1.1	APLICACIONES DE LA CAL.....	22
2.2	ANTECEDENTES.....	23
2.3	MORTEROS DE RESTAURACIÓN.....	25
2.3.1	CALIDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS.....	27
2.3.2	CALIDAD TÉCNICA DEL MORTERO.....	29
2.4	ADITIVOS.....	30
2.4.1	CLARA DE HUEVO.....	32
2.4.2	SANGRE BOVINA.....	33
2.4.3	MIEL.....	33
III.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....	34
3.1	OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN.....	35
3.2	MATERIALES UTILIZADOS.....	35

IV.	EQUIPOS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES.....	39
4.1	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA) .....	40
4.2	PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO FRESCO .....	41
4.2.1.	FLUIDEZ .....	41
4.2.2.	VISCOSIDAD .....	49
4.3	PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO ENDURECIDO .....	53
4.3.1	CÁMARA DE CARBONATACIÓN ACELERADA.....	53
4.3.2	MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO .....	55
4.3.3	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	61
4.3.4	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	62
4.3.5	DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA, ÍNDICE DE POROSIDAD .....	63
4.3.6	AVANCE DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN.....	65
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	66
5.1	ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA) .....	67
5.2	PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO FRESCO .....	68
5.2.1.	FLUIDEZ .....	68
5.2.2.	VISCOSIDAD .....	70
5.3	PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO ENDURECIDO .....	83
5.3.1	MOE LONG IMPACTO Y ULTRASONIDOS .....	84
5.3.2	MOE IMPACTO CON RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	87
5.3.3	RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	88
5.3.4	RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y POROSIDAD .....	89
5.3.5	AVANCE AL FRENTE DE CARBONATACIÓN.....	90
7.	CONCLUSIONES.....	100
7.1	CONCLUSIÓN GENERAL.....	100
7.2	CONCLUSIONES PARTICULARES .....	100

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

7.3 NICHOS DE INVESTIGACIÓN .....101

8. GLOSARIO .....104

9. BIBLIOGRAFÍA .....107

ANEXO A .....110



## 2. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Funcionalidad de los aditivos para la elaboración de un mortero. (Sánchez, 2002) .....	31
Tabla 2. Características de los materiales utilizados para este proyecto de investigación.....	35
Tabla 3. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) de las medidas de viscosidad de una pasta de cal + sangre a diferentes dosificaciones .....	74
Tabla 4. Valores correspondientes al esfuerzo cortante (t) para los modelos exponenciales ajustados a las distintas dosificaciones de sangre analizadas con pastas de cal .....	74
Tabla 5. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal ..	75
Tabla 6. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + miel 5% .....	76
Tabla 7. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) de las medidas de viscosidad de una pasta de cal + miel 5% .....	77
Tabla 8. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) para los modelos exponenciales ajustados a la dosificación de miel 5% analizada con pastas de cal .....	77
Tabla 9. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) de las medidas de viscosidad de una pasta de cal con diferentes dosificaciones de clara de huevo .....	81
Tabla 10. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) para los modelos exponenciales ajustados a las diferentes dosificaciones de clara de huevo analizadas con pastas de cal.....	81



### 3. ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Gráfica termogravimétrica de la pasta de cal .....	67
Gráfica 2. Gráfica de resultados de ensayo de fluidez de morteros a distintas dosificaciones y aditivos orgánicos.....	68
Gráfica 3. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal ..	71
Gráfica 4. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 1% .....	71
Gráfica 5. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 2% .....	72
Gráfica 6. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 5% .....	72
Gráfica 7. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 10% .....	73
Gráfica 8. Modelos exponenciales ajustados a las distintas dosificaciones de sangre analizadas con pasta de cal .....	74
Gráfica 9. Modelos exponenciales ajustados a la dosificación de miel 5% analizada con pasta de cal.....	77
Gráfica 10. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal ..	78
Gráfica 11. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + clara de huevo 1% .....	79
Gráfica 12. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + clara de huevo 5% .....	79

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

Gráfica 13. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + clara de huevo 10% .....80

Gráfica 14. Modelos exponenciales ajustados analizados a las dosificaciones de clara de huevo con pasta de cal .....81

Gráfica 15. Gráfica comparativa de resultados de los métodos Moe long impacto y MOE ultrasonidos de las probetas de pasta de cal + miel de las diferentes proporciones que se evaluaron.....84

Gráfica 16. Gráfica comparativa de resultados de los métodos Moe long impacto y MOE ultrasonidos en probetas de pasta de cal + clara de huevo con las diferentes proporciones evaluadas. ....85

Gráfica 17. Gráfica comparativa de resultados de los métodos Moe long impacto y MOE ultrasonidos en probetas de pasta de cal + sangre con las diferentes proporciones evaluadas. ....86

Gráfica 18. Gráfica comparativa de MOE impacto con Resistencia a la compresión de todos los aditivos y las diferentes proporciones.....87

Gráfica 19. Gráfica comparativa de resistencia a compresión y resistencia a la flexión de todos los aditivos y las distintas proporciones en peso evaluadas. ....88

Gráfica 20. Gráfica comparativa de la resistencia a compresión y la porosidad de todos los aditivos y dosificaciones evaluadas. ....89

Gráfica 21. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal (Flex cara 1) ..... 110

Gráfica 22. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + miel a diferentes proporciones propuestas (Flex cara 1) ..... 110

Gráfica 23. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + clara de huevo a diferentes proporciones propuestas (Flex cara 1) .....111

Gráfica 24. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + sangre a diferentes proporciones propuestas (Flex cara 1) ..... 111

Gráfica 25. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + sangre (Long.) ..... 112

Gráfica 26. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + miel a diferentes proporciones propuestas (Long.) ..... 112

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

Gráfica 27. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + clara de huevo a diferentes proporciones propuestas (Long.) .....113

Gráfica 28. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + sangre a diferentes proporciones propuestas (Long.).....113

Gráfica 29. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal a diferentes proporciones propuestas .....114

Gráfica 30. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal + miel a diferentes proporciones propuestas .....114

Gráfica 31. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal + clara de huevo a diferentes proporciones propuestas .....115

Gráfica 32. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal + sangre a diferentes proporciones propuestas.....115

Gráfica 33. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal a proporciones propuestas .....116

Gráfica 34. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas.....117

Gráfica 35. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas.....117

Gráfica 36. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas....117

Gráfica 37. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal proporciones propuestas .....118

Gráfica 38. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas.....119

Gráfica 39. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas.....119

Gráfica 40. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas...119

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

Gráfica 41. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal a las proporciones propuestas .....120

Gráfica 42. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas.....120

Gráfica 43. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas.....121

Gráfica 44. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas....121

Gráfica 45. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal a las proporciones propuestas .....122

Gráfica 46. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas.....122

Gráfica 47. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas.....123

Gráfica 48. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas....123

Gráfica 49. Gráfica de resultados de la porosidad en probetas de pastas de cal + a las proporciones propuestas .....124

Gráfica 50. Gráfica comparativa de resultados de porosidad en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas.....124

Gráfica 51. Gráfica comparativa de resultados de porosidad en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas.....125

Gráfica 52. Gráfica comparativa de resultados de porosidad en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas .....125

#### 4. ACRÓNIMOS

INAH, Instituto Nacional de Antropología e Historia

GICITED, Grupo Interdisciplinar de Ciencia y Tecnología de la Edificación

UPC, Universidad Politécnica de Cataluña

EPSEB, Escuela Politécnica Superior de la Edificación de Barcelona

AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación



## 5. RESUMEN EN ESPAÑOL

El mortero ha sido desde la antigüedad una mezcla usada comúnmente en la construcción, especialmente en mampostería y acabados; el empleo parece remontarse a la época neolítica, con los griegos y romanos perfeccionar la técnica de mortero de cal y preparación egipcios dominante. Con el fin de modificar algunas de las propiedades de mortero, antes de que se añadieron diversos materiales tales como aditivos naturales u orgánicos; Un ejemplo de estos incluyen arcilla, escoria, puzolanas, huevo, jugo de higo, el arroz, la sangre del ganado, mucílago de cactus, etc.

En México, las regulaciones para el caso de la restauración de monumentos arquitectónicos del Instituto Nacional de Antropología e Historia, INAH, requieren el uso de cal como un adhesivo, el uso de mortero de cal como material de restauración, es algo que se ha llevado a cabo ya que mientras su historia, origen, comportamiento estructural, elasticidad, imagen arquitectónica, resistencia, coste relativamente bajo y facilidad de reemplazo.

El objetivo principal de esta investigación fue el de analizar y caracterizar el comportamiento de los morteros de cal hidratada dosificados con diferentes aditivos orgánicos preseleccionados como lo fueron la miel, la clara de huevo y la sangre bovina; realizando una comparativa basada en las propiedades en estado fresco: nivel de fluidez y viscosidad; como en las propiedades en estado endurecido: módulo de elasticidad dinámica, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, densidad aparente y relativa; y el avance al frente de carbonatación.

## 6. RESUMEN EN INGLÉS

The mortar has been since ancient times a mixture commonly used in construction especially in masonry and finishes; employment appears to date back to the Neolithic era, with the Greeks and Romans perfecting the technique of lime mortar and dominant Egyptians preparation. In order to modify some of the properties of mortar, formerly they were added various materials such as natural or organic additives; An example of these include clay, slag, pozzolans, egg, fig juice, rice, cattle blood, cactus mucilage, etc.

In Mexico, the regulations for the case of restoration of architectural monuments of the National Institute of Anthropology and History, INAH, require the use of lime as an adhesive, the use of lime mortar as restorative material, is something that has been conducted since while its history, origin, structural behavior, elasticity, architectural image, resistance, relatively low cost and ease of replacement.

The main objective of this research was to analyze and characterize the behavior of hydrated lime mortars dosed with different organic additives were shortlisted as honey, egg yolk and bovine blood; making a comparative based on fresh properties: level of fluidity and viscosity; as in the cured state properties : dynamic modulus of elasticity , flexural strength , compressive strength , relative density and apparent ; and advancing to the front of carbonation.



## I. INTRODUCCIÓN





## I. INTRODUCCIÓN

El mortero ha sido desde tiempos antiguos una mezcla de uso común en la construcción sobre todo en mamposterías y acabados. Al hacer una caracterización físico-mecánica de los morteros de cal hidratada adicionados con diferentes aditivos orgánicos se pretende obtener parámetros cuantitativos que nos permitirán probar el efecto de dichos aditivos en sus propiedades tanto en estado fresco como endurecido de las mezclas.

Lo anterior con la finalidad de optimizar las técnicas empleadas en los procesos de restauración del patrimonio edificado, recurriendo al conocimiento y las técnicas tradicionales en la intervención de dichos elementos.

Lamentablemente existe una gran pérdida de este conocimiento durante la época medieval retomando únicamente este material como elemento de construcción y es hasta la época renacentista en que por las necesidades propias de la edificación se busca el mejoramiento de las propiedades de los morteros, pero a diferencia de los romanos no es con el agregado sino con aditivos orgánicos, logrando con esto modificar las propiedades y características de los morteros de cal.

En lo que respecta al ámbito local, las culturas prehispánicas de México tenían un amplio conocimiento de la cal, llegando a elaborar morteros de muy buena calidad de tal manera que aún en nuestros días se puede encontrar ejemplos en muy buenas condiciones de estos elementos, aunque no existía ninguna relación directa entre las culturas europeas y las prehispánicas en ese momento, estas últimas empleaban aditivos orgánicos en sus mezclas, poco se sabe de estos procesos, sin embargo se ha comprobado del uso de elementos orgánicos tanto en la preparación de los morteros como en las pigmentaciones empleadas en sus recubrimientos.

Los morteros tienen la doble función de protección de fachadas expuestas y de adhesión de rocas para que las mamposterías funcionen de forma monolítica. Los morteros de cal deben ser relativamente resistentes, elásticos, tener capacidad de deformación, facilidad de reposición, no sellar totalmente las superficies de las

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

rocas que puedan impedir la evaporación del agua atrapada por capilaridad; ser capaces de absorber deformaciones debidas a microsismos, hundimientos diferenciales, cambios volumétricos por temperatura.

En la actualidad, existen diversos artículos donde se han elaborado pruebas con morteros de cal apagada artesanalmente, en donde hacen una caracterización de sus propiedades mecánicas, de compresión, así como de tensión y flexión, utilizando como aditivos orgánicos el mucílago de cactácea y la ceniza volcánica; por lo que en este trabajo se pretende hacer una caracterización físico-mecánica con pruebas en estado fresco y estado endurecido del mortero en los especímenes con morteros de cal hidratada dosificados con clara de huevo, miel y sangre bovina.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **GENERALES**

El objetivo de la investigación es analizar y caracterizar el comportamiento mecánico de los morteros de cal hidratada adicionados con diferentes aditivos orgánicos, empleados históricamente en el mejoramiento de las propiedades de dichas mezclas, seleccionando y fabricando especímenes con distintas dosificaciones de los aditivos y realizando una comparativa entre las propiedades mecánicas que éstos presenten contra las propiedades de la mezcla sin adición de aditivos.

### **PARTICULARES**

- Identificar los aditivos orgánicos empleados a lo largo de la historia de la construcción en morteros de cal hidratada, su funcionamiento tradicional, así como las dosificaciones propuestas por distintos autores a lo largo del tiempo.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

- Determinar las pruebas físicas y mecánicas a realizar a las diferentes muestras de morteros de cal hidratada adicionadas con diferentes proporciones de aditivos orgánicos.
- Examinar y hacer una caracterización de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas en las diferentes muestras de morteros de cal hidratada adicionadas con diferentes proporciones de aditivos orgánicos.

## **1.2 ALCANCES**

El alcance de esta investigación será de una manera descriptiva, destinado a una caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con diferentes aditivos orgánicos, que esto a su vez, podrían implementarse en el campo de la restauración de patrimonio histórico, siendo así una opción de preservar el patrimonio con morteros de cal muy semejantes a los que se utilizaban durante su construcción.

## **1.3 HIPÓTESIS**

- La adición de aditivos orgánicos aumenta o disminuye propiedades mecánicas de los morteros de cal hidratada.



## II. ESTADO DEL ARTE



La cal  
Antecedentes históricos  
Morteros de Restauración

## II. ESTADO DEL ARTE

En este proyecto de investigación, se estudia los comportamientos físicos y mecánicos de los morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos. Concretamente, se estudia el mortero de cal dada su indiscutible uso desde la antigüedad y su uso en materia de restauración del Patrimonio Arquitectónico.

### 2.1 LA CAL

La cal es el conglomerante más empleado en la fabricación de morteros tradicionales, sobre todo en el campo de la restauración. Desde que la piedra caliza es extraída, la cal sufre una serie de procesos mejormente conocidos como “Ciclo de la Cal”.



Ilustración 1. Proceso del ciclo de la cal, donde se representa las etapas que se llevan a cabo durante el proceso de obtención y carbonatación de la misma. Fuente: (Amigó J. R., 2000)

La cal aérea es obtenida mediante la calcinación de la piedra caliza, en donde se obtiene óxido de calcio o cal viva, CaO<sub>2</sub>, la temperatura de cocción debe de superar los 850 °C pero no alcanzar los 1200 °C.

A continuación, es necesario la hidratación del producto para conseguir el conglomerante, obteniendo así el hidróxido de calcio Ca(OH)<sub>2</sub> o cal apagada. La cantidad de agua necesaria para este proceso se determina en función del resultado deseado, es decir, si se le añade una cantidad de agua justa, el resultado

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

será una cal apagada en polvo; por lo contrario, si se añade un exceso de agua el producto será en pasta.



Ilustración 2. a) Piedra caliza, materia prima. b) Horno empleado para la calcinación de la piedra caliza y la obtención del óxido de calcio. c) Proceso de apagado del óxido de calcio para la obtención de Hidróxido de calcio, en este ejemplo para la obtención de cal en pasta. Fuente: Oxical.

Algunas de las múltiples ventajas que presentan los morteros de cal son las siguientes:

- Ausencia de retracción
- Buena plasticidad y trabajabilidad
- Gran elasticidad
- Permeabilidad apreciable al vapor de agua
- Buena resistencia a la penetración del agua de lluvia
- Buen aislamiento térmico y acústico
- Ausencia de eflorescencias
- Desinfectante y fungicida natural

### 2.1.1 APLICACIONES DE LA CAL

Hoy en día, el uso de la cal como conglomerante principal ha ido desapareciendo de las obras comunes, cada vez resulta más frecuente utilizar morteros predosificados a base de cemento sin valorar el tipo de conglomerante que se utilice; esto conlleva a la utilización de productos dotados de documentos de calidad, recomendaciones de uso, fichas técnicas, etc. Lo que permite el desconocimiento de las características composicionales de los mismos.

En sentido particular del patrimonio edificado, la búsqueda de materiales compatibles en la restauración conlleva a la evaluación de dos enfoques primordiales: lo tradicional y lo moderno; el primero siendo un intento de encontrar soluciones a partir de materiales tradicionales que cumplan con los requisitos de compatibilidad con los usados en la antigüedad; el moderno, la adquisición de materiales compatibles para la elaboración de un mortero con materiales modernos.

La cal en pasta es la forma de cal más usada para obras de restauración pero posee la desventaja de la escasa información técnica en el uso adecuado de la misma así como las diferencias del curado respecto a otros materiales y las propiedades físicas de los morteros elaborados a partir de dichas pastas con lo cual conlleva a convertirse en tema de investigación de los últimos años.

La cal se caracteriza por su versatilidad, siendo el producto de mayor gama de aplicaciones; en el sector de la construcción, se puede utilizar sola o en combinación con otros cementantes en la aplicación de aplanados, cimentaciones de mampostería, firmes, enmasillados, estabilización de suelos y carreteras, etc., en el uso de impermeabilizantes y pinturas a base de cal.

## 2.2 ANTECEDENTES

El mortero ha sido desde tiempos antiguos una mezcla de uso común en la construcción sobre todo en mamposterías y acabados; su empleo parece remontarse en la época neolítica, siendo los griegos y los romanos los perfeccionadores de la técnica de mortero de cal y los egipcios los dominantes de su preparación.

Los griegos, entre los siglos II y I a. C. (Furlan, V; Bissegger, P, 1975), utilizaron por primera vez el mortero de cal como conglomerante para la construcción de muros evolucionando este material adicionándole tierras volcánicas, o la teja triturada, tierra cocida, con la finalidad de obtener morteros más estables al agua.

La civilización romana heredó las tecnologías constructivas de la antigua Grecia, y con ellas, el uso del mortero de cal mejorando los procesos de fabricación de la cal, y las técnicas puestas en obra, explotando el uso de este material y difundiénolo por todo el imperio

Más allá del uso del mortero de cal, el gran avance de los romanos fue la creación del *opus caementicium*, mortero de cal con adiciones puzolánicas (roca volcánica de Puzzoli) con el fin de conferir a sus morteros propiedades hidráulicas. Este material, también conocido como “hormigón romano”, fue de uso obligado en todas las obras públicas en tiempos del emperador Augusto (Sánchez, 2002). Un ejemplo de la construcción con *opus caementicium* es el Panteón de Roma, construcción que todavía perdura después de más de 2000 años. Desde el Imperio Romano hasta finales del siglo XVIII, el mortero de cal ha sido el principal conglomerante de construcción.

Es por Vitruvio que se conoce que la dosificación de materiales utilizada en esa época siendo una parte de cal por tres de arena, o de dos por cinco según la calidad de la arena. (José Ignacio Álvarez Galindo, Antonio Martín Perez, Pedro J. García Casado, 1998).

Con la caída del Imperio Romano, los morteros medievales se identificaron por poseer características mediocres en comparación a la que se venían desarrollando por los romanos.



Según estudios comparativos realizados han demostrado que los antiguos constructores empleaban aditivos orgánicos egipcios como lo son la albúmina de huevo, queratina y caseína; jugo de higo, sangre, clara de huevo y pasta de centeno; cerveza, cera de abejas, jugos de fruta, gluten, malta, arroz, azúcar y orina. (Sickels, 1981)

Es amplia la utilización de morteros, de cemento, de cal o mixtos; destacando su empleo en mamposterías, aplanados, recubrimientos y pegado de piezas diversas.

En el s. XIX, la llegada del cemento Portland revolucionó el mundo de los materiales de construcción, desplazando el uso de la cal por el del cemento para la fabricación de morteros y hormigones utilizados en todo tipo de construcciones. El mortero de cal pasa de ser el principal conglomerante de construcción hasta la revolución industrial, al ir ocupando un papel secundario hasta aproximadamente los años 80, a partir de los cuales se ha comprendido que es un material insustituible para determinados trabajos, sobre todo en restauración y rehabilitación de edificios antiguos para protección del Patrimonio.

Esta concienciación se ha convertido en una demanda que el mercado actual pretende satisfacer mediante una amplia oferta de morteros de cal predosificados, que se presentan como materiales idóneos para todo tipo de intervenciones de restauración, así como aplicaciones diversas en obra nueva.

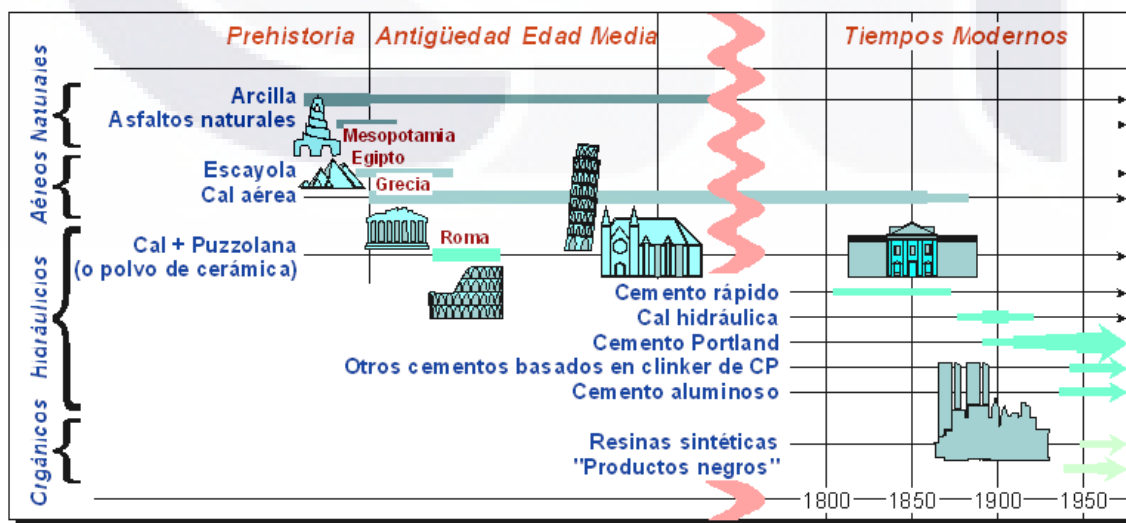


Ilustración 3. Materiales aglomerantes utilizados en morteros de construcción (Granada, 2014)

### 2.3 MORTEROS DE RESTAURACIÓN

Los morteros, al igual que cualquier material de restauración que entra a formar parte de un edificio o monumento en una intervención arquitectónica, deben cumplir con unas condiciones básicas:

- No debe dañar al elemento arquitectónico intervenido, ni modificarle sus propiedades.
- Debe tener características y propiedades similares a las del mortero original.
- No debe modificar la estética inicial del elemento arquitectónico ni del conjunto de la edificación o monumento.
- Su interacción con los agentes ambientales no puede causar ningún tipo de alteración en el conjunto arquitectónico.
- Ha de ser durable en el tiempo

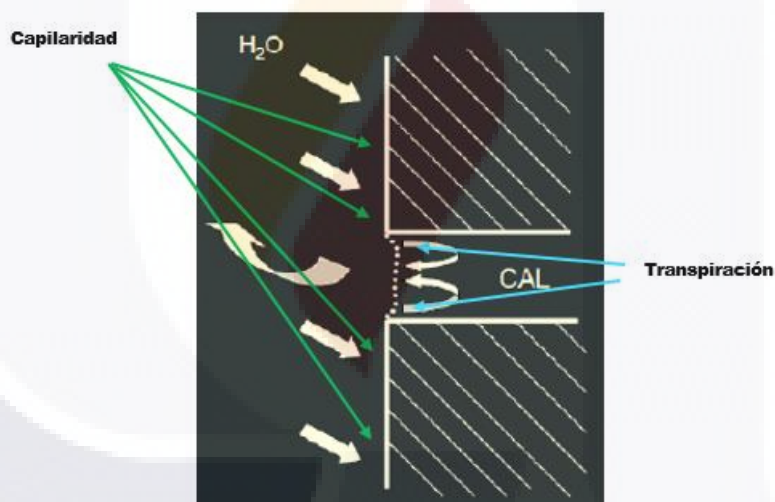


Ilustración 4. Condiciones a cumplir por un mortero de restauración. Fuente propia

Los morteros de restauración deben ser lo más similares a los originales, deben de caracterizarse por la compatibilidad con el resto de los elementos que se presentan en el patrimonio y poseer características físico-químicas y de resistencia a los agentes externos de la obra, además de contar con propiedades de óptimas de trabajabilidad, compacidad, docilidad, etc.

## **DIFERENCIAS FUNDAMENTALES ENTRE MORTEROS DE CAL Y MORTEROS DE CEMENTO**

Con el descubrimiento a finales del siglo XIX (Arizzi, 2012) del cemento Portland y de la cal hidráulica, se fue sustituyendo la cal aérea, debido a su resistencia y rigidez, en beneficio de una construcción más vertical, marginando así las ventajas de los morteros de cal:

- Ausencia de retracciones mecánicas
- Plasticidad y elasticidad
- Permeabilidad al vapor de agua
- Transpirabilidad (evita condensaciones)
- Ausencia de sales solubles y aditivos añadidos
- Causticidad higiénica

El mortero de cal posee unas propiedades muy características, tales como su fácil trabajabilidad y plasticidad en pasta, bajas resistencias mecánicas y por consiguiente, módulos de elasticidad relativamente bajos (alta capacidad de deformación), lo que permite repeler pequeños movimientos; elevada permeabilidad al agua líquida y al vapor de agua, lo que permite el elevado grado de transpiración de estos morteros cuando revisten a los muros de fábrica; ausencia de sales solubles y álcalis, culpables de lesiones tales como eflorescencias, criptoflorescencias, etc; y también baja resistencia a las heladas (Malinowski, 1981).

Las propiedades de los morteros preparados con cemento son prácticamente las contrarias a los de cal: escasa trabajabilidad y plasticidad del estado fresco, fraguado rápido, resistencias mecánicas elevadas, módulo de elasticidad relativamente alto, baja permeabilidad al vapor de agua y un alto contenido desales solubles y álcalis (Sánchez, 2002).

### 2.3.1 CALIDAD DE LAS MATERIAS PRIMAS

En la elaboración de un mortero de cal, es importante que las materias primas tengan una adecuada calidad para un buen comportamiento futuro. Es necesario una correcta selección de las mismas, sobre todo en sus características físicas (granulometría, morfología, etc.).

Es primordial que la calidad de estos elementos se mantenga antes y después de ser puestas en obra.

#### **CONGLOMERANTES**

Los conglomerantes tienen la función de unir varios materiales con la finalidad de originar uno nuevo, los cuales poseen las características de plasticidad, moldeo y endurecimiento.

#### **Tipos de conglomerantes**

Según su capacidad de fraguar (Badiola, 2015):

- Aéreos. Se caracterizan por fraguar y endurecer únicamente en medio seco, ejemplos de este tipo son el yeso y la cal aérea.
- Hidráulicos. Este grupo tiene la versatilidad de fraguar y endurecer en medios tanto húmedos como en secos, ejemplos de éste lo son el cemento y la cal hidráulica.

Según su naturaleza:

- Yesos
- Cales
- Cementos

La cantidad del conglomerante deberá de ser la adecuada en proporción a la cantidad de agua.

### **CALES**

La piedra caliza, una vez calcinada en horno se convierte en óxido de calcio o cal. Su tipo depende de la cantidad de arcilla que contenga en su elaboración. Por lo que se clasifica en:

- Cal viva            →      Piedra caliza totalmente pura
- Cal grasa           →      Piedra caliza con contenido ente 1-5% de arcilla
- Cal hidráulica    →      Con mayor contenido de arcilla

### **ÁRIDOS**

Su característica principal de los áridos es la de disminuir las retracciones debiendo absorber y transmitir las cargas que se le efectúen al mortero.

