

Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

Influencia de la cal en las características físico-mecánicas del mortero de pega para mampostería, fabricado con arena de tajo.

Proyecto de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

Presenta:

Ana María Campos Rojas

Director de Proyecto de Graduación:

Alejandro Navas Carro, M.Sc.

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

Costa Rica

Abril, 2016

TRIBUNAL

Estudiante:



Ana María Campos Rojas.

Director:



Ing. Alejandro Navas Carro, MSc.

Asesores:



Ing. Andrea Ramírez Villalba.



Ing. María Amalia Trejos Murillo.

Fecha: 2016, Abril, 12

El suscrito, Ana María Campos Rojas, cédula 2-0695-0754, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné B01290, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación Influencia de la cal en las características físico-mecánicas del mortero de pega para mampostería, fabricado con arena de tajo, bajo la Dirección del MSc. Alejandro Navas Carro, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N°6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); “no podrá suprimirse su nombre en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales”. Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

A mis padres Elidier y Marta, por su amor y apoyo incondicional. Gracias a sus consejos y confianza, hoy estoy culminando esta etapa; este triunfo también es de ustedes.

A mi hermana, por ser mi amiga incondicional y estar siempre a mi lado apoyándome.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tribunal examinador: Ingenieros Alejandro Navas Carro, Andrea Ramírez Villalba y María Amalia Trejos Murillo, por su ayuda y consejos.

A Productos de Concreto, por su aporte facilitando los bloques de concreto utilizados en esta investigación, especialmente al Ingeniero Minor Murillo, Gerente Investigación y Desarrollo.

Al LanammeUCR, por facilitar sus instalaciones, equipo, materiales y transporte, que fueron vitales en el desarrollo de este proyecto.

Al personal del LanammeUCR, en especial a los técnicos del Laboratorio de Agregados y del Laboratorio de Escala Natural, y a los Ingenieros Einer Rodríguez y Francisco Villalobos, por su ayuda y consejos durante las diferentes etapas de este proyecto.

Además, agradezco a mi familia, amigos, novio y a todos aquellos que me ayudaron y apoyaron durante este proceso.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Generalidades	1
1.2. Importancia	1
1.3. Antecedentes	2
1.4. Objetivos.....	3
1.4.1. Objetivo general.....	3
1.4.2. Objetivos específicos.....	3
1.5. Alcance.....	4
1.6. Limitaciones.....	6
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Cemento UG	7
2.2. Cal hidratada.....	7
2.3. Agregado fino	8
2.3.1. Arena de tajo.....	8
2.3.2. Arena industrial.....	9
2.3.3. Hinchamiento de la arena	10
2.4. Mortero de pega para mampostería	10
2.4.1. Procedimiento de pega de bloques de mampostería.....	11
2.5. Prueba de hipótesis t de Student	12
CAPÍTULO 3: PROCESO EXPERIMENTAL.....	14
3.1. Pruebas a realizar a la cal.....	14
3.1.1. Pruebas químicas (ASTM C207-06).....	14
3.1.2. Ensayo de granulometría (ASTM C110-14)	14
3.2. Pruebas a realizar a la arena	15
3.2.1. Peso Unitario (ASTM C29).....	15
3.2.2. Granulometría (ASTM C144)	15
3.2.3. Gravedad específica (ASTM C128)	17

3.2.4. <i>Humedad e hinchamiento</i>	17
3.3. Pruebas a realizar al cemento	18
3.3.1. <i>Gravedad específica (ASTM C188)</i>	18
3.4. Pruebas a realizar a los bloques de concreto	19
3.4.1. <i>Absorción y área neta (ASTM C140)</i>	19
3.4.2. <i>Resistencia a la compresión (ASTM C140)</i>	19
3.5. Pruebas a realizar al mortero	20
3.5.1. <i>Prueba de flujo (ASTM C1437)</i>	20
3.5.2. <i>Contenido de aire (ASTM C185)</i>	20
3.5.3. <i>Retención de agua (C1506)</i>	21
3.5.4. <i>Resistencia a la compresión (ASTM C109)</i>	23
3.6. Pruebas a realizar a la mampostería	25
3.6.1. <i>Prismas de mampostería (ASTM C1314)</i>	25
3.6.2. <i>Cruces de mampostería</i>	26
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS.....	28
4.1. Caracterización de la cal.....	28
4.1.1. <i>Pruebas químicas</i>	28
4.1.2. <i>Granulometría</i>	29
4.2. Caracterización del agregado fino.....	29
4.3. Caracterización del cemento y los bloques	31
4.4. Caracterización de los morteros	32
4.4.1. <i>Prueba de flujo</i>	32
4.4.2. <i>Retención de agua</i>	34
4.4.3. <i>Contenido de aire</i>	36
4.4.4. <i>Resistencia a compresión en cubos de mortero de 50mm de arista</i>	38
4.5. Caracterización de la mampostería	40
4.5.1. <i>Resistencia a la compresión (Prismas de mampostería)</i>	40
4.5.2. <i>Adherencia (Cruces de mampostería)</i>	43
4.5.3. <i>Otras pruebas realizadas al mortero fabricado en campo</i>	47

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	51
5.1. Conclusiones	51
5.2. Recomendaciones	54
REFERENCIAS.....	55
GLOSARIO.....	59
APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES DE MATERIALES UTILIZADOS ...	A-1
A.1. Datos experimentales del cemento	A-1
A.2. Datos experimentales de los agregados finos.....	A-1
A.3. Datos experimentales de los bloques de concreto	A-2
<i>A.3.1. Bloques sencillos.....</i>	<i>A-3</i>
<i>A.3.2. Bloques dobles.....</i>	<i>A-4</i>
APÉNDICE B. DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO.....	B-1
B.1. Prueba de flujo	B-1
B.2. Prueba de retención de agua en el mortero	B-2
B.3. Prueba de contenido de aire en el mortero	B-3
B.4. Resistencia a la compresión en cubos de 50 mm	B-4
APÉNDICE C.DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS REALIZADAS A LA MAMPOSTERÍA	C-1
C.1. Resistencia a la compresión en prismas de mampostería	C-1
C.2. Adherencia en cruces de mampostería	C-3
C.3. Otras pruebas al mortero fabricado en campo.....	C-5

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ensayos realizados	5
Figura 2. Esparcido del mortero en las caras laterales del bloque	12
Figura 3. Colocación de un bloque en sitio.....	12
Figura 4. Equipo utilizado para la prueba de peso unitario de agregado fino.....	15
Figura 5. Mallas apiladas verticalmente, colocadas en el agitador mecánico para análisis granulométrico.....	16
Figura 6. Preparación de muestras para la prueba de hinchamiento.....	18
Figura 7. Picnómetro le Chatelier utilizado para determinar el peso específico del cemento..	19
Figura 8. Muestra de mortero en la mesa de flujo	20
Figura 9. Equipo utilizado para la prueba de contenido de aire en el mortero	21
Figura 10. Relación de la composición del mortero, resistencia a compresión y retención de agua (Relación cemento+cal: arena=1:3, por volumen)	22
Figura 11. Equipo utilizado para el ensayo de retención de agua del mortero	23
Figura 12. Moldes utilizados para la elaboración de los cubos de mortero de 50 mm	24
Figura 13. Cubos de mortero de 50 mm	24
Figura 14. Proceso de construcción, almacenamiento y falla de los prismas de mampostería	25
Figura 15. Configuración de las cruces de mampostería.....	26
Figura 16. Proceso de fabricación y falla de las cruces de mampostería	27
Figura 17. Montaje para la falla de las cruces	27
Figura 18. Agregados finos utilizados para la elaboración de los morteros.....	30
Figura 19. Curva granulométrica de ambas arenas a utilizar.....	31
Figura 20. Resumen de relación w/c de las mezclas de mortero y su respectivo flujo	33
Figura 21. Comparación de resultados de retención de agua en el mortero	35
Figura 22. Comparación de resultados de contenido de aire en el mortero	37
Figura 23. Comparación de resultados de resistencia a la compresión en cubos de mortero de 50 mm	39
Figura 24. Comparación de resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión en prismas de mampostería	42
Figura 25. Cruz de mampostería después de ser fallada.....	44
Figura 26. Cuña de mortero en la ranura de una cruz.....	45

Figura 27. Comparación de resultados de adherencia en cruces de mampostería	46
Figura 28. Comparación de relación w/c de morteros fabricados en campo vs morteros mezclados en laboratorio	47
Figura 29. Comparación de flujo de morteros fabricados en campo vs morteros mezclados en laboratorio.....	49
Figura 30. Comparación de resistencia a la compresión en cubos de mortero de 50 mm de arista entre morteros fabricados en campo vs morteros mezclados en laboratorio.....	50
Figura A.1. Curva de hinchamiento de ambas arenas	A-2
Figura A.2. Ejemplo de bloque sencillo	A-3
Figura A.3. Ejemplo de bloque de doble pared	A-3
Figura C.1. Tipos de falla por compresión de prismas de mampostería.....	C-1

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Proporciones por volumen para la fabricación de mortero de pega	11
Cuadro 2. Requisitos de composición química para la cal hidratada usada en mampostería..	14
Cuadro 3. Límites de granulometría para agregado fino manufacturado para morteros de mampostería, según la norma ASTM C144	16
Cuadro 4. Resistencia mínima para los prismas de mampostería a 28 días, según el CSCR (2010)	25
Cuadro 5. Resultados de las pruebas químicas realizadas a la cal	28
Cuadro 6. Resultados de granulometría de la cal.....	29
Cuadro 7. Principales propiedades para caracterizar los agregados finos	30
Cuadro 8. Resumen de resultados de porcentaje de retención de agua del mortero, según ASTM C1506.....	34
Cuadro 9. Comparación de resultados de retención de agua, con la prueba estadística t de Student.....	36
Cuadro 10. Resumen de resultados de contenido de aire en el mortero, según ASTM C270 .	36
Cuadro 11. Comparación de resultados de contenido de aire, con la prueba estadística t de Student.....	38
Cuadro 12. Resumen de resultados de resistencia a la compresión a los 28 días, según ASTM C109.....	38
Cuadro 13. Comparación de resultados de resistencia a la compresión en cubos de mortero, con la prueba estadística t de Student	40
Cuadro 14. Medidas de los prismas de mampostería	41
Cuadro 15. Factores de corrección para prismas establecidos en ASTM C1314.....	41
Cuadro 16. Resumen de resultados de resistencia a compresión de prismas de mampostería	41
Cuadro 17. Comparación de resultados de resistencia a la compresión en prismas de mampostería, con la prueba estadística t de Student.....	43
Cuadro 18. Resumen de resultados de adherencia en cruces de mampostería	44
Cuadro 19. Resumen de resultados de adherencia en cruces de mampostería, corregidos ...	45
Cuadro 20. Comparación de resultados de adherencia en cruces de mampostería, con la prueba estadística t de Student	47

Cuadro A.1. Datos complementarios de caracterización de los agregados finos.....	A-1
Cuadro A.2. Granulometría de la arena de tajo	A-1
Cuadro A.3. Granulometría de la arena industrial	A-2
Cuadro A.4. Dimensiones de los bloques sencillos	A-3
Cuadro A.5. Propiedades de los bloques sencillos, según ASTM C140.....	A-3
Cuadro A.6. Fuerza de compresión sobre el área neta de los bloques sencillos, según ASTM C140.....	A-4
Cuadro A.7. Dimensiones de los bloques dobles.....	A-4
Cuadro A.8. Propiedades de los bloques dobles, según ASTM C140	A-4
Cuadro A.9. Fuerza de compresión sobre el área neta de los bloques dobles, según ASTM C140.....	A-5
Cuadro B.1. Datos de relación w/c para la fabricación de los morteros.....	B-1
Cuadro B.2. Datos de flujo obtenido en cada uno de los morteros	B-1
Cuadro B.3. Datos obtenidos en la prueba de retención de agua en el mortero.....	B-2
Cuadro B.4. Datos obtenidos en la prueba de contenido de aire en el mortero	B-3
Cuadro B.5. Datos obtenidos en la falla de cubos de mortero de 50 mm, a los 7 y 28 días..	B-4
Cuadro B.6. Datos de densidad de cubos de mortero de 50 mm.....	B-5
Cuadro C.1. Datos obtenidos en la falla a compresión de prismas de mampostería	C-2
Cuadro C.2. Datos obtenidos en la falla de cruces de mampostería.....	C-3
Cuadro C.3. Relación w/c para los morteros fabricados en campo	C-5
Cuadro C.4. Datos de flujo para los morteros fabricados en campo.....	C-5
Cuadro C.5. Datos de resistencia a la compresión a los 28 días para cubos de mortero de las mezclas fabricadas en campo.....	C-6

SÍMBOLOS

”:	Pulgadas.
cm:	Centímetros.
cm ³ :	Centímetros cúbicos.
CV:	Coeficiente de variación.
f _m :	Resistencia al esfuerzo de compresión de la mampostería.
f _{mortero} :	Resistencia al esfuerzo de compresión del mortero.
G _{bs} :	Gravedad específica bruta seca.
G _s :	Densidad relativa aparente.
g/cm ³ :	Gramos sobre centímetros cúbicos.
h:	Horas
kg/cm ² :	Kilogramos sobre centímetro cuadrado.
kg/m ³ :	Kilogramos sobre metro cúbico.
KPa:	Kilopascales.
mm:	Milímetros.
mm ² :	Milímetros cuadrados.
MPa:	Megapascales.
s:	Segundos.
w/c:	Relación agua sobre cemento.
%h:	Porcentaje de hinchamiento.
%wL:	Porcentaje de agua libre

Campos Rojas, Ana María

Influencia de la cal en las características físico-mecánicas del mortero de pega para mampostería, fabricado con arena de tajo.

Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, C.R.:

A.M.Campos R., 2016

XIV, 59, [16]h; ils. Col.-30 refs

RESUMEN

En esta investigación se evaluaron las propiedades de 16 tipos de mortero para pega de mampostería; de ellos, la mitad fueron fabricados con arena de tajo y la otra mitad con arena industrial. Se fabricaron morteros tipo M y tipo S con cal de diferentes calidades y sin cal, para comparar los efectos de la cal en el mortero y la variación en dichos efectos al cambiar el agregado fino utilizado.

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en cubos de mortero a los 7 y 28 días de edad. Además, se midieron otras propiedades del mortero en estado fresco como trabajabilidad, retención de agua y contenido de aire.

Se construyeron prismas de mampostería para determinar la resistencia a compresión y "cruces" de mampostería para determinar la adherencia de las juntas de mortero. Además, de las mezclas realizadas en campo, se obtuvieron muestras para comparar la trabajabilidad y resistencia en cubos de mortero con los datos obtenidos en el laboratorio.

Las pruebas se realizaron según lo dicta la Sociedad Americana de Pruebas y Materiales (ASTM). A.M.C.R.

MORTERO DE PEGA; MORTERO CON CAL; MORTERO FABRICADO EN SITIO; PEGA DE BLOQUES; PRISMAS DE MAMPOSTERÍA; CRUCES DE MAMPOSTERÍA.

Ing. Alejandro Navas Carro

Escuela de Ingeniería Civil

CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Generalidades

La construcción de muros de mampostería con bloques de concreto es la más utilizada actualmente en Costa Rica, especialmente en la construcción de viviendas y edificaciones de uno a diez niveles de altura. Para adherir los bloques de mampostería, se requiere de un mortero de pega con características especiales que le permita conformar todas las piezas como un solo elemento, formando un bloque sólido. Sin embargo, las prácticas empleadas en algunas construcciones para la fabricación en sitio de este mortero, así como en su colocación, podrían ocasionar que no se alcance la resistencia esperada.

La cal hidratada se encuentra especificada para uso en la fabricación de morteros de pega de mampostería, en la normativa nacional (CSCR 2010). Sin embargo, en el país se ha dejado de lado la importancia de este material, en muchos casos por la falta de regulación en su producción, en otros por desconocimiento de sus propiedades.

El Código Sísmico de Costa Rica 2010 (CSCR 2010) establece como morteros de pega estructurales únicamente los morteros clase A y clase B, los cuales especifican el uso de cal para cumplir dicha condición. Sin embargo, estos datos sugieren algunas condiciones para la cal y la arena que no siempre se pueden obtener con los materiales nacionales. En el caso de la cal, su producción en el país no ha sido normada y por lo tanto cada una de las caleras utiliza su propio método de producción. En el caso de la arena de tajo, su proceso de obtención no es muy riguroso y además, posee un alto porcentaje de contenido de finos que, al mezclarse con la cal, podría alterar significativamente las propiedades del mortero de pega.

1.2. Importancia

La importancia de esta investigación se centra en conocer las ventajas que tiene la utilización de la cal producida en el país en el mortero de pega de los bloques de concreto, con el fin de que, al conocerse mejor sus propiedades y efectos al agregarse a la mezcla para mortero, sea posible reactivar su uso en la industria de la construcción.

En el país se producen mezclas pre empacadas de mortero de pega, las cuales contienen cal y aditivos. Estos han dado resultados favorables tanto en resistencia como en trabajabilidad

cuando se han utilizado en la construcción; sin embargo, estos productos tienen un mayor costo que el mortero fabricado en sitio. Esto implica que, en obras con una cantidad importante de mampostería, sea más rentable fabricar el mortero en sitio, por lo que es necesario estudiar diferentes opciones para su elaboración.

Se seleccionó arena de tajo porque, cuando se construye un proyecto, es deseable adquirir los agregados en el depósito más cercano posible para reducir los costos del material. La arena de tajo es un material fácil de conseguir en los depósitos de materiales de todo el país y sumamente utilizado en el sector construcción. Sin embargo, a pesar de ser apta para la fabricación de concreto, sus efectos en el mortero de pega aún no han sido evaluados. Posee características granulométricas distintas a las especificadas en la norma ASTM C144 para la fabricación de morteros de pega, al contar con un alto porcentaje de contenido de finos.

Con este trabajo, se pretende un mejoramiento en la calidad de las construcciones de mampostería del país, dándole al usuario una guía de la cal producida en Costa Rica y permitiéndole saber con mayor precisión los efectos que esta tendrá en la mampostería, así como sus posibles reacciones al ser combinada con arena de tajo.

1.3. Antecedentes

Los beneficios de la cal en los morteros de pega han sido estudiados y normados para su uso en construcción. Además, se cataloga su uso en morteros de pega como necesario para cumplir los estándares de calidad de la mampostería. Según Klingner (2010), para la fabricación de mortero de pega se debe adicionar cal al cemento tipo Portland, puzolánico o de escoria, o en su defecto fabricar el mortero con "cemento para mampostería", el cual no se fabrica en el país actualmente.

En el CSCR 2010 y la norma ASTM C270, se especifican las proporciones de cemento, cal y agregado fino para la fabricación de cada tipo de mortero.