Una granulometría adecuada será la ideal para la obtener la mayor ocupación de huecos y por consecuencia mayor porcentaje de compacidad, en función del uso del mortero a elaborar; considerando que la elección de un determinado árido tendrá influencia directa en el color y textura final.

### **AGUA**

El agua es el componente que permite que el resto de los elementos se puedan agrupar, añadiendo la cantidad necesaria para obtener la trabajabilidad del mortero o pasta. Es importante que el agua esté libre de sustancias que puedan alterar el fraguado, el endurecimiento o alguna otra propiedad del conglomerante.

Teniendo todo lo anterior se puede elaborar un mortero:

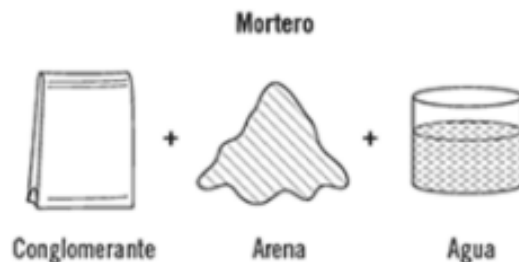


Ilustración 5. Representación gráfica de los componentes principales para la elaboración de un mortero. Fuente: (Cebrián, 2013)

## DOSIFICACIÓN

Para elaborar un mortero es necesario establecer las proporciones de sus componentes, determinando el volumen o el peso de cada uno de ellos, a fin de obtener la resistencia, trabajabilidad y durabilidad proyectadas.

Para establecer la dosificación apropiada para el mortero, se tendrá en cuenta el uso que se le dará y las características de textura, color, resistencia y facilidad de puesto en obra según las necesidades. (Cebrián, 2013)

### 2.3.2 CALIDAD TÉCNICA DEL MORTERO

La determinación de una calidad de los morteros de restauración se determina por medio de ensayos normalizados en laboratorio, realizando pruebas en estado fresco, como endurecido determinando las propiedades físico-mecánicas de los mismos. Una calidad adecuada en los morteros de es primordial para garantizar su perdurabilidad, por lo que es necesario que los materiales empleados sean compatibles con el soporte de la obra y ofrezcan buena resistencia a la alteración.

Investigaciones recientes, muestran que las cales en pasta ofrecen, por lo general, mejores comportamientos que las cales en polvo, además la mejora de las propiedades de estas cales se ven beneficiadas cuanto mayor sea su tiempo de apagado ya que se producen modificaciones en los tamaños de los cristales de la cal que mejoran, entre otras, su plasticidad, homogeneidad en la carbonatación,

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

y resistencia mecánica y a la alteración, en comparación con los resultados de cales hidratadas en polvo.

El abandono de la práctica en la elaboración de morteros artesanales ha llevado a la producción industrial de morteros homogéneamente mezclados y listos para ser utilizados. La cal hidratada en polvo no tiene las excelentes propiedades reológicas que las que se pueden obtener de las cales en pasta, a pesar de la superioridad de la pasta de cal, la cal hidratada en polvo es actualmente la más utilizada en la fabricación de morteros, debido a su bajo coste de producción y comercialización y a la facilidad y rapidez de uso. (Arizzi, 2012)

## 2.4 ADITIVOS

Los aditivos son sustancias de tipo natural o sintético que puede o no añadirse a la mezcla del mortero, en proporción  $< 5\%$  en peso del conglomerante y que le añadirán propiedades permanentes al mortero tanto en estado fresco como endurecido.

*Según Garate (1993), "El debate está en cómo reemplazar los viejos morteros con aditivos orgánicos por otros similares, con técnicas avanzadas, utilizando compuestos sintéticos o mezcla de materias sintéticas y orgánicas, u orgánicas transformadas." (Sánchez, 2002)*

### CARACTERÍSTICAS

Los aditivos pueden modificar las propiedades del mortero:

- o En estado fresco: Facilita la trabajabilidad de la masa en cualquier condición ambiental. Forman parte de este grupo los aditivos, endurecedores, aerantes, retardantes, etc.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

- En estado endurecido: Permiten mejorar el rendimiento de la masa una vez puesto en obra, cuando es colocado en condiciones ambientales “excepcional”.

Su presentación puede ser en forma líquida, de pasta o en polvo, y la dosificación depende del tipo y del efecto que se quiera obtener.

**Tipos de aditivos:**

- **Hidrofugantes.** Poseen propiedades hidrófugas que reducen la absorción de agua a través de una superficie porosa, mejorando la durabilidad.
- **Fluidificantes.** Modifican la tensión superficial del agua por contener una parte hidrófoba y otra parte hidrófila. Disminuyen el contenido de agua para una trabajabilidad dada, por lo que generan un aumento en la resistencia mecánica y disminución en la exudación y absorción por capilaridad.
- **Otros.** Según la funcionabilidad del mortero:

Aditivo	Se utiliza para....
Colorante	Darle color al mortero. Útil para acabados vistosos
Anticongelante	Mejora el fraguado del mortero en condiciones de baja temperatura
Resina	Plastificar e impermeabilizar el mortero
Endurecedor de superficie	Conseguir una terminación antipolvo, también aumenta la adherencia sobre aceites y grasas
Hidrófugo e impermeabilizante	Para revestimiento de muros enterrados, depósitos, piscinas, canales, canalizaciones, etc.
Plastificante	Ayudar a su colocación, aportando a la masa una consistencia más líquida sin necesidad de incrementar el aporte de agua
Acelerador de fraguado	Reducir el tiempo de fraguado de la masa
Retardador de fraguado	Dilatar el tiempo de fraguado de la masa

Tabla 1. Funcionalidad de los aditivos para la elaboración de un mortero. (Sánchez, 2002)



### 2.4.1 CLARA DE HUEVO

Según la bibliografía (José Ignacio Álvarez Galindo, Antonio Martín Perez, Pedro J. García Casado, 1998), en morteros antiguos se han encontrado pruebas de que la clara de huevo o el huevo como tal, fueron utilizados como aditivos en morteros de cal.

La clara presenta la característica física de ser viscosa y por su contenido bajo en proteínas y el 88 u 89% de su composición es agua. El clara de huevo tiene un pH de 9.7.

Es importante conocer la composición de la clara de huevo, para conocer las propiedades del aditivo a evaluar en esta investigación.

	<b>% Respecto al total</b>	<b>Observaciones</b>
Ovoalbúmina	58	Fija iones metálicos
Conoalbúmina	13	Inhibidor de microorganismos
Ovuomucoide	11	Inhibidor de la tripsina del vacuno pero no de la humana
Ovoglobinas	8	Formadoras de la espuma
Lisozima	3.5	Hidroliza la pared de bacterias (G+)
Ovomucina	1.5	Inhibe la hemoaglutinación vírica
Flavoproteína	0.8	Fija la riboflavina
Ovoinhibidor	0.1	Inhibidor de las proteunasa
Avidina	0.05	Fija la biotina

Ilustración 6. Proteínas más importantes que se encuentran en la clara de huevo, así como sus características. (Iciar Asrasarán, J. Alfredo Martínez, 2000)

### 2.4.2 SANGRE BOVINA

La sangre debido a sus propiedades nutricionales y funcionales se emplea como aditivo proteico, aprovechando sus características de solubilidad, emulsificación y capacidad espumante. (Iciar Asrasarán, J. Alfredo Martínez, 2000)

En la siguiente ilustración se puede observar los valores promedio del pH de sangre de diferentes tipos de especies:

Valores promedio de pH por especie y fracción sanguínea					
Especie			Fracción		
Características	Bovino	Ave	Sangre	Glóbulos	Plasma
pH	7.46	7.53	7.48	7.47	7.44

Ilustración 7. Tabla de valores promedio de pH en diferentes especies de sangre. (Iciar Asrasarán, J. Alfredo Martínez, 2000)

### 2.4.3 MIEL

*“ Se conoce por miel el producto alimenticio que producen las abejas a partir del néctar de las flores, de las secreciones procedentes de partes vivas de las plantas o que se encuentran sobre ellas, que es pecoreado, transformado, mezclado con sustancias específicas propias, almacenado y dejado madurar en los panales de la colmena”.* (Iciar Asrasarán, J. Alfredo Martínez, 2000)

La miel forma parte de los primeros alimentos que el hombre aprovechó para nutrirse, en su contenido se destacan la fructosa y glucosa que suponen el 75% de su peso y el resto es agua.

El pH ácido de la miel posee la función de inhibir la presencia y el crecimiento de microorganismos.



### III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL



### III. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

La finalidad de esta campaña experimental fue realizar una caracterización físico-mecánica de los morteros de cal hidratada dosificados con los distintos aditivos orgánicos previamente seleccionados: la clara de huevo, sangre bovina y miel pura.

#### 3.1 OBJETIVOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

Las pruebas se realizaron para morteros de cal en estado fresco y endurecido, teniendo en cada una de ellas un mortero de cal sin aditivo como testigo, para así comparar las características que presenten. Todo esto siguiendo con las normativas establecidas por la UNE-EN (norma española, normalizada con toda la unión europea).

#### 3.2 MATERIALES UTILIZADOS

Los materiales utilizados para la realización de este proyecto, fueron seleccionados de acuerdo a la experiencia del centro de investigación GICITED.

CODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	TIPO	EDAD (meses)
CAL	Cal aérea en pasta (Com-cal)	Cal en Pasta	Mínimo 6 meses
ÁRIDO	Árido Sauló Fino (Sorigué)	Silíceo	
CH	Clara de Huevo		
SA	Sangre vacuna (matadero Osvaca, Sabadell)		
MI	Miel (San Francisco)	Miel de mil flores	

Tabla 2. Características de los materiales utilizados para este proyecto de investigación.

## **CAL EN PASTA**

### **Características técnicas**

Normativa CL-90 según UNE-EN 459/1 con pureza de CaO superior al 95%

Producto 100% natural, sin aditivos

Densidad: 1,2 g/cm<sup>3</sup>

Concentración de CaO: 270 gr/l

Granulometría: 90-200 micras

Se empleó cal en pasta; la cual es utilizada en la fabricación de morteros puros para su uso como revestimientos (interiores o exteriores). Estos morteros proporcionan:

- Buena plasticidad y usabilidad.
- Ausencia de retracción a causa de la constancia de volumen durante el endurecimiento. Durabilidad.
- Gran elasticidad: favorece la adaptación sobre las deformaciones del soporte, sin provocar fisuras. Buena adherencia.
- Permeabilidad apreciable al vapor de agua, lo que permite que los muros “respiren” (transpirable al vapor de agua, no acumula humedad).
- Buen aislante térmico y acústico
- Permite la aplicación de capas muy finas
- Fácil de pigmentar. Gran riqueza de cromatismos y luminosidad del color
- Garantizan el sellado y estucado
- Aplicados como revestimientos verticales exteriores, los morteros de cal son impermeables a la penetración de agua de lluvia
- No interaccionan negativamente con otros materiales
- Efecto desinfectante. Fungicida natural por la alcalinidad de la cal
- Resistente al fuego. En caso de incendio no desprende humos tóxicos

### ÁRIDO SAULÓ FINO

El árido utilizado en este proyecto fue agregado sílico Sauló Fino, el cual presenta una curva granulométrica muy similar a la normalizada para áridos de máxima compacidad (árido de Fuller); UNE- EN 933.2: 31.5, 16, 8,4, 2, 1, 0.5, 0.25, 0.125, 0.063.

A continuación se muestra una comparativa de las curvas granulométricas del árido seleccionado y el árido normalizado:

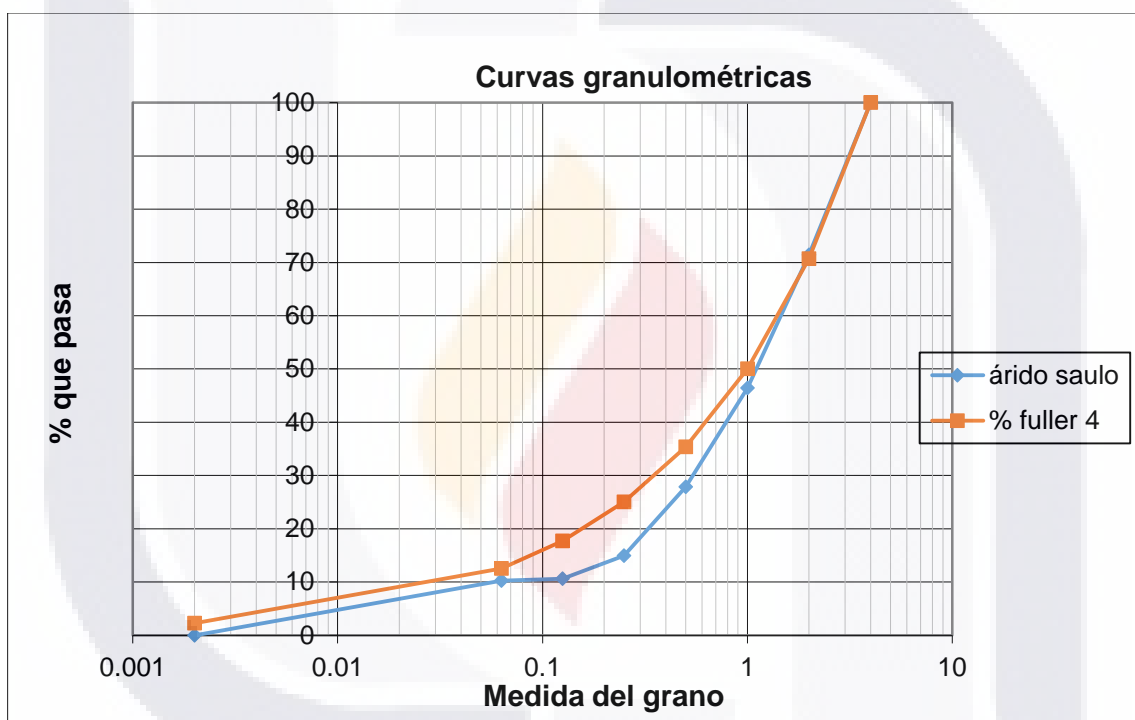


Ilustración 8. Curva granulométrica árido Sauló, la línea azul representa la granulometría del árido Sauló y la línea naranja la curva de Fuller normalizada.

Posteriormente, se tomó la decisión de solo utilizar el agregado con diámetro inferior a 2 mm; la utilización de un árido normalizado en este proyecto, ayudará a realizar comparativas para posteriores investigaciones similares.



Ilustración 9. Granulometría del árido silíceo Sauló (Fotografía de archivo del autor).

### **Clara de Huevo**

El tipo de huevo que se adquirió fue el café de granja, posteriormente se obtuvo la clara.

### **Sangre**

La sangre utilizada fue sangre bovina del matadero “Osvaca”; el cual se encuentra localizado en Sabadell, Barcelona, España; por lo que se tuvo que añadir un anticoagulante para la transportación de este aditivo a utilizar.

Se le añadieron 38 gramos de Citrato de sodio para combatir la coagulación normal de la sangre, considerando que esto no afectara a la composición de la misma y químicamente a la cal.

### **Miel**

Se añadió una miel de mil flores de la marca comercial “San Francisco”, misma que fue comprada en el supermercado.



## **IV. EQUIPOS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES**





## IV. EQUIPOS Y MÉTODOS EXPERIMENTALES

### 4.1 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)

El análisis termogravimétrico es una técnica de caracterización mineralógica que mide la variación porcentual en peso de un material (respecto al tiempo o a temperatura) al ser sometido a un calentamiento, producto de la descomposición del material, como consecuencia del desprendimiento de compuestos gaseosos, deshidratación etc. (Matteini & Moles, 2001). Este calentamiento de la muestra es programada a una velocidad constante y por un tiempo determinado. Los resultados registrados se suelen representar en una gráfica masa-temperatura, conocida como termograma, que proporciona información cualitativa y cuantitativa de las muestras. La interpretación del termograma obtenido permite la identificación de la composición mineralógica de la muestra.

Se ha utilizado un sistema de equipos para la realización de la prueba, siendo programados con una velocidad de calentamiento de 10°C/min, desde 25/30 °C hasta 1000 °C.



Ilustración 10. Sistema de equipos (equipo de TG, báscula de precisión, horno y computadora) para análisis termogravimétrico del laboratorio de materiales de EPSEB. Fuente: propia.

La muestra se colocó en el interior de un horno, sobre un porta muestras conectado a una balanza que mide y registra gráficamente la variación del peso y de la temperatura.

## 4.2 PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO FRESCO

### 4.2.1. FLUIDEZ

El agua de amasado se determina según UNE EN 1015-3 mediante la mesa de sacudidas, a la que se le coloca previa humectación un cilindro normalizado que se rellena de mortero y se enrasa. A continuación se desamolda el producto, se esperan 15 segundos y se realizan 15 sacudidas, una por segundo. El diámetro final del mortero se denomina diámetro de escurrimiento y es el que determina su consistencia. De este modo, el agua de amasado que se emplee para un mortero será aquella que dote al mortero de un diámetro de escurrimiento, y por tanto de una consistencia determinados.

Se propone la realización de 3 especímenes de morteros de cal adicionados con aditivos orgánicos para poder realizar una media aceptable. Las dosificaciones de los aditivos para el ensayo de fluidez se elaborarán con dosificaciones 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, 5%, 6%, 7%, 8%, 9%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90% y 100% de la masa de la mezcla a elaborar para evaluar su comportamiento en estado fresco.

#### Pasta de cal

Procedimiento que se realizó para esta prueba:

- Se comenzó con una muestra de pasta de cal de 200 grs, la cual contiene un 38% de cal pura, por lo que se tomó esto como referencia para la proporción en peso de la arena, que en este caso fue de 76 grs. Y los otros 124 grs forman parte del agua ya contenida en la pasta.



- Se hizo la homogenización de la mezcla de pasta de cal y arena.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

- o Se colocó el cono en el centro de la mesa de sacudidas, para después llenarlo con el mortero en dos capas y compactadas cada una de ellas con 25 golpes de pisón.
- o Posteriormente, se enrasó sin compactar el mortero y haciendo limpieza del mortero excedente.
- o Después, se levantó el molde de manera rápida y en una sola dirección.
- o A continuación, se sometió la mesa de sacudidas a 15 golpes controlados en un tiempo de 15 segundos.
- o Después de estos golpes, se midió y registró los cuatro diámetros resultantes del mortero ya esparcido para posteriormente obtener una media de los resultados y medir el nivel de fluidez de cada mortero.

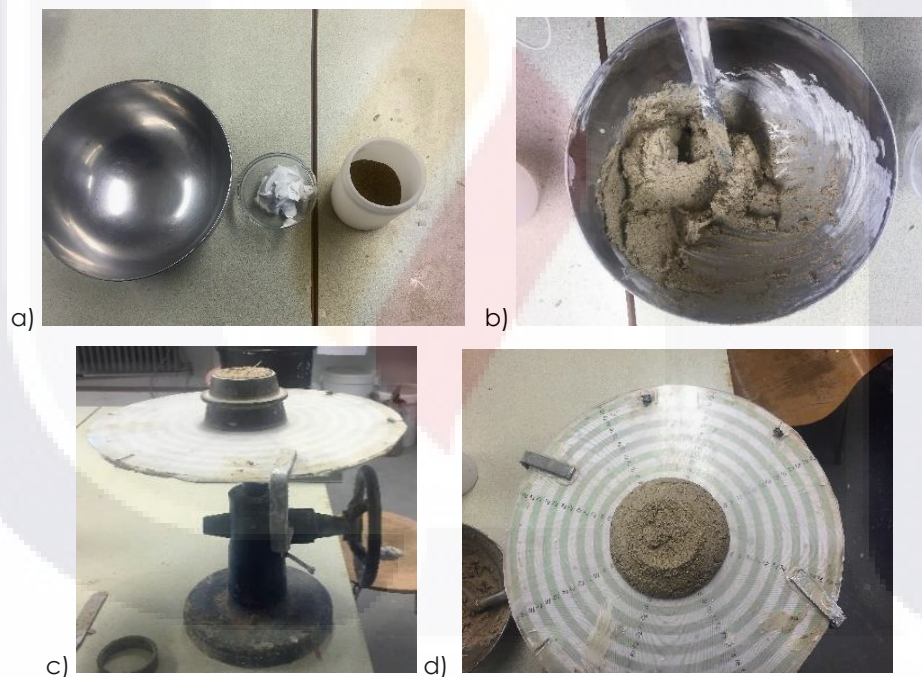


Ilustración 11. Procedimiento llevado a cabo para la prueba de fluidez en mortero de pasta de cal, siguiendo los pasos descritos con anterioridad. a) Pasta de cal, arena y recipiente mezclero para la elaboración del mortero. b) Mortero de cal. c) Mortero de cal en cono normalizado. d) Diámetros de escurrimiento obtenidos para esta prueba.

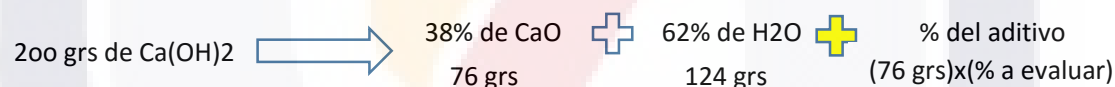
## Clara de huevo

Procedimiento que se realizó para esta prueba:

- Se comenzó con una muestra de pasta de cal de 200 grs, la cual contiene un 38% de cal pura, por lo que se tomó esto como referencia para la proporción en peso de la arena, que en este caso fue de 76 grs. Y los otros 124 grs forman parte del agua ya contenida en la pasta.



- Se hizo la homogenización de la mezcla de pasta de cal y arena.
- A continuación se le añadió el porcentaje del aditivo a probar (Este se considera con el porcentaje de concentración de  $\text{CaO}$  contenido en la pasta de cal).



- Se colocó el cono en el centro de la mesa de sacudidas, para después llenarlo con el mortero en dos capas y compactadas cada una de ellas con 25 golpes de pisón.
- Posteriormente, se enrasó sin compactar el mortero y haciendo limpieza del mortero excedente.
- Después, se levantó el molde de manera rápida y en una sola dirección.
- A continuación, se sometió la mesa de sacudidas a 15 golpes controlados en un tiempo de 15 segundos.
- Después de estos golpes, se midió y registró los cuatro diámetros resultantes del mortero ya esparcido para posteriormente obtener una media de los resultados y medir el nivel de fluidez de cada mortero.
- Se repitió este mismo proceso en cada porcentaje de aditivo a evaluar.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

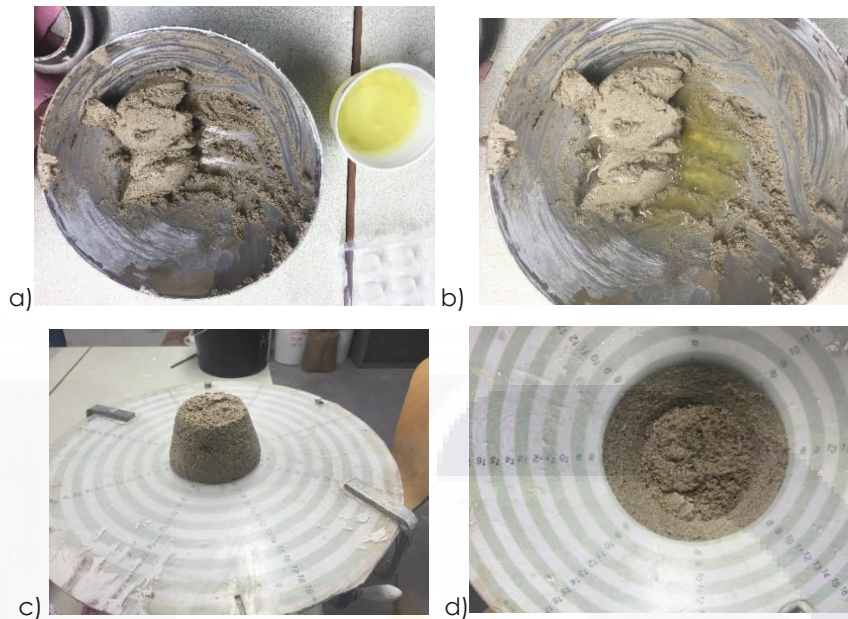


Ilustración 12. Procedimiento llevado a cabo para la prueba de fluidez en mortero de pasta de cal más clara de huevo como aditivo, siguiendo los pasos descritos con anterioridad. a) Pasta de cal, arena, bowl y clara de huevo. b) Mortero de cal más clara de huevo. c) Mortero de cal en cono normalizado. d) Diámetros de escurrimiento obtenidos para esta prueba. Fuente propia.

## Miel

Procedimiento que se realizó para esta prueba:

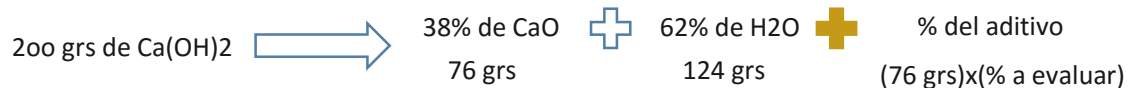
- Se comenzó con una muestra de pasta de cal de 200 grs, la cual contiene un 38% de cal pura, por lo que se tomó esto como referencia para la proporción en peso de la arena, que en este caso fue de 76 grs. Y los otros 124 grs forman parte del agua ya contenida en la pasta.



- Se hizo la homogenización de la mezcla de pasta de cal y arena.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

- A continuación se le añadió el porcentaje del aditivo a probar (Este se considera con el porcentaje de concentración de CaO contenido en la pasta de cal).



- Se colocó el cono en el centro de la mesa de sacudidas, para después llenarlo con el mortero en dos capas y compactadas cada una de ellas con 25 golpes de pisón.
- Posteriormente, se enrasó sin compactar el mortero y haciendo limpieza del mortero excedente.
- Después, se levantó el molde de manera rápida y en una sola dirección.
- A continuación, se sometió la mesa de sacudidas a 15 golpes controlados en un tiempo de 15 segundos.
- Después de estos golpes, se midió y registró los cuatro diámetros resultantes del mortero ya esparcido para posteriormente obtener una media de los resultados y medir el nivel de fluidez de cada mortero.
- Se repitió este mismo proceso en cada porcentaje de aditivo a evaluar.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

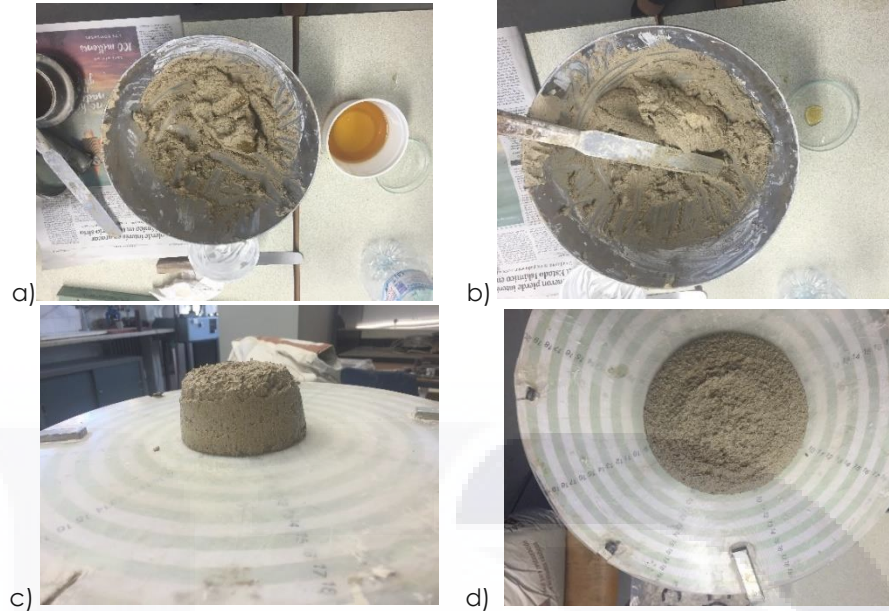


Ilustración 13. Procedimiento llevado a cabo para la prueba de fluidez en mortero de pasta de cal más miel como aditivo, siguiendo los pasos descritos con anterioridad. a) Pasta de cal, arena, bowl y miel. b) Mortero de cal más clara de huevo. c) Mortero de cal en cono normalizado. d) Diámetros de escurrimiento obtenidos para esta prueba. Fuente propia.