En el 2001, Chacón, en su proyecto final de graduación, "Análisis y evaluación técnica en morteros para repellos y recomendaciones para su uso", presenta un estudio sobre morteros para repello, variando el tipo de cemento, agregados y cal, para obtener distintos comportamientos en su adherencia y agrietamiento.

También en el 2001, Picado, en su proyecto final de graduación, "Evaluación técnica de morteros para repello y recomendaciones para su aplicación", realiza pruebas para determinar la influencia de distintos tipos de arena y cal en los morteros de repello y evalúa cuales de estas combinaciones muestran mejores resultados.

En el 2012, Arias presenta su proyecto final de graduación, "Evaluación de las propiedades del mortero pre empacado para pega de bloques de mampostería", en el que se realizaron pruebas de resistencia a compresión, porcentaje de retención de agua, contenido de aire, medición de flujo y adherencia ante esfuerzos cortantes, a siete tipos de mortero pre empacado que son comercializados en el país.

En el 2014, Acón presenta su proyecto final de graduación titulado "Influencia de la cal nacional en las propiedades del mortero para pega de bloques en mampostería"; en este trabajo, se analizaron muestras de cal de 14 diferentes caleras en el país y dos muestras de cal importadas, se seleccionaron seis de ellas y se moldearon cubos de mortero para fallar a los 7, 28 y 56 días. Para estas pruebas se utilizó arena industrial como agregado fino.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estudiar los beneficios en las propiedades físico-mecánicas del uso de cal hidratada en la fabricación de mortero de pega para bloques de mampostería, con arena de tajo y arena industrial.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente tres tipos de cal, y caracterizar físicamente la arena de tajo y arena industrial para comparar el desempeño de estos materiales en la fabricación de mortero de pega para mampostería.
- Obtener experimentalmente y analizar la resistencia a la compresión del mortero de pega con tres tipos diferentes de cal nacional y un mortero sin cal, para arena de tajo y arena industrial, mediante cubos de mortero a fallar a los 7 y 28 días.
- Fabricar prismas de mampostería para fallar a los 28 días y analizar los efectos en la resistencia a compresión de la adición de tres tipos distintos de cal nacional para arena de tajo y arena industrial. Hacer la comparación con prismas fabricados con mortero sin cal.

- Fabricar cruces de mampostería para fallar a los 28 días y analizar los efectos en la adherencia de la adición de tres tipos distintos de cal nacional para arena de tajo y arena industrial. Hacer la comparación con prismas fabricados con mortero sin cal.

1.5. Alcance

- Se escogieron tres caleras costarricenses para la realización de las pruebas. La escogencia se basó en el Proyecto Final de Graduación de Catherine Acón, quien en el 2014 realizó un muestreo a 14 caleras del país y se seleccionó la cal de mejor calidad (Industrias de Calcio), una de mediana calidad (Roy Villalobos) y una de baja calidad (Alvarado).
- La fabricación de la cal en las caleras Roy Villalobos y Alvarado se realiza en forma artesanal y para esto se utiliza madera, la cual en época lluviosa puede estar mojada y afectar la calidad de la cal al disminuir la temperatura a la que es sometida.
- Para todos los ensayos se utilizó cemento para uso general de marca Holcim. Los bloques utilizados en todos los casos fueron bloques Clase A provenientes de Productos de Concreto.
- Se caracterizaron ambos agregados finos. El agregado fino de tajo provino del tajo La Florencia, ubicado en la Garita de Alajuela; el agregado fino de tipo industrial es proveniente de Guápiles y es el mismo utilizado por Acón, 2014. Se caracterizaron ambos agregados.
- La arena de tajo originalmente presentaba una granulometría que contenía partículas de hasta 13 mm ($\frac{1}{2}$ "), por lo que se debió tamizar con la malla N°4 y homogenizar, para poder ser utilizada en los ensayos de laboratorio.
- Se verificaron las propiedades de los bloques de concreto, mediante ensayos de resistencia a la compresión, absorción y área neta.
- Los morteros se fabricaron con las proporciones obtenidas del CSCR 2010 y se caracterizaron mediante ensayos de retención de agua, porcentaje de aire y resistencia a la compresión.
- Se construyeron prismas y cruces de mampostería para medir su resistencia a compresión y adherencia. Se fabricaron con mano de obra externa para representar el proceso de pega que se utiliza en las construcciones en el país.

- Los ensayos se llevaron a cabo en Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), excepto las pruebas químicas a la cal, bajo las normas indicadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM). En la Figura 1 se muestran los ensayos realizados.

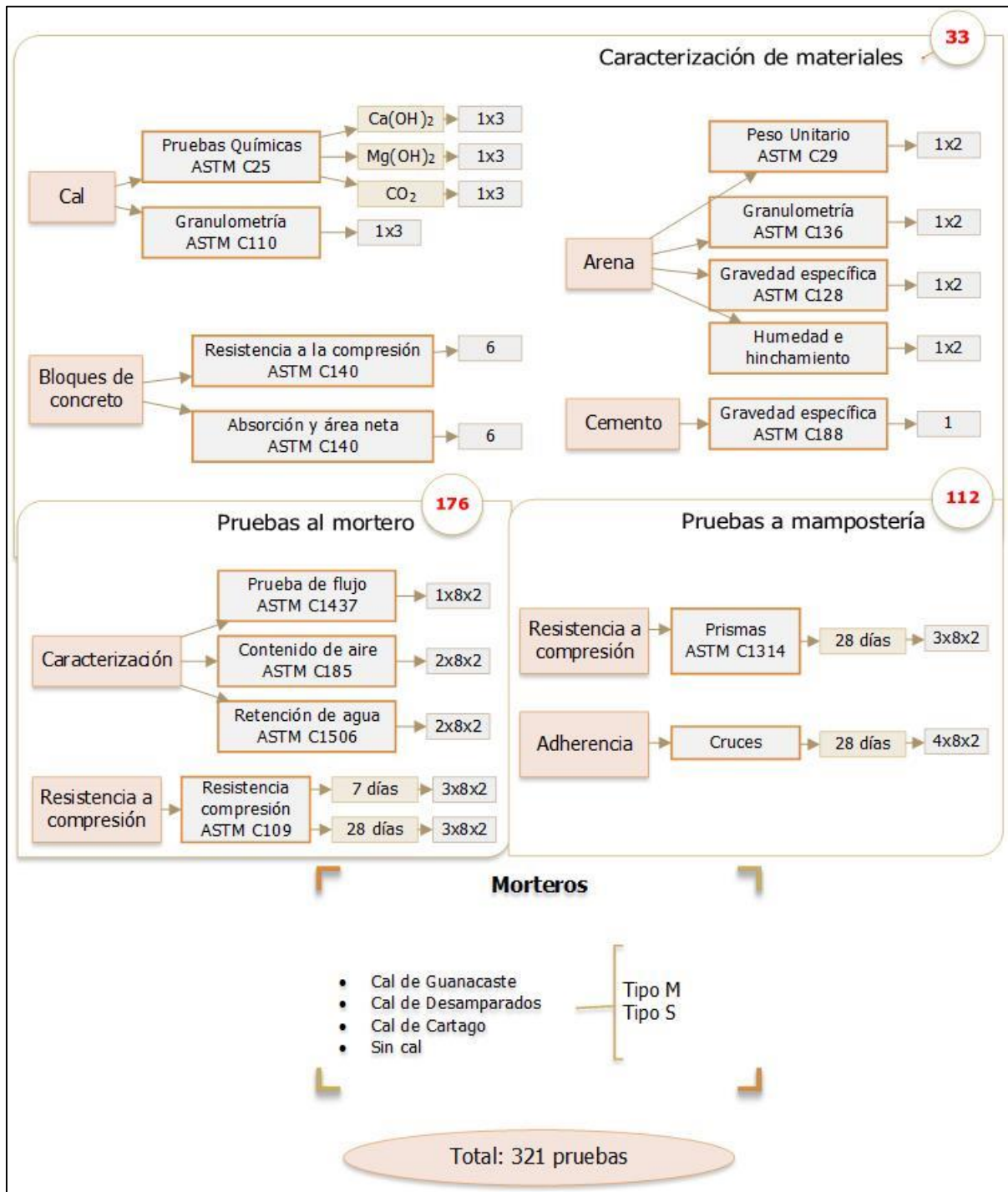


Figura 1. Ensayos realizados

1.6. Limitaciones

- No se cuenta con un procedimiento normado para obtener el hinchamiento de la arena, por lo que se recurre a idear un proceso que permita obtener dicha gráfica por medio de un ensayo de laboratorio sencillo para caracterizar adecuadamente la arena.
- No se cuenta con un ensayo normado para realizar la prueba de adherencia; sin embargo, se recurre al procedimiento empleado por Eliécer Arias en su trabajo final de graduación, ya que refleja condiciones similares a la realidad y permite modelar el comportamiento adecuadamente.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. Cemento UG

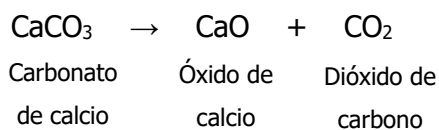
Se trata de un cemento hidráulico de uso general y es el más utilizado en las construcciones en el país; no posee requerimientos especiales pero puede ser utilizado para elementos estructurales. (Navas, 2013). Actualmente en el país es producido por las empresas Holcim y Cemex, y alcanza una resistencia a los 28 días de 28 MPa.

Para la fabricación de los morteros de este estudio se utiliza Cemento UG marca Holcim, el cual según la ficha técnica de dicha empresa cumple con la norma nacional vigente Reglamento Técnico de Costa Rica (La Gaceta # 49 del 10 de marzo del 2005) y es obtenido por la molienda conjunta y uniforme de clinker tipo Portland, y minerales naturales (Caliza de alta ley y Puzolana), en proporciones que van del 20% al 40% del peso del cemento (Holcim, 2014).

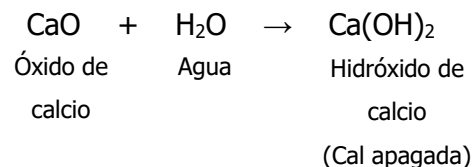
2.2. Cal hidratada

La cal hidratada se obtiene de un proceso que consiste en la calcinación de piedras calizas y su posterior hidratación con agua. Sin embargo, en el país este proceso tiene variaciones en las distintas caleras ya que en su mayoría se desarrollan en hornos artesanales. El proceso químico que da origen a la cal hidratada se describe mediante las siguientes dos reacciones:

Calcinación de piedra caliza



Hidratación de la cal viva



Al adicionar cal a la mezcla del mortero de pega para mampostería se obtiene que:

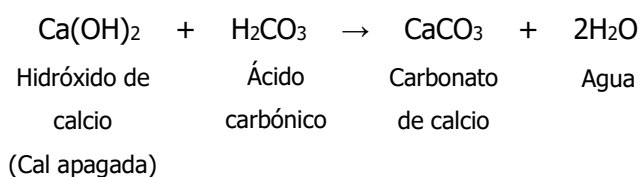
- Mejora la plasticidad o trabajabilidad del mortero
- Mejora la impermeabilidad de la pared

- Mejora la retención de agua del mortero

(Chrysler, Baltimore, & Escobar, 2007)

Debido a su capacidad de retener agua, brinda beneficios también cuando el mortero se encuentra endurecido. Luego del curado, la cal tiene la capacidad de reaccionar con el dióxido de carbono y agua presentes en el ambiente, creando un fenómeno conocido como carbonatación, que le permite auto-curar posibles grietas que se manifiestan en el mortero a través del tiempo. Este fenómeno ocurre debido a la siguiente reacción química:

Fenómeno de carbonatación



2.3. Agregado fino

Los agregados son partículas minerales relativamente inertes que se derivan principalmente de rocas naturales, piedra quebrada o gravas naturales y arenas que se utilizan para producir concretos. Son materiales de relleno y si bien no aportan resistencia, una mala calidad de ellos puede limitar la resistencia del concreto (Navas, 2013).

Un agregado fino está compuesto por material que pasa la malla N°4 (4,75 mm) y es retenido en la N°200 (75 µm) (Navas, 2013).

Para efectos de esta investigación se utilizará como agregado fino arena de tajo y arena industrial:

2.3.1. Arena de tajo

Es una arena suave, que se obtiene, en algunos casos por escarificación y en otros por trituración de materia prima.

En el país, la arena de tajo proviene de vetas del tajo de muy mala calidad, lo que resulta en un material con altas absorciones, altos porcentajes pasando la malla N°200 y partículas suaves, pero tiene la ventaja de que está libre de materia orgánica. Además, presenta partículas de tamaño mayor a los 4,75 mm, por lo que se debe tamizar a través de una malla N°4 para poder utilizarse como agregado fino para mortero.

Este material forma concretos y morteros susceptibles a altas contracciones y agrietamiento, ya que debido al exceso de finos y las altas absorciones de este agregado, se requiere mayor relación w/c para obtener una trabajabilidad adecuada. Una vez consolidados los morteros y concretos, se pierde el exceso de agua y es esto lo que produce las contracciones y agrietamientos en el material. Es por esto que se considera de menor calidad que la arena industrial.

Sin embargo, es importante el estudio de la arena de tajo en este proyecto ya que, por su bajo precio y facilidad de obtención (procesos poco rigurosos y materiales de mala calidad) es la más usada.

2.3.2. Arena industrial

Es una arena manufacturada, que se obtiene a partir de un proceso de extracción, trituración y cribado de material de río (Holcim, 2014).

Este material se obtiene de la misma veta que la roca que se usa para producir el agregado grueso, lo que resulta en un material de buena calidad, bajas absorciones y dureza adecuada. Además, con el proceso de cribado se procura que el material resultante cumpla con las especificaciones de granulometría para la fabricación de concreto.

La arena industrial presenta forma y textura angular y rugosa, debido a que se obtiene del residuo de la trituración de rocas. Por su forma y textura se puede usar para producir concretos de alta resistencia, ya que se adhiere mejor al concreto endurecido. Sin embargo, en morteros presenta menor trabajabilidad debido a un menor porcentaje de finos (en comparación con la arena de tajo).

2.3.3. Hinchamiento de la arena

Este fenómeno consiste en un aumento del volumen masivo de agregado fino (arena) con respecto al volumen que ocupaba su masa seca inicial. Se da por la presencia de agua libre, ya que esta se deposita en los espacios entre partículas y debido a la tensión superficial forma un menisco (espacio libre de agua). La formación de este menisco crea capas de agua más gruesas entre las partículas de agregado, lo que las mantiene separadas y aumenta el volumen masivo. Cuando la arena se satura, el menisco se destruye por lo que el volumen se reduce (Navas, 2013).

2.4. Mortero de pega para mampostería

El mortero es una mezcla plástica de materiales usada para unir las unidades de mampostería en una sola masa estructural, de forma que sean capaces de soportar las condiciones de carga y de clima a las que se exponen (Chrysler, Baltimore, & Escobar, 2007).

El mortero de pega es una mezcla de material cementante, agregado fino y agua (Navas, 2013); debe poseer la trabajabilidad, la consistencia y la plasticidad necesarias para poder adherirse a las juntas horizontales y sobre todo a las juntas verticales. Adicionalmente, debe ser capaz de retener el agua de la mezcla el tiempo suficiente para que el albañil pueda alinear, aplomar, nivelar y ajustar correctamente cada bloque (Poveda, 2015). Por ello se deben tomar en cuenta algunas propiedades para seleccionar el tipo a utilizar, estas se clasifican de la siguiente manera:

Propiedades del mortero fresco

- Trabajabilidad (ASTM C1437)
- Retención de agua (ASTM 1506)

Propiedades del mortero endurecido

- Adherencia
- Resistencia a la compresión (ASTM C109)
- Durabilidad

Los morteros con cal se han utilizado durante siglos y forman una mezcla adecuada, ya que el cemento provee la fuerza, la cal ayuda a mejorar la trabajabilidad y la arena constituye un

relleno de bajo costo. Los morteros de pega se pueden clasificar en cuatro tipos de acuerdo con la norma ASTM C270, según la variación que se da en sus propiedades. Estos son:

M: alta resistencia en compresión y adherencia con unidades

S: moderada resistencia en compresión y adherencia con unidades.

N: baja resistencia en compresión y adherencia con unidades.

O: muy baja resistencia en compresión y adherencia con unidades.

(Klingner, 2012)

Las categorías M, S y N corresponden a las clases A, B y C especificadas en el CSCR 2010, y únicamente las clases A y B son permitidas en Costa Rica para la construcción de mampostería estructural. El CSCR 2010 también presenta un cuadro con las relaciones volumétricas de materiales para cada uno de los tipos de mortero, el cual se muestra en el Cuadro 1. La resistencia mínima requerida a compresión es de 175 kg/cm² para morteros Clase A (M), 126 kg/cm² para morteros Clase B (S) y 53 kg/cm² para Clase C (N).

Cuadro 1. Proporciones por volumen para la fabricación de mortero de pega

Combinación de materiales cementantes	Tipo de Mortero	Cemento	Cal Hidratada	Arena húmeda y suelta
Cemento-cal hidratada	A	1	¼	3
Cemento-cal hidratada	B	1	½	4
Cemento-cal hidratada	C	1	¾	5

Fuente: CSCR, 2010

2.4.1. Procedimiento de pega de bloques de mampostería

El método de uso del mortero de mampostería se detalla a continuación.

Se esparce el mortero de pega en franjas longitudinales en la cara superior del bloque ya colocado y en las laterales del contacto del bloque por colocar, procediendo a colocarlo presionando hacia abajo y lateralmente contra el bloque adyacente, hasta obtener la posición precisa (Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto, 2007). Las sisas deben acabarse antes de que el mortero de pega endurezca. El proceso puede observarse en las Figuras 2 y 3.

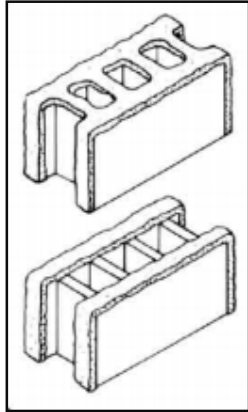


Figura 2. Esparcido del mortero en las caras laterales del bloque

Fuente: Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto, 2007

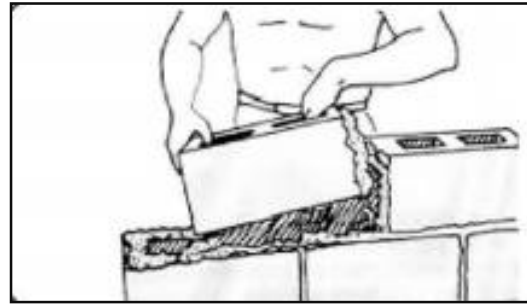


Figura 3. Colocación de un bloque en sitio

Fuente: Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto, 2007.

Para el proceso de pega de bloques también se deben tomar en cuenta las siguientes especificaciones para su correcta colocación:

- El ancho de la sisa inicial debe tener entre 0,6 cm y 2,5 cm. Las sisas entre bloques deben tener entre 0,6 cm y 1,5 cm de espesor.
- Se debe limpiar el exceso de mortero que es expulsado de la junta, interna y externamente, al ejercer presión sobre los bloques.
- En la mampostería hueca, el mortero debe cubrir todo el espesor de las paredes externas.

(Navas, 2013)

2.5. Prueba de hipótesis t de Student

Esta prueba se utiliza para comparar medias de dos grupos de datos cuando el tamaño de la muestra es menor a 30. El procedimiento consiste en determinar, con base en la información dada por la muestra, un criterio de decisión que nos permite decidir si se rechaza o no la hipótesis que hemos formulado o nos han propuesto (Quintana, 1996).

En este trabajo se utiliza la prueba para muestras independientes de dos colas con un intervalo de confianza del 90%. La prueba para dos colas plantea las siguientes hipótesis:

Hipótesis nula: $H_0: \mu = \mu_0$

Hipótesis alternativa: $H_1: \mu \neq \mu_0$

De acuerdo con lo anterior, se debe rechazar la hipótesis nula cuando el estadístico P sea menor a 0,05 y en ese caso se puede afirmar que se tiene una diferencia significativa entre las medias de las series de datos.

CAPÍTULO 3: PROCESO EXPERIMENTAL

3.1. Pruebas a realizar a la cal

3.1.1. Pruebas químicas (ASTM C207-06)

Se obtuvo la composición química de las cales en cuanto a porcentajes de hidróxido de calcio, hidróxido de magnesio y dióxido de carbono, y se compararon con las proporciones que se solicitan en la norma ASTM C207-06 (2011), las cuales se muestran en el Cuadro 2. Para la obtención de la composición química de cada una de las cales, se llevaron las muestras al laboratorio químico Lambda.

Cuadro 2. Requisitos de composición química para la cal hidratada usada en mampostería

	Tipo N (cal hidratada normal)	Tipo NA (cal hidratada normal con inductor de aire)	Tipo S (cal hidrata especial)	Tipo SA (cal hidrata especial con inductor de aire)
Hidróxido de Calcio y de Magnesio, min, %	95	95	95	95
Dióxido de Carbono, máx. %				
- Si la muestra es tomada en el sitio de fabricación	5	5	5	5
- Si la muestra es tomada en otro sitio	7	7	7	7
Óxidos no hidratados, máx. %	-	-	8	8

Fuente: ASTM C207-06 (2011)
Modificado por: Autora, 2016

3.1.2. Ensayo de granulometría (ASTM C110-14)

La determinación de la granulometría de la cal se lleva a cabo según la sección 15.4 de la norma ASTM C110-14, la cual permite obtener los porcentajes retenidos en las mallas N°30 y

N°200 después de lavar una muestra de cal a una presión de $69 \text{ kPa} \pm 1,7 \text{ kPa}$ sobre las mallas. La norma indica que el porcentaje retenido en la malla N°30 no debe superar el 0,5%.

3.2. Pruebas a realizar a la arena

3.2.1. *Peso Unitario (ASTM C29)*

Este ensayo permite conocer el peso de un volumen determinado de agregado seco, tomando en cuenta el volumen de material sólido y el de vacíos. Se obtiene tanto el peso unitario suelto, como el envarillado (la muestra se compacta previamente con una varilla de punta redondeada de 16 mm de diámetro) y ambos se toman con el mismo volumen, el cual corresponde al recipiente que se muestra en la Figura 4. Es común que el valor del peso unitario se ubique entre 1360 kg/m^3 y 2000 kg/m^3 .



Figura 4. Equipo utilizado para la prueba de peso unitario de agregado fino

3.2.2. *Granulometría (ASTM C144)*

La graduación (o granulometría) es la distribución de partículas de un agregado según su tamaño. Para obtenerlo, se debe tamizar una muestra del material seco de forma mecánica a través de una serie de mallas apiladas una sobre otra en orden descendente de abertura (Navas, 2013). Además, se obtiene el porcentaje de material fino presente en el material, al lavar una muestra a través de la malla N°200.

Para este ensayo se utiliza la norma ASTM C144, la cual establece los límites de granulometría para el agregado fino utilizado en la elaboración de mortero, mostrados en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Límites de granulometría para agregado fino manufacturado para morteros de mampostería, según la norma ASTM C144

Tamaño de malla	Porcentaje pasando
4,75 mm (N° 4)	100
2,36 mm (N° 8)	95 a 100
1,18 mm (N° 16)	70 a 100
600 μm (N° 30)	40 a 75
300 μm (N° 50)	20 a 40
150 μm (N° 100)	10 a 25
75 μm (N° 200)	0 a 10

Fuente: ASMT C144-11

Modificado por: Autora, 2016



Figura 5. Mallas apiladas verticalmente, colocadas en el agitador mecánico para análisis granulométrico

3.2.3. Gravedad específica (ASTM C128)

La gravedad específica se define como la densidad de un material (en este caso el agregado) entre la densidad del agua. Es adimensional; permite establecer relaciones peso-volumen en el diseño de mezclas y realizar cálculos de cantidades de agregados (Navas, 2013).

La gravedad específica se obtiene con el procedimiento descrito en la norma ASTM C128, el cual solicita que se lleve una muestra de agregado a la condición saturada superficie seca, y se compare su peso dentro de un picnómetro lleno con agua destilada, con el peso del picnómetro solo con agua destilada y el peso seco de la muestra. Los valores típicos de G_{bs} varían entre 2,5 y 2,8.

3.2.4. Humedad e hinchamiento

Para obtener el hinchamiento no se cuenta con una norma para el procedimiento a seguir, por lo que se llevó a cabo de la siguiente forma: se colocaron muestras pequeñas, de misma masa, en diferentes bolsas. A cada muestra se le agregó una cantidad diferente de agua iniciando con la cantidad necesaria para obtener la saturación de la muestra y llegando aproximadamente hasta un 10% de agua libre (el porcentaje de absorción se obtuvo previamente con la norma ASTM C128 en el ensayo de gravedad específica). Cada muestra se dejó debidamente cerrada durante 24 h y después de esto se midió el volumen ocupado por cada muestra de arena con ayuda de una probeta.

Se obtuvo también la humedad natural de la arena almacenada en los sacos, para realizar cálculos posteriores de cantidad de materiales.

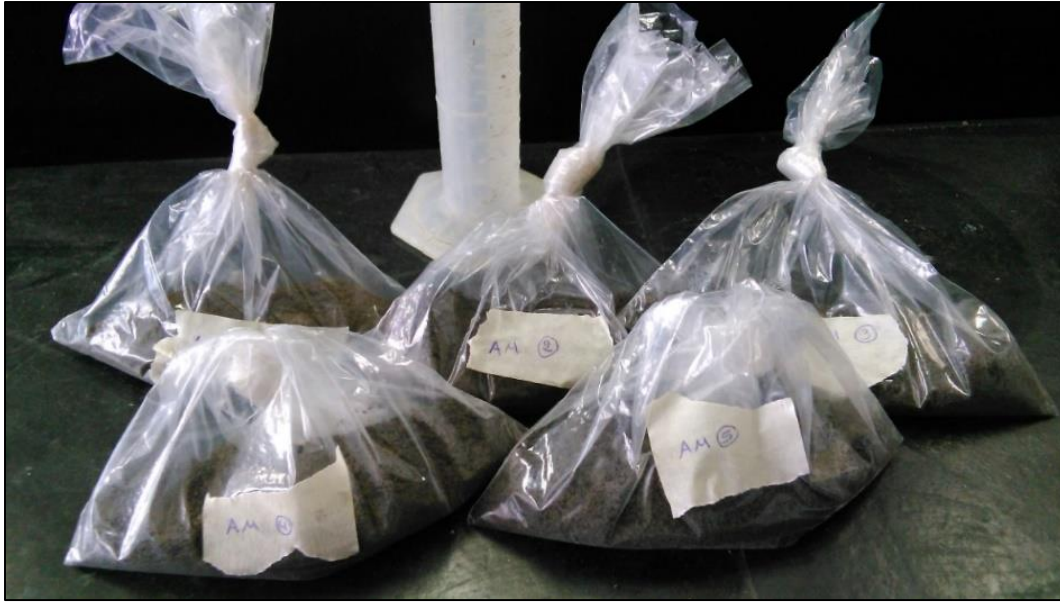


Figura 6. Preparación de muestras para la prueba de hinchamiento

3.3. Pruebas a realizar al cemento

3.3.1. Gravedad específica (ASTM C188)

Esta propiedad del cemento se obtiene con la norma ASTM C188 y resulta de utilidad en los cálculos necesarios para las proporciones de la mezcla y para algunas propiedades del mortero. El proceso consiste en tomar el peso de un picnómetro de le Chatelier con Kerosene y la muestra de cemento (ver Figura 7), luego de liberar el aire atrapado en el material. Por último, se realizan los cálculos necesarios con la calibración del picnómetro para obtener el peso específico del cemento, el cual en el caso del cemento para uso general se espera que tenga un valor aproximado a 2,95.



Figura 7. Picnómetro le Chatelier utilizado para determinar el peso específico del cemento

3.4. Pruebas a realizar a los bloques de concreto

3.4.1. Absorción y área neta (ASTM C140)

Se debe determinar el área neta para garantizar que los bloques cumplan con las especificaciones de resistencia sobre el área neta del CSCR 2010. Además, la absorción permite saber aproximadamente la cantidad de agua que absorbe la unidad.

Para determinar tanto la absorción como el área neta de los especímenes se sigue un único procedimiento, que consiste en tomar el peso de los especímenes bajo diferentes condiciones: primero se toma el peso del bloque sumergido en agua (peso aparente) después de haber sido saturado durante 24 h; luego, se seca la superficie del espécimen y se toma su peso saturado; por último, se seca al horno y se obtiene el peso seco de la unidad. La norma establece que se debe realizar el procedimiento a tres especímenes y que se debe tomar la medida de la altura de cada bloque.

3.4.2. Resistencia a la compresión (ASTM C140)

Se deben fallar los bloques a compresión para determinar si cumplen con los requerimientos del CSCR 2010. Antes de fallar los bloques (al menos 72 h antes) se deben tomar las medidas

de cada unidad y realizar el proceso de capeo con una mezcla de cemento de alta resistencia y yeso. La norma establece que se debe realizar el procedimiento a tres especímenes y que se debe presentar el resultado como la resistencia a compresión sobre el área neta del bloque. En el CSCR (2010), se establece que la resistencia mínima de los bloques Clase A debe ser de 13,0 MPa en el promedio de tres unidades y de 11,8 MPa cada unidad individual.

3.5. Pruebas a realizar al mortero

3.5.1. Prueba de flujo (ASTM C1437)

La prueba de flujo permite medir en el laboratorio la trabajabilidad del mortero y calibrar la cantidad de agua necesaria para la mezcla. En este ensayo, el flujo del mortero se mide por el incremento en el diámetro de un cono de mortero después de 25 golpes en una mesa de flujo estándar, como se observa en la Figura 8. El mortero debe presentar un flujo de $110 \pm 5\%$ para que cumpla los requerimientos de la norma ASTM C1437.



Figura 8. Muestra de mortero en la mesa de flujo

3.5.2. Contenido de aire (ASTM C185)

El aire presente en la mezcla permite un aumento en la trabajabilidad, ya que los vacíos son llenados por burbujas de aire que facilitan el roce entre las partículas. Sin embargo, un alto contenido de aire puede disminuir la durabilidad y la resistencia del mortero endurecido.

La norma ASTM C185 recomienda proporciones para realizar el ensayo con arena Ottawa. Sin embargo, en este caso se utilizan las proporciones acordes a cada mezcla de mortero que se está evaluando, por lo que se adaptó la fórmula a dichas proporciones y al G_s de la arena utilizada. El procedimiento consiste en tomar una muestra de mortero con un flujo de $87,5 \pm 7,5\%$ al someterse a 10 golpes en la mesa de flujo y moldearla en un recipiente estándar como se indica en la norma ASTM C185 para obtener su peso. La norma ASTM C270 establece un valor máximo de contenido de aire de 7% para los morteros tipo M y S con cemento y cal hidratada.



Figura 9. Equipo utilizado para la prueba de contenido de aire en el mortero

3.5.3. Retención de agua (C1506)

Es la propiedad del mortero que previene la pérdida rápida de agua de la mezcla por la absorción de los bloques de mampostería y por el aire (Drysdale & Hamid, 2008). Al agregar cal a los morteros, se espera un aumento en la retención de agua y por lo tanto un aumento en su trabajabilidad. Sin embargo, esto puede llevar a que el mortero pierda resistencia, como se observa en la Figura 10.

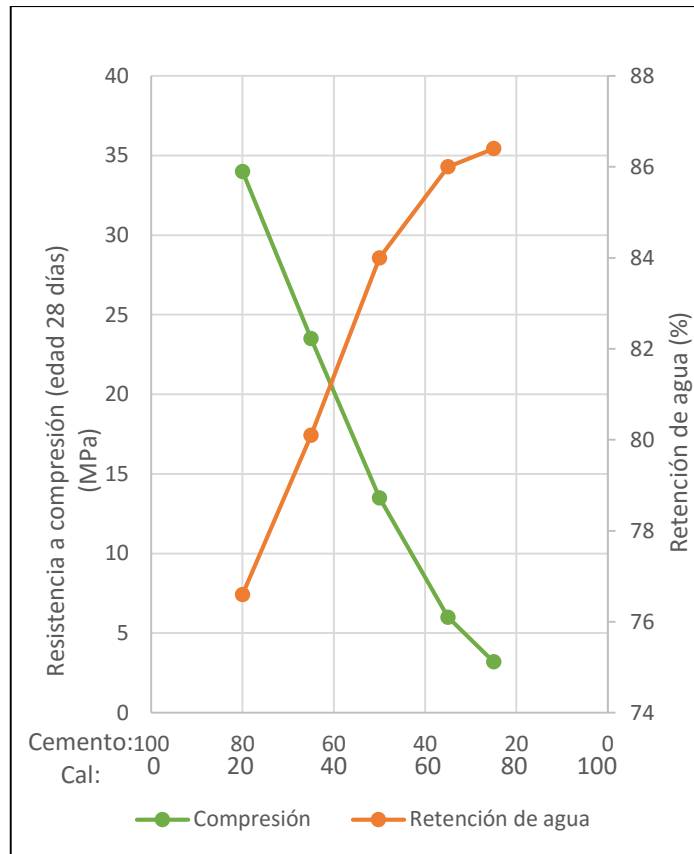


Figura 10. Relación de la composición del mortero, resistencia a compresión y retención de agua (Relación cemento+cal: arena=1:3, por volumen)

Fuente: Drysdale & Hamid, 2008

Para este ensayo se utiliza el equipo mostrado en la Figura 11, el cual permite someter el mortero a una succión de $7,0 \pm 0,4$ kPa durante 60 s, después de la cual se realiza una prueba de flujo cuyo resultado se expresa como un porcentaje del flujo de la mezcla antes de someterse a succión y este porcentaje corresponde a la retención de agua del mortero. La norma ASTM C270 establece un valor mínimo de retención de agua de 75% para los morteros tipo M y S con cemento y cal hidratada.



Figura 11. Equipo utilizado para el ensayo de retención de agua del mortero

3.5.4. Resistencia a la compresión (ASTM C109)

Se mide la resistencia a compresión con cubos de mortero de 50 mm de arista como los mostrados en la Figura 13, los cuales se fallan a 7 y a 28 días. Se construyen con moldes estándar como los que se observan en la Figura 12 y se moldean de acuerdo con lo solicitado en la norma ASTM C109. Una vez moldeados, se introducen a la cámara húmeda durante 24 h, después de las cuales se desmoldan y se mantienen en agua con cal hasta el día de su falla. El CSCR 2010 establece una resistencia mínima de 175 kg/cm² para mortero tipo M (Clase A), 126 kg/cm² para tipo S (Clase B) y 53 kg/cm² para tipo N (Clase C).



Figura 12. Moldes utilizados para la elaboración de los cubos de mortero de 50 mm



Figura 13. Cubos de mortero de 50 mm

3.6. Pruebas a realizar a la mampostería

3.6.1. Prismas de mampostería (ASTM C1314)

Los prismas permiten obtener el f'_m , el cual corresponde a la resistencia a compresión de la mampostería. Los prismas se construyen dentro de una bolsa plástica, la cual se mantiene cerrada desde el momento de construcción y se retira 48 h antes de la falla, los especímenes además se deben someter a capeo al menos 72 h antes de la falla.

Para este estudio se fabricaron 3 prismas sin relleno para cada tipo de mortero y se fallaron a la edad de 28 días. Se recomienda que tengan una relación de altura a espesor entre 1,33 y 5,0. Además, el CSCR (2010) exige una resistencia mínima de los prismas de mampostería como se establece en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Resistencia mínima para los prismas de mampostería a 28 días, según el CSCR 2010

Mampostería	f'_m sobre el área neta (kg/cm ²)
Clase A (M)	100
Clase B (S)	70
Clase C (N)	60

Fuente: CSCR, 2010

Modificado por: Autora, 2016



Figura 14. Proceso de construcción, almacenamiento y falla de los prismas de mampostería

3.6.2. Cruces de mampostería

Este es un ensayo que se utiliza para medir la adherencia del mortero de pega en la mampostería. Consiste en construir especímenes de acuerdo con la configuración mostrada en la Figura 15, dejando un espacio de 1 cm entre los bloques del centro, para el desplazamiento durante la falla. Las celdas de los bloques se dejan vacías para medir la adherencia solamente entre el bloque y el mortero.

Se construyeron cuatro cruces por cada tipo de mortero, las cuales una vez construidas se cubrieron con un plástico hasta 48 h antes de la falla, permitiendo que la muestra mantuviera su humedad. El curado se realizó únicamente durante las 48 h posteriores a la construcción y consistió en humedecer las sisas de forma manual en la mañana y en la tarde.

Estos especímenes se fallan con un gato hidráulico, colocados sobre una base móvil, con el fin de que esta disminuya la fricción provocada por el desplazamiento lateral. Para absorber posibles concentraciones de esfuerzos, se coloca una pieza de neopreno en el marco de acero que realiza la reacción y además el gato hidráulico cuenta con una cabeza móvil que le permite absorber los posibles desplomes de la muestra. En el gato hidráulico se coloca un acople extra que le permite alcanzar la longitud, y la base móvil para la muestra es colocada sobre un banco de madera para alcanzar la altura a la que se encuentra el gato hidráulico. Este montaje puede verse en la Figura 17.