## Sangre

Procedimiento que se realizó para esta prueba:

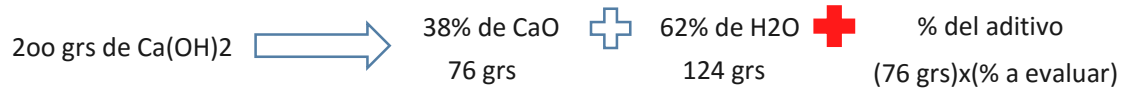
- Se comenzó con una muestra de pasta de cal de 200 grs, la cual contiene un 38% de cal pura, por lo que se tomó esto como referencia para la proporción en peso de la arena, que en este caso fue de 76 grs. Y los otros 124 grs forman parte del agua ya contenida en la pasta.



- Se hizo la homogenización de la mezcla de pasta de cal y arena.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

- A continuación se le añadió el porcentaje del aditivo a probar (Este se considera con el porcentaje de concentración de CaO contenido en la pasta de cal).



- Se colocó el cono en el centro de la mesa de sacudidas, para después llenarlo con el mortero en dos capas y compactadas cada una de ellas con 25 golpes de pisón.
- Posteriormente, se enrasó sin compactar el mortero y haciendo limpieza del mortero excedente.
- Después, se levantó el molde de manera rápida y en una sola dirección.
- A continuación, se sometió la mesa de sacudidas a 15 golpes controlados en un tiempo de 15 segundos.
- Después de estos golpes, se midió y registró los cuatro diámetros resultantes del mortero ya esparcido para posteriormente obtener una media de los resultados y medir el nivel de fluidez de cada mortero.
- Se repitió este mismo proceso en cada porcentaje de aditivo a evaluar.



“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

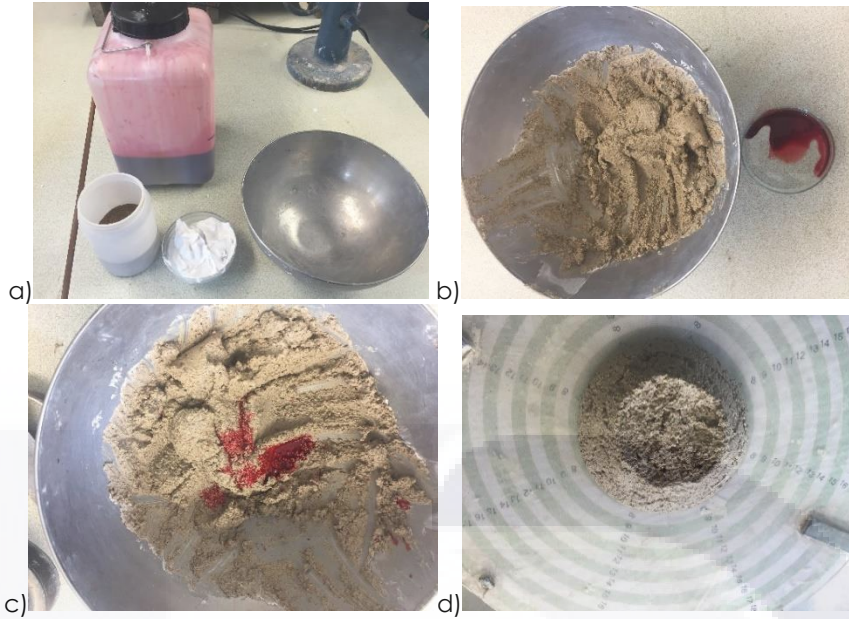


Ilustración 14. Procedimiento llevado a cabo para la prueba de fluidez en mortero de pasta de cal más sangre como aditivo, siguiendo los pasos descritos con anterioridad. a) Pasta de cal, arena, bowl y sangre. b) Mortero de cal más clara de huevo. c) Mortero de cal en cono normalizado. d) Diámetros de escurrimiento obtenidos para esta prueba. Fuente propia.

Al finalizar cada prueba, se llenaron los moldes normalizados para obtener probetas y posteriormente realizar las pruebas en su estado endurecido,



Ilustración 15. Moldes normalizados con dimensiones de 4x4x16 cms para la elaboración de probetas.

#### 4.2.2. VISCOSIDAD

En la actualidad, no existe un procedimiento normalizado para la medida de las características reológicas de las pastas de cal. Sí parece más cercana la posibilidad de que se establezcan algunas pautas, o incluso una metodología suficientemente acotada, para la medida de la viscosidad dinámica de dichas pastas y para unas condiciones previamente fijadas (tiempo de ensayo, velocidad de aplicación del par, rampas o escalones de variación de velocidad, definiciones de condiciones de historia de corte previa, etc.).

En este caso, se siguió la metodología llevada a cabo en la tesis doctoral del Dr. Joan Ramon Rosell i Amigó de la Universidad Politécnica de Cataluña, con esto, es necesario concretar diferentes aspectos de los procedimientos de medida y comprender el efecto de las variables que intervienen.

##### Variables en el proceso de medida:

- Rango de velocidades
- Variables procedimentales vinculadas a la sedimentación (tiempo 0 desde el amasado, interrupciones en la aplicación del par).
- Variables en la preparación de las muestras:
- Desorden inicial, historia de corte
- Influencia del reamasado

El equipo está dotado de una sonda termométrica que permite tomar como dato la temperatura de la sustancia medida. La toma de datos se realiza automáticamente acoplado el equipo a un ordenador convencional. El software utilizado, específico para equipos Thermo Scientific, es el HAAKE RheoWin 3. Los parámetros de precisión, repetitividad y resolución son adecuados a los objetivos del estudio.

### **Velocidad de rotación y sensor**

Al ser la pasta de cal un fluido no Newtoniano, su comportamiento depende de la velocidad de aplicación del esfuerzo deformante, en nuestro caso, un esfuerzo cortante, por tanto no se da linealidad entre viscosidad y velocidad de aplicación del esfuerzo de corte.

Para la caracterización de las cales es necesario realizar medidas a diferentes velocidades hasta la estabilización de la lectura para cada una de ellas. Se tratará de 106 un conjunto discreto de resultados  $(\tau, t)$  o  $(\mu, t)$ , en función de la velocidad de giro del husillo. Como puede verse, y como ocurre siempre en un viscosímetro, no es posible establecer una rampa continua de incremento de velocidad de rotación por lo que debe actuarse por escalones. Para determinados resultados de caracterización perseguidos se realizarán las lecturas a diferentes velocidades (típicamente de 3 a 200 rpm).

En la siguiente ilustración, se reproducen los rangos máximos de lectura para cada husillo y velocidad. Si se considera que los valores de viscosidad medidos para los distintos ensayos realizados varían entre 12 y 0.5 Pa · s, podemos observar la validez de los distintos husillos para las diferentes velocidades de ensayo, en la zona destacada en azul.

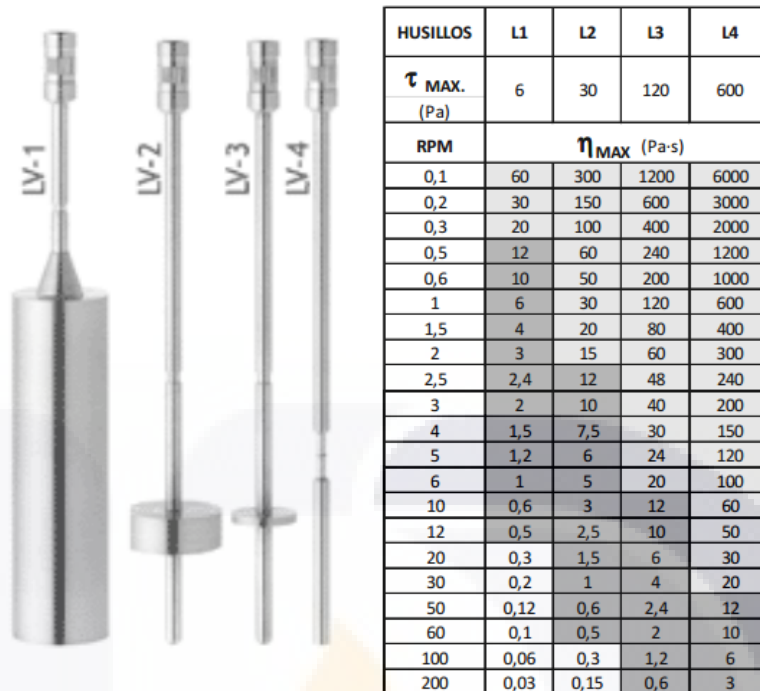


Ilustración 16. Husillos de L1 a L4 y tabla de valores de viscosidad máxima para cada velocidad.  
Fuente: (Amigó, 2013).

Para este proyecto, se utilizó el husillo L3 de acuerdo a la consistencia de la mezcla de pasta de cal y aditivo, con las velocidades de 3, 4, 6, 10, 12, 20, 30, 50, 60, 100 y 200 rpm realizadas de forma discontinua, cada mezcla se ha colocado en un bote cilíndrico de dimensiones 65 mm de diámetro por 90 mm de altura, y previamente a la realización de las medidas de viscosidad se ha homogeneizado las muestras el material mediante la aplicación de un amasado mecánico, a unas 100 rpm durante 5 minutos. El tiempo de interrupción entre el amasado y el inicio de las lecturas con el viscosímetro ha sido de 10 minutos. Esto es para minimizar el efecto posterior de variación de historia de corte por introducción del husillo de aplicación del movimiento en el viscosímetro.

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”



Ilustración 17. Agitador rotacional utilizado para el amasado previo al ensayo de pastas de cal más aditivos orgánicos. Fuente propia.

Para la realización de las medidas de viscosidad se dispuso de un viscosímetro rotacional de la marca Haake, concretamente modelo Viscotester 7L plus (Ilustración 06).

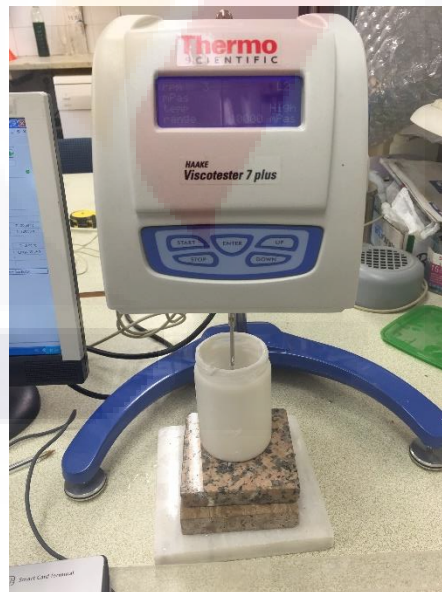


Ilustración 18. Viscosímetro rotacional, tipo Brookfield, Viscotester 7L marca Haake. Fuente propia.



Ilustración 19. Mecanismos y dispositivos de software necesarios para la realización de la prueba de viscosidad. Fuente propia.

### 4.3 PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO ENDURECIDO

#### 4.3.1 CÁMARA DE CARBONATACIÓN ACELERADA

Las probetas elaboradas fueron sometidas a una cámara de carbonatación acelerada durante siete días; la cual hacía la función de inyectar y mantener el dióxido de carbono necesario para la madurez de la cal.

La cámara de Carbonatación acelerada se encuentra completamente sellada, la cual está conectada a un cilindro de CO<sub>2</sub> se inserta de forma manual a la cámara. Se cuenta con varios dispositivos que controlan la temperatura y el nivel de dióxido de carbono que se presenta dentro de la misma.



a) b)  
 Ilustración 20. a) Probetas de mortero de cal más aditivos orgánicos, dentro de la cámara de carbonatación acelerada. b) Mecanismos de medición de CO<sub>2</sub>, temperatura y porcentaje de humedad. Fuente propia.

Cuando el proceso químico del hidróxido de calcio reacciona con el CO<sub>2</sub>, se libera una gran cantidad de H<sub>2</sub>O dentro de la cámara de carbonatación acelerada, por lo que se recurrió a la colocación de una bandeja con sal de sílice (previamente secada en horno), la cual absorbe la humedad que se presenta dentro de la misma y permita que el CO<sub>2</sub> penetre sobre el hidróxido de calcio para obtener su maduración.

El color marrón de la sal de sílice nos indicará que se encuentra saturada de humedad, por lo que será necesario hacer el cambio por otra sal de sílice completamente seca (color azul).

### 4.3.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

#### a) Módulo de Elasticidad Dinámica (MOE) por ondas sonoras

Esta prueba fue llevada a cabo bajo el método desarrollado por el equipo de profesionales del laboratorio de materiales de la EPSEB, el cual ha sido publicado ante la comunidad científica (Rosell & Cantalapiedra, 2011). El método permite obtener el módulo de elasticidad dinámico de la probeta determinando la velocidad con que se propagan las ondas sonoras provocadas por un impulso. Su desarrollo ha tomado como referencia las normas UNE-EN 14146 (UNE-EN 14146 AENOR, 2004) y UNE-EN ISO 12680-1 (UNE-EN ISO 12680-1 AENOR, 2007).

Esta es una prueba no destructiva que se realiza para determinar el módulo de elasticidad del mortero endurecido mediante la emisión de las ondas a través del cuerpo de las probetas y la recepción de la información a la computadora, esto se crea a través de un golpe dado a la muestra.

Para llevar a cabo este proceso, es completamente necesario que las muestras se encuentren en su totalidad secas, debido a que la cantidad de humedad puede influir en el paso de las ondas y variar los resultados; por lo que se colocaron en un horno a con una temperatura constante de 80 grados centígrados durante 48 horas.

Posteriormente, se utilizó un software analizador FFT, un micrófono receptor de sonido, un martillo y dos triángulos de espuma con la función de dar soporte a la probeta y evitar la pérdida de vibración.

Este desarrollo, ha sido por el profesor de la EPSEB, por lo que se proporcionó un formato de Excel para obtener los resultados, siguiendo los pasos basado en la norma UNE- EN- 14146.



Procedimiento de la prueba para cada una de las muestras:

1. Primeramente se pesó la muestra en balanza de precisión de 0.01 gr para después con ayuda de un pie de rey electrónico se midió cada uno de las cuatro aristas correspondientes a la longitud, ancho y altura de cada probeta (12 medidas). Las dimensiones y el peso fueron introducidos en los correspondientes campos en la hoja de cálculo del MOE que determinará los dos puntos de la probeta en la que serán colocados dos soportes en forma de triangulares de poliestireno extruido para soportarla. Esto para evitar vibraciones e interrupciones en la transferencia de las ondas y definir el modo de vibración de las muestras.

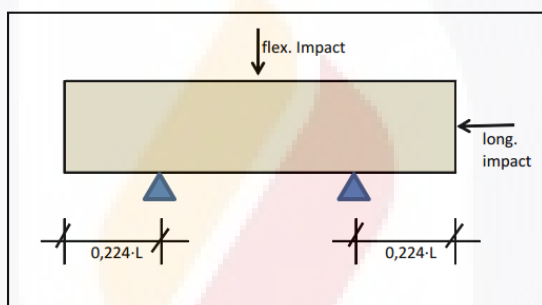


Ilustración 21. Imagen de zonas de soporte e impacto. Fuente (Rosell & Cantalapiedra, 2011)

especificacions	nº proveta	SEPARACIÓ SUPORTS	Peso (g)	altura	anchura base	Longitud	Flexión. Cara1	Flexión. Cara2	freq. longitudinal
			g	mm	mm	mm	Hz	Hz	Hz
		a	34.7	406.6	38.41	41.09	156.28	1626	4135
		b	85.4		38.34	42.8	156.01	1625	4134
		c	34.7		38.09	43.65	155.43	1621	4135
		d	77.4		38.33	42.41	151.12	1615	4145
							1603		4135
							1629		4134
		Std. Desv.					9.55859125	#jDIV/0!	4.27395211
		mitjanes	406.6	38.29	42.49	154.71	1620	#jDIV/0!	4136
		sensibilitat	0.01	0.01	0.01	0.01	1	1	1
		err. Mes. rel.	2.46E-05	2.61E-04	2.35E-04	6.46E-05	6.17E-04	#jDIV/0!	2.42E-04
		err. accid.					10.9903359	#jDIV/0!	4.91413096
		err. Accid. relatiu					6.78E-03	#jDIV/0!	1.19E-03
		ERROR							

Ilustración 22. Formato de Excel para la introducción de los datos para el cálculo del MOE mediante ondas sonoras. (Rosell & Cantalapiedra, 2011)

2. Con el software ya instalado en una computadora y el micrófono ya conectado, se analizó que el micrófono esté recibiendo la señal de las vibraciones y se comprueba la eficiencia del mismo.

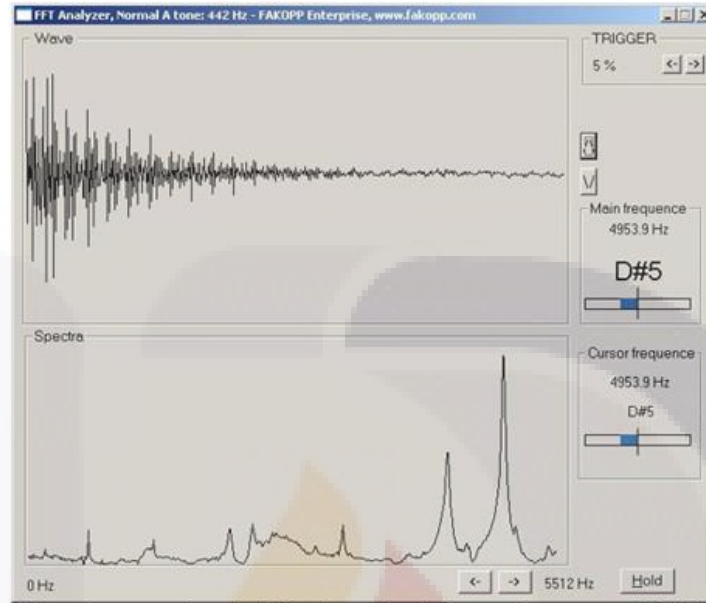
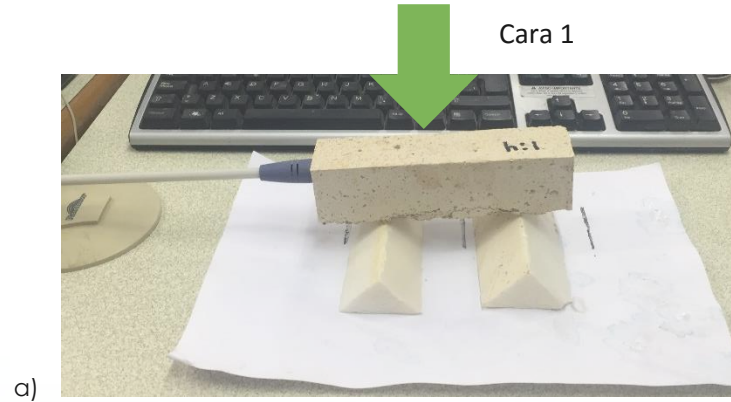


Ilustración 23. Representación de lectura de la frecuencia de resonancia medida mediante el software FFT Analyzer.

Fuente Propia

3. Se colocó en el centro de la cara lateral de la probeta un receptor para la ejecución del software FFT Analyzer. Se determinó el paso de las ondas sonoras en sentido transversal golpeando ligeramente con un martillo percutor con punta de madera 6 veces en la cara superior e inferior y en sentido longitudinal 6 golpes en la cara lateral. Es importante que al momento de realizar este paso no se produzcan a la vez otro tipo de sonidos que puedan interferir con los resultados.
4. A continuación, se comenzó con las mediciones de la resonancia de la frecuencia en la parte de la cara 1 de la probeta, introduciendo seis mediciones obtenidas por el software.



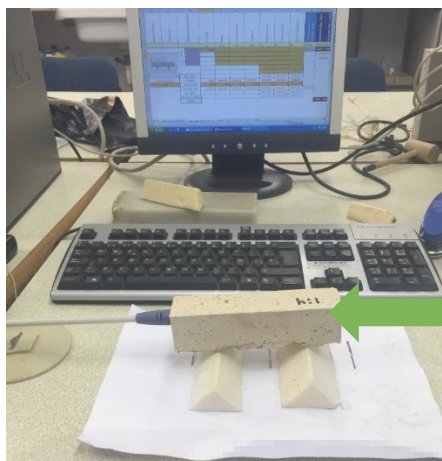
a)

especificacions	nº proveta	SEPARACIÓ SUPORTS	Peso (g)	altura	anchura base	Longitud	Flexión. Cara1	Flexión. Cara2	freq. longitudinal
			g	mm	mm	mm	Hz	Hz	Hz
		a	34.7	406.6	38.41	41.09	156.2	1626	4135
		b	85.4		38.34	42.8	156.0	1625	4134
		c	34.7		38.09	43.65	155.4	1621	4135
		d	77.4		38.33	42.41	151.1	1615	4145
							1603		4135
							1629		4134
		Std. Dev.					9.55859125	#!DIV/0!	4.27395211
		Poisson hipot. (μ)					1620	#!DIV/0!	4136
			0.22				1	1	1
		sensibilitat	0.01	0.01	0.01	0.01			
		err. Mes. rel.	2.46E-05	2.61E-04	2.35E-04	6.46E-05	6.17E-04	#!DIV/0!	2.42E-04
		err. accid.					10.9903359	#!DIV/0!	4.91413096
		err. Accid. relatiu					6.78E-03	#!DIV/0!	1.19E-03
		ERROR							

b)

Ilustración 24. a) Representación de la Cara 1 para la obtención de las ondas sonoras. b) Formato de Excel en donde se anotaron los resultados arrojados por el software. Fuente (Rosell & Cantalapiedra, 2011)

- Posteriormente, se realizan las mismas mediciones de la resonancia de la frecuencia en la parte de la cara lateral de la probeta, introduciendo otra vez las seis mediciones obtenidas por el software.



a)

especificacions	nº proveta	SEPARACIÓ SUPORTS	Peso (g)	altura	anchura base	Longitud	Flexión. Cara1	Flexión. Cara2	freq. longitudinal	
			g	mm	mm	mm	Hz	Hz		
		a	34.7	406.6	38.41	41.09	156.28	1626	4135	
		b	85.4		38.34	42.8	156.01	1625	4134	
		c	34.7		38.09	43.65	155.43	1621	4135	
		d	77.4		38.33	42.41	151.12	1615	4145	
							1603		4135	
							1629		4134	
		Std. Desv.					9.55859125	#i DIV/0!	4.27395211	
		Poisson hipot.(μ)	mitjanes	406.6	38.29	42.49	154.71	1620	#i DIV/0!	4136
			0.22					1	1	
			err. Mes. rel.	2.46E-05	2.61E-04	2.35E-04	6.46E-05	6.17E-04	#i DIV/0!	2.42E-04
			err. accid.					10.9903359	#i DIV/0!	4.91413096
			err. Accid. relatiu					6.78E-03	#i DIV/0!	1.19E-03
		ERROR								

b)

Ilustración 25. a) Colocación del micrófono receptor de las ondas sonoras para la obtención del MOE. b) Formato de Excel donde se vaciarán los resultados arrojados por el software. (Rosell & Cantalapedra, 2011)

6. Todos los datos que se han introducido en la hoja de Excel servirán para el cálculo de los resultados finales de la prueba.

### **b) Módulo de Elasticidad Dinámica (MOE) mediante ultrasonido**

Una segunda comprobación es realizada a fines de comparar y descartar errores en el método anterior, determinando el MOE en este caso por la propagación de ultrasonido en sentido longitudinal.

Procedimiento de la prueba para cada una de las muestras:

Para la realización de esta prueba se utilizó un equipo de emisión-recepción de ultrasonidos a C368 de Matest, provisto de palpadores de contacto receptor-transmisor de 55 kHz. Con la ayuda de un gel de PH neutro se colocó en el palpador receptor y emisor del aparato, colocando cada uno de estos en la cara lateral de las muestras (lectura en sentido longitudinal de la probeta). El equipo arroja el tiempo (en microsegundos  $\mu s$ ), que tarda el ultrasonido en transmitirse.

Con la ayuda de una hoja de cálculo en Excel, se introdujeron los datos del peso, dimensiones y densidad de la probeta para la determinación final de del módulo de elasticidad dinámico.

Calculando la velocidad de paso:

$$v_{us} = \text{longitud de la probeta (m)} / \text{tiempo de paso (s)}. \quad v_{us} = L/t .$$

$$\text{Moe por ultrasonido: } MOE_{us} = \rho (1+\mu)(1-2\mu) v_{us}^2 / (1-\mu)$$



Ilustración 26. Equipo y receptores para medición de MOE por medio de ultrasonidos. Fuente propia

Procedimiento de la prueba para cada una de las muestras:

1. Primeramente, se realizó una calibración previa para asegurar que los datos sean correctos, colocando los polos en la barra de calibración ya normalizada, verificando que el resultado sea el correcto para la barra.
2. Consecutivamente, se aplicó el gel conductor de una manera considerablemente distribuida en los extremos de la probeta y evitar una mala lectura, para posteriormente colocar el polo emisor y receptor.
3. Finalmente, el equipo nos dará la lectura del tiempo en que tarda el sonido en recorrer la probeta.

### **4.3.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

En esta prueba mecánica se determina la resistencia de un material, en este caso, la resistencia a la deformación al frente de flexión del mortero de cal hidratada solo y con los aditivos orgánicos estudiados.

En este ensayo se establece la curva de desplazamiento de carga, la medición del desplazamiento y la cantidad de carga aplicada a la probeta de mortero a ensayar. UNE EN 1015-11.

Para la realización de esta prueba se contó con una prensa Wykeham Farrance, colocando el centro de nuestra probeta en el punto donde se ejerció la carga; controlando la velocidad de carga y el punto de quiebre, el cual nos lo indicará el lector.



Ilustración 27. Prensa Wykeham Farrance utilizada para la prueba de resistencia a la flexión. Fuente propia.

#### 4.3.4 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La 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 española UNE EN 1015-11, AENOR, 2000-2007.

Es una prueba similar a la prueba de resistencia a la flexión, lo que lo difiere es que la carga se aplica entre dos superficies de 40x40 mm hasta llegar a su punto límite o punto de ruptura.



Ilustración 28. Probeta sometida a la resistencia a la compresión. Fuente propia.

### 4.3.5 DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA, ÍNDICE DE POROSIDAD

Densidad en un mortero se correlaciona directamente con los componentes que tiene en él, así como su contenido de aire. La densidad del mortero fresco se determina por la norma UNE 1015-6. En este caso se determinará en estado endurecido, para la valoración y comparación de los valores que afectan la densidad del mortero de cal hidratada así como los que contienen los aditivos orgánicos establecidos para esta investigación.

Para la realización de este ensayo se contó con un horno con una temperatura gradual, una campana de vacío con una eliminación de agua, bomba de vacío, una báscula con un 0,01 g de precisión, y un agua de pesaje hidrostático y destilada (esta agua para evitar el proceso de lixiviación en las muestras).

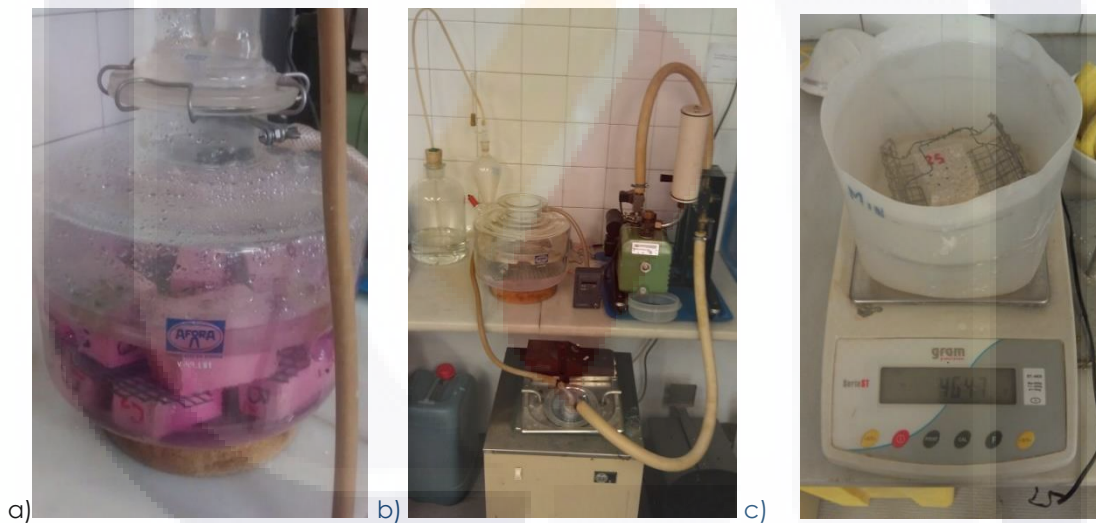


Ilustración 29. a) Probetas dentro de la campana de vacío. b). Equipo para ensayo de porosidad del laboratorio de materiales de la EPSEB, c) Determinación del peso hidrostático. Fuente propia.