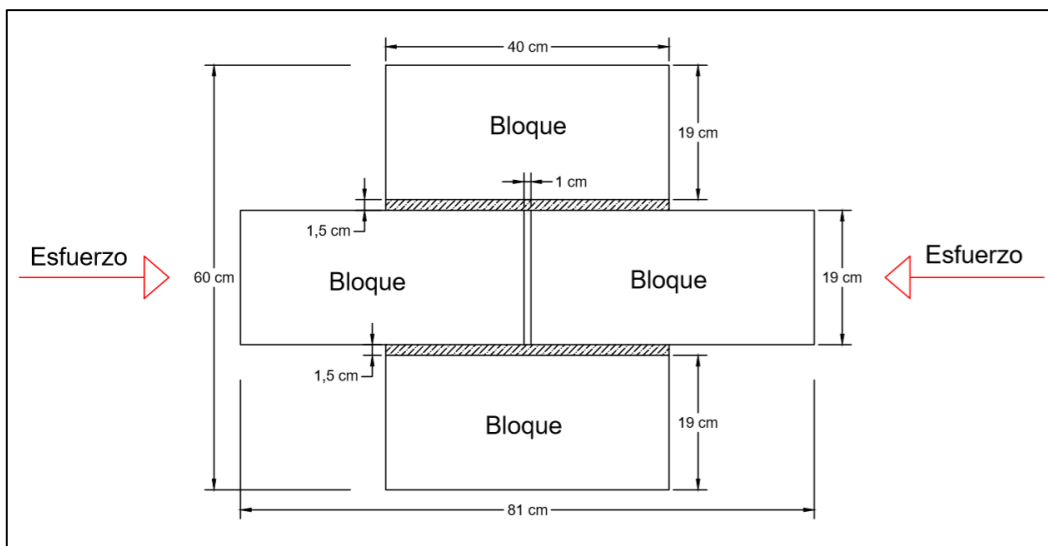


Figura 15. Configuración de las cruces de mampostería

Fuente: Arias, 2012

Modificado por: Autora, 2016



Figura 16. Proceso de fabricación y falla de las cruces de mampostería

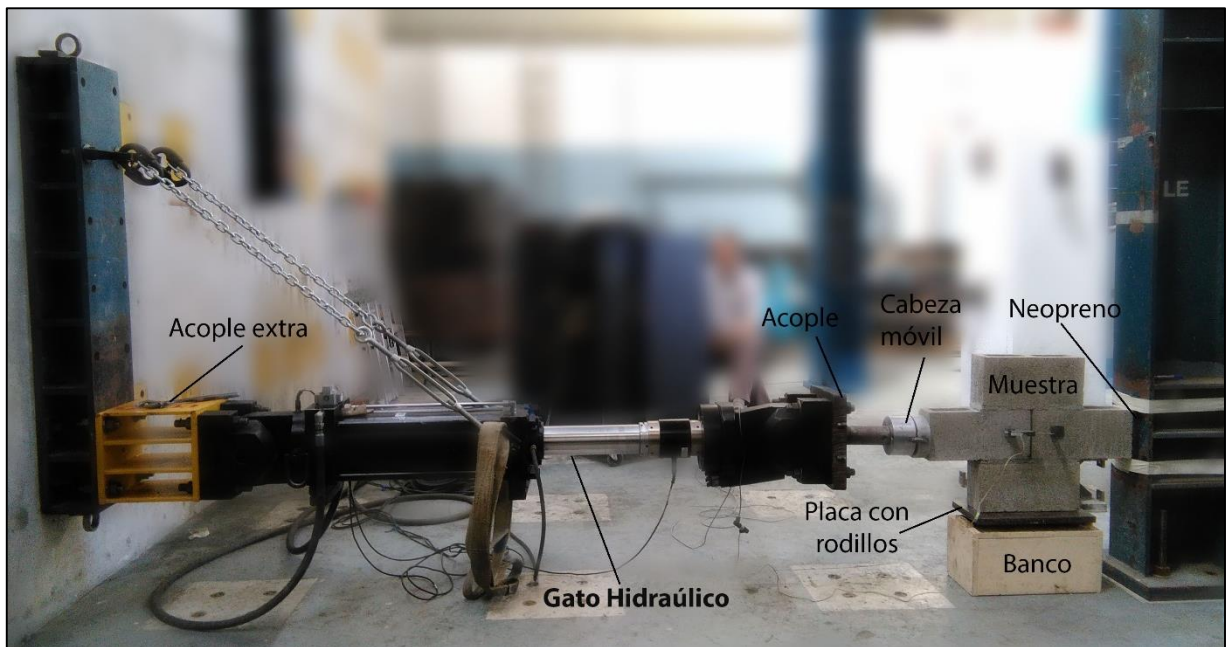


Figura 17. Montaje para la falla de las cruces

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS

4.1. Caracterización de la cal

4.1.1. Pruebas químicas

Se analizaron las muestras de cal de tres caleras para obtener los porcentajes de hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), hidróxido de magnesio (Mg(OH)_2) y dióxido de carbono (CO_2). Las caleras analizadas fueron:

- Industrias de Calcio, ubicada en Barra Honda, Guanacaste (Cal 1).
- Calera Roy Villalobos, ubicada en San Miguel, Desamparados (Cal 2).
- Calera Alvarado, ubicada en San Miguel, Cartago (Cal 3).

Los resultados de dichos análisis químicos se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Resultados de las pruebas químicas realizadas a la cal

# Cal	Resultados químicos (%)			
	Ca(OH)_2	Mg(OH)_2	CO_2	$\text{Ca(OH)}_2 + \text{Mg(OH)}_2$
1	93,75	1,03	1,43	94,78
2	79,1	2,03	6,62	81,13
3	32,65	2,56	33,69	35,21

Según la norma ASTM C207-06, el porcentaje mínimo de hidróxido de calcio y de magnesio debe ser de 95% y el contenido de dióxido de carbono no debe sobrepasar el 5% (ver Cuadro 2). Sin embargo, según los resultados observados en el Cuadro 5, ninguna de las cales cumple todos los requisitos de la norma. La cal 1 es la más cercana a cumplir ya que su contenido de dióxido de carbono no sobrepasa el 5% permitido y su porcentaje de hidróxido de calcio y magnesio es muy cercano al 95% mínimo. En el caso de la cal 3, es la que presenta características químicas más desfavorables, ya que sus resultados no cumplen ni se aproximan a ninguna de las dos condiciones solicitadas.

4.1.2. Granulometría

En el Cuadro 6 se muestran los resultados de la prueba de granulometría efectuada a la cal. En cada caso se realizó un único ensayo.

Cuadro 6. Resultados de granulometría de la cal

# Cal	Retenido %	
	Nº 30	Nº200
1	0,42	2,86
2	14,47	25,29
3	21,62	44,90

La cal que presenta la granulometría más adecuada para fabricar mortero es la cal 1, ya que según la norma ASTM C110-11 el porcentaje retenido en la malla Nº30 debe ser menor a 0,5%. Las cales 2 y 3 presentan porcentajes retenidos en la malla Nº30 mayores a lo permitido, por lo que no cuentan con una granulometría adecuada, siendo la cal 3 la que muestra condiciones más desfavorables.

4.2. Caracterización del agregado fino

En este estudio se utilizaron dos tipos de agregado fino con el fin de comparar los efectos de la cal en agregados con diferentes características. Los agregados utilizados se muestran en la Figura 18 y fueron:

-Arena de tajo, proveniente del tajo La Florencia, ubicado en La Garita, Alajuela (arena de tajo).

-Arena industrial, proveniente de Guápiles, Limón (arena industrial).

En el Cuadro 7 se presentan las principales propiedades de ambas arenas y en la Figura 19 se comparan ambas granulometrías con los límites solicitados por la norma ASTM C144 para arena manufacturada.

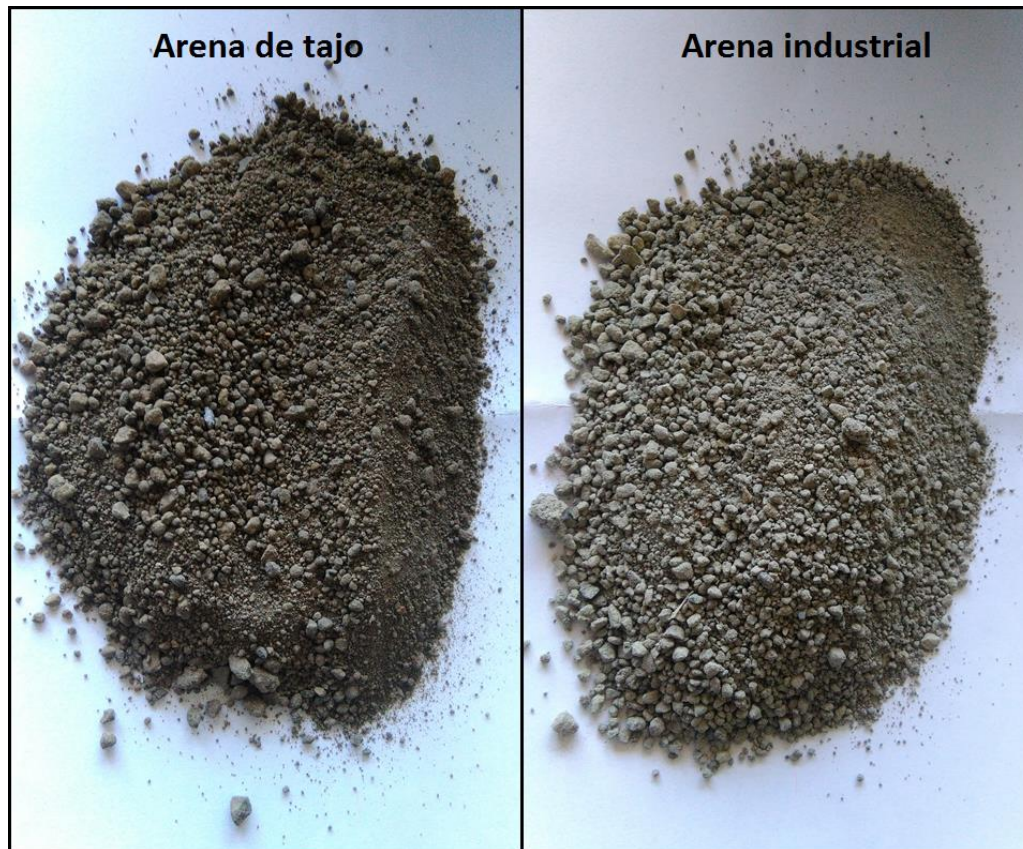


Figura 18. Agregados finos utilizados para la elaboración de los morteros

Cuadro 7. Principales propiedades para caracterizar los agregados finos

Propiedad	Agregado fino	
	<i>Arena de tajo</i>	<i>Arena industrial</i>
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1145	1543
Gravedad específica	2,36	2,73
Absorción (%)	9,43	1,54
Módulo de finura	3,36	2,44

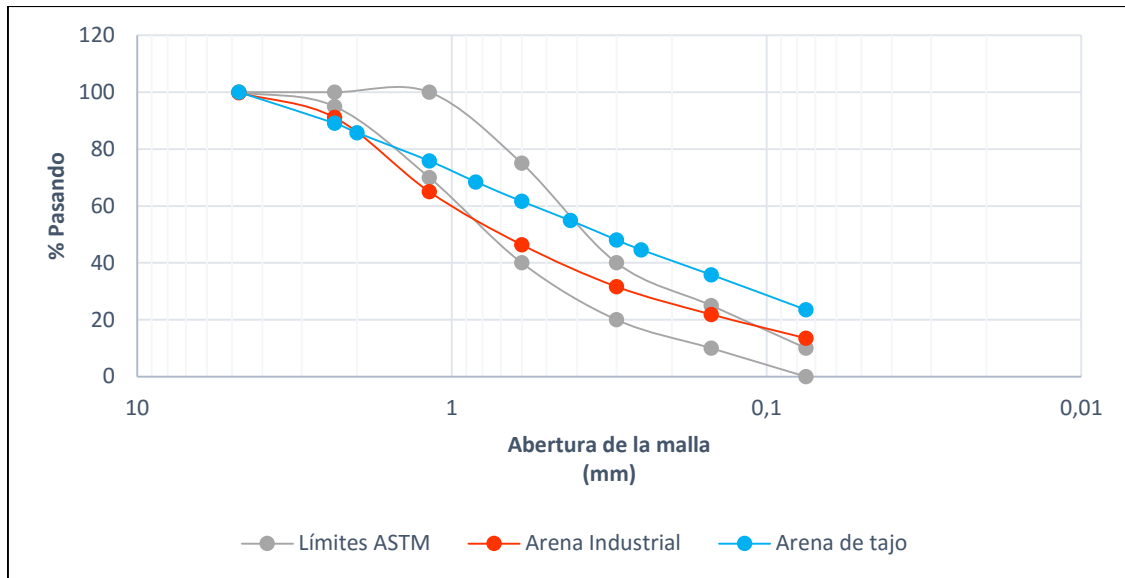


Figura 19. Curva granulométrica de ambas arenas a utilizar

Como se observa en el Cuadro 7, la arena de tajo es un material más liviano, absorbente y con mayor contenido de finos en comparación con la arena industrial. La Figura 19 presenta una comparación entre las granulometrías de los agregados finos utilizados y la granulometría solicitada por la norma ASTM C144. Como se observa, ninguna cumple con lo solicitado, pero la arena industrial se acerca más a las condiciones necesarias de un agregado fino apto para fabricar mortero de pega para mampostería. En el apéndice A.2 se presentan otras propiedades y una descripción detallada de la granulometría de ambos agregados.

4.3. Caracterización del cemento y los bloques

El cemento utilizado es para uso general (UG RTCR 383:2004) con una resistencia a la compresión de 28 MPa a los 28 días y cuenta con una gravedad específica de 2,95.

Los bloques son Clase A (tipo M) y cumplen con los requisitos estipulados en el CSCR 2010, el cual pide una resistencia promedio a la compresión medida sobre el área neta a los 28 días de edad, no menor que 133 kg/cm² y un mínimo para cada muestra individual de 120 kg/cm². Se puede ver en la sección A.3 de apéndices los resultados obtenidos.

4.4. Caracterización de los morteros

Para este estudio se utilizaron 16 diferentes mezclas de mortero, las cuales se pueden ver en la Figura 1; se dosificaron por volumen con las proporciones que especifica el CSCR 2010 para morteros Tipo M y Tipo S (ver Cuadro 1).

4.4.1. Prueba de flujo

Con esta prueba se calibró el agua necesaria para cada una de las mezclas, de modo que se obtuviera un flujo de $110 \pm 5\%$, como lo pide la norma.

Como se observa en la Figura 20, las mezclas con cal requieren de mayor contenido de agua para cumplir con el flujo solicitado. Sin embargo, dichas mezclas presentan una consistencia más blanda, trabajable y que permite un moldeo más uniforme.

Además, la arena de tajo, al contener una cantidad mayor de finos, forma mezclas más pastosas, que al ser moldeadas en cubos dan como resultado un elemento más compacto y con menor cantidad de vacíos, pero es más susceptible a sufrir contracciones.

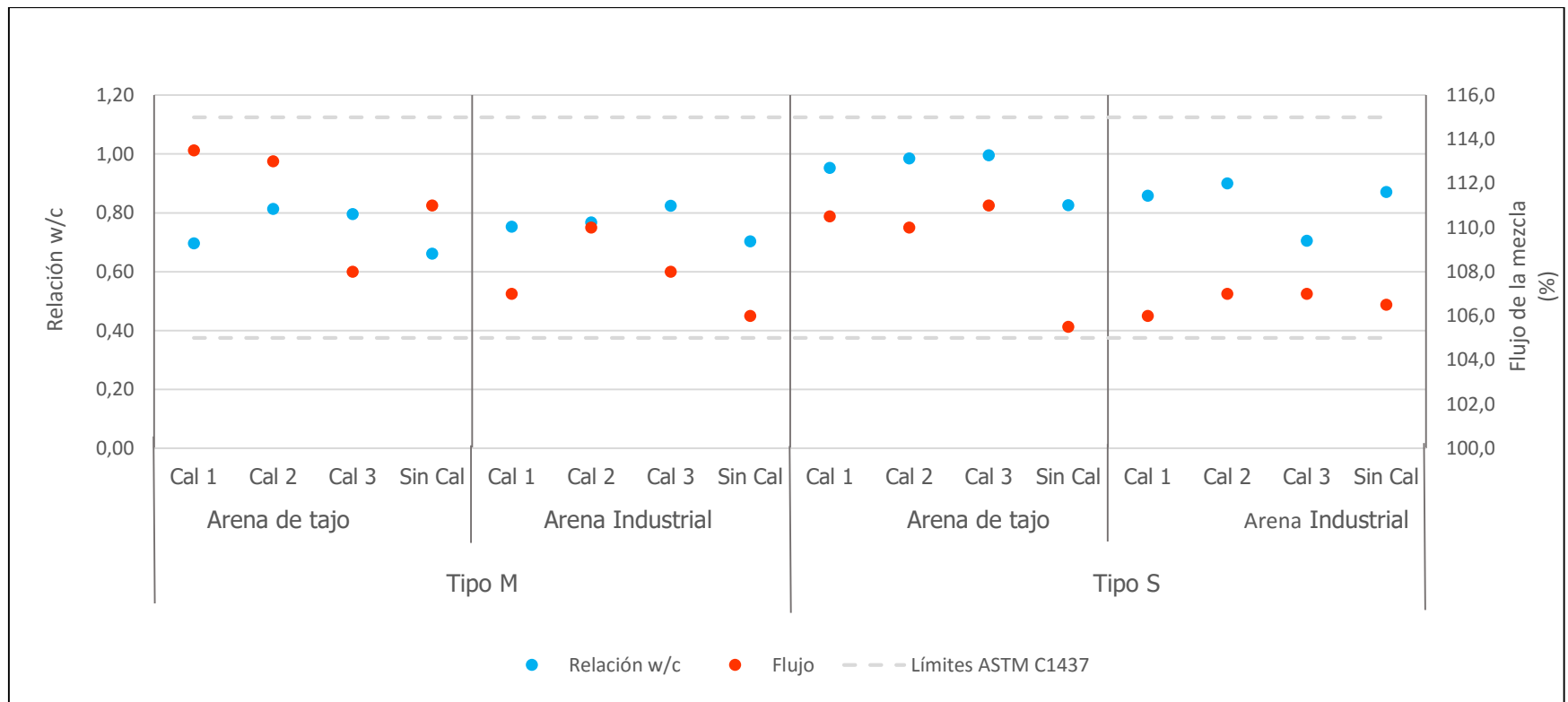


Figura 20. Resumen de relación w/c de las mezclas de mortero y su respectivo flujo

4.4.2. Retención de agua

Como se puede ver en el Cuadro 8, en todos los casos se mejora la retención de agua al incorporar cal al mortero. Esto se percibía al momento de retirar la succión y moldear nuevamente para realizar la prueba de flujo, ya que los morteros que contenían cal se mantenían suaves y trabajables, mientras los morteros sin cal mostraban una consistencia dura y difícil de moldear.

Cuadro 8. Resumen de resultados de porcentaje de retención de agua del mortero, según ASTM C1506

Retención de agua	Tipo M	% variación		Tipo S	% variación	
		<i>vs mín ASTM C270</i>	<i>vs. Sin cal</i>		<i>vs mín ASTM C270</i>	<i>vs. Sin cal</i>
ATSM C270	≥75%	-	-	≥75%	-	-
Arena de tajo						
Sin Cal	53%	-30%	-	55%	-27%	-
Cal 1	79%	5%	49%	80%	6%	45%
Cal 2	69%	-8%	31%	64%	-15%	16%
Cal 3	75%	0%	42%	66%	-12%	21%
Arena industrial						
Sin Cal	55%	-27%	-	72%	-4%	-
Cal 1	89%	19%	63%	88%	18%	23%
Cal 2	90%	20%	64%	87%	16%	21%
Cal 3	87%	16%	59%	81%	9%	14%

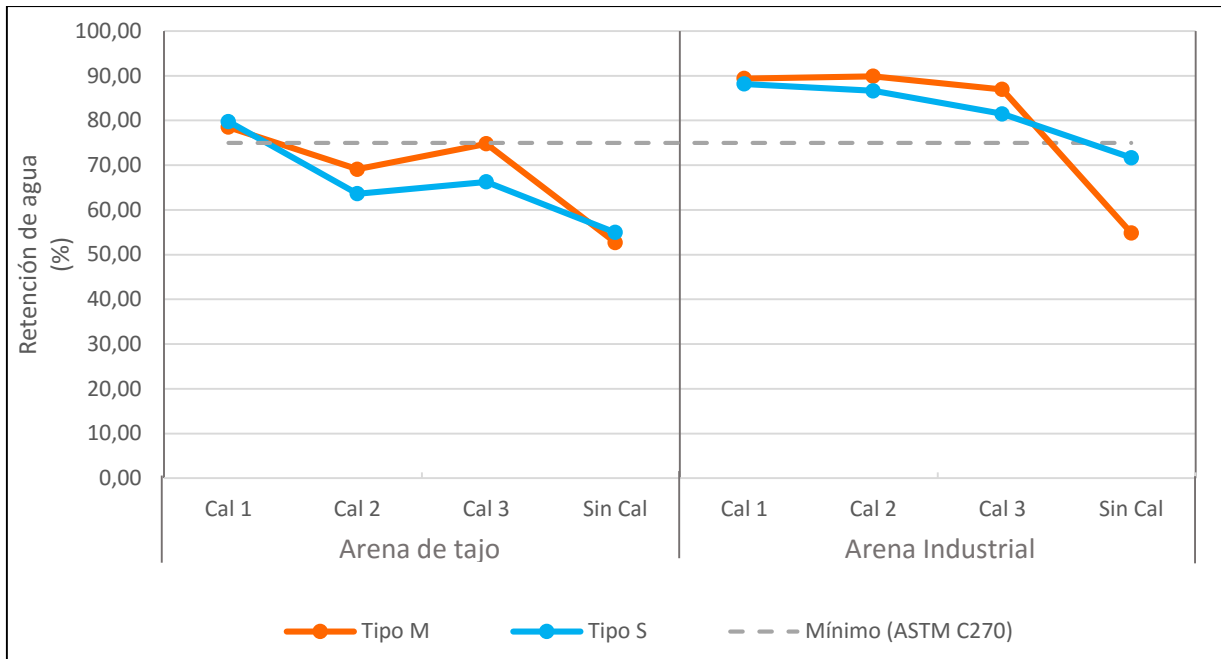


Figura 21. Comparación de resultados de retención de agua en el mortero

Si se comparan los resultados obtenidos con el mínimo de 75% solicitado por la norma, se obtiene que, en el caso de la arena industrial, todos los morteros con cal cumplen con la norma, mientras los morteros sin cal, tanto tipo M como tipo S tienen una retención de agua menor a la solicitada. Es decir, el agregar cal (sin importar su calidad) a la mezcla de mortero con arena industrial sí mejora la retención de agua y, como puede verse en el Cuadro 8, los resultados obtenidos con cada cal son similares.

Por su parte, los morteros con arena de tajo también aumentan la retención de agua al agregar cal a la mezcla. Sin embargo, no todos alcanzan el mínimo requerido, como se puede ver en la Figura 21, donde el mejor resultado se obtiene con la Cal 1. Es decir, en el caso de la arena de tajo, las condiciones de la cal sí representan una diferencia en cuanto al aumento de retención de agua.

Según el Cuadro 9, existe evidencia estadística para afirmar que la retención de agua de los morteros con cal es diferente a la de los morteros sin cal, en ambas arenas. Por lo tanto, se puede afirmar que se obtiene una mejoría significativa en la retención de agua al agregar cal a la mezcla de mortero, tanto en tipo M como tipo S. Además, existe diferencia significativa en cuanto al tipo de arena que se utiliza, obteniéndose mejores resultados al usar arena industrial, como se ve en la Figura 21.

Cuadro 9. Comparación de resultados de retención de agua, con la prueba estadística t de Student

Comparación de morteros	Valor P para distribución de dos colas	
	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo: Sin cal vs con cal	0,001	0,043
Arena industrial: Sin cal vs con cal	1,62E-06	0,004
Sin cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,490	0,033
Con cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,000	0,001

4.4.3. Contenido de aire

Uno de los factores que podrían determinar la trabajabilidad de una mezcla de mortero, es su contenido de aire, y en algunos casos se utilizan incluso de aire para obtener una mezcla más plástica. Sin embargo, como se puede ver en el Cuadro 10, agregar cal a la mezcla no suele representar un aumento en su contenido de aire, pero sí en su trabajabilidad.

Cuadro 10. Resumen de resultados de contenido de aire en el mortero, según ASTM C270

Contenido de aire	Tipo M	% variación		Tipo S	% variación	
		vs. Mín ASTM C270	vs. Sin cal		vs. Mín ASTM C270	vs. Sin cal
ATSM C270	≤ 7%		-	≤ 7%		-
Arena de tajo						
Sin Cal	9%	26%	-	9%	29%	-
Cal 1	9%	29%	2%	8%	11%	-14%
Cal 2	7%	6%	-16%	8%	12%	-14%
Cal 3	8%	13%	-10%	7%	-2%	-24%
Arena industrial						
Sin Cal	4%	-48%	-	3%	-60%	-
Cal 1	2%	-65%	-33%	2%	-75%	-38%
Cal 2	2%	-71%	-43%	2%	-65%	-14%
Cal 3	2%	-65%	-33%	1%	-80%	-50%

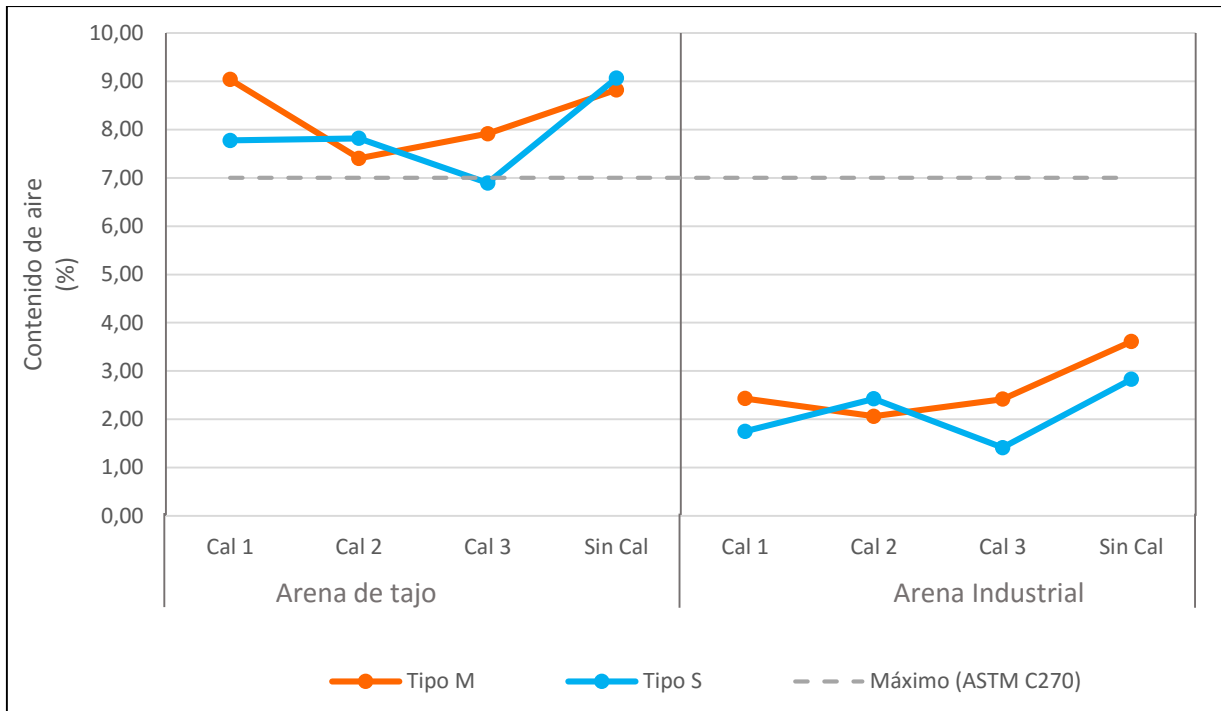


Figura 22. Comparación de resultados de contenido de aire en el mortero

En la Figura 22, se puede ver como en el caso de la arena industrial se cumple con el límite de contenido de aire en todos los casos, aún sin agregar cal a la mezcla. La arena de tajo, por su parte, presenta porcentajes de contenido de aire más altos, llegando incluso a incrementarse con la presencia de la cal 1. Esto puede deberse al alto porcentaje de material fino de esta arena. En el caso de la arena de tajo, no se cumple con el límite máximo, aunque se agregue cal. Se presenta una excepción en el mortero tipo S con cal 3, pero esta cal presenta resultados con variaciones importantes, por lo que no debe considerarse este dato como una tendencia.

El Cuadro 11 muestra la prueba de hipótesis para el contenido de aire, y como se puede ver no es consistente en cuanto a si agregar cal a la mezcla representa una diferencia significativa en su contenido de aire, por lo que se necesitaría realizar esta prueba a una muestra más grande. En cuanto a la comparación entre agregados finos, se observa que existe una diferencia significativa entre ambas arenas, teniendo un contenido de aire más alto la arena de tajo (ver Figura 22), lo que se aprecia en una mejor trabajabilidad de la mezcla con dicha arena. Sin embargo, debe recordarse que no cumple con el límite máximo establecido en ASTM C270.

Cuadro 11. Comparación de resultados de contenido de aire, con la prueba estadística t de Student

Comparación de morteros	Valor P para distribución de dos colas	
	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo: Sin cal vs con cal	0,269	0,019
Arena industrial: Sin cal vs con cal	0,009	0,176
Sin cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,012	0,013
Con cal: Arena de tajo vs arena industrial	9,26E-09	5,76E-08

4.4.4. Resistencia a compresión en cubos de mortero de 50 mm de arista

Se fallaron 3 cubos de cada mortero a 7 días de edad y 3 a 28 días de edad. En el Cuadro 12 se puede ver un resumen con el promedio de los resultados obtenidos a 28 días de edad.

Cuadro 12. Resumen de resultados de resistencia a la compresión a los 28 días, según ASTM C109

f' mortero	Tipo M (kg/cm ²)	% variación		Tipo N (kg/cm ²)	% variación	
		vs. mín CSCR 2010	vs. Sin Cal		vs. mín CSCR 2010	vs. Sin Cal
CSCR 2010	175	-	-	126	-	-
Arena de tajo						
Sin Cal	272	56%	-	237	88%	-
Cal 1	308	76%	13%	247	96%	4%
Cal 2	260	48%	-5%	237	88%	0%
Cal 3	207	18%	-24%	244	94%	3%
Arena industrial						
Sin Cal	267	53%	-	127	1%	-
Cal 1	253	45%	-5%	117	-7%	-8%
Cal 2	249	42%	-7%	111	-12%	-13%
Cal 3	168	-4%	-37%	112	-11%	-12%

En el caso de la arena de tajo, como se puede ver en la Figura 23, todos los morteros cumplen con la resistencia mínima establecida en el CSCR 2010. Sin embargo, al agregar cal se puede dar una pérdida pequeña de resistencia. La mayor pérdida se da en el caso de la cal 3 para el mortero tipo M, en la que se pierde un 24% respecto al mortero sin cal, pero la resistencia se mantiene un 18% mayor a lo solicitado en el CSCR 2010.

Por su parte, la arena industrial en el mortero tipo S al agregar cal experimenta una pérdida de resistencia que lo lleva a quedar por debajo del límite solicitado en el CSCR 2010. Esto se debe a que aún sin agregar cal se obtienen resultados muy cercanos al límite.

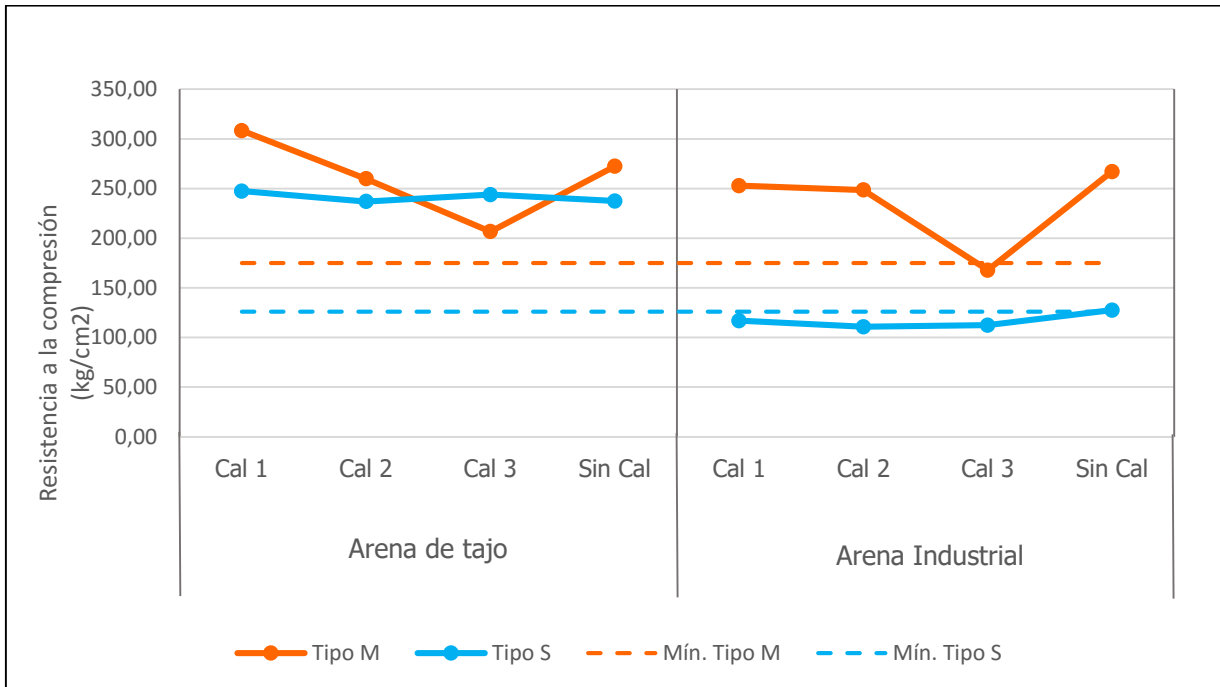


Figura 23. Comparación de resultados de resistencia a la compresión en cubos de mortero de 50 mm

La pérdida de resistencia en la arena de tajo al agregar cal se puede considerar que no es significativa, ya que como se puede ver en el Cuadro 13, el estadístico P es mayor a 0,05 tanto para tipo M como para tipo S. En el caso de la arena industrial, se tiene que en el mortero tipo M la pérdida de resistencia no es significativa, pero en el mortero tipo S sí lo es. Además, al agregar cal no se está alcanzando la resistencia solicitada en el CSCR 2010 con los morteros tipo S.

Para los morteros Tipo M, ambas arenas alcanzan resistencias similares, sea con o sin cal. Sin embargo, en el caso del mortero Tipo S sí existen diferencias significativas en cuanto a la resistencia obtenida a los 28 días de edad, obteniéndose mejores resultados con la arena de tajo. La arena de tajo además forma morteros más livianos que la arena industrial, al ser una arena con menor peso específico. Los cubos de mortero de arena de tajo tienen un peso

aproximado de 1,88 g/cm³ y los de arena industrial pesan aproximadamente 2,25 g/cm³. En la sección de apéndices, en el Cuadro B.6, se puede ver más detallada esta propiedad.

Cuadro 13. Comparación de resultados de resistencia a la compresión en cubos de mortero, con la prueba estadística t de Student

Comparación de morteros	Valor P para distribución de dos colas	
	<i>Tipo M</i>	<i>Tipo S</i>
Arena de tajo: Sin cal vs con cal	0,447	0,406
Arena industrial: Sin cal vs con cal	0,108	0,001
Sin cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,355	1,80E-04
Con cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,180	5,83E-17

4.5. Caracterización de la mampostería

Para caracterizar el comportamiento del mortero como parte de la mampostería se realizaron pruebas para determinar la resistencia a compresión y la adherencia del conjunto mortero-bloque. Además, se realizaron pruebas de flujo y de resistencia a compresión en cubos de mortero de 50 mm a la misma mezcla usada para los prismas y cruces de mampostería, para comparar los resultados obtenidos en el laboratorio con los de las mezclas fabricadas en campo por mano de obra externa.

4.5.1. Resistencia a la compresión (Prismas de mampostería)

Todos los prismas se fabricaron utilizando el mismo tipo de bloque clase A. Sin embargo, la mano de obra que fabricó los tipo M fue diferente a la que fabricó los tipo S, por lo que el tamaño de la sisa es diferente en ambos casos como se puede ver en el Cuadro 14. La diferencia en altura de los prismas también implica que se utilice un factor de corrección distinto para cada tipo de prismas, ya que este factor de corrección se obtiene de interpolar en el Cuadro 15 el valor correspondiente de acuerdo con la relación alto/ancho de los prismas.