Proceso de la prueba para cada una de las muestras:

1. Como primer paso, se colocaron las muestras dos días en el horno para su secado total, hasta la obtención de un peso constante entre ellas.
2. Se colocaron la mayor cantidad de muestras en la campana de vacío.
3. Posteriormente, se ajustó toda la estanqueidad del vaso y la estrella de la bomba de vacío para el inicio de la aspiración de todo el aire en el interior de la vasija y los poros de las muestras en el interior. Dejándolos así un tiempo de dos horas.
4. A continuación, se abrió la válvula para permitir la penetración del agua en el vaso, asegurándose que la muestra se encuentre sumergida 15 mm por encima del nivel. Es importante considerar que el agua debe de entrar lentamente y nunca caer directamente sobre las muestras.
5. En el momento de que el agua se encontró en la parte superior, se reinició el conteo por dos horas más en la campana de vacío.
6. Después de haber concluido, se apagó la campana de vacío, eliminando todo el aire que se encuentra estancado en la red de poros de la muestra.
7. Posteriormente, con la báscula hidrostática se mide el peso de las muestras, para posteriormente pesarlás con una báscula normal para completar los datos necesarios para la obtención de resultados para obtener una densidad aparente y relativa.

### 4.3.6 AVANCE DEL FRENTE DE CARBONATACIÓN

Para determinar la velocidad de carbonatación de un mortero de cal hidratada, de acuerdo con UNE EN 13295 se aplicó un reactivo llamado fenolftaleína, que reacciona al contacto si la muestra tiene un  $\text{pH} > 8$ , y por lo tanto la muestra no es carbonatada. De este modo se puede determinar qué profundidad de carbonatación ha alcanzado la muestra del estudio en un momento dado.

Para esta prueba, se consideró el pH de los aditivos orgánicos para validar la influencia del pH de cada uno de ellos contra el frente de carbonatación de cada probeta.

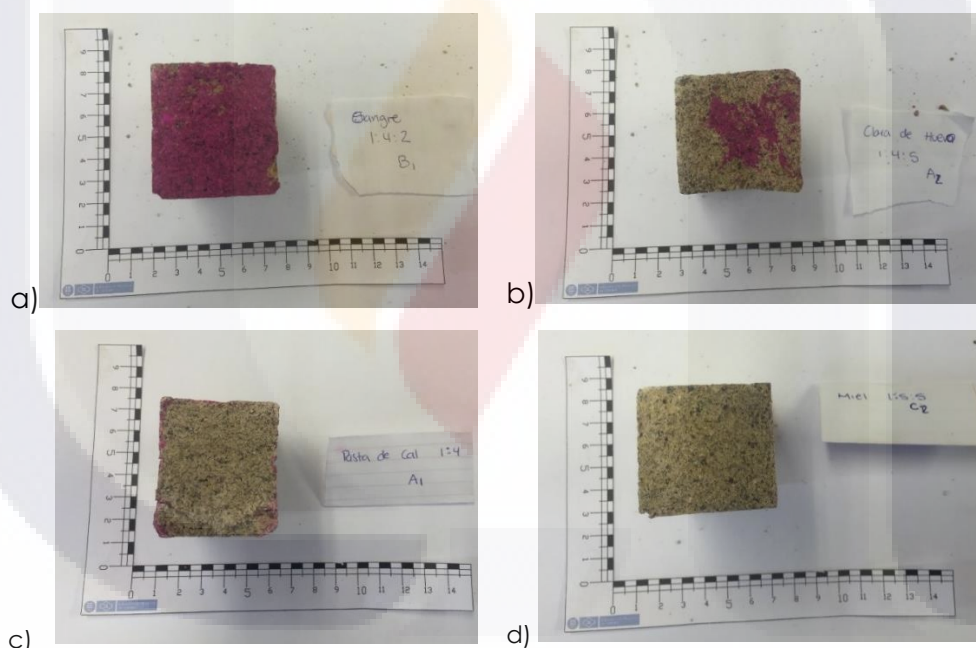


Ilustración 30. Muestras sometidas a la aplicación de fenolftaleína a) Muestra de probeta de Sangre 1:4:2 en peso presentando un  $\text{Ph} > 8$ , b) Muestra de Clara de huevo 1:4:5 en peso presentando un poco de contenido de  $\text{Ph} > 8$ , c) Muestra de pasta de cal 1:4 en peso completamente carbonatada, d) Muestra de Miel 1:5:5 en peso totalmente carbonatada.



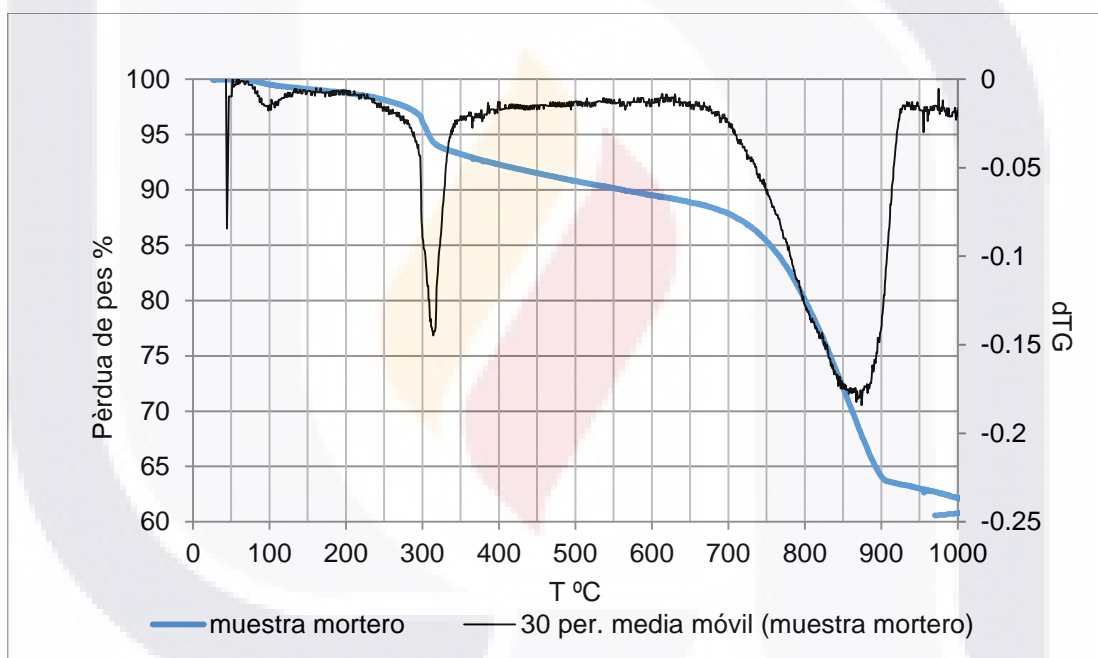
## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS



## V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron pruebas para morteros en estado fresco a todas las mezclas con las diferentes proporciones de aditivo orgánico, para así comparar los resultados y características que presenten y posteriormente hacer una valoración de sus consistencias para valorar si es conveniente hacer pruebas para estado endurecido o se descarta esa dosificación para cada aditivo. También se realizará la prueba para un mortero sin aditivar, como medida de control.

### 5.1 ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO (TGA)



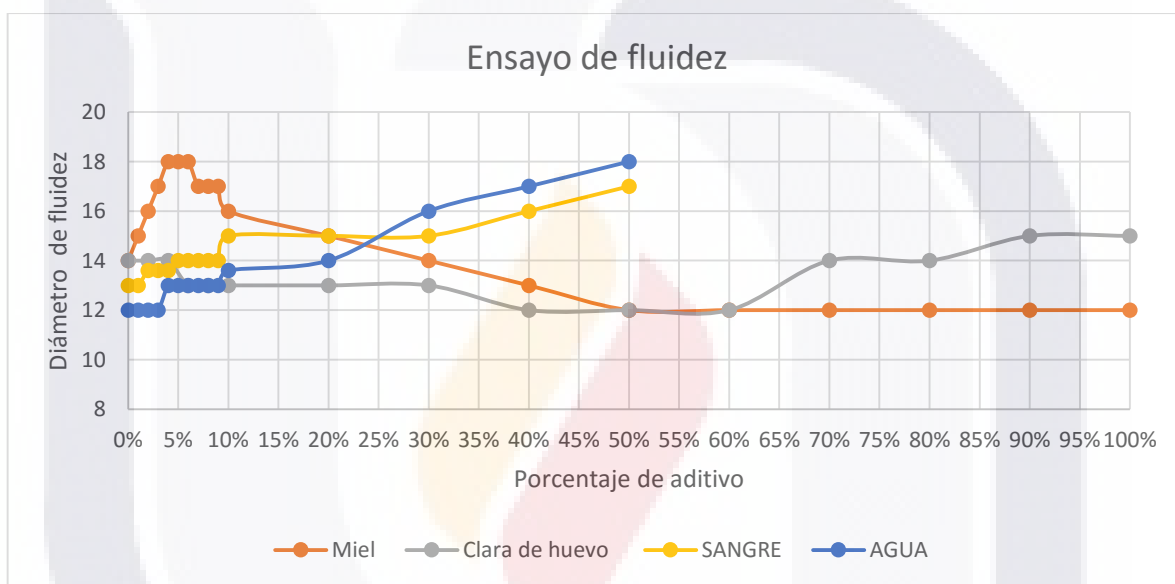
Gráfica 1. Gráfica termogravimétrica de la pasta de cal

En esta gráfica, nos mostró el resultado de la cantidad de agua contenida en la pasta de cal utilizada para esta investigación, lo cual nos genera que el 38% del total de la pasta de cal es óxido de calcio y el 62% es su nivel de agua contenida. Es importante tomar en cuenta que el 38% de óxido de calcio que contiene nuestra pasta de cal es un factor importante, debido a que las dosificaciones tanto de arena como de los aditivos que se consideraron para la elaboración de los morteros

de cal necesarios para esta investigación, se calculan respecto este 38% de óxido de calcio contenido en nuestra pasta de cal.

## 5.2 PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO FRESCO

### 5.2.1. FLUIDEZ



Esta gráfica representa el grado de fluidez de los morteros de pasta de cal con las diferentes proporciones de los aditivos a evaluar.

Primeramente, se realizó la prueba en un mortero de pasta de cal sin aditivo evaluándolo de 0% al 50% de incremento de agua según la proporción correspondiente de acuerdo al peso y el nivel de concentración de CaO anteriormente definido por la prueba termogravimétrica.

En este caso en particular, solamente se evaluó hasta un 50% de adición de agua, debido a que los resultados que se obtuvieron en este rango excedían el diámetro

de escurrimiento óptimo para un mortero de pasta de cal; por lo cual no era trabajable.

El mismo caso se reprodujo al momento de realizar la prueba con la adición de la sangre al mortero de pasta de cal, por lo que se tomó la decisión de elaborar probetas de pasta de cal con sangre en los puntos donde hubo un cambio considerable en la gráfica y en dónde se respetaba el diámetro admisible para un mortero de pasta de cal (15 cms.), por lo que se obtuvieron como resultados el 2%, 5% y 10%; y así realizar las pruebas en estado endurecido con estos porcentajes en proporción del nivel de concentración de CaO en peso: 1:4:2, 1:4:5 y 1:4:10.

Para el caso de la miel, se obtuvo un nivel de fluidez bastante alto al añadirle cada porcentaje en relación al nivel de concentración de CaO y el peso, pero mantuvo una cohesión cerrada, por lo que se propuso la evaluación del porcentaje en donde se presentaba el punto más alto de fluidez (5%): 1:4:5 en peso.

Subsiguientemente, sabiendo que el punto máximo del porcentaje de adición de miel en relación al peso era el 5%, se planteó la evaluación de la prueba de fluidez con este porcentaje y la misma cantidad de pasta de cal, variando así la proporción del peso de la arena para la obtención de un diámetro de escurrimiento de 15 cms.

Se obtuvo que haciendo una proporción de 1:5:5 en peso se adquiere el diámetro requerido, por lo que fue pauta importante para la proporción evaluada en morteros de cal en estado endurecido.

En la clara de huevo, se presentó una consistencia importante, el nivel de fluidez bajó al añadirle este aditivo. Se planteó evaluarlo en 1%, 5% y 10%, siendo estos los saltos en la gráfica y porcentajes similares a los aditivos anteriormente evaluados; con el fin de lograr la comparativa entre los mismo. Las proporciones a evaluar en estado fresco de acuerdo a lo anterior fueron las siguientes: 1:4:1, 1:4:5 y 1:4:10 en peso.

### 5.2.2. VISCOSIDAD

Se exponen los resultados de las medidas de esfuerzo cortante necesario para mantener la deformación, así como los de viscosidad determinada para cada velocidad de deformación en función del tiempo de aplicación del par.

Para mostrar los resultados se ha optado por reproducir los gráficos correspondientes a las lecturas de valores de esfuerzo cortante y viscosidad para un tiempo de ensayo determinado (media de las lecturas a los 700 segundos). Estos valores a tiempo constante permiten obtener funciones de ajuste de tipo potencial con niveles de correlación (R2) significativos en la mayoría de los casos.

La función ajustada es del tipo:

$$\tau = k \gamma^n$$

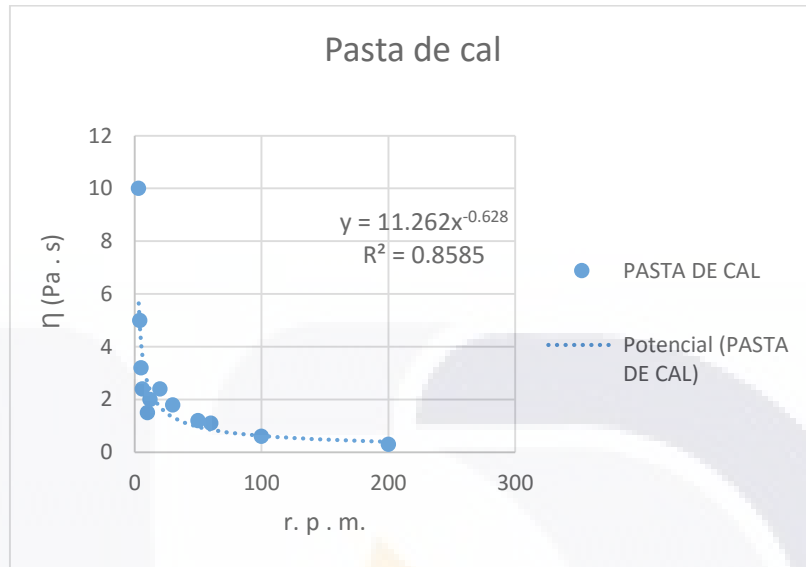
Donde:

k = índice de consistencia

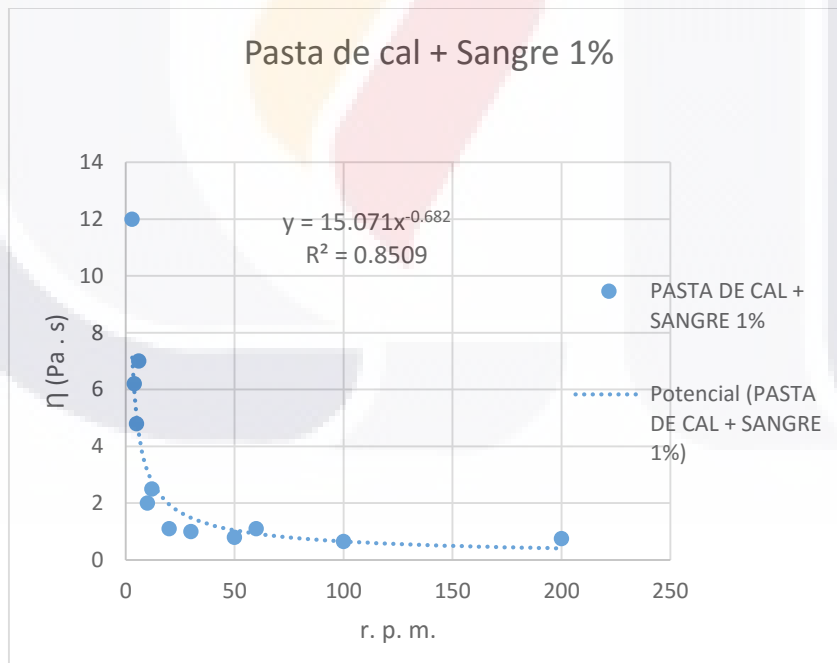
n = índice de flujo

Finalmente, para la comparación de los diferentes aditivos se procede a agrupar cada pasta de cal con las diferentes dosificaciones del mismo aditivo y se reflejan los modelos ajustados a las medidas.

**SANGRE**



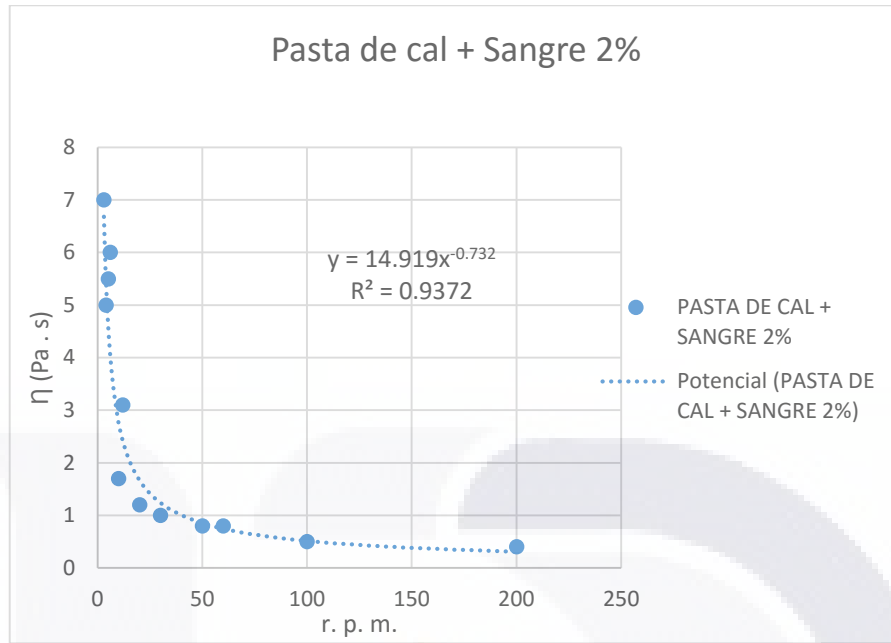
Gráfica 3. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal



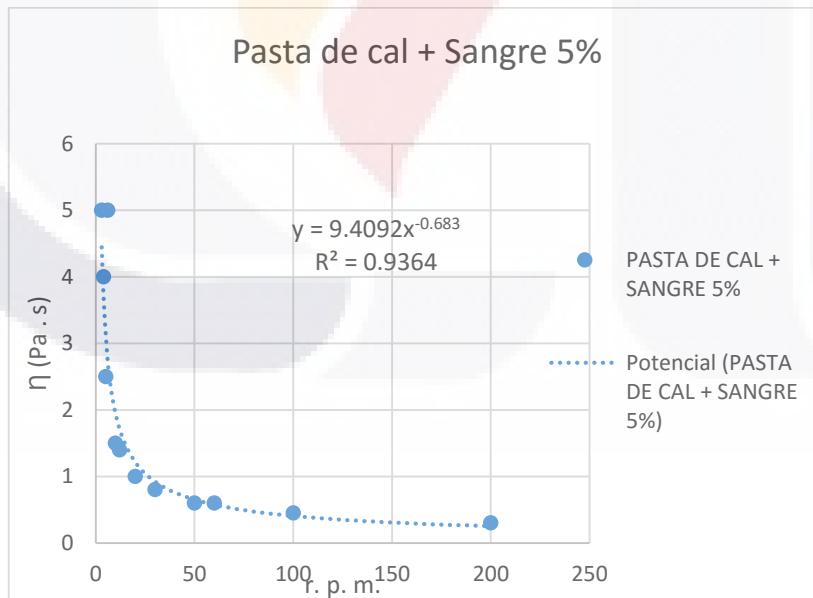
Gráfica 4. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 1%



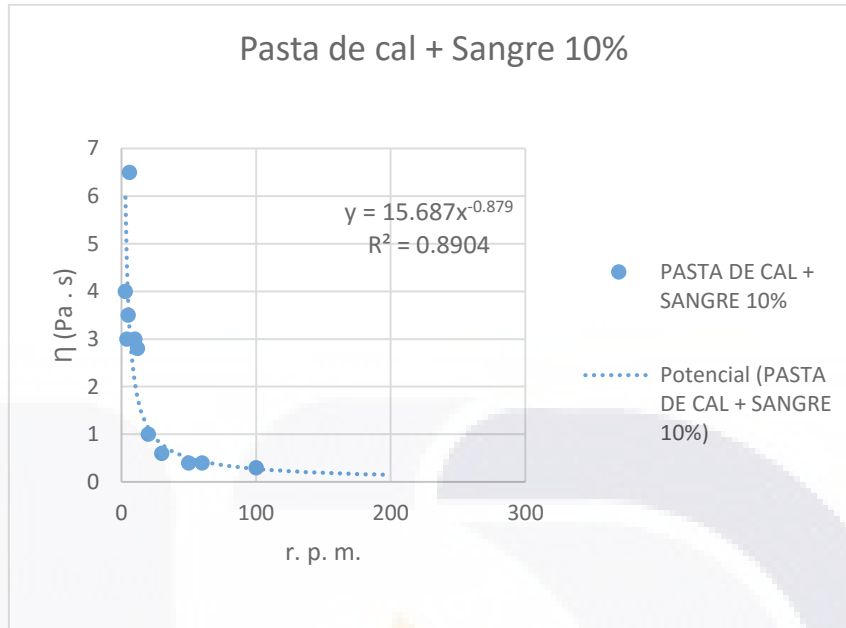
"Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos"



Gráfica 5. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 2%



Gráfica 6. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 5%

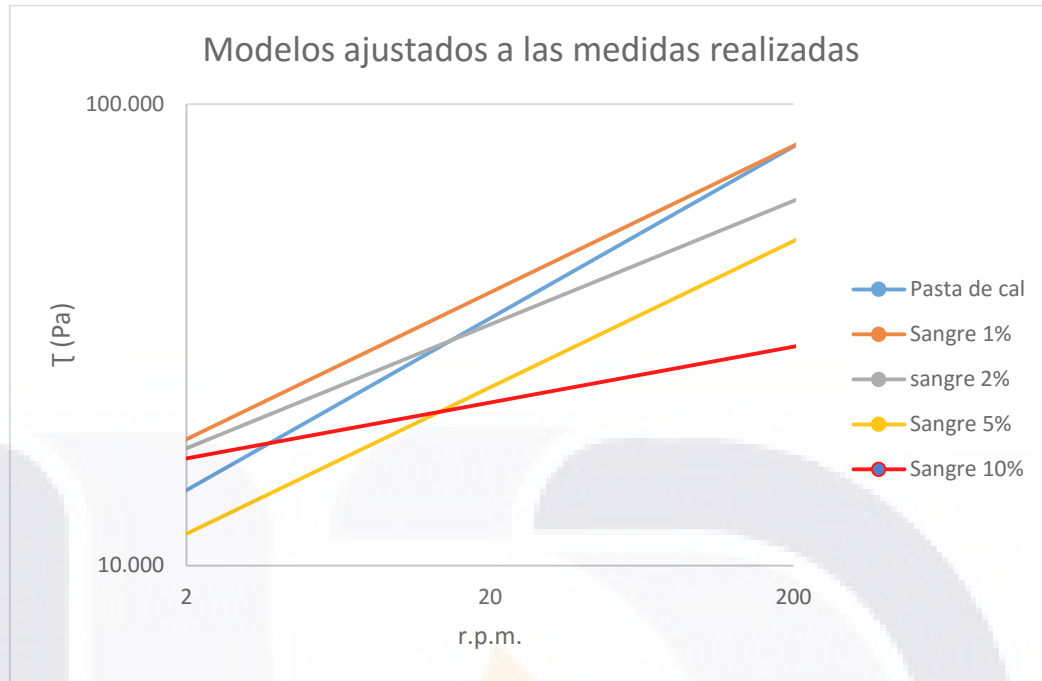


Gráfica 7. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + sangre 10%

La pasta de cal es un fluido no Newtoniano, es decir, su viscosidad depende de la deformación aplicada. En los gráficos anteriores se midieron estos comportamientos para cada una de las muestras ensayadas.

Inicialmente, a bajas velocidades se observa un comportamiento muy viscoso, mientras que a altas velocidades es más “líquido”.

El aditivo estudiado: Sangre bovina, altera este comportamiento haciendo la pasta más líquida.



Gráfica 8. Modelos exponenciales ajustados a las distintas dosificaciones de sangre analizadas con pasta de cal

% aditivo	k	N
0	11.26	0.372
1	15.07	0.318
2	14.92	0.268
5	9.41	0.317
10	15.69	0.121

Tabla 3. Valores del índice de consistencia (K) y del índice de flujo (n) de las medidas de viscosidad de una pasta de cal + sangre a diferentes dosificaciones

	$t = k \cdot g^N$				$n < 1$
g	0	1	2	5	10
0.1	4.781	7.246	8.049	4.535	11.875
250	87.816	87.228	65.526	54.167	30.604

Tabla 4. Valores correspondientes al esfuerzo cortante (t) para los modelos exponenciales ajustados a las distintas dosificaciones de sangre analizadas con pastas de cal

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

En estas gráficas se puede observar detenidamente que para velocidades de movimiento de herramienta (de artesano) altas, mayores contenidos de sangre fluidifican la pasta de cal.

Para contenidos de 1% de sangre, no influyen en la viscosidad del mismo, por lo que se puede observar que presenta un esfuerzo cortante similar al de la pasta de cal sin aditivar.

Para contenidos de 2%, se presenta un poco ya de fluidez representativo, y sin lugar a duda un 5% de sangre como aditivo, hace el cambio en la resistencia al corte, por lo que a mayores porcentajes de sangre se pueden utilizar como fluidificante de pastas de cal.