Cuadro 14. Medidas de los prismas de mampostería

Medida	Tipo M	Tipo S
Alto (cm)	39,8	39,2
Ancho (cm)	12,0	12,0
Ancho de sisa (cm)	1,6	1,0
Alto/Ancho	3,32	3,27
Factor de corrección	1,10	1,09

Cuadro 15. Factores de corrección para prismas establecidos en ASTM C1314

alto/ancho	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0
Factor de corrección	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2

Fuente: ASTM C1314, 2014

Modificado por: Autora, 2016

Cuadro 16. Resumen de resultados de resistencia a compresión de prismas de mampostería

f'_m	Tipo M (kg/cm ²)	% variación		Tipo S (kg/cm ²)	% variación	
		vs. mín CSCR 2010	vs. Sin Cal		vs. mín CSCR 2010	vs. Sin Cal
CSCR 2010	100	-	-	70	-	-
Arena de tajo						
Sin Cal	115	15%	-	95	35%	-
Cal 1	115	15%	0%	95	36%	1%
Cal 2	100	0%	-13%	138	97%	46%
Cal 3	75	-25%	-35%	103	48%	9%
Arena industrial						
Sin Cal	117	17%	-	94	34%	-
Cal 1	109	9%	-6%	105	50%	12%
Cal 2	98	-2%	-16%	118	69%	26%
Cal 3	156	56%	34%	97	38%	3%

Al agregar cal a la mezcla de mortero se obtiene una menor f'_m en los prismas tipo M, igual que con el caso de $f'_{mortero}$. Sin embargo, en el caso de las cales 1 y 2 en mortero tipo M, se continúa cumpliendo con la resistencia solicitada para arena de tajo y se encuentra muy cerca del límite para arena industrial. La cal 3 no es consistente con sus resultados, ya que no muestra una tendencia clara debido a que es probable que su composición no sea homogénea.

En el caso de los prismas tipo S, se puede ver como en todos los casos, al agregarse cal, se mejora la resistencia de los prismas a compresión. Se debe recordar también que estos prismas fueron fabricados con bloques tipo M, y en el CSCR 2010 se especifica que, para tener mampostería tipo S, los bloques deben ser tipo S. Es por ello q los resultados obtenidos superan en más de un 30% la resistencia esperada, llegando en algunos casos a una resistencia adecuada para mampostería tipo M, como es el caso de los morteros de arena industrial con cal. Esto demuestra que quien más aporta en resistencia a la compresión es el bloque y no tanto el mortero de pega, por lo que se debería considerar en el Código Sísmico que para obtener mampostería tipo M no es necesario que el mortero sea del mismo tipo y aceptar la calificación de mampostería tipo M con un mortero tipo S, siempre y cuando los bloques sean tipo M y el mortero sea fabricado con cal y arena de buena calidad (se recomienda arena industrial, ya que presenta los mejores resultados al mezclarse con cal).

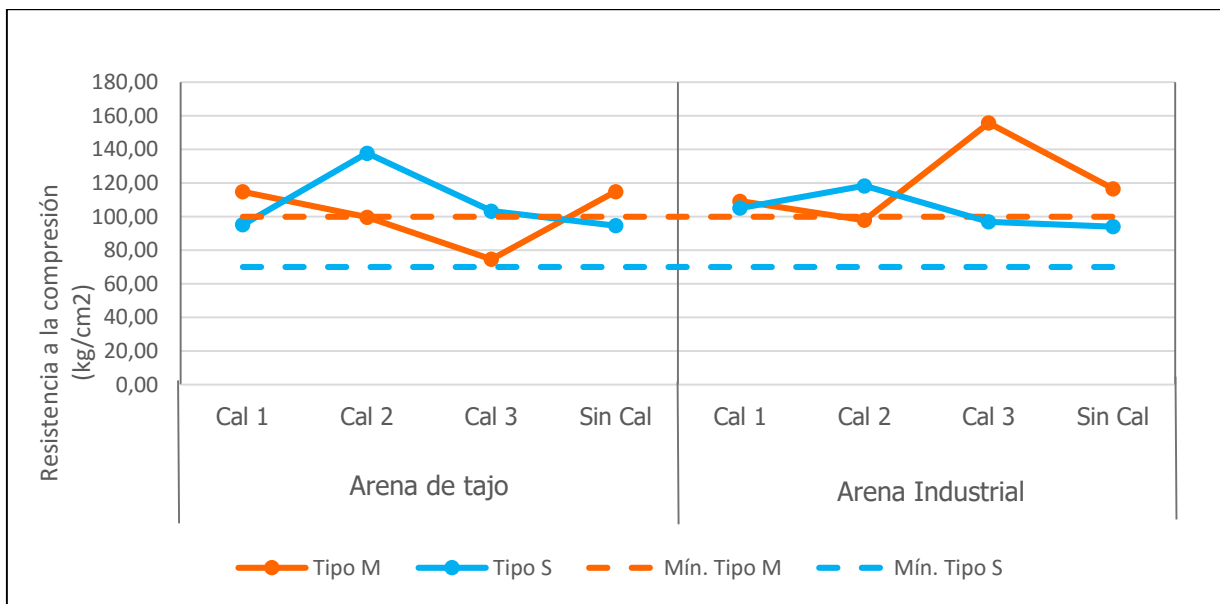


Figura 24. Comparación de resultados obtenidos en la prueba de resistencia a la compresión en prismas de mampostería

Se puede notar en la Figura 24 como todos los morteros tipo S sobrepasan la resistencia solicitada y en algunos casos se ubican también por encima del límite para tipo M. Además, se puede ver como en el caso de los morteros tipo M no es posible establecer una tendencia en cuanto a cuál de las cales presenta mejores resultados. Sin embargo, los morteros tipo S sí tienen un comportamiento similar en ambas arenas. Se puede ver como la cal 1 y la cal 2 son las que forman morteros con mayor resistencia y alcanzan el límite para tipo M, mientras en el

caso de la cal 3 y el mortero sin cal, sí se supera el límite para tipo S pero no es posible compararlo como mampostería tipo M.

En el Cuadro 17 se presenta la prueba estadística t de Student para estos resultados, según la cual no existe suficiente evidencia estadística para afirmar una diferencia significativa en el uso de la cal ni entre las arenas. Sin embargo, según los resultados que se acaban de analizar esta diferencia sí existe y aunque estadísticamente es una diferencia muy pequeña, en algunos casos dicha diferencia puede ser suficiente para que un mortero tipo S con bloques tipo M pueda ser considerado como mampostería tipo M.

Cuadro 17. Comparación de resultados de resistencia a la compresión en prismas de mampostería, con la prueba estadística t de Student

Comparación de prismas	Valor P para distribución de dos colas	
	<i>Tipo M</i>	<i>Tipo S</i>
Arena de tajo: Sin cal vs con cal	0,132	0,264
Arena industrial: Sin cal vs con cal	0,820	0,375
Sin cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,823	0,946
Con cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,055	0,842

4.5.2. Adherencia (Cruces de mampostería)

La adherencia entre mortero y bloque se midió al fallar las cruces de mampostería como se ve en la Figura 17, produciendo una falla a cortante en el mortero, como se ve en la Figura 25, en la cual también se puede ver como los bloques no sufrieron ningún daño durante el ensayo y efectivamente la falla del espécimen se da por adherencia.

Estos especímenes son sumamente frágiles y algunos se dañaron al ser transportados desde el lugar de almacenamiento al sitio de falla, por lo que en algunos casos solo se contó con 3 especímenes para obtener la adherencia de determinada muestra. Los especímenes que se dañaron fueron de diferentes tipos de mortero y se debió a manipulación. Se puede ver en el Cuadro C.2, en el apéndice C.2, cuáles fueron las muestras que se perdieron.



Figura 25. Cruz de mampostería después de ser fallada

Cuadro 18. Resumen de resultados de adherencia en cruces de mampostería

Adherencia	Tipo M (kg/cm²)	CV	%variación vs. Sin Cal	Tipo S (kg/cm²)	CV	%variación vs. Sin Cal
Arena de tajo						
Sin Cal	2,77	0,41	-	0,89	0,29	-
Cal 1	2,12	0,36	-23%	0,95	0,38	7%
Cal 2	1,48	0,29	-47%	1,20	0,27	34%
Cal 3	2,60	0,48	-6%	1,08	0,27	21%
Arena industrial						
Sin Cal	2,67	0,46	-	0,83	0,70	-
Cal 1	1,95	0,32	-27%	1,31	0,44	58%
Cal 2	1,47	0,38	-45%	0,90	0,26	7%
Cal 3	1,31	0,24	-51%	1,05	0,32	26%

Las cruces tipo M presentan desviaciones estándar mayores a las de las cruces tipo S, esto se debe a que en estos especímenes se obtuvieron diferencias de resistencia importantes entre las cruces de una misma mezcla de mortero. Estas diferencias se pueden deber principalmente a la formación de una cuña en la ranura de las cruces que impide el deslizamiento del bloque, contribuyendo a la resistencia y provocando la obtención de un resultado atípico mayor a los demás (ver Figura 26). Debido a esto, se eliminaron los datos que se consideraron atípicos

por presentar valores del doble de los valores promedio obtenidos. Los resultados después de eliminar los valores atípicos se resumen en el Cuadro 19 y son con los que se trabajará para realizar el análisis. Además, en el Cuadro C.2 en la sección de apéndices, se pueden ver los resultados completos y los datos que fueron descartados.

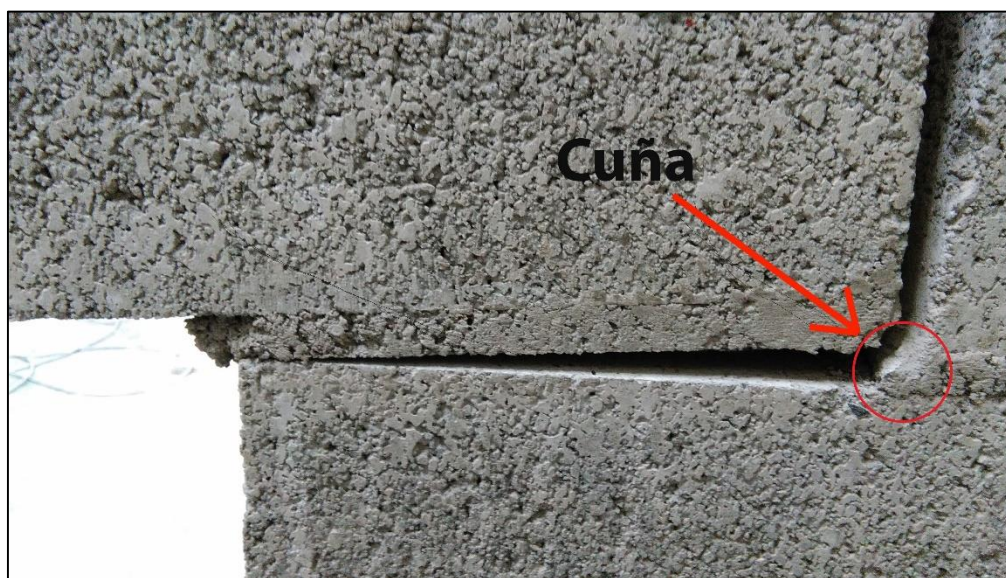


Figura 26. Cuña de mortero en la ranura de una cruz

Cuadro 19. Resumen de resultados de adherencia en cruces de mampostería, corregidos

Adherencia	Tipo M (kg/cm²)	CV	%variación vs. Sin Cal	Tipo S (kg/cm²)	CV	%variación vs. Sin Cal
Arena de tajo						
Sin Cal	1,92	0,48	-	0,89	0,29	-
Cal 1	2,12	0,36	11%	0,95	0,38	7%
Cal 2	1,48	0,29	-23%	1,20	0,27	34%
Cal 3	2,04	0,55	6%	1,08	0,27	21%
Arena industrial						
Sin Cal	1,61	0,18	-	0,83	0,70	-
Cal 1	1,95	0,32	21%	1,31	0,44	58%
Cal 2	1,47	0,38	-9%	0,90	0,26	7%
Cal 3	1,31	0,24	-19%	1,05	0,32	26%

Según los resultados mostrados en el Cuadro 19, los morteros tipo M solo presentan un aumento en su adherencia con la cal 1, y en el caso de la arena de tajo también se observa un pequeño aumento con la cal 3. Por su parte, los morteros tipo S presentan todos un aumento en su adherencia cuando se les agrega cal. La arena de tajo se comportó mejor con la cal 2 y la arena industrial con la cal 1.

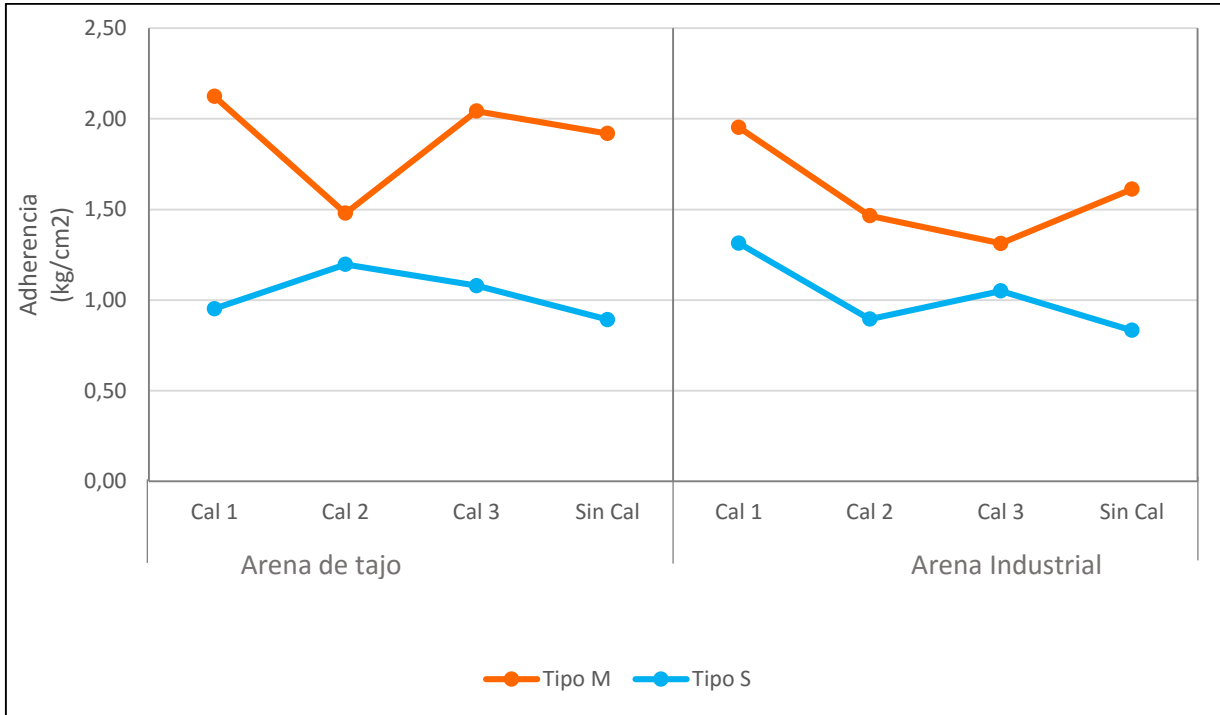


Figura 27. Comparación de resultados de adherencia en cruces de mampostería

La prueba t de Student indica que no existe suficiente evidencia estadística para afirmar a un 90% de confianza que los resultados obtenidos con los morteros con cal sean diferentes a los obtenidos con morteros sin cal, ni a que haya diferencia entre el uso de arena de tajo o industrial. Sin embargo, la adherencia es una de las características más importantes de un mortero de pega y como se puede ver en la Figura 27, sí existen diferencias en utilizar cal en el mortero, en especial en los morteros tipo S, por lo que este aumento sí debe considerarse como una mejoría en el mortero de pega.

Cuadro 20. Comparación de resultados de adherencia en cruces de mampostería, con la prueba estadística t de Student

Comparación de adherencia	Valor P para distribución de dos colas	
	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo: Sin cal vs con cal	0,905	0,375
Arena industrial: Sin cal vs con cal	0,933	0,414
Sin cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,696	0,878
Con cal: Arena de tajo vs arena industrial	0,321	0,809

4.5.3. Otras pruebas realizadas al mortero fabricado en campo

Cuando se construyeron los especímenes de prismas y cruces de mampostería, se obtuvo una muestra de cada mortero fabricado por los albañiles y a esta se le aplicó la prueba de flujo y se moldearon 3 cubos para fallar a 28 días. Además, se midió la cantidad de agua que agregaron los albañiles a la mezcla. Con estos datos se hace una comparación de los resultados obtenidos de las mezclas fabricadas en campo con las mezclas realizadas en condiciones de laboratorio.

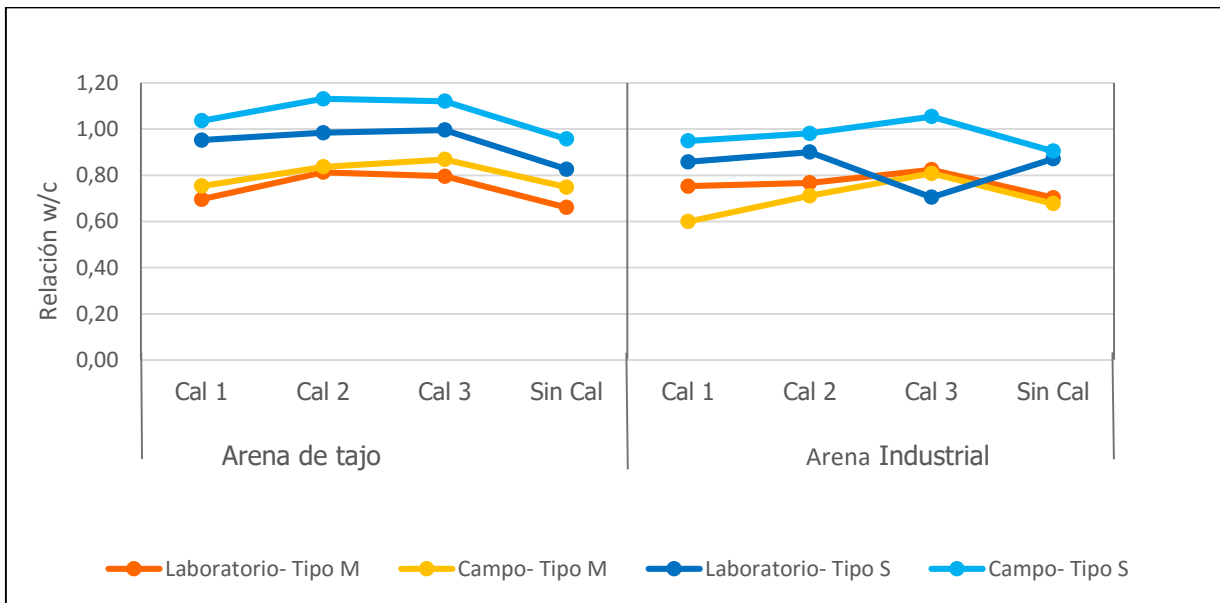


Figura 28. Comparación de relación w/c de morteros fabricados en campo vs morteros mezclados en laboratorio

En la Figura 28 puede verse como en la mayoría de los casos en campo se agrega más agua a la mezcla, con excepción del mortero tipo M fabricado con arena industrial, el cual se trabajó con una cantidad de agua menor que en el laboratorio. Es común que en campo se trabaje con una cantidad de agua mayor y dependiendo de la cantidad no representa un problema, ya que parte de esa agua es absorbida por los bloques.