**MIEL**

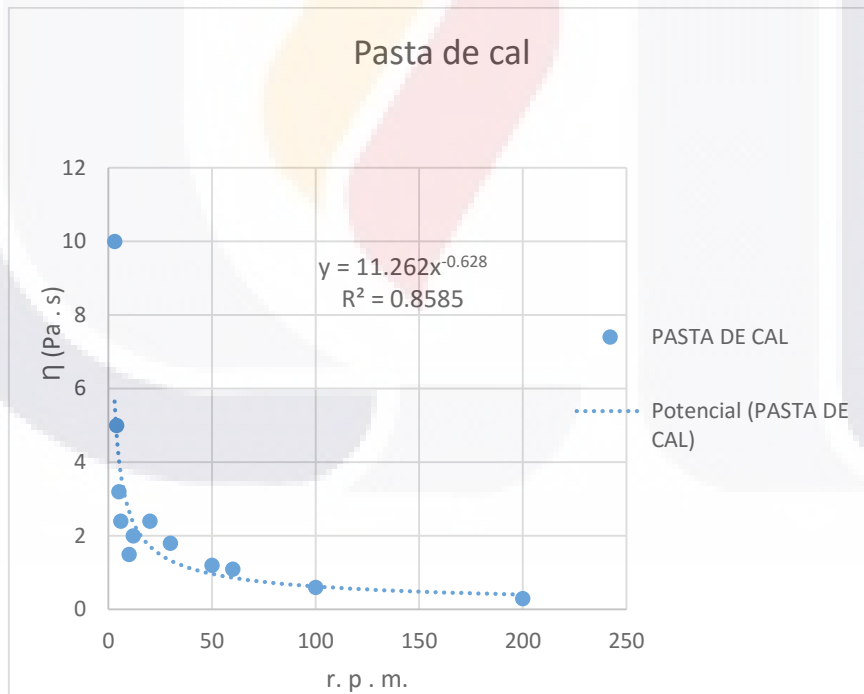


Tabla 5. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal

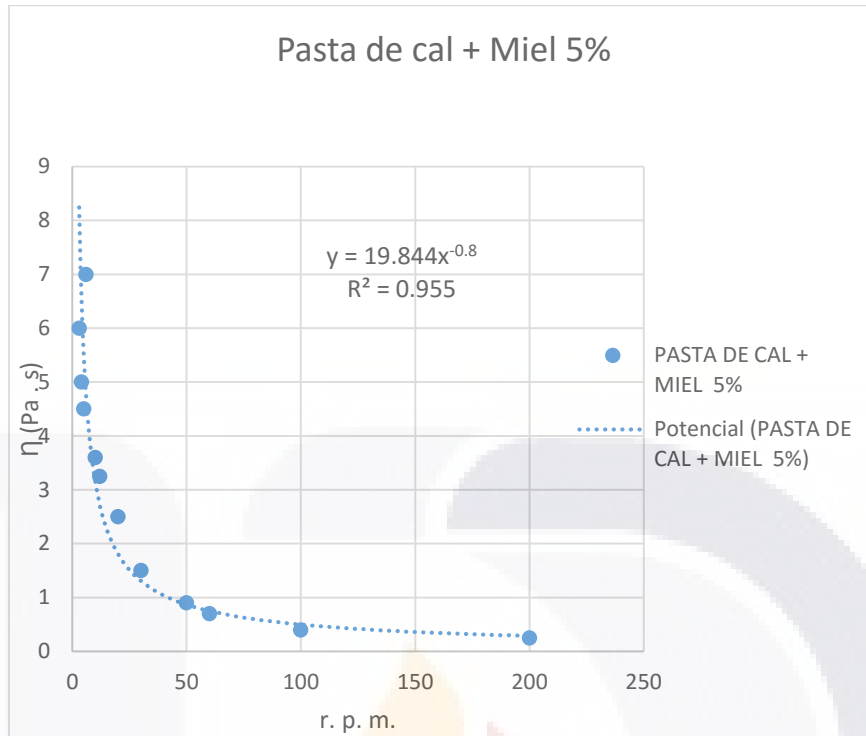
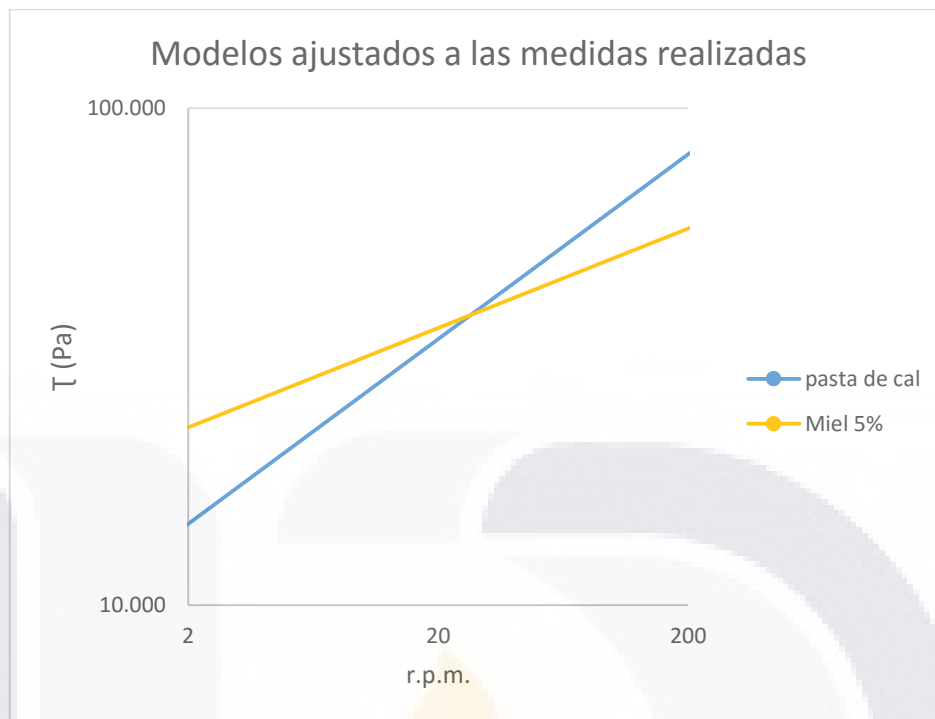


Tabla 6. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + miel 5%

La pasta de cal es un fluido no Newtoniano, es decir, su viscosidad depende de la deformación aplicada. En los gráficos anteriores se midieron estos comportamientos para cada una de las muestras ensayadas.

Inicialmente, a bajas velocidades la presencia de la miel presenta un comportamiento muy viscoso en comparación con la de la pasta de cal sin aditivar, mientras que a altas velocidades es más “líquido”.



Gráfica 9. Modelos exponenciales ajustados a la dosificación de miel 5% analizada con pasta de cal

% de aditivo	k	N
0	11.26	0.372
5	19.84	0.2

Tabla 7. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) de las medidas de viscosidad de una pasta de cal + miel 5%

g	t = k · g N	n < 1
	0	5
0.1	4.781	12.518
250	87.816	59.859

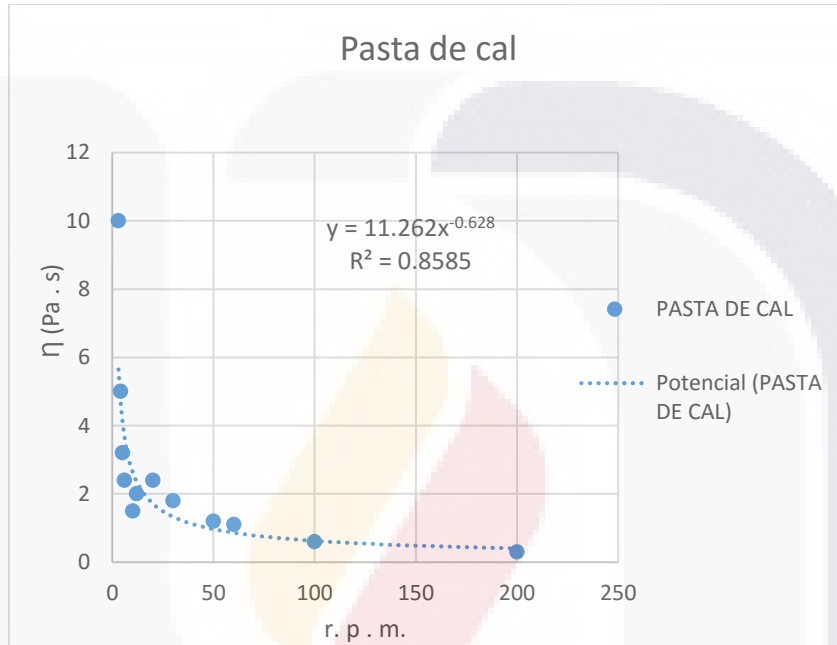
Tabla 8. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) para los modelos exponenciales ajustados a la dosificación de miel 5% analizada con pastas de cal

Podemos observar que la miel en porcentaje de 5% hace que la pasta de cal fluidifique en un punto considerable después de las 20 r.p.m.

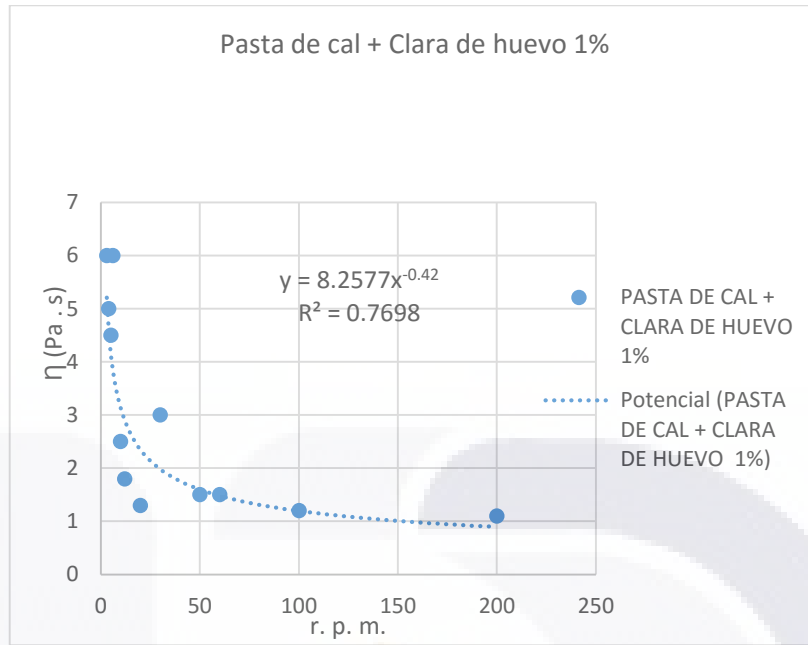
“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

Por lo que a mayores velocidades de amasado, la miel a la misma proporción cede a la resistencia al esfuerzo cortante y se vuelve fluidificante con respecto a la pasta de cal.

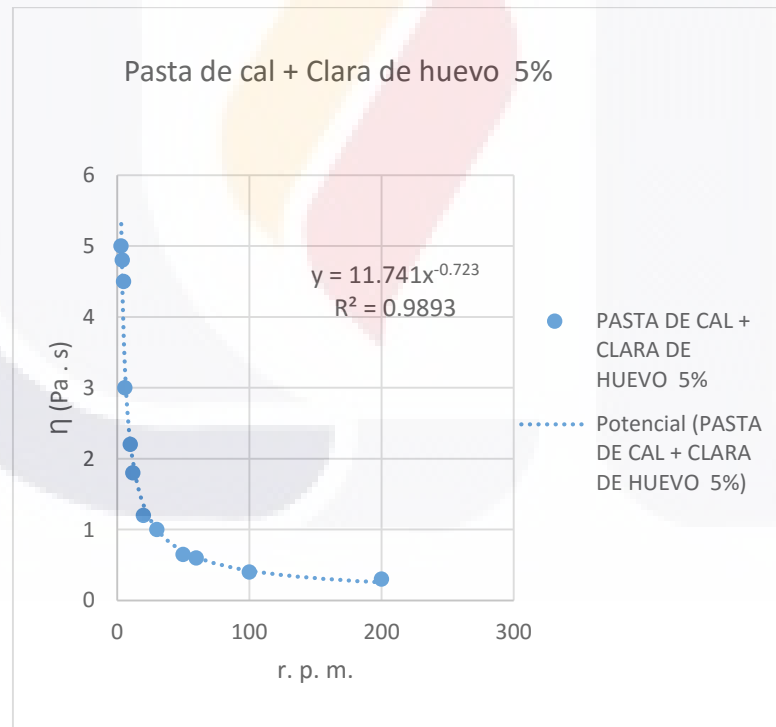
**CLARA DE HUEVO**



Gráfica 10. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal

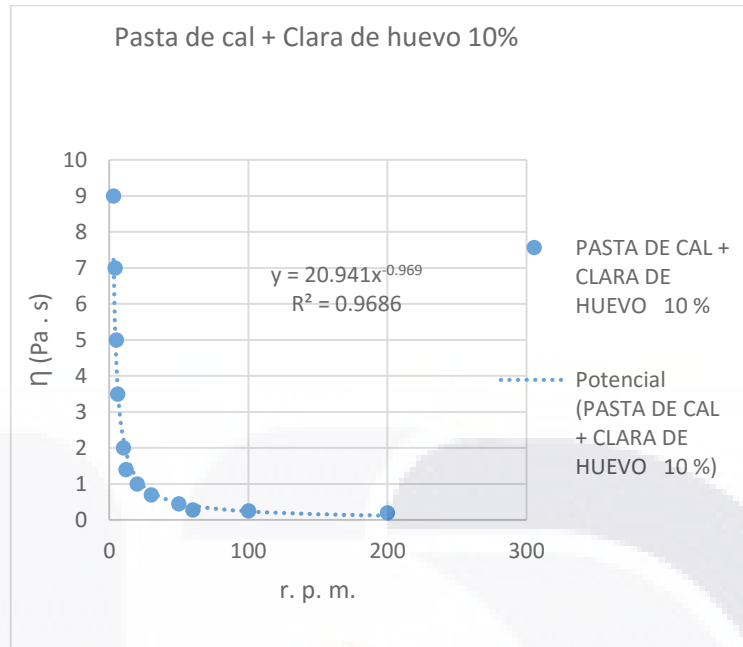


Gráfica 11. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + clara de huevo 1%



Gráfica 12. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + clara de huevo 5%

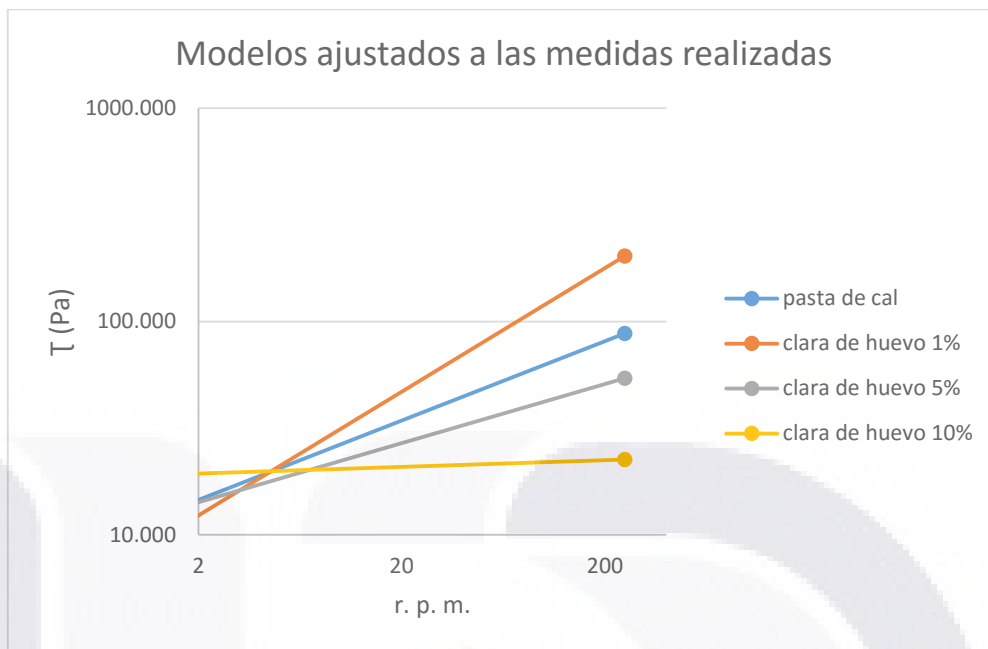




Gráfica 13. Gráfica correspondiente a las mediciones de viscosidad para distintas velocidades de ensayo con valores medios en 700 seg. Para una pasta de cal + clara de huevo 10%

La pasta de cal es un fluido no Newtoniano, es decir, su viscosidad depende de la deformación aplicada. En los gráficos anteriores se midieron estos comportamientos para cada una de las muestras ensayadas.

Inicialmente, a bajas velocidades la presencia de la clara de huevo presenta un comportamiento muy viscoso en comparación con la de la pasta de cal sin aditivar, mientras que a altas velocidades es más “líquido”.



Gráfica 14. Modelos exponenciales ajustados analizados a las dosificaciones de clara de huevo con pasta de cal

	<b>k</b>	<b>N</b>
<b>0</b>	11.26	0.372
<b>1</b>	8.2577	0.58
<b>5</b>	11.741	0.277
<b>10</b>	20.941	0.031

Tabla 9. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) de las medidas de viscosidad de una pasta de cal con diferentes dosificaciones de clara de huevo

<b>g</b>			<b>t = k · g N</b>	<b>n &lt; 1</b>
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>10</b>
<b>0.1</b>	4.781	2.172	6.204	17.665
<b>250</b>	87.816	203.079	54.192	22.514

Tabla 10. Valores del índice de consistencia (K) y del Índice de flujo (n) para los modelos exponenciales ajustados a las diferentes dosificaciones de clara de huevo analizadas con pastas de cal

Para contenidos de 5% de clara de huevo son ideales para un estado alto de fluidez en relación a la pasta de cal, pero en contenidos mayores de este aditivo y a

“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

mayores velocidades de amasado el efecto que genera es nulo, y esto se pudo observar en la prueba de fluidez, por lo que aquí se comprueba que la miel no se puede emplear a mayores cantidades si lo que se quiere usar como fluidificante. Para cantidades de 1% la clara de huevo, contrae la pasta de cal, por lo que a mayores velocidades se genera mayor esfuerzo cortante.



5.3 PRUEBAS PARA MORTEROS DE CAL EN ESTADO ENDURECIDO

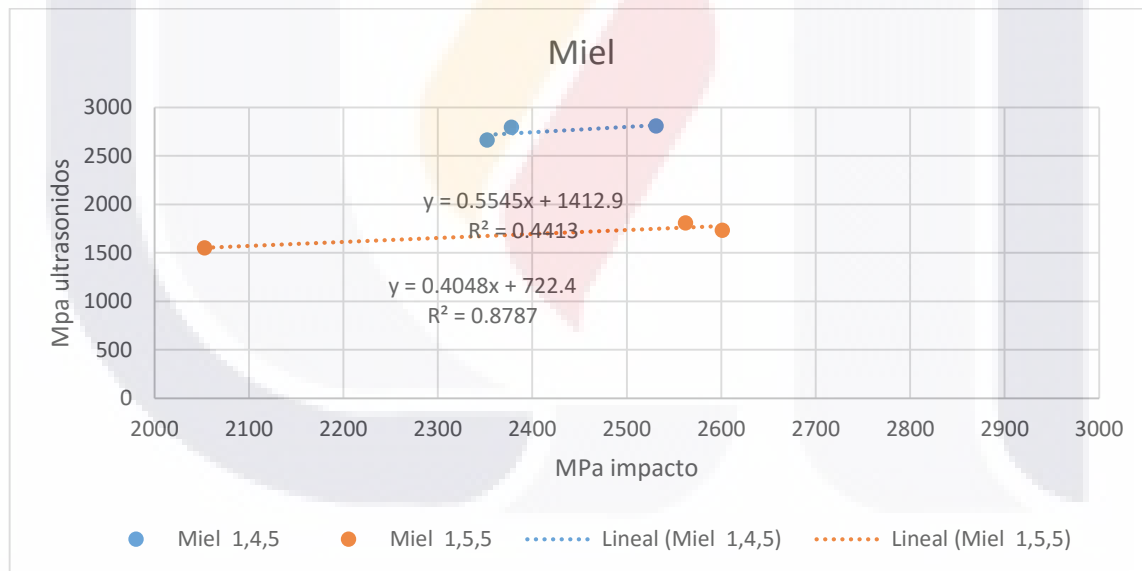
	Probeta	MOE Flex cara 1 (impacto) MPa	MOE long. (impacto) MPa	MOE (ultrasonidos) Mpa	Resistencia a la Flexión (Mpa)	Resistencia a la Compresión (Mpa)	Densidad Aparente (gr/cm3)	Densidad Relativa (gr/cm3)	Porosidad (%)
Pasta de Cal	A	2190	2318	1424	0.10	2.63	1.65	2.58	35.90
	B	1964	1934	1615	0.09	2.37			
	C	1709	2009	1047	0.07	2.63			
Miel 1,4,5	A	2334	2378	2796	0.12	4.09	1.69	2.67	36.60
	B	2586	2531	2807	0.12	4.02	1.67	2.63	36.60
	C	2466	2352	2662	0.11	3.87	1.68	2.65	36.60
Miel 1,5,5	A	1932	2053	1550	0.11	3.8	1.73	2.65	34.60
	B	2552	2562	1807	0.12	4.23	1.74	2.65	34.60
	C	2721	2601	1731	0.11	4.18	1.72	2.62	34.50
Clara de huevo 1,4,1	A	3376	2952	3618	0.15	1.95	1.61	2.64	39.00
	B	3469	3071	3768	0.14	2.07	1.62	2.40	32.80
	C	3310	2972	3771	0.16	3.14	1.62	2.64	38.60
Clara de huevo 1,4,5	A	2758	2846	3203	0.12	3.14	1.62	2.63	38.50
	B	3047	2780	3344	0.14	2.81	1.61	2.65	39.30
Clara de huevo 1,4,10	A	2963	2634	3005	0.14	2.25	1.56	2.63	40.70
	B	2893	2524	2956	0.12	2.63	1.56	2.65	41.00
	C	2696	2465	2898	0.13	2.82	1.56	2.64	40.80
Sangre 1,4,2	A	6139	805	762	0.04	1.71	1.51	2.57	41.30
	B	1545	1254	887	0.06	1.81	1.52	2.59	41.30
	C	1617	1358	1790	0.07	1.66	1.54	2.63	41.30
Sangre 1,4,5	A	2911	3226	3999	0.15	2.56	1.60	2.64	39.40
	B	3110	2735	3251	0.15	3.03	1.58	2.63	40.00
	C	3324	3002	3610	0.16	2.52	1.57	2.59	39.30
Sangre 1,4,10	A	2945	2755	3263	0.17	2.98	1.56	2.59	39.80
	B	3183	2953	3356	0.15	1.95	1.57	2.59	39.60
	C	2830	2636	3217	0.15	3.00	1.56	2.62	40.30

### 5.3.1 MOE LONG IMPACTO Y ULTRASONIDOS

El módulo de elasticidad es proporcional a la rigidez del material. El estudio del MOE, nos permitirá establecer la capacidad de deformación del material. Estudios señalan la importancia de una alta rigidez en los morteros para evitar fisuras.

En primer lugar, se compararon los resultados finales de MOE long. impacto y MOE ultrasonidos, para evaluar la correlación existente entre estos dos métodos y añadirlos a la base de datos del Laboratorio de Materiales de la EPSEB, de la Universidad Politécnica de Cataluña.

#### Comparativa MOE long impacto y ultrasonidos



Gráfica 15. Gráfica comparativa de resultados de los métodos Moe long impacto y MOE ultrasonidos de las probetas de pasta de cal + miel de las diferentes proporciones que se evaluaron.

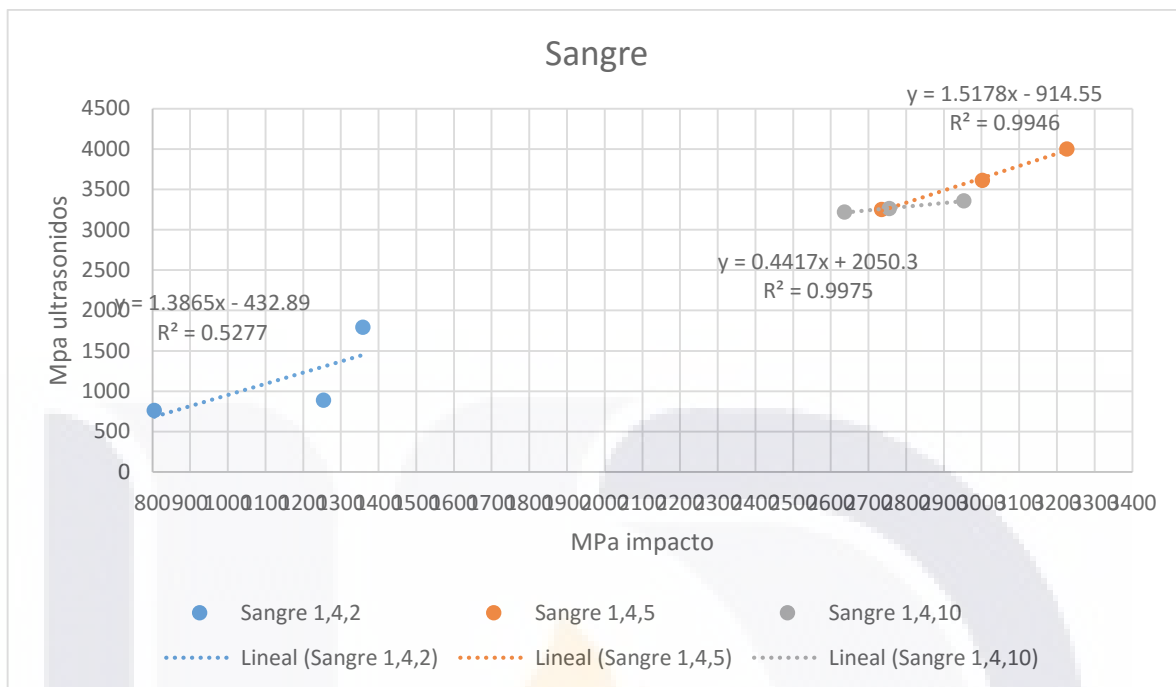
La fiabilidad de la confirmación del ensayo de MOE por impacto mediante el MOE por ultrasonido en dosificaciones de miel 1:4:5 en peso es baja. Mientras que en la

dosificaciones de miel 1:5:5 en peso existe una correlación más alta que la anterior, pero no muy significativa.



Gráfica 16. Gráfica comparativa de resultados de los métodos Moe long impacto y MOE ultrasonidos en probetas de pasta de cal + clara de huevo con las diferentes proporciones evaluadas.

En esta gráfica se puede observar claramente que en la proporción de clara de huevo 1:4:5 en peso, tiene una excelente correlación en comparación con las demás dosificaciones.

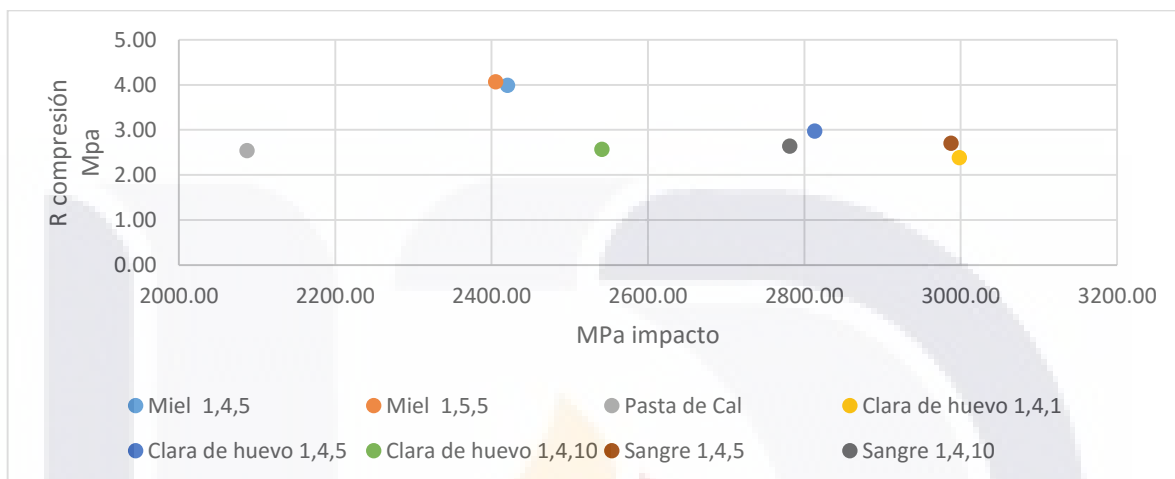


Gráfica 17. Gráfica comparativa de resultados de los métodos Moe long impacto y MOE ultrasonidos en probetas de pasta de cal + sangre con las diferentes proporciones evaluadas.

Sin embargo, en el caso de la sangre como aditivo orgánico, se observa que la correlación que existe entre esos dos métodos es alta en dosificaciones como sangre 1:4:5 y 1:4:10 en peso.

### 5.3.2 MOE IMPACTO CON RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

#### Comparativa de MOE impacto con Resistencia a compresión



Gráfica 18. Gráfica comparativa de MOE impacto con Resistencia a la compresión de todos los aditivos y las diferentes proporciones.

Al momento de realizar una comparativa para una caracterización físico-mecánica de las probetas, se sugirió realizarla entre los resultados del MOE de impacto contra la resistencia a la compresión para evaluar el nivel de rigidez de las probetas.

En esta gráfica se puede observar que la pasta de cal es menos resistente pero más flexible en comparación con los morteros que se les añadieron los aditivos, por lo que se concluye que el uso de estos aditivos cambia considerablemente las propiedades de una probeta de mortero de pasta de cal.

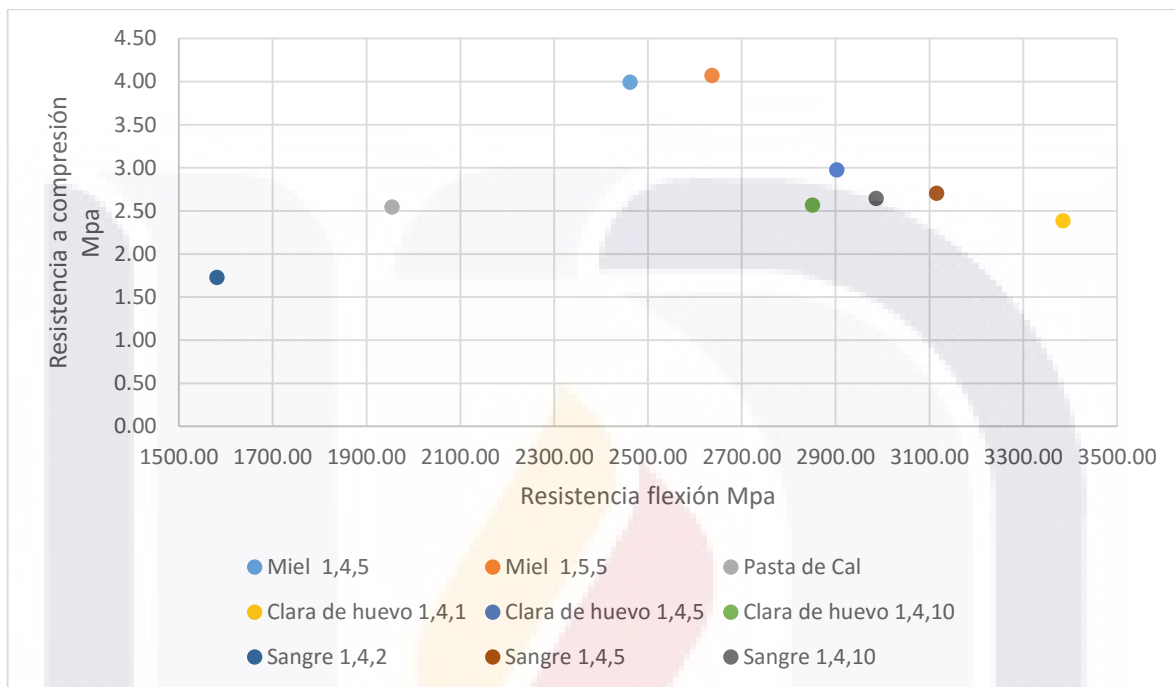
En un caso particular, el aditivo orgánico como la Miel, presenta mayor rigidez y mejor elasticidad que las restantes; la sangre y la clara de huevo nos proporcionaron valores de resistencia de menor y más rigidez.

La clara de huevo presenta una mayor variación en función de la dosificación.



### 5.3.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

#### Comparativa de Resistencia a compresión y resistencia a la flexión



Gráfica 19. Gráfica comparativa de resistencia a compresión y resistencia a la flexión de todos los aditivos y las distintas proporciones en peso evaluadas.

En la gráfica anterior, se observa que la miel sigue figurando en los niveles más altos en cuanto a la resistencia a la compresión y flexión que una pasta de cal sin aditivos.

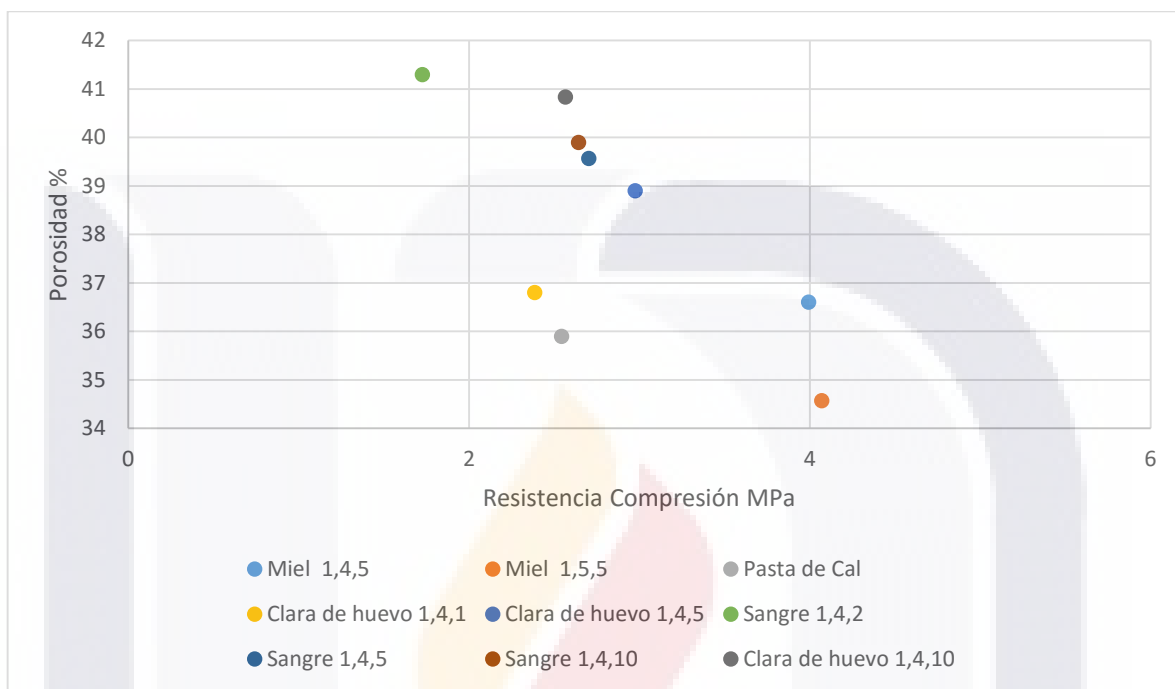
En la miel como aditivo, se puede observar que tiene una gran relación la resistencia a la flexión con la resistencia a la compresión, por lo que se puede pensar que la miel hace que tenga mayor cohesión en el mortero de cal y genere esta característica.

En el caso de la Clara de huevo, presenta que entre mayor sea la resistencia a la flexión, disminuye la resistencia a la compresión significativamente en relación a cantidades mayores con este aditivo.

La sangre presenta una resistencia a la compresión similar a la de una pasta de cal, pero mayor resistencia a la flexión que la misma.

### 5.3.4 RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y POROSIDAD

Comparativa de Resistencia a compresión y porosidad



Gráfica 20. Gráfica comparativa de la resistencia a compresión y la porosidad de todos los aditivos y dosificaciones evaluadas.

En la gráfica anterior, se puede observar que la pasta de cal presenta una resistencia a la compresión y porcentaje de porosidad medio; en el caso particular de la miel en proporción en peso 1:5:5, presentó una mayor resistencia a la compresión que los demás aditivos, esto es, que a mayor resistencia a la compresión, disminuye el porcentaje de porosidad de la probeta y en menor grado de resistencia a la compresión se puede observar que existe un alto nivel de porosidad, por lo que el uso de la miel como aditivo aumenta la resistencia de un mortero de cal disminuyendo la porosidad entre el mismo.

En el caso de la sangre, los valores que presentan son muy próximos a los de la miel en cuanto a porosidad, pero mayores en comparativa a la resistencia de compresión.

En dosificaciones en peso más altas de clara de huevo, aumenta el porcentaje de porosidad y la resistencia de compresión.

### 5.3.5 AVANCE AL FRENTE DE CARBONATACIÓN

Mortero Pasta de Cal 1:4 (Proporciones en pesos)







Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4		A2	1:4	
B1	1:4		B2	1:4	
C1	1:4		C2	1:4	

Ilustración 31. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal.

Se puede observar que para esta prueba del frente del índice de carbonatación se comprueba que las probetas están carbonatadas en un 100%, por lo que no presentan residuos o presencia de fenolftaleína.

Mortero Pasta de Cal + Miel 1:4:5 (Proporciones en pesos)







Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:5		A2	1:4:5	
B1	1:4:5		B2	1:4:5	
C1	1:4:5		C2	1:4:5	

Ilustración 32. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + miel 1:4:5.

La presencia de fenolftaleína crea un efecto rosa en la probeta si este tiene un  $\text{pH} > 8$  o es alcalino; en caso contrario, cuando se obtiene un  $\text{pH} < 8$  se ausenta este color de las probetas.

En el caso de la miel, es difícil obtener un resultado confiable sobre el índice de carbonatación de la probeta debido a que el  $\text{pH}$  de la miel es ácido, por lo que se tendrá que hacer un Tg a las probetas para comprobar su grado de carbonatación.

Pasta de Cal + Miel 1:5:5 (Proporciones en pesos)







Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:5:5		A2	1:5:5	
B1	1:5:5		B2	1:5:5	
C1	1:5:5		C2	1:5:5	

Ilustración 33. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + miel 1:5:5.

Lo mismo sucede con esta proporción 1:5:5 en peso, no se tiene un resultado contundente debido al pH de la miel sobre el índice de carbonatación con la aplicación de fenolftaleína.

Se hace la misma recomendación de realizar un Tg para la comprobación del mismo.

Pasta de Cal + Sangre 1:4:2 (Proporciones en pesos)


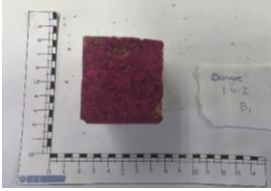




Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:2		A2	1:4:2	
B1	1:4:2		B2	1:4:2	
C1	1:4:2		C2	1:4:2	

Ilustración 34. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + sangre 1:4:2.

En cantidades menores de sangre como aditivo, se presenta un índice de carbonatación nulo, por lo que la sangre hace que se forme una impermeabilidad al dióxido de carbono y evita la carbonatación de la misma.

Pasta de Cal + Sangre 1:4:5 (Proporciones en pesos)

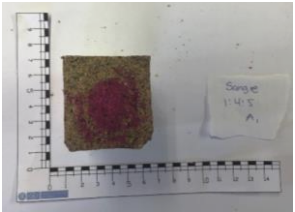





Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:5		A2	1:4:5	
B1	1:4:5		B2	1:4:5	
C1	1:4:5		C2	1:4:5	

Ilustración 35. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + sangre 1:4:5.

En cantidades mayores de sangre, se presenta un índice de carbonatación medio, ya se alcanza a carbonatar los extremos de las probetas y la permeabilidad que se presenta es un poco débil en comparación a la presencia de cantidades menores de sangre como aditivo.

Pasta de Cal + Sangre 1:4:10 (Proporciones en pesos)

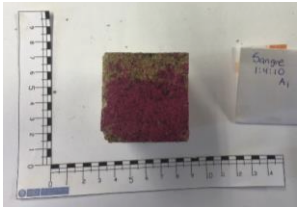


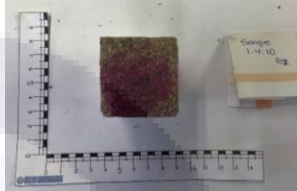


Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:10		A2	1:4:10	
B1	1:4:10		B2	1:4:10	
C1	1:4:10		C2	1:4:10	

Ilustración 36. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + sangre 1:4:10.

En cantidades mayores de sangre como aditivo, se presenta un efecto similar de poca permeabilidad en las probetas, por lo que se concluye que la sangre actúa como agente impermeable e impide el paso del dióxido de carbono, lo cual evita la madurez de la cal.



Pasta de Cal + Clara de huevo 1:4:1 (Proporciones en pesos)

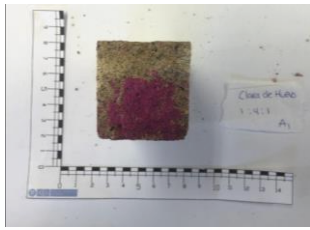
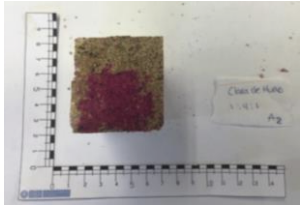




Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:1		A2	1:4:1	
B1	1:4:1		B2	1:4:1	
C1	1:4:1		C2	1:4:1	

Ilustración 37. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + clara de huevo 1:4:1.

En el caso de la clara de huevo, presenta un poco de impermeabilidad en cantidades menores de este aditivo lo cual es un resultado pero significativo sobre el índice de carbonatación que presentan estas probetas en comparación a una probeta sin aditivar.

Pasta de Cal + Clara de huevo 1:4:5 (Proporciones en pesos)


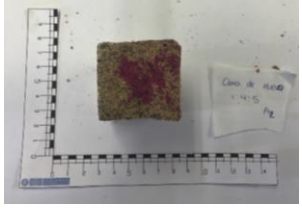

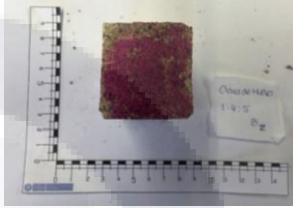
Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:5		A2	1:4:5	
B1	1:4:5		B2	1:4:5	

Ilustración 38. Probetas en presencia de feniltaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + clara de huevo 1:4:5.

En cantidades medias, incrementa el grado de ausencia de carbonatación, por lo que la clara de huevo actúa como agente impermeable al dióxido de carbono, sobre todo en áreas internas de la probeta.

Pasta de Cal + Clara de huevo 1:4:10 (Proporciones en pesos)




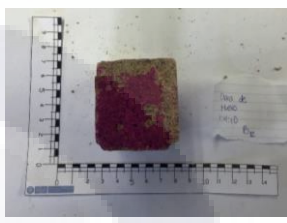


Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación	Probeta	Dosificación	Índice de carbonatación
A1	1:4:10		A2	1:4:10	
B1	1:4:10		B2	1:4:10	
C1	1:4:10		C2	1:4:10	

Ilustración 39. Probetas en presencia de fenolftaleína para la valoración del frente de carbonatación en morteros de pasta de cal + clara de huevo 1:4:10.

En estas imágenes se observa que existe una relación con la cantidad de clara de huevo y el grado de carbonatación; esto es, entre mayor sea la cantidad de este aditivo, menor es la cantidad de partículas carbonatadas de la probeta.

Formando una impermeabilidad al paso del dióxido de carbono en presencia de una cantidad mayor de clara de huevo.



## VI. CONCLUSIONES



## 7. CONCLUSIONES

### 7.1 CONCLUSIÓN GENERAL

Seguidamente se exponen las principales conclusiones alcanzadas en relación a las características en estado fresco y endurecido presentadas en la pasta de cal con la adición de aditivos orgánicos evaluados en esta investigación.

Los aditivos utilizados en esta investigación: miel, sangre bovina y clara de huevo, resultaron en su mayoría fluidificantes, presentando incrementos en las viscosidades en los morteros de pasta de cal.

Actualmente el uso de la cal en la arquitectura se limita, casi exclusivamente, a las obras de restauración y rehabilitación. En este tipo de obras intervienen profesionales artesanos que valoran especialmente la trabajabilidad de la cal en estado fresco, y que consideran que una cal en pasta envejecida tradicionalmente ofrece mejores prestaciones que una cal en pasta coetánea o que una cal en polvo. Esta mejor trabajabilidad se traduce en mayor viscosidad, la cual está íntimamente ligada a como son las partículas que componen la dispersión de la pasta.

### 7.2 CONCLUSIONES PARTICULARES

- o El uso de aditivos orgánicos ha sido utilizado desde la antigüedad, pero sin alguna certeza de la finalidad con la que se realizaban, por lo que esta investigación aporta información característica de los mismos. El funcionamiento tradicional de los distintos aditivos orgánicos utilizados en la historia ha sido principalmente por costumbres o elementos de fácil obtención, por lo que gracias a esto se han ido encontrando morteros testigos a base de algunos aditivos utilizados a lo largo de la historia la presencia de estos.

- o En esta investigación se logró realizar un análisis y una comparativa de las propiedades físico-mecánicas en estado fresco (fluidez, viscosidad) como en estado endurecido (Moe, resistencia a la flexión, resistencia a la compresión, densidad aparente y relativa, avance al índice de carbonatación); de morteros de cal hidratada dosificados aditivos orgánicos; contra mortero de cal hidratada sin aditiviar.
- o En el caso de la adición de la miel, se presentó la característica de incremento en la resistencia a la compresión, siguiéndole la sangre y por último la clara de huevo en mayor medida. La presencia de estos elementos orgánicos cambia considerablemente las propiedades físicas y mecánicas que pueda presentar un mortero de cal sin aditiviar; claro está que puede variar según el tipo de pasta de cal y el árido que se utilicen.

El poco uso actual de la cal ha representado la falta de interés de técnicas y proyectos de mejora para la rehabilitación del patrimonio edificado, por lo que investigaciones de este tipo servirán para darle auge e impacto al empleo de la reconstrucción antigua.

Lo expuesto en el presente documento es un parteaguas para ingenieros, arquitectos o restauradores para futuras investigaciones sobre el tema de materiales de restauración del patrimonio edificado; el conocimiento de las propiedades físico-mecánicas que se presentan con la adición de estos aditivos orgánicos deja abierto el campo del empleo de materiales tradicionales con los actuales o la innovación de algunos nuevos.

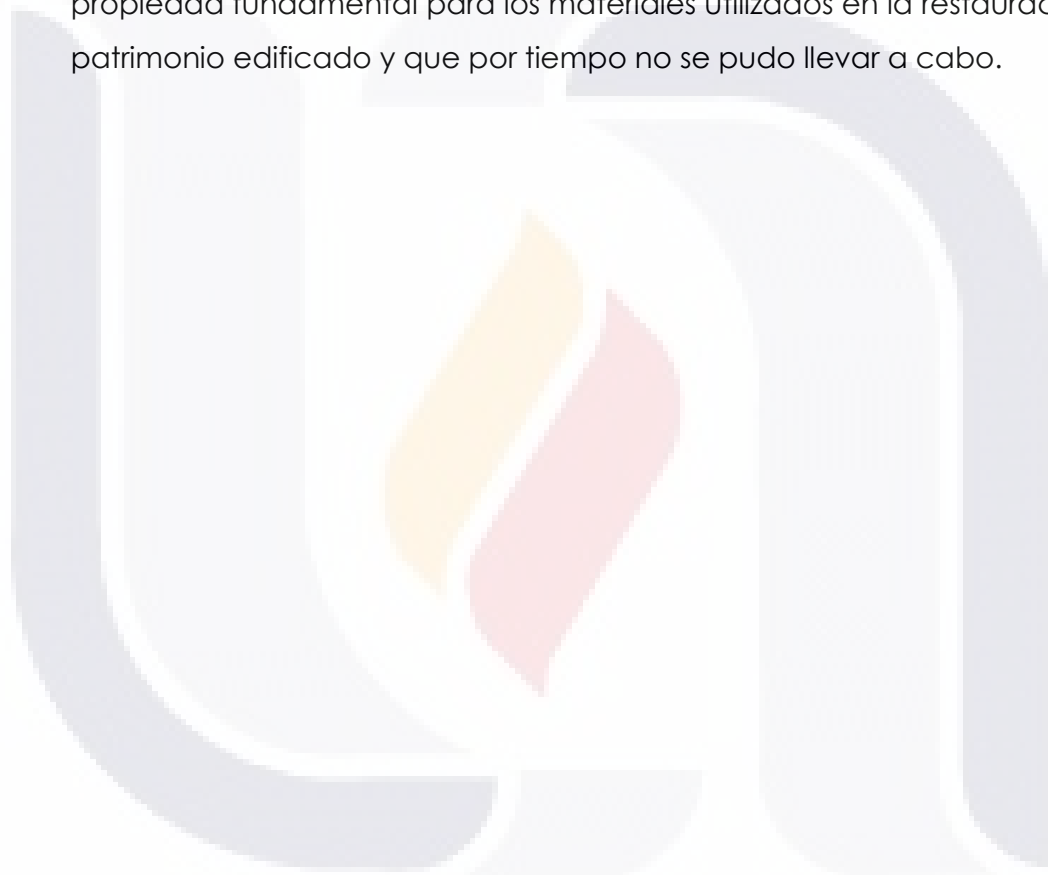
### **7.3 NICHOS DE INVESTIGACIÓN**

Un párrafo que diga entre los nichos de investigación que se detectaron en este proyecto se encuentran las siguientes:

- o La realización de otra campaña experimental utilizando otro árido con una granulometría diferente así como otro tipo de pasta de cal a diferente

concentración para así contrastar las diferencias en las propiedades físico-mecánicas que se puedan presentar.

- o La valoración mediante un análisis termogravimétrico de cada una de las probetas para identificar los elementos conformados de cada una de ellas después de un determinado periodo de añejamiento.
- o La realización de pruebas de adherencias a los morteros de cal hidratados dosificados con los mismos aditivos orgánicos, debido a que es una propiedad fundamental para los materiales utilizados en la restauración del patrimonio edificado y que por tiempo no se pudo llevar a cabo.





## VII. GLOSARIO





## 8. GLOSARIO

**Mortero.** Mezcla de diversos materiales, como cal o cemento, arena y agua, que se usa en la construcción para fijar ladrillos y cubrir paredes.

**Cal.** Es un término que designa todas las formas físicas en las que puede aparecer el óxido de calcio.

**Aditivo.** Agregados que modifican las características del hormigón.

**Viscosidad.** Es una característica de los fluidos en movimiento, que muestra una tendencia de oposición hacia su flujo ante la aplicación de una fuerza. Cuanta más resistencia oponen los líquidos a fluir, más viscosidad poseen.

**Eflorescencias.** Comúnmente se distinguen dos tipos de eflorescencias:

- Eflorescencia Primaria: Se forma debido a la humedad de la obra recién terminada. Comúnmente este tipo de eflorescencia es inevitable, pero desaparece en pocos meses.
- Eflorescencia Secundaria: Aparecen en obras de más de un año de antigüedad debido a condiciones desfavorables propias de la estructura o del medio (alta porosidad, elevada humedad permanente, defectos constructivos, etc.). Son evitables. Los morteros y sus agregados son la principal fuente de sales y causa de la aparición de la mayoría de las eflorescencias.

**Criptoflorescencias.** Depósitos interiores en los poros del material, que al aumentar de volumen crean fuertes tensiones que hacen que el poro se abra. Las piezas que lo sufren presentan desconchados importantes o se desprenden con facilidad capas del ladrillo de unos milímetros. Suelen darse en zonas húmedas y/o marítimas.

**Álcalis.** Los álcalis son óxidos, hidróxidos y carbonatos de los metales alcalinos. Actúan como bases fuertes y son muy hidrosolubles.

**Ductilidad.** Es una propiedad que presentan algunos materiales, como las aleaciones metálicas o materiales asfálticos, los cuales bajo la acción de una fuerza, pueden deformarse plásticamente de manera sostenible sin romperse, permitiendo obtener alambres o hilos de dicho material.

**Bomba de vacío.** Máquina que se usa para extraer, elevar o impulsar líquidos y gases de un lugar a otro.

**Correlación.** Correspondencia o relación recíproca entre dos o más acciones o fenómenos.

**Rigidez.** Capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre su superficie.

**Fenofaleina.** Es un indicador de pH que en disoluciones ácidas permanece incoloro, pero en disoluciones básicas toma un color rosado con un punto de viraje entre pH=8,2 (incoloro) y pH=10 (magenta o rosado).

**Ph.** Coeficiente que indica el grado de acidez o basicidad de una solución acuosa.

**Gel de sílice.** Es una forma granular y porosa de dióxido de silicio fabricado sintéticamente a partir de silicato sódico. A pesar del nombre, el gel de sílice es sólido. Se suele encontrar comúnmente en forma de pequeñas esferas envasadas en bolsas transpirables. En esta forma, se usa como agente desecante para controlar la humedad local y evitar el deterioro de ciertos bienes.



## VIII. BIBLIOGRAFÍA



## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Amigó, J. R. (2013). *Aportaciones al conocimiento del comportamiento deformacional de pastas de cal: tamaño y formas de las partículas y su viscosidad*. Barcelona, España.
- Arizzi, A. (2012). *Design or ready to use rendering mortars for use in restoration work*. Granada, España.
- Cebrián, J. J. (2013). *Pastas, morteros, adhesivos y hormigones*. IC Editorial.
- Granada, U. d. (s.f.). *Universidad de Granada*. Obtenido de <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/TEMA04.htm>
- Iciar Asrasarán, J. Alfredo Martínez. (2000). *Alimentos, composición y propiedades*. Mc Graw Hill.
- José Ignacio Álvarez Galindo, Antonio Martín Pérez, Pedro J. García Casado. (s.f.). *Historia de los Morteros*. Pamplona, España.
- Malinowski, R. R. (1981). Ancient Mortars and concretes Durability Aspects. *Symposium of Mortars, cements and grouts used in the conservation of Historic Building*.
- Matteini, M., & Moles, A. (2001). *Ciencia y Restauración. Método de Investigación*. Sevilla, España: Editorial Nerea S.A.
- Rosell, J., & Cantalapiedra, I. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39-48.
- Sánchez, F. J. (2002). *"Historia, caracterización y restauración de morteros"*. Sevilla: Universidad de Sevilla. Secretariado de Publicaciones Instituto Universitario de Ciencias de la Construcción.
- Sickels, L. (1981). Organics vs. synthetics: their use as additives in mortars. *Mortars, cements and grouts used in the Conservation of Historic Buildings. ICCROM Symposium*, (págs. 25-52).
- UNE-EN 1015-11 AENOR. (2000-2007). *Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido*.
- UNE-EN 14146 AENOR. (2004). *Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación del módulo de elasticidad dinámico (con la medida de la frecuencia de resonancia fundamental)*.
- UNE-EN ISO 12680-1 AENOR. (2007). *Métodos de ensayo para productos refractarios. Parte 1: Determinación del módulo de Young dinámico (MOE) por excitación de la vibración por impulso*.
- UNE 7088:1955, Compactness determination in the arids for mortars and concretes, 1955-01-15
- UNE-EN 1015-2:1999/A1:2007, Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars, 2007-10-31
- UNE-EN 1015-3:2000, Methods of test for mortar for masonry. Part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 2000-09-27
- UNE-EN 1015-3:2000, Methods of test for mortar for masonry. Part 3: determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 2000-09-27

UNE-EN 1015-11:2000/A1:2007, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. 2007-10-31

UNE-EN 1015-6:1999/A1:2007, Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar, 2007-10-31

UNE-EN ISO 12680-1:2007, Methods of test for refractory products - Part 1: Determination of dynamic Young's modulus (MOE) by impulse excitation of vibration (ISO 12680-1:2005), 2007-09-12

UNE-EN 1936:2007, Natural stone test methods - Determination of real density and apparent density, and of total and open porosity, 2007-03-21

UNE-EN 933-1:2012, Tests for geometrical properties of aggregates - Part 1: Determination of particle size distribution - Sieving method, 2012-07-11

UNE-EN 459-1:2011, Building lime - Part 1: Definitions, specifications and conformity criteria, 2011-09-21

Revista de la Construcción Volúmen 7 No.2 – 2008

Martínez, W. - Alonso, E. M. - Rubio, J. C - Bedolla, J. A. -Velasco F. A. - Torres, A. A.