En general las relaciones w/c siguen un mismo comportamiento en campo y en laboratorio. Las mezclas con cal necesitan más agua, en especial las de cal 2 y 3 y las mezclas sin cal y con cal 1 presentan las relaciones w/c más bajas.

El aumento en la relación w/c también se ve reflejado en la Figura 29, en la que se comparan los resultados de flujo obtenidos en campo con los obtenidos en el laboratorio. En laboratorio se trabajó siempre con mezclas que cumplieron un flujo de $110 \pm 5\%$, mientras que los fabricados en campo tuvieron una dispersión mayor.

Los morteros tipo S presentan una dispersión menor, ya que se trata de un mortero más trabajable, lo que hace que la tendencia a agregar más agua sea menor y en este caso se obtuvo flujos menores al límite en el caso de la cal 1 con ambas arenas. En el caso de los morteros tipo M, la dispersión es mayor y los morteros sin cal tienden a tener un flujo mayor al límite, lo que es consistente con la Figura 28, donde estos morteros son los que presentan mayor relación w/c en la serie.

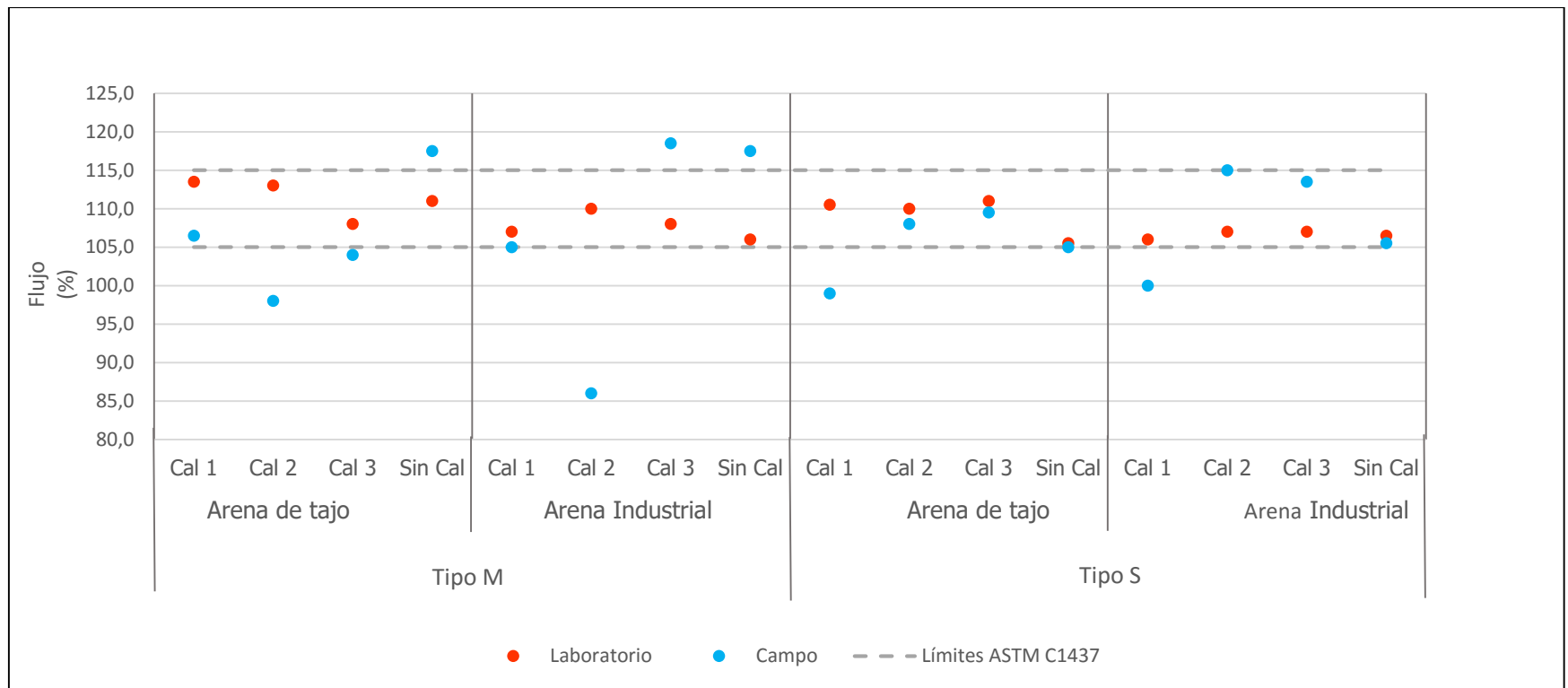


Figura 29. Comparación de flujo de morteros fabricados en campo vs morteros mezclados en laboratorio

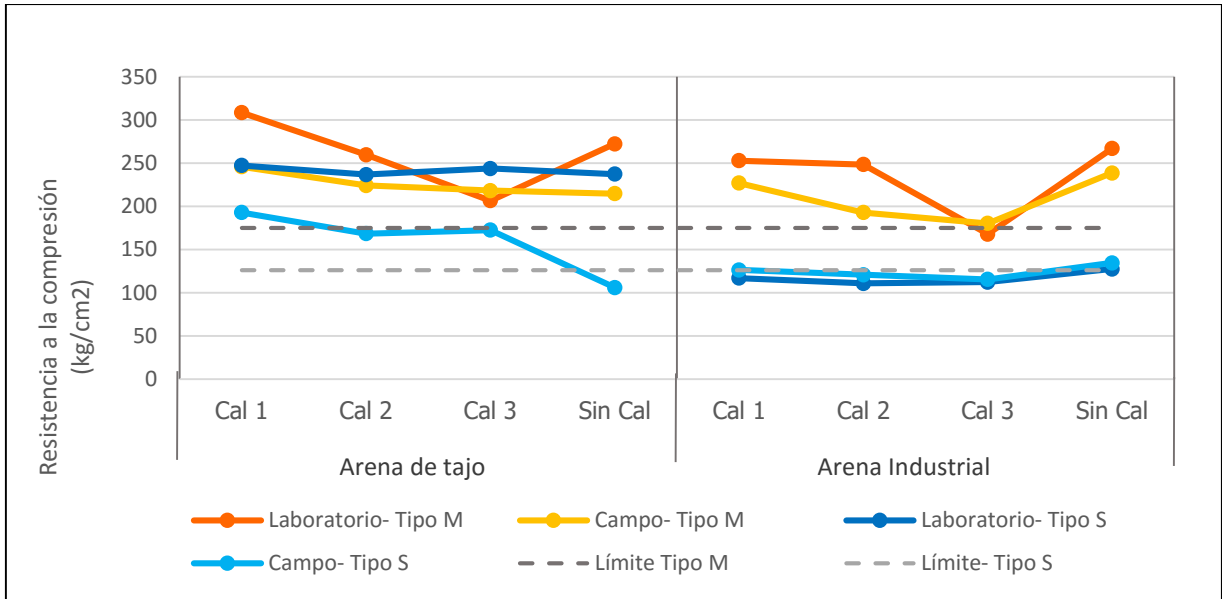


Figura 30. Comparación de resistencia a la compresión en cubos de mortero de 50 mm de arista entre morteros fabricados en campo vs morteros mezclados en laboratorio

En cuanto a la resistencia a compresión de los cubos de mortero, con la arena industrial se obtuvieron resultados y comportamientos similares, obteniéndose las mayores resistencias con cal 1 y sin cal. Los morteros tipo S son los que tienen resultados más similares a los obtenidos en el laboratorio. Sin embargo siguen sin cumplir con la resistencia mínima cuando se mezclan con cal 2 y cal 3.

La arena de tajo presenta resultados similares con los morteros tipo M. Sin embargo, los morteros tipo S sí bajan en gran medida su resistencia, en especial en el mortero sin cal, el cual en campo no cumple con la resistencia mínima solicitada por el CSCR 2010.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

Retención de agua

- Los morteros sin cal no logran alcanzar el 75% de retención de agua que pide la norma y presentan hasta un 30% menos de lo solicitado.
- Agregar cal al mortero mejora la retención de agua en todos los casos. Y aunque en algunas mezclas aún con la cal no se logra el mínimo indicado por la norma ASTM C270, la mejora que se obtiene es importante.
- La cal mejora la retención de agua de los morteros fabricados con arena de tajo, sin embargo se obtienen mejores resultados si se utiliza arena industrial.

Contenido de aire

- En la mayoría de los casos, agregar cal al mortero disminuye el contenido de aire de la mezcla. Sin embargo, se obtiene un aumento en la trabajabilidad de la muestra, el cual es percibido cualitativamente.
- Los morteros con arena de tajo no cumplen con el límite de 7%, salvo una excepción en el mortero tipo S con cal 3, pero debido a que es un dato aislado no se considera como una tendencia. Lo anterior contrasta con los morteros fabricados con arena industrial los cuales en todos los casos cumplen con el límite máximo establecido en la norma ASTM C270.
- Los resultados de esta prueba no son concluyentes en cuanto a una tendencia que muestre cual mortero presenta mejores propiedades de contenido de aire.

Resistencia a la compresión en cubos de mortero

- Los morteros sin cal cumplen todos con la resistencia mínima que pide el CSCR 2010 y en su mayoría presentan una resistencia de más del 53% solicitado.
- Los morteros con arena de tajo pierden resistencia a compresión al agregar cal. Sin embargo, siguen cumpliendo con el mínimo que establece el CSCR 2010. Esta tendencia se da también en los morteros con arena industrial. La excepción se da con los morteros

de arena de tajo con cal 1, los cuales mejoran su resistencia a compresión en comparación con los morteros sin cal.

- Se puede considerar que la pérdida en resistencia a compresión en cubos de mortero no es importante en el caso de la cal 2. Sin embargo, la cal 3 presenta resultados que no siguen ninguna secuencia, por lo que su uso no es recomendado.
- Los resultados obtenidos con arena de tajo son mayores a los obtenidos con arena industrial. Sin embargo, se debe considerar que la arena de tajo al contener un porcentaje mayor de finos, es más propensa a sufrir contracción.

Resistencia a la compresión en prismas de mampostería

- El uso de la cal en morteros tipo M puede ocasionar una pérdida de resistencia a compresión en prismas de mampostería. Sin embargo, en morteros tipo S aumenta dicha resistencia.
- Los morteros tipo M, con arena de tajo, con las cales 1 y 2 cumplen con el límite del CSCR 2010, al igual que los morteros sin cal.
- Los morteros tipo S, con arena de tajo, cumplen todos con el esfuerzo mínimo y alcanzan una resistencia mayor a la solicitada para mampostería tipo M. Esto se da también con la arena industrial cuando se mezcla con las cales 1 y 2.
- La calidad de la cal influye en el comportamiento de la resistencia a compresión en prismas de mampostería; la cal 1 y la cal 2 tienen comportamientos muy similares. Sin embargo, la cal 3 no presenta ninguna tendencia en sus resultados, ya que en algunos casos mejora y en otros empeora la resistencia del prisma.
- Es posible obtener mampostería tipo M, al utilizar un mortero tipo S con bloques tipo M. El mortero debe contener cal de calidad igual o superior a la cal 2 para alcanzar esta resistencia.

Adherencia en cruces de mampostería

- En el mortero tipo S, todas las cales mejoran la adherencia del mortero.
- En el mortero tipo M, solo la cal 1 mejora la adherencia del mortero, las cales 2 y 3 tienden a bajar esta propiedad.

- La calidad de la cal influye en el comportamiento que esta tendrá en el mortero en cuanto a adherencia, siendo la cal 1 la que presenta un mejor desempeño en la mayoría de los casos.
- Los resultados con arena de tajo son similares a los obtenidos con arena industrial, por lo que se puede concluir que, en cuanto a adherencia, ambos agregados finos se desempeñan de forma similar.

Generales

- La calidad de la cal que se utilice sí influye en los resultados. Una cal de buena calidad como la cal 1 o de mediana calidad como la cal 2, presentan mejoras notorias y consistentes, mientras una cal de baja calidad como la cal 3 presenta mejoras en unos casos, pero en otras perjudica al mortero, sin ser consistente en los resultados.
- El uso de la cal reduce la resistencia a compresión en cubos de mortero pero aumenta su retención de agua. La pérdida de resistencia no es significativa, mientras que el aumento en la retención de agua sí lo es, por lo que puede afirmarse que la cal representa una mejoría para el mortero de pega.
- En cuanto a resistencia a compresión, es más importante la resistencia del bloque que la del mortero de pega. Se pueden obtener muy buenos resultados con prismas de mampostería fabricados con morteros de f'_{mortero} menor a la solicitada, como es el caso de los morteros tipo S con arena industrial.
- La cantidad de cal que se agrega a la mezcla juega un papel importante en cuanto a la mejora que esta representa en el mortero, siendo los morteros tipo S, los que presentan porcentajes de beneficio mayores.
- Cualitativamente, se obtuvo que, tanto en laboratorio como en campo, la trabajabilidad de la arena de tajo es superior a la de la arena industrial. Además, la trabajabilidad aumenta en ambas arenas al agregar cal a la muestra, especialmente la cal 1.

5.2. Recomendaciones

- Sería conveniente ampliar la investigación variando las cantidades de cal que se agregan al mortero, principalmente a los morteros tipo M.
- Sería apropiado realizar más ensayos de prismas y cruces de mampostería para ampliar la muestra y concluir más precisamente sobre la tendencia. Además, fallar especímenes con edades mayores a los 28 días para estudiar el fenómeno de carbonatación de la cal
- Sería oportuno proponer a la Comisión Permanente de Estudio y Revisión del Código Sísmico de Costa Rica que se revise el Anexo A, en el que se especifica que para la mampostería clase A se debe utilizar mortero tipo A. Y además ampliar la investigación, para obtener una tendencia que respalde esta propuesta.
- Se recomienda el uso de cal en los morteros de pega para mampostería. Sin embargo, se debe revisar la calidad de la cal (composición química principalmente) y se recomienda que esta sea similar o superior a la cal 2.
- Se recomienda el uso de ambas arenas para fabricar mortero de pega para mampostería, pero se debe preferir el uso de la arena industrial.
- Sería favorable realizar una investigación en la que se combinen ambos tipos de agregado fino para obtener los beneficios de trabajabilidad de la arena de tajo y los de resistencia de la arena industrial.
- En Costa Rica, es necesaria una norma que permita a los productores regular su producción y brindar cal que sea apta para su uso en construcción. Además, que permita a los constructores nacionales identificar y obtener fácilmente dichas cales.
- Se puede consultar el trabajo final de graduación "Influencia de la cal y arena de río lavada en las propiedades físico mecánicas del mortero de pega de bloques de mampostería" de Yari León para complementar este estudio.

REFERENCIAS

Acón, C. (2014). *Influencia de la cal nacional en las propiedades del mortero para pega de bloques en mampostería*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). *Standard Specification for Hydrated Lime for Masonry Purposes, C207 – 06 (Reapproved 2011)*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2006). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, C136 – 06*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2009). *Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate, C29/C29M – 09*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2009). *Standard Test Method for Water Retention of Hydraulic Cement-Based Mortars and Plasters, C1506 – 09*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2011). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Limestone, Quicklime, and Hydrated Lime, C25 – 11*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2012). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, C128 – 12*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens), C109/C109M – 13*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, C1437 – 13*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2013). *Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, C117 – 13*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency, C305 – 14*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Specification for Mortar for Unit Masonry, C270 – 14a*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms, C1314–14*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, C188 – 14*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Methods for Physical Testing of Quicklime, Hydrated Lime, and Limestone, C110 – 14*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2014). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units, C140/C140M – 14a*. Philadelphia: ASTM.

American Society for Testing and Materials (ASTM). (2015). *Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar, C185 – 15*. Philadelphia: ASTM.

Arias, E. (2012). *Evaluación de las propiedades del mortero preempacado para pega de bloques de mampostería*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Chacón, C. (2001). *Análisis y evaluación técnica en morteros para repellos y recomendaciones para su uso*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.

Chrysler, J., Baltimore, C., & Escobar, T. (2007). *Masonry Design Manual*. Estados Unidos de América: Masonry Institute of America and International Code Council.

Colegio Federado de Ingenieros y Arquitectos de Costa Rica. (2010). *Código Sísmico de Costa Rica 2010*. San José: Editorial Tecnológica de Costa Rica.

Drysdale, R., & Hamid, A. (2008). *Masonry Structures Behavior and Design. 3erd edition*. Estados Unidos de América: The Masonry Society.

Holcim. (19 de Setiembre de 2014). *Catálogo de agregados*. Obtenido de http://www.holcim.cr/fileadmin/templates/CR/doc/Zero/Fichas_tecnicas_agregados__Holcim_2014.pdf

Holcim. (2014). *Ficha técnica Cemento UG-RTCR 383:2004*.

Instituto Costarricense del Cemento y el Concreto. (2007). *Manual de construcción con bloques de concreto*. San José, Costa Rica.

Klingner, R. (2012). *Especificación, diseño y cálculo de mampostería*. San José, Costa Rica.

Navas, A. (2013). *Notas del curso IC-0604 Materiales de construcción*. San José, Costa Rica.

Picado, A. (2001). *Evaluación técnica de morteros para repello y recomendaciones para su aplicación*. Proyecto de graduación para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica.

Poveda, Á. (2015). *Notas del curso Estructuras de mampostería*. San José.

Quintana, C. (1996). *Elementos de Inferencia Estadística*. San José: Editorial de la Universidad de Costa Rica.

GLOSARIO

Absorción:	Proceso por el cual un líquido, que puede ser agua, es atraído hacia el interior de un sólido seco y poroso, como por ejemplo un bloque de concreto.
Adherencia:	Resistencia tangencial que se produce en la superficie de contacto entre el mortero de pega y el bloque cuando se intenta que el bloque se deslice.
ASTM:	American Society for Testing and Materials.
CSCR 2010:	Código Sísmico de Costa Rica 2010.
Cuña:	Material sobrante de mortero en forma de ángulo que impide el deslizamiento de los bloques.
Curado:	Mantenimiento de un adecuado contenido de humedad durante el periodo en el cual el mortero gana resistencia.
Coeficiente de variación:	Resultado de dividir la desviación estándar entre el promedio. Indica la dispersión de los datos de la muestra.
Ensayo:	Método para probar las propiedades de un espécimen o elemento.
Escarificación:	Proceso de extracción de materiales que consiste en realizar cortes o incisiones en el terreno.
Mampostería:	Sistema constructivo en el cual los elementos estructurales resultan de la unión de piezas formadas por distintos materiales (naturales o artificiales)
Trabajabilidad:	Propiedad de la mezcla de mortero que determina su facilidad de ser moldeada y colocada.