Historia de los Morteros, Materiales y Técnicas,

José Ignacio Álvarez Galindo, Antonio Martín Pérez, y Pedro J. García, Casado. Departamento de Química y Edafología, Facultad de Ciencias. Universidad de Navarra

Las bondades del Nopal,

Andrés A. Torres Acosta, Prisciliano Felipe de J. Cano Barrita, publicación del Instituto Universitario de Restauración del Patrimonio de la UPV - núms. 6 y 7 - 2011 y 2012

Aditivos orgánicos en morteros de cal apagada en la edificación histórica J. A. Bedolla Arroyo<sup>1</sup>, E. M. Alonso Guzmán<sup>1,2</sup>, W. Martínez Molina<sup>2</sup>, J. C. Rubio Avalos<sup>2</sup>, F. A. Velasco Ávalos<sup>2</sup>, L. F. Guerrero Baca<sup>1,3</sup>, J. Mendoza Jiménez<sup>4</sup> y S. Le Borgne Le Gall<sup>5</sup> 1.PIDA, Fac. Arq., UMSNH, 2.CA-UMSNH 147, Depto. Materiales, Fac. Ing. Civil, UMSNH, 3.UAM-Xochimilco, 4.PIDA, Universidad de Colima, 5.UAM-Cuajimalpa



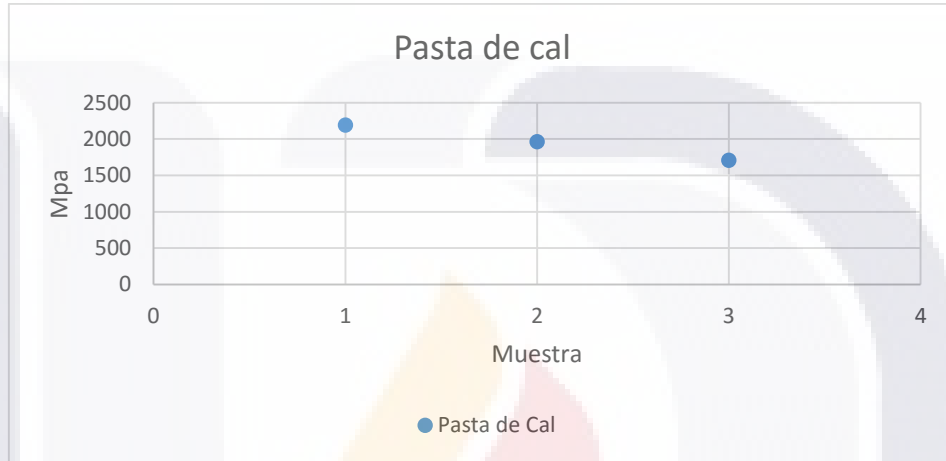
## IX. ANEXOS



## ANEXO A

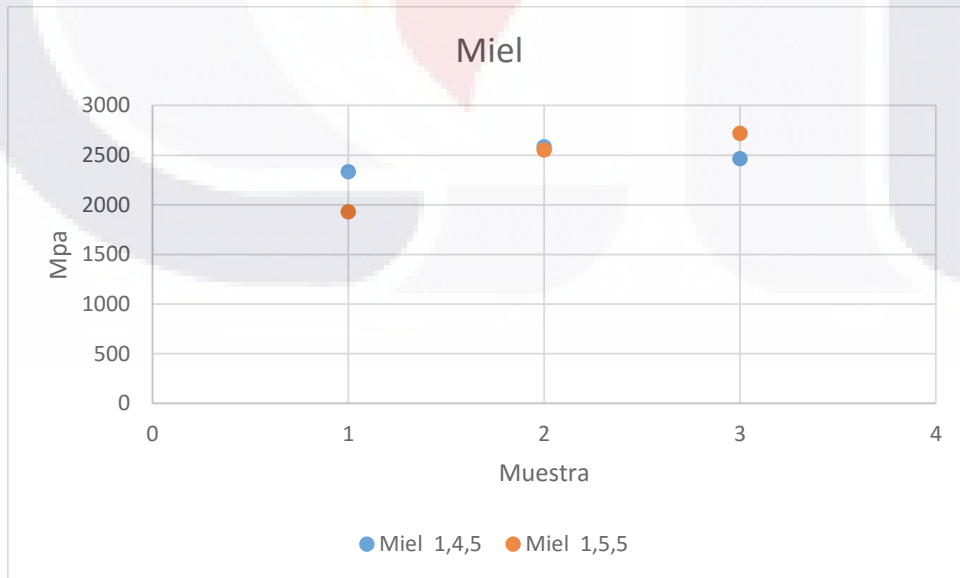
### MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO

MOE Flex cara 1 (impacto) MPa Pasta de cal



Gráfica 21. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal (Flex cara 1)

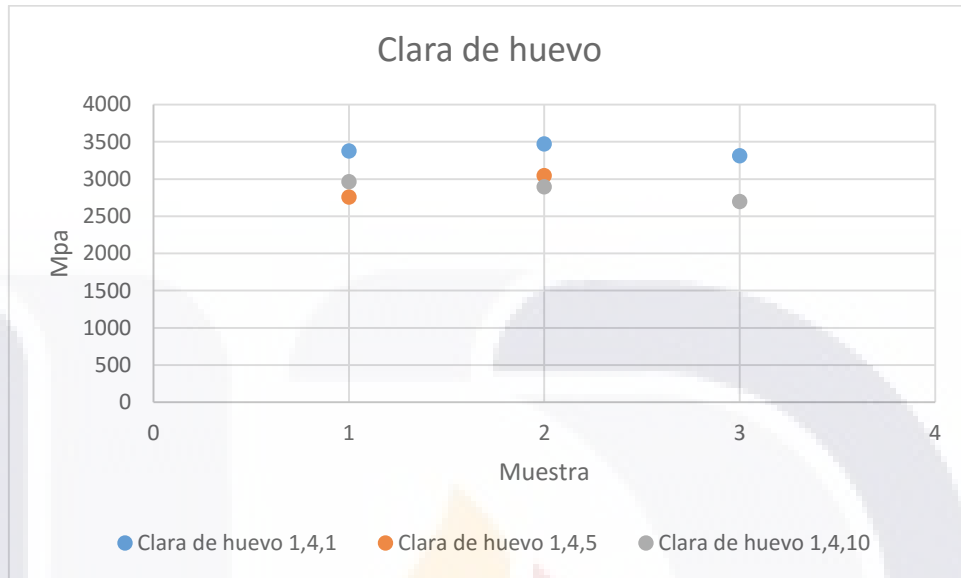
MOE Flex cara 1 (impacto) MPa Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



Gráfica 22. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + miel a diferentes proporciones propuestas (Flex cara 1)

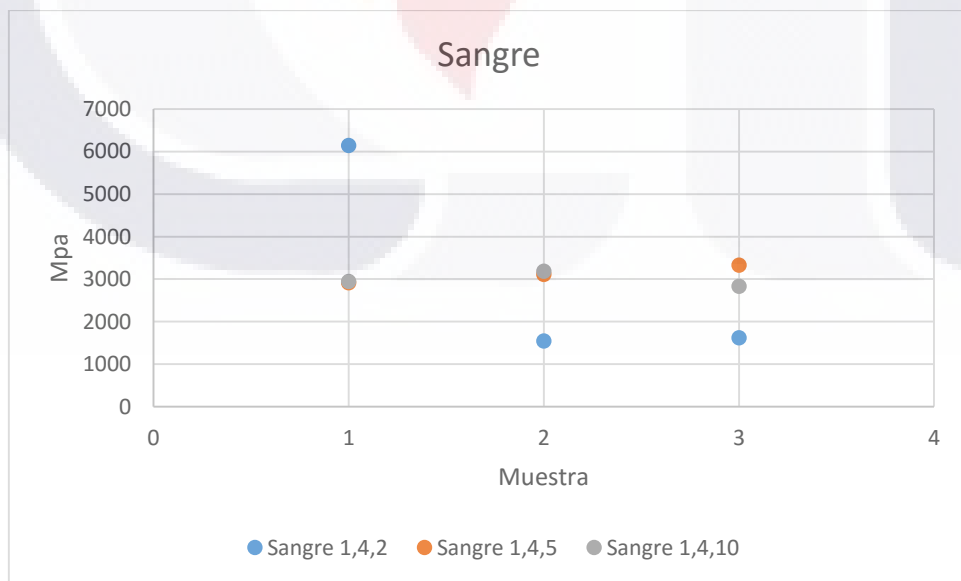
“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

MOE Flex cara 1 (impacto) MPa Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



Gráfica 23. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + clara de huevo a diferentes proporciones propuestas (Flex cara 1)

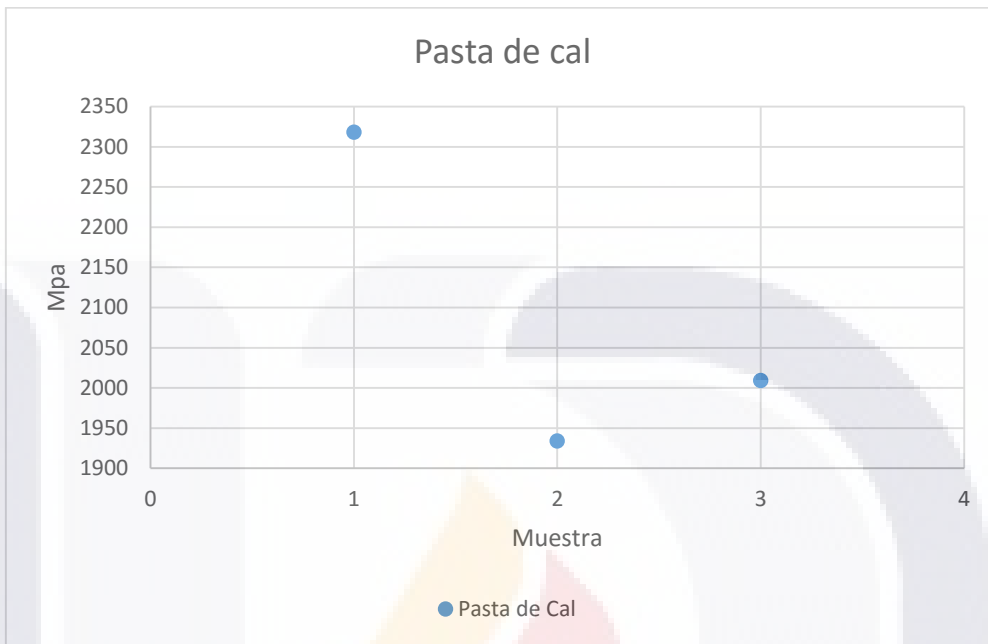
MOE Flex cara 1 (impacto) MPa Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



Gráfica 24. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + sangre a diferentes proporciones propuestas (Flex cara 1)

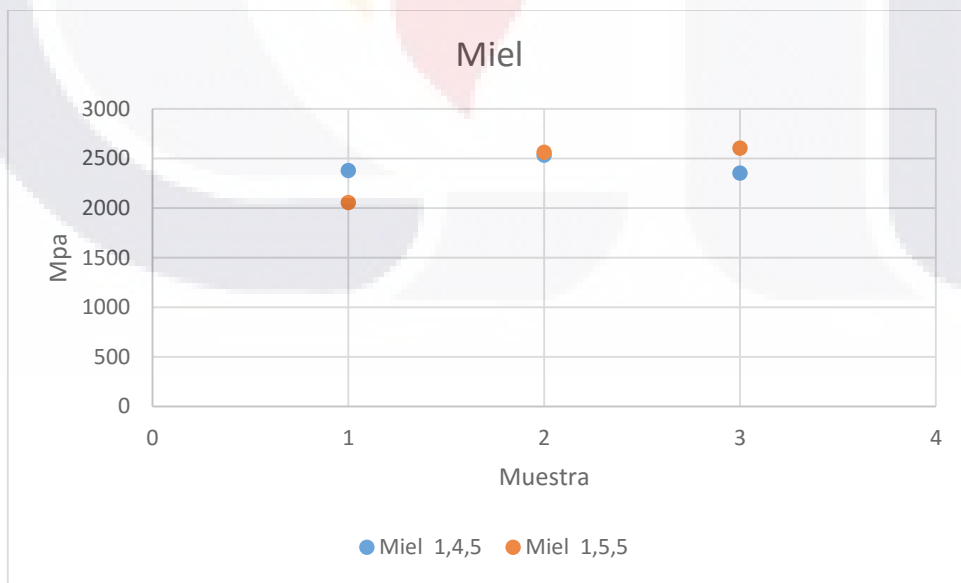


MOE long. (impacto) Mpa Pasta de Cal



Gráfica 25. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + sangre (Long.)

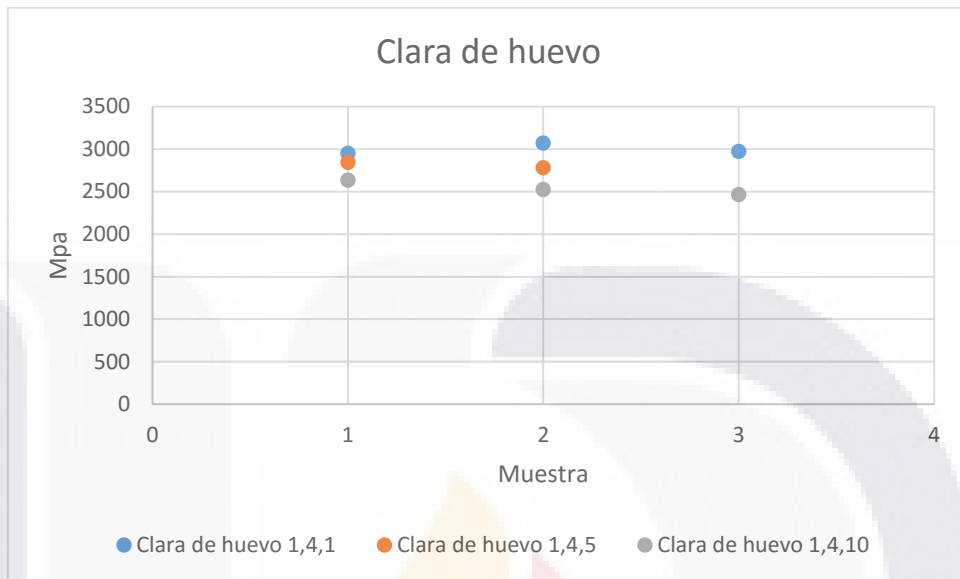
MOE long. (impacto) Mpa Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



Gráfica 26. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + miel a diferentes proporciones propuestas (Long.)

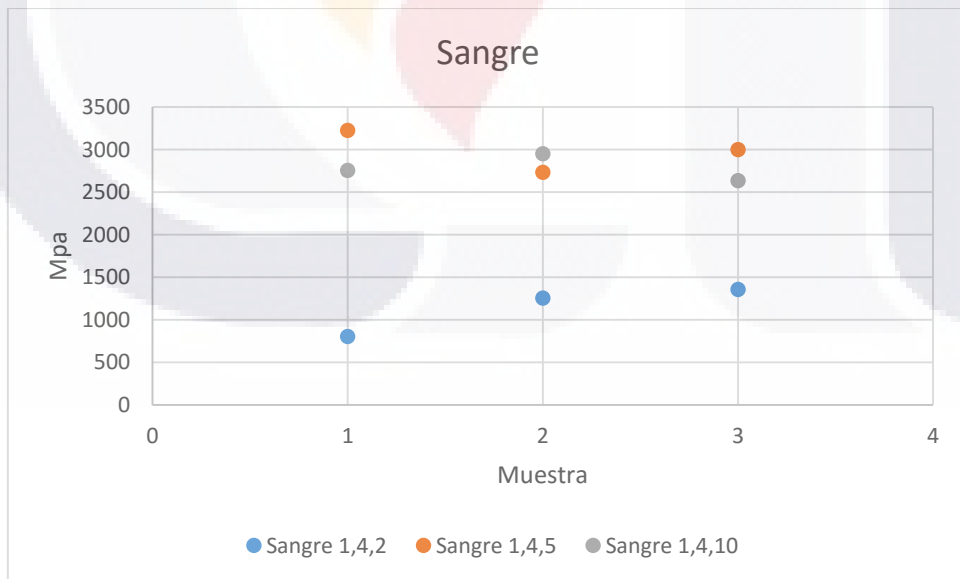
“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

MOE long. (impacto) Mpa Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



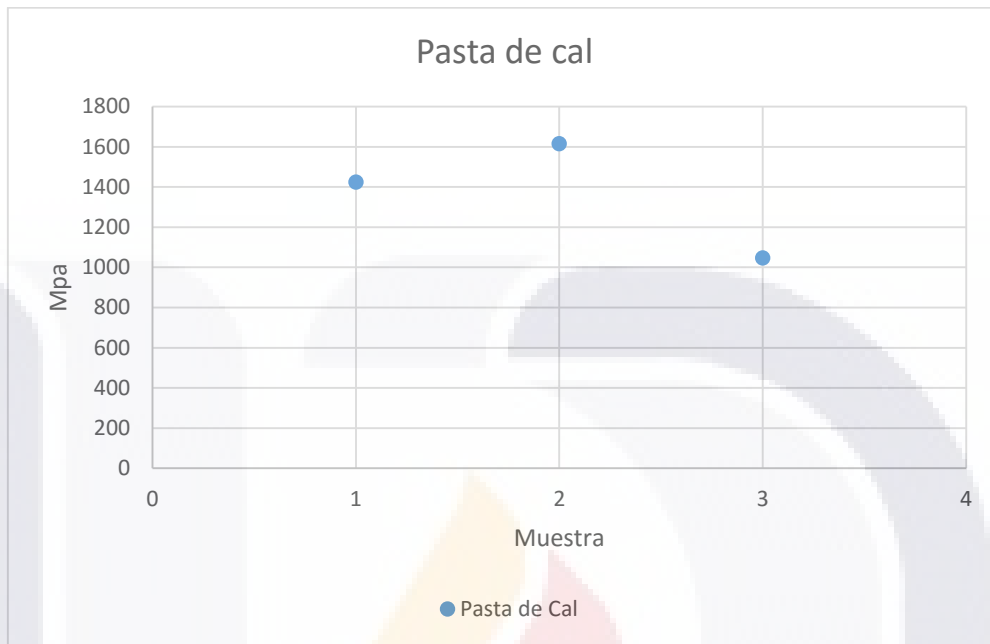
Gráfica 27. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + clara de huevo a diferentes proporciones propuestas (Long.)

MOE long. (impacto) Mpa Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



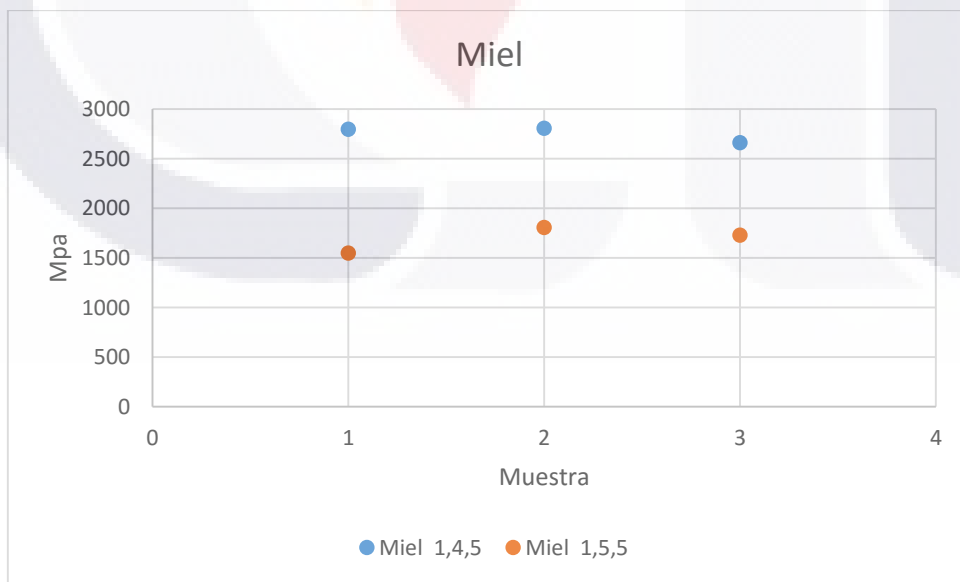
Gráfica 28. Gráfica comparativa de resultados del MOE en probetas de pastas de cal + sangre a diferentes proporciones propuestas (Long.)

MOE ultrasonidos Mpa Pasta de Cal



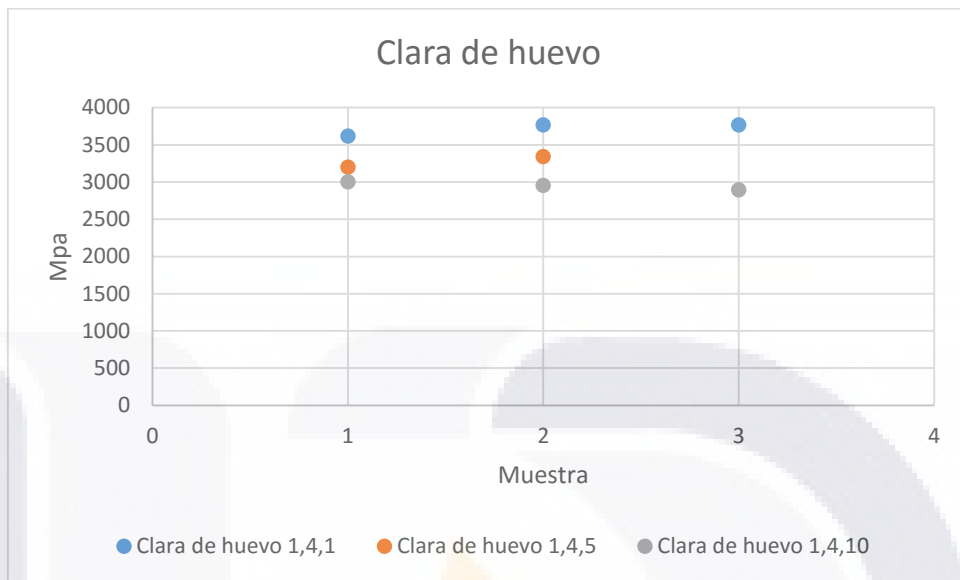
Gráfica 29. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal a diferentes proporciones propuestas

MOE ultrasonidos Mpa Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



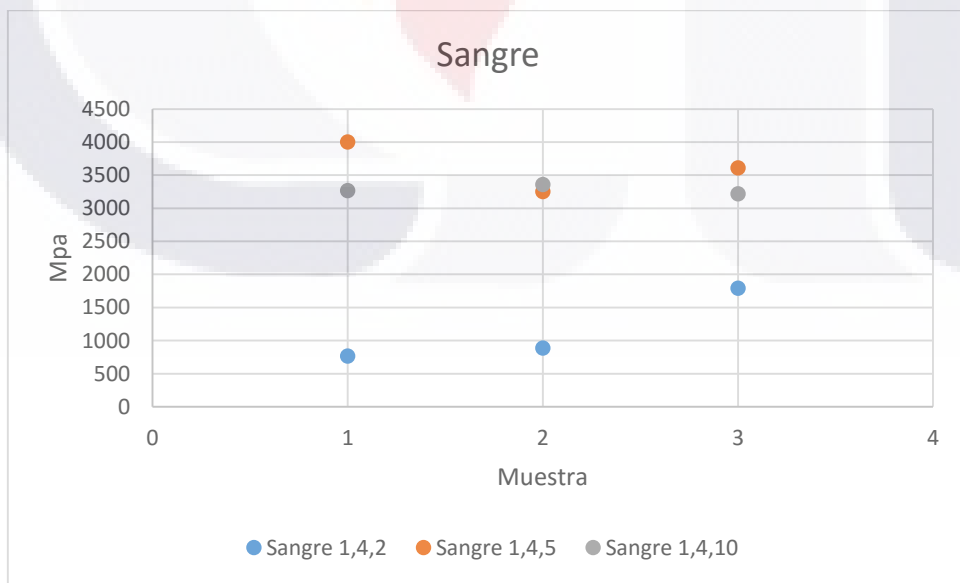
Gráfica 30. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal + miel a diferentes proporciones propuestas

MOE ultrasonidos Mpa Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



Gráfica 31. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal + clara de huevo a diferentes proporciones propuestas

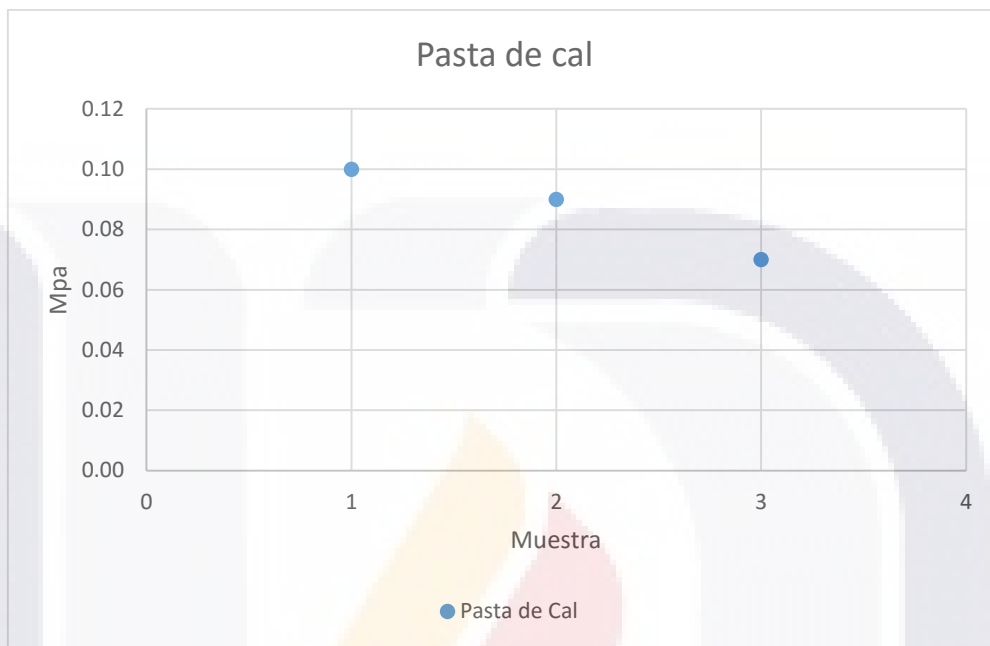
MOE ultrasonidos Mpa Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



Gráfica 32. Gráfica comparativa de resultados del MOE por ultrasonidos en probetas de pastas de cal + sangre a diferentes proporciones propuestas

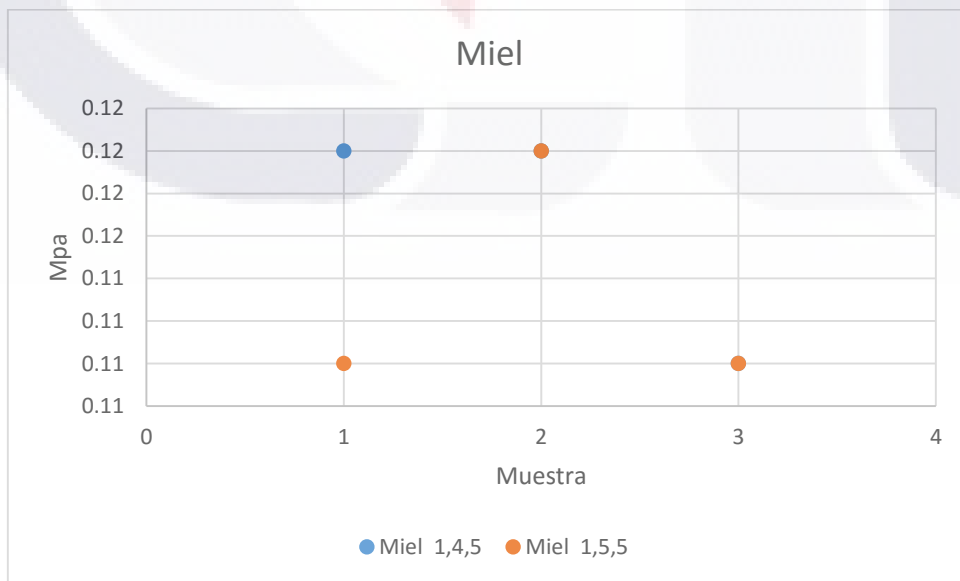
### RESISTENCIA A LA FLEXIÓN

Resistencia a la flexión Mpa Pasta de Cal



Gráfica 33. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal a proporciones propuestas

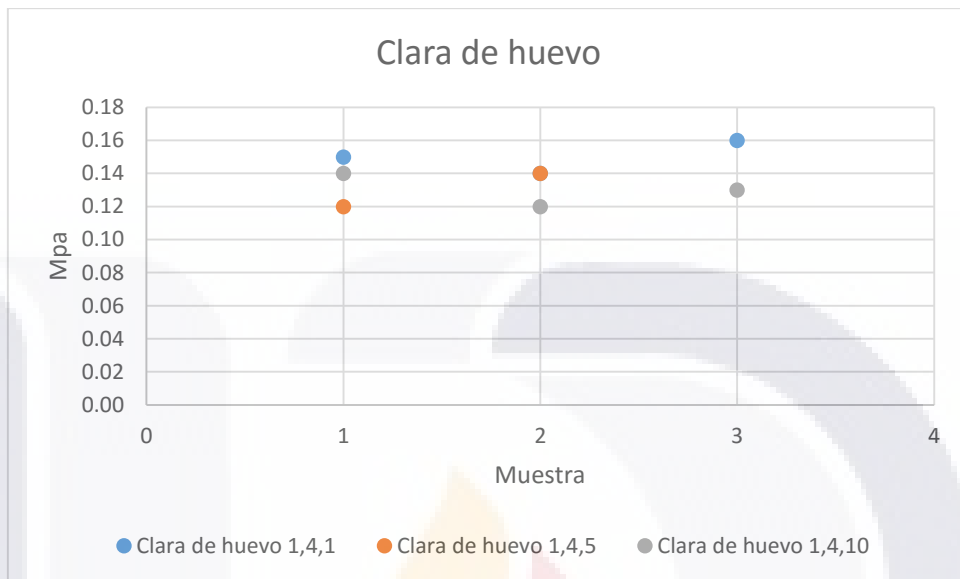
Resistencia a la flexión Mpa Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

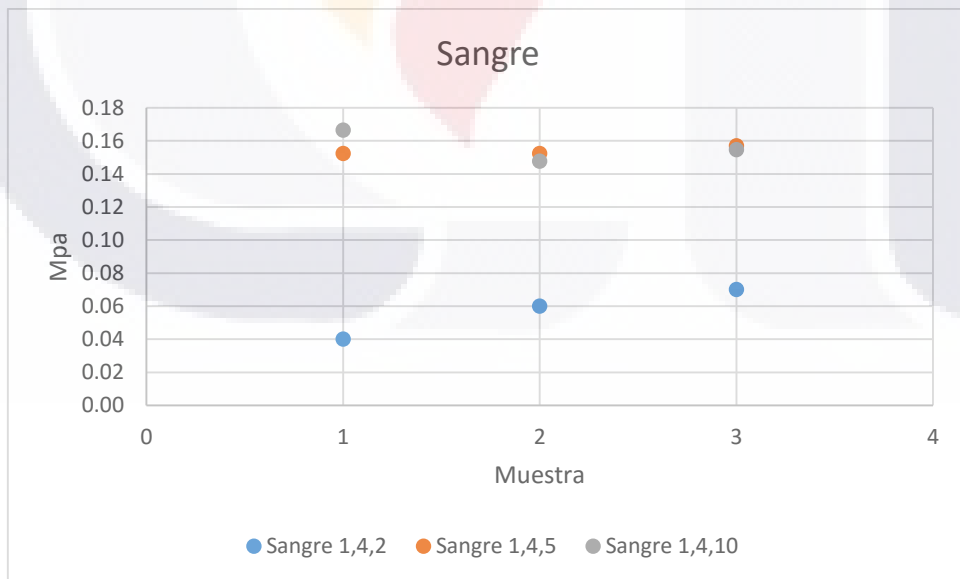
Gráfica 34. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas

Resistencia a la flexión Mpa Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



Gráfica 35. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas

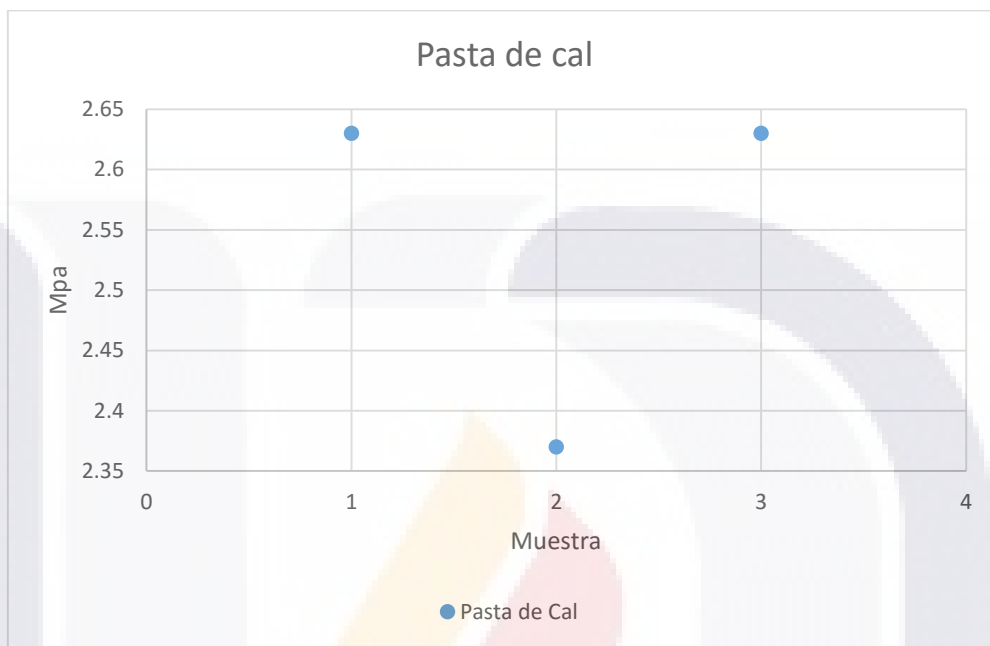
Resistencia a la flexión Mpa Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



Gráfica 36. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la flexión en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas

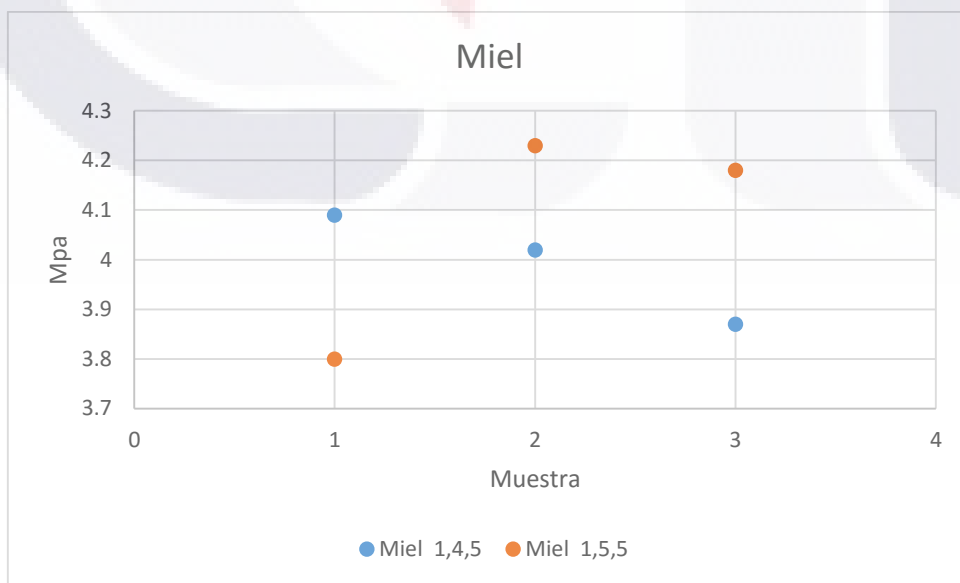
### RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Resistencia a la compresión Mpa Pasta de Cal



Gráfica 37. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal proporciones propuestas

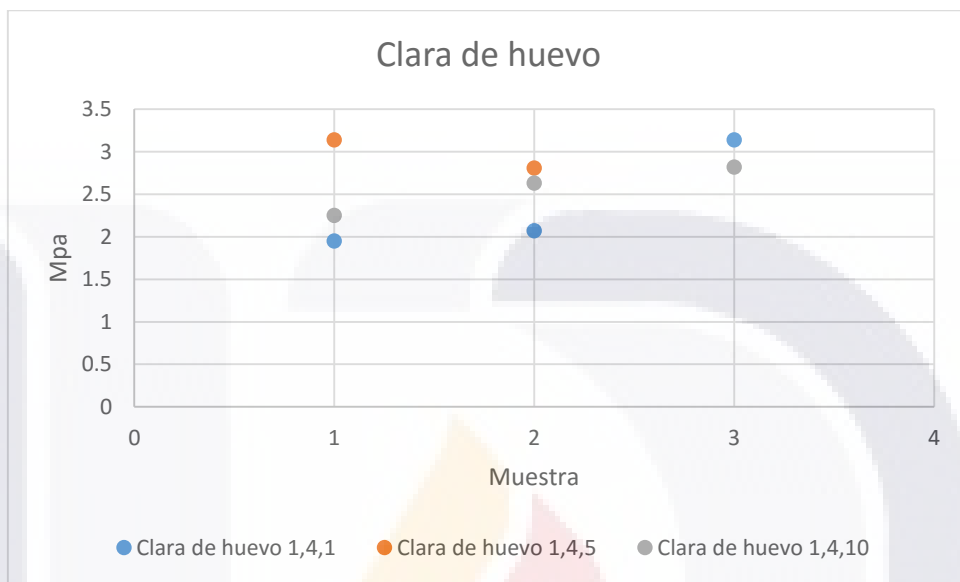
Resistencia a la compresión Mpa Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

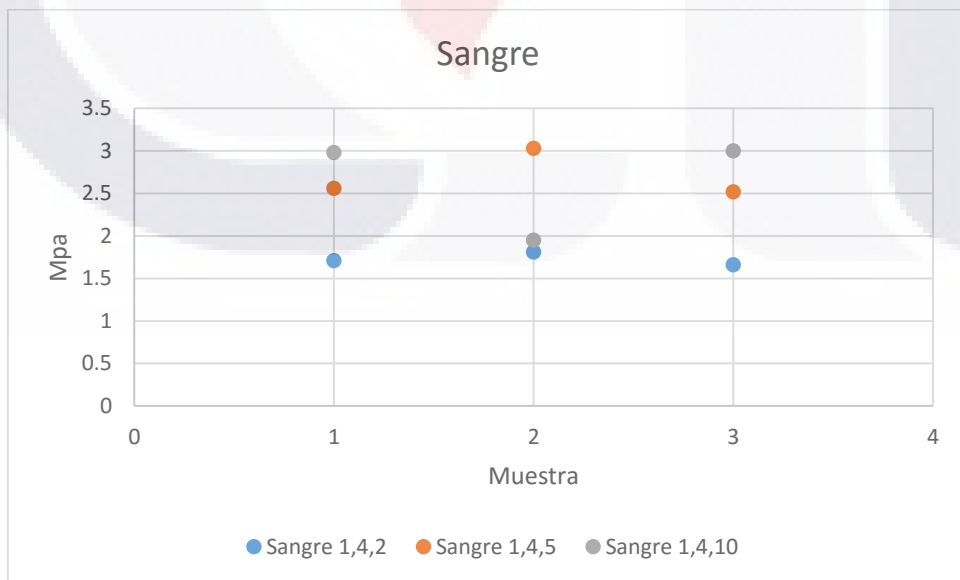
Gráfica 38. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas

Resistencia a la compresión Mpa Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



Gráfica 39. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas

Resistencia a la compresión Mpa Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)

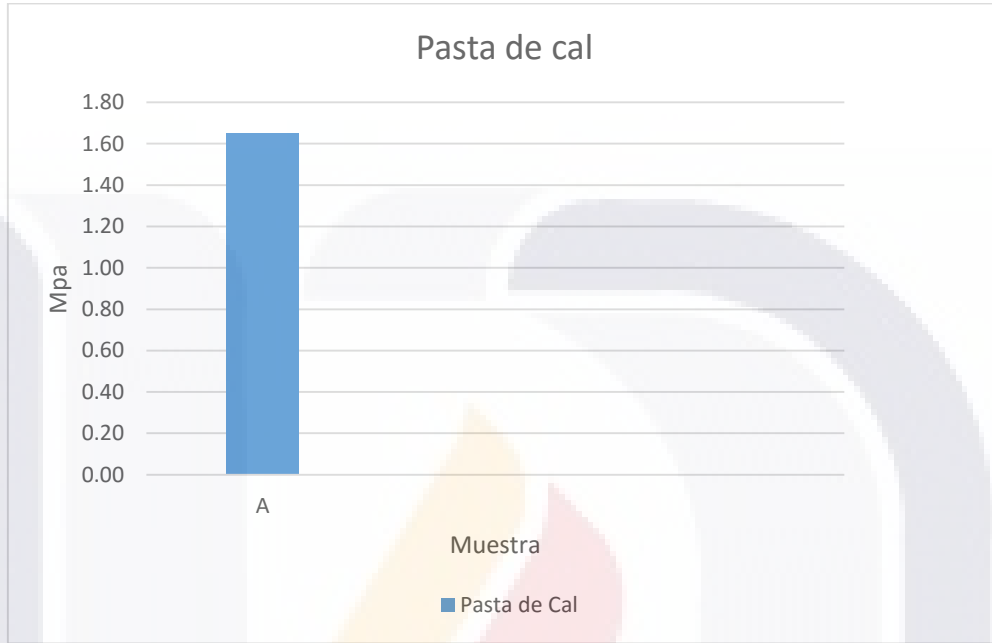


Gráfica 40. Gráfica comparativa de resultados de resistencia a la compresión en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas



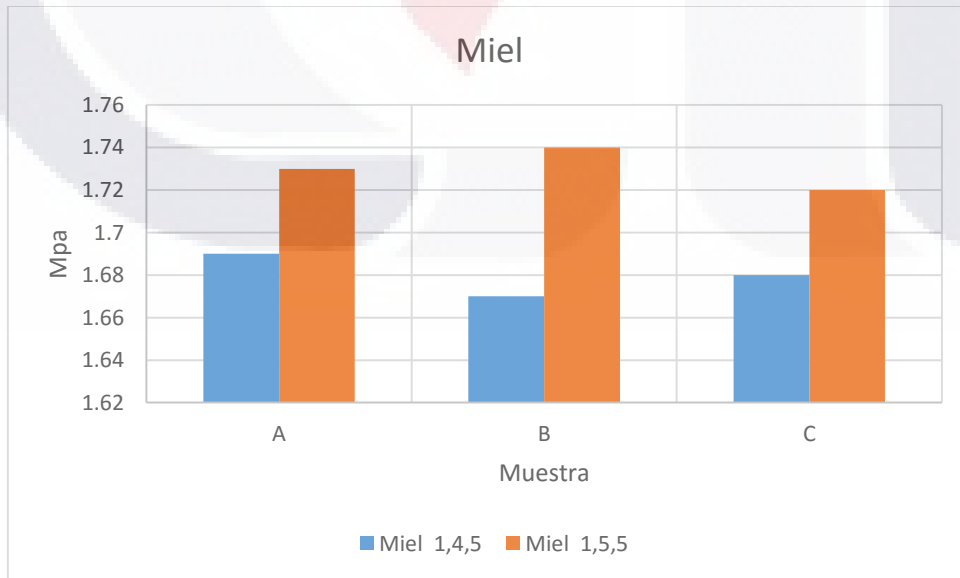
## DENSIDAD APARENTE Y RELATIVA, ÍNDICE DE POROSIDAD

Densidad Aparente (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal



Gráfica 41. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal a las proporciones propuestas

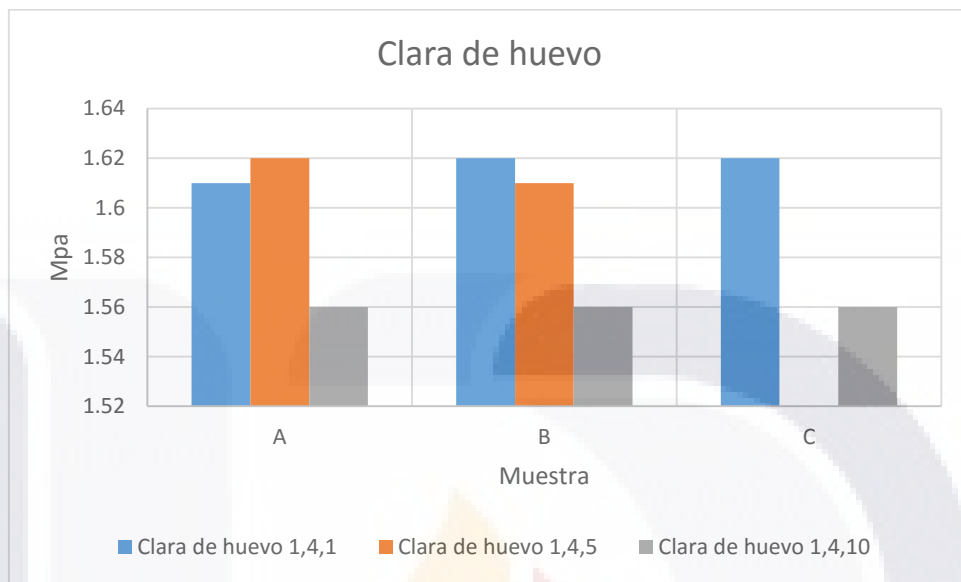
Densidad Aparente (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



Gráfica 42. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas

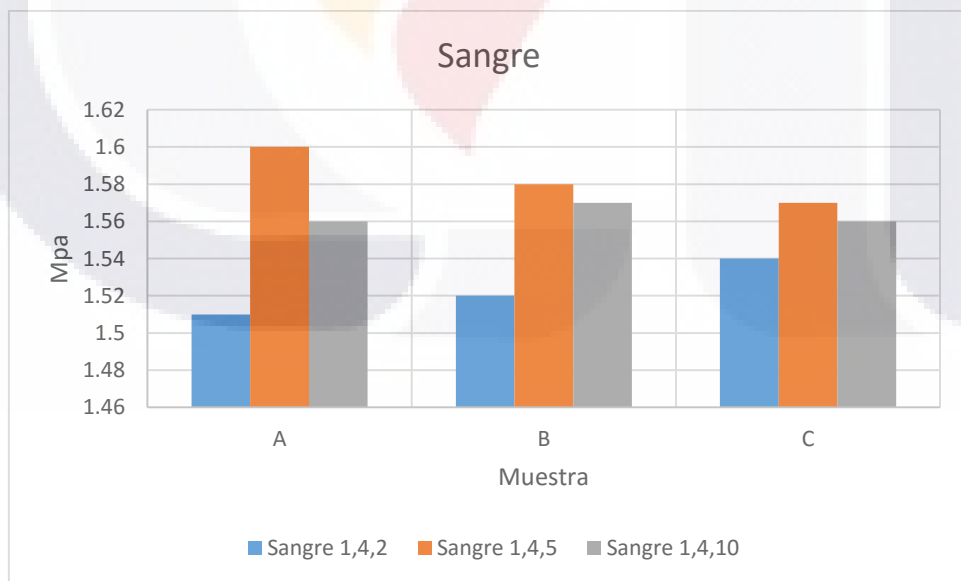
“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

Densidad Aparente (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



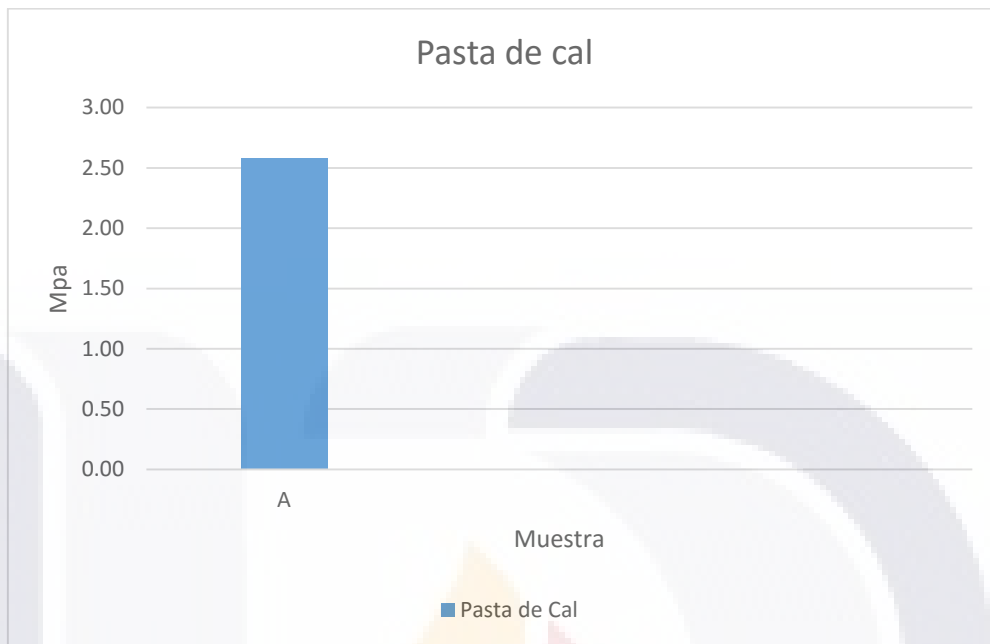
Gráfica 43. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas

Densidad Aparente (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



Gráfica 44. Gráfica comparativa de resultados de la densidad aparente en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas

Densidad relativa (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal



Gráfica 45. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal a las proporciones propuestas

Densidad relativa (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



Gráfica 46. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas

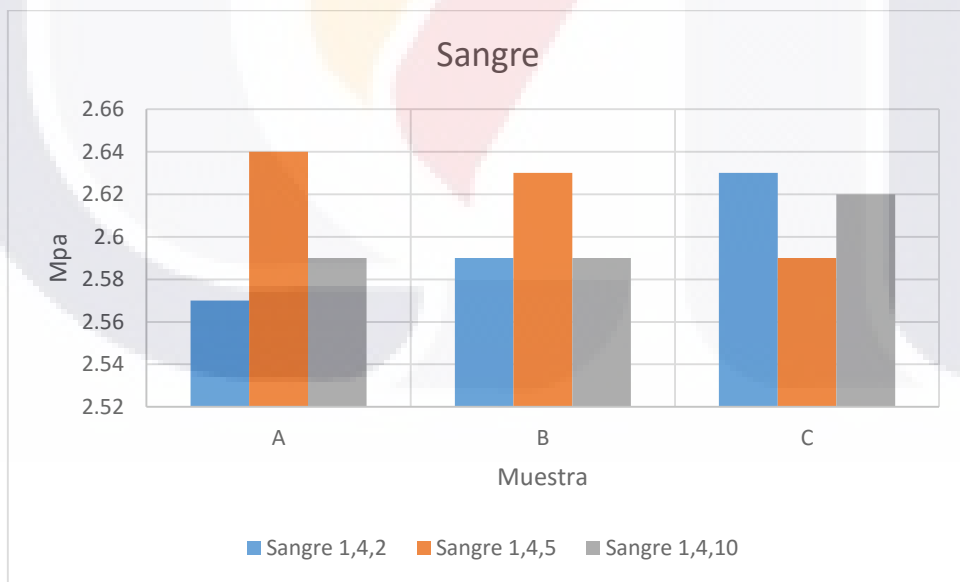
“Caracterización físico-mecánica de morteros de cal hidratada dosificados con aditivos orgánicos”

Densidad relativa (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



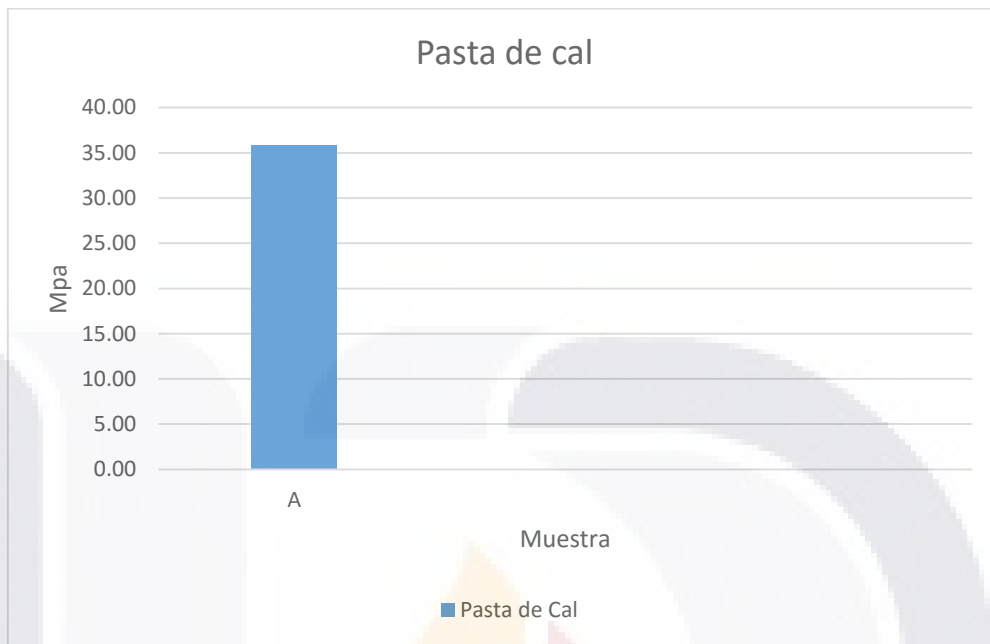
Gráfica 47. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas

Densidad relativa (gr/cm<sup>3</sup>) Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



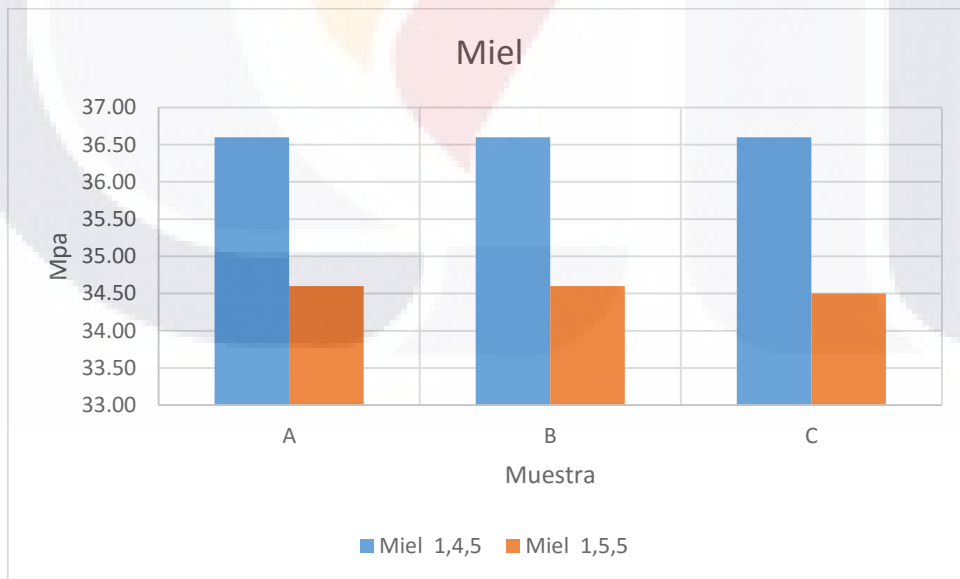
Gráfica 48. Gráfica comparativa de resultados de la densidad relativa en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas

Porosidad % Pasta de Cal



Gráfica 49. Gráfica de resultados de la porosidad en probetas de pastas de cal + a las proporciones propuestas

Porosidad % Pasta de Cal + Miel (Proporciones en pesos)



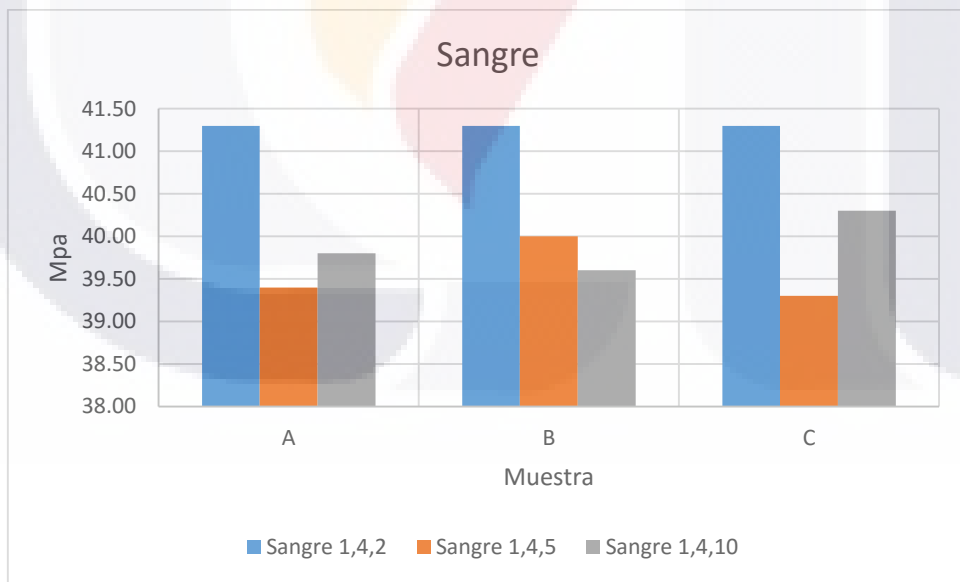
Gráfica 50. Gráfica comparativa de resultados de porosidad en probetas de pastas de cal + miel a las diferentes proporciones propuestas

Porosidad % Pasta de Cal + Clara de huevo (Proporciones en pesos)



Gráfica 51. Gráfica comparativa de resultados de porosidad en probetas de pastas de cal + clara de huevo a las diferentes proporciones propuestas

Porosidad % Pasta de Cal + Sangre (Proporciones en pesos)



Gráfica 52. Gráfica comparativa de resultados de porosidad en probetas de pastas de cal + sangre a las diferentes proporciones propuestas