APÉNDICES

APÉNDICE A. DATOS EXPERIMENTALES DE MATERIALES UTILIZADOS

A.1. Datos experimentales del cemento

Se presenta a continuación los datos para caracterizar el cemento utilizado.

Gravedad específica: 2,95 g/cm³

A.2. Datos experimentales de los agregados finos

Se presenta a continuación los datos que complementan la caracterización de los agregados finos utilizados.

Cuadro A.1. Datos complementarios de caracterización de los agregados finos

Propiedad	Agregado fino	
	<i>Arena de tajo</i>	<i>Arena industrial</i>
Peso unitario envarillado (kg/m ³)	1258	1737
Gravedad específica bruta saturada superficie seca	2,11	2,66
Gravedad específica bruta seca	1,93	2,62
Densidad aparente (kg/m ³)	2351,92	2721,16
Densidad saturada superficie seca (kg/m ³)	2105,63	2650,64
Densidad seca (kg/m ³)	1924,25	2604,59
Porcentaje de finos (%)	24	13
Humedad del material almacenado (%)	5,90	0,7

Cuadro A.2. Granulometría de la arena de tajo

Malla N°	% Pasando acumulado	Requisito % Pasando acumulado, según ASTM C114
4	100	100
8	89	95-100
10	86	
16	76	70-100
20	68	
30	62	40-75
40	55	
50	48	20-40
60	45	
100	36	10-25
200	23	0-10
charola	0	

Cuadro A.3. Granulometría de la arena industrial

Malla N°	% Pasando acumulado.	Requisito % Pasando acumulado, según ASTM C114
4	100	100
8	91	95-100
16	65	70-100
30	46	40-75
50	32	20-40
100	22	10-25
200	13	0-10
Charola	0	

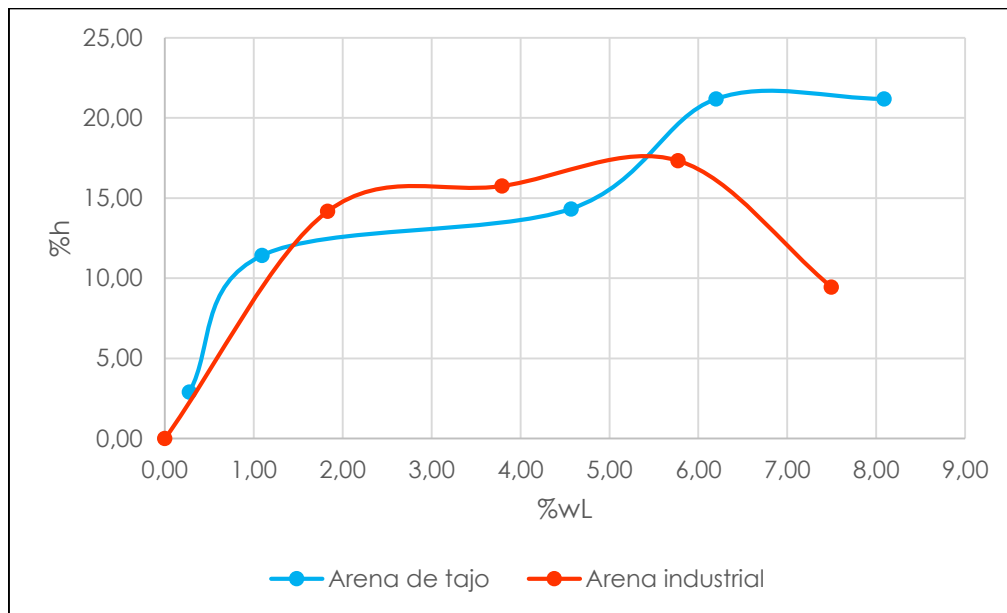


Figura A.1. Curva de hinchamiento de ambas arenas

A.3. Datos experimentales de los bloques de concreto

Se presenta a continuación los datos para caracterizar los bloques de concreto utilizados. Se emplearon tanto bloques sencillos como de doble pared, todos de 12 cm de ancho, Clase A. En la Figura A.2 se puede ver un bloque sencillo y en la Figura A.3 un bloque de doble pared, que son los que en la construcción se cortan y se utilizan como medio bloque.



Figura A.2. Ejemplo de bloque sencillo

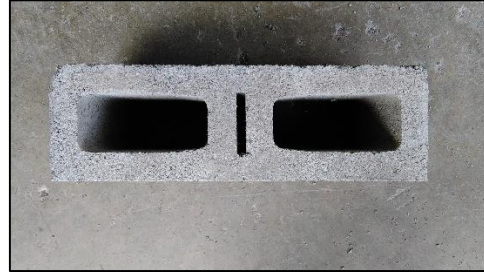


Figura A.3. Ejemplo de bloque de doble pared

A.3.1. Bloques sencillos

Las dimensiones que se muestran en el Cuadro A.4 son el promedio de 4 alturas, 2 anchos y 2 largos en cada caso, medidas tomadas en distintos puntos de una misma muestra.

Cuadro A.4. Dimensiones de los bloques sencillos

N° muestra	Dimensiones (mm)		
	<i>Altura</i>	<i>Ancho</i>	<i>Largo</i>
1	190,6	120,5	391,5
2	190,1	120,0	389,0
3	190,6	120,5	391,5
Promedio	190,4	120,3	390,7

Cuadro A.5. Propiedades de los bloques sencillos, según ASTM C140

N° muestra	Absorción (kg/m³)	Absorción (%)	Densidad (kg/m³)	Volumen neto (cm³)	Área neta (mm²)
A-1	177	8,6%	2055	5098	26779
A-2	175	8,5%	2060	5171	27057
A-3	176	8,5%	2071	5142	26929
Promedio	176	8,5%	2062	5137	26921

**Cuadro A.6. Fuerza de compresión sobre el área neta de los bloques sencillos,
según ASTM C140**

N° muestra	Compresión sobre el área neta	
	MPa	kg/cm ²
1	12,1	122,9
2	15,0	152,4
3	14,9	151,2
Promedio	14,0	142,2

A.3.2. Bloques dobles

B. Las dimensiones que se muestran en el Cuadro A.7 son el promedio de 4 alturas, 2 anchos y 2 largos en cada caso, medidas tomadas en distintos puntos de una misma muestra.

Cuadro A.7. Dimensiones de los bloques dobles

N° muestra	Dimensiones (mm)		
	<i>Altura</i>	<i>Ancho</i>	<i>Largo</i>
1	192,0	121,3	390,5
2	191,2	120,5	390,0
3	190,6	120,9	390,5
Promedio	191,3	120,9	390,3

Cuadro A.8. Propiedades de los bloques dobles, según ASTM C140

N° muestra	Absorción (kg/m ³)	Absorción (%)	Densidad (kg/m ³)	Volumen neto (cm ³)	Área neta (mm ²)
1	167	8,1%	2070	5462	28582
2	141	6,6%	2119	5485	28665
3	236	12,4%	1910	5850	30646
Promedio	181	9,0%	2033	5599	29298

**Cuadro A.9. Fuerza de compresión sobre el área neta de los bloques dobles,
según ASTM C140**

N° muestra	Compresión sobre el área neta	
	MPa	kg/cm₂
1	16,2	179,7
2	17,0	188,8
3	19,2	213,0
Promedio	17,5	193,8

APÉNDICE B. DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS REALIZADAS AL MORTERO

B.1. Prueba de flujo

Cuadro B.1. Datos de relación w/c para la fabricación de los morteros

Relación w/c	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo		
Cal 1	0,70	0,95
Cal 2	0,81	0,98
Cal 3	0,80	1,00
Sin Cal	0,66	0,83
Arena industrial		
Cal 1	0,75	0,86
Cal 2	0,77	0,90
Cal 3	0,82	0,70
Sin Cal	0,70	0,87

Cuadro B.2. Datos de flujo obtenido en cada uno de los morteros

Flujo (%)	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo		
Cal 1	113,5	110,5
Cal 2	113,0	110,0
Cal 3	108,0	111,0
Sin Cal	111,0	105,5
Arena industrial		
Cal 1	107,0	106,0
Cal 2	110,0	107,0
Cal 3	108,0	107,0
Sin Cal	106,0	106,5

B.2. Prueba de retención de agua en el mortero

Cuadro B.3. Datos obtenidos en la prueba de retención de agua en el mortero

	Retención de agua (%)	
	<i>Tipo M</i>	<i>Tipo S</i>
Arena de tajo		
Cal 1	78,08	80,84
	78,95	78,70
Promedio	79	80
Cal 2	69,59	65,32
	68,58	61,93
Promedio	69	64
Cal 3	72,56	66,21
	77,00	66,36
Promedio	75	66
Sin Cal	50,44	54,46
	55,00	55,45
Promedio	53	55
Arena industrial		
Cal 1	88,00	88,63
	90,74	87,68
Promedio	89	88
Cal 2	90,91	85,02
	88,89	88,24
Promedio	90	87
Cal 3	84,51	83,48
	89,40	79,50
Promedio	87	81
Sin Cal	53,70	68,57
	56,02	74,77
Promedio	55	72

B.3. Prueba de contenido de aire en el mortero

Cuadro B.4. Datos obtenidos en la prueba de contenido de aire en el mortero

	Contenido de aire (%)	
	<i>Tipo M</i>	<i>Tipo S</i>
Arena de tajo		
Cal 1	9,11 8,96	7,50 8,05
Promedio	9	8
Cal 2	7,25 7,55	7,90 7,73
Promedio	7	8
Cal 3	7,72 8,11	6,30 7,48
Promedio	8	7
Sin Cal	8,63 9,02	8,71 9,42
Promedio	9	9
Arena industrial		
Cal 1	2,52 2,34	2,39 1,12
Promedio	2	2
Cal 2	2,05 2,08	2,61 2,24
Promedio	2	2
Cal 3	2,03 2,81	2,05 0,78
Promedio	2	1
Sin Cal	3,07 4,15	2,19 3,46
Promedio	4	3

B.4. Resistencia a la compresión en cubos de 50 mm

Cuadro B.5. Datos obtenidos en la falla de cubos de mortero de 50mm, a los 7 y 28 días

f'_{mortero} (kg/cm ²)	Tipo M		Tipo S	
	7 días	28 días	7 días	28 días
Arena de tajo				
Cal 1	215,37	304,22	169,50	239,92
	209,83	269,32*	151,36*	245,26
	211,05	312,50	161,59	256,88
Promedio	212	308	166	247
Cal 2	146,01	258,80	110,21	240,29
	138,67	253,33	115,60	238,41
	138,02	267,32	114,98	232,01
Promedio	141	260	114	237
Cal 3	125,22	207,95	113,97	242,24
	133,09	207,95	112,42	236,90
	135,62	203,87	113,11	252,48
Promedio	131	207	113	244
Sin Cal	190,91	265,40	163,55	216,64*
	220,84*	274,90	155,15	231,89
	184,14	276,90	152,54	242,94
Promedio	188	272	157	237
Arena industrial				
Cal 1	150,87	256,88	62,96*	114,17
	114,17*	251,17	57,61	121,51
	150,87	250,76	56,88	115,19
Promedio	151	253	59	117
Cal 2	130,48*	243,22	49,34	113,11
	167,18	251,99	52,15	108,62
	163,10	250,36	48,97	120,12*
Promedio	165	249	50	111
Cal 3	96,96	162,61	49,87	110,09
	97,90	169,79	53,17	110,78
	101,16	171,17	52,97	116,37
Promedio	99	168	52	112
Sin Cal	142,43	270,95	81,22	127,42
	142,30	259,57	83,75	124,24
	141,81	270,54	80,57	130,76
Promedio	142	267	82	127

*Los datos fueron descartados por superar el 8,7% de variación en el rango permitido por ASTM C109 y no fueron tomados en cuenta para calcular el promedio.

Cuadro B.6. Datos de densidad de cubos de mortero de 50 mm

Densidad	Tipo M (g/cm³)	Tipo S (g/cm³)
Arena de tajo		
Sin Cal	1,90	1,88
Cal 1	1,89	1,88
Cal 2	1,88	1,87
Cal 3	1,87	1,88
Arena industrial		
Sin Cal	2,31	2,27
Cal 1	2,28	2,22
Cal 2	2,28	2,21
Cal 3	2,26	2,22

APÉNDICE C. DATOS EXPERIMENTALES DE PRUEBAS REALIZADAS A LA MAMPOSTERÍA

C.1. Resistencia a la compresión en prismas de mampostería

Los tipos de falla que se expresan en el Cuadro C.1 corresponden a los mostrados en la Figura C.1, y son los estipulados por la norma ASTM C1314.

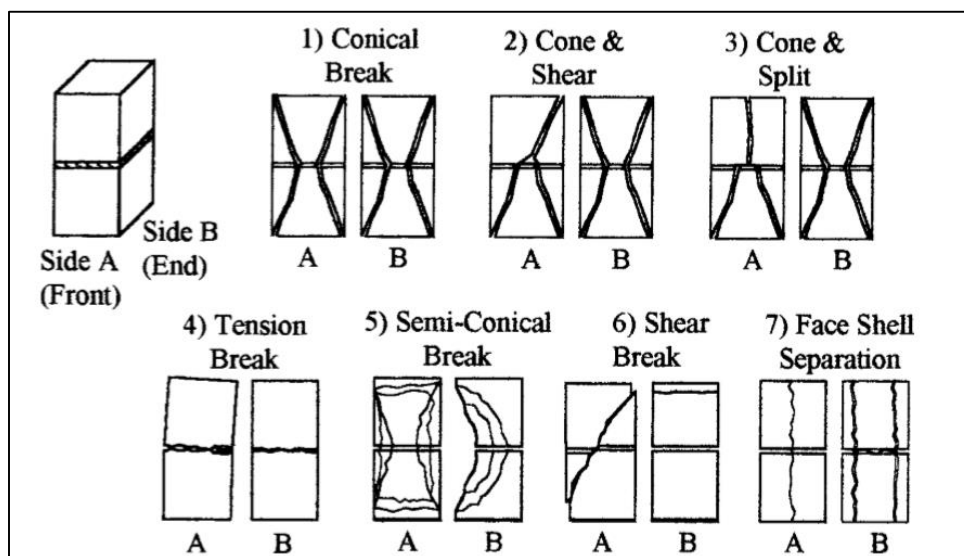


Figura C.1. Tipos de falla por compresión de prismas de mampostería

Fuente: ASTM C1314

Cuadro C.1. Datos obtenidos en la falla a compresión de prismas de mampostería

f'_m	Tipo M		Tipo S	
	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Tipo de falla	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	Tipo de falla
Arena de tajo				
Cal 1	128,71	7	94,41	4
	106,87	3	103,00	7
	108,95	3	88,11	6
Promedio	114,85	-	95,17	-
Cal 2	97,34	2	139,31	7
	102,64	7	69,33*	4
	99,10	3	136,31	7
Promedio	99,69	-	137,81	-
Cal 3	77,17	7	100,27	7
	75,89	6	111,03	7
	70,78	6	98,60	6
Promedio	74,61	-	103,30	-
Sin Cal	109,44	4	108,24	7
	121,84	2	88,97	7
	113,55	7	86,63	4
Promedio	114,94	-	94,61	-
Arena industrial				
Cal 1	103,12	6	105,10	5
	102,62	6	80,58	7
	121,84	7	129,81	7
Promedio	109,20	-	105,16	-
Cal 2	101,38	3	93,55	6
	107,50	3	111,95	6
	84,85	6	149,50	3
Promedio	97,91	-	118,33	-
Cal 3	172,53	7	96,48	6
	128,26	5	114,88	6
	166,57	3	79,31	7
Promedio	155,79	-	96,89	-
Sin Cal	104,12	6	99,01	4
	123,33	3	94,06	4
	122,57	7	89,16	7
Promedio	116,67	-	94,08	-

*El dato fue descartado por ser un inconsistente con los demás datos de la serie, al representar un valor menor a la mitad del promedio de los demás valores.

C.2. Adherencia en cruces de mampostería

Cuadro C.2. Datos obtenidos en la falla de cruces de mampostería

	Adherencia (kg/cm ²)	
	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo		
Cal 1	1,97	0,87
	2,44	1,20
	1,13	0,47
	2,95	1,27
Promedio	2,12	0,95
CV	0,36	0,38
Cal 2	1,95	1,05
	1,29	1,11
	1,00	1,67
	1,68	0,97
Promedio	1,48	1,20
CV	0,29	0,27
Cal 3	2,84	1,33
	3,72*	1,16
	1,25	0,75
	--	--
Promedio	2,04	1,08
CV	0,55	0,27
Sin Cal	1,27	1,17
	2,57	0,67
	3,46*	0,83
	3,79*	--
Promedio	1,92	0,89
CV	0,48	0,29
Arena industrial		
Cal1	2,76	0,91
	1,60	1,72
	1,34	--
	2,11	--
Promedio	1,95	1,31
CV	0,32	0,44
Cal 2	1,13	0,68
	1,58	0,74
	2,19	0,97

	0,95	1,19
Promedio	1,47	0,90
CV	0,38	0,26
Cal 3	0,89	0,68
	1,28	1,14
	1,63	0,93
	1,45	1,46
Promedio	1,31	1,05
CV	0,24	0,32
Sin Cal	1,41	1,56
	1,81	0,14
	3,64*	0,82
	3,81*	0,82
Promedio	1,61	0,83
CV	0,18	0,70

*Los datos fueron descartados por ser valores superiores al doble del promedio, por lo que se supone que una cuña en la ranura pudo contribuir a su resistencia.

-- El espécimen se dañó al ser manipulado y no fue posible fallarlo.

C.3. Otras pruebas al mortero fabricado en campo

Cuadro C.3. Relación w/c para los morteros fabricados en campo

Relación w/c	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo		
Cal 1	0,75	1,04
Cal 2	0,84	1,13
Cal 3	0,87	1,12
Sin Cal	0,75	0,96
Arena industrial		
Cal 1	0,60	0,95
Cal 2	0,71	0,98
Cal 3	0,81	1,05
Sin Cal	0,68	0,90

Cuadro C.4. Datos de flujo para los morteros fabricados en campo

Flujo (%)	Mortero Tipo M	Mortero Tipo S
Arena de tajo		
Cal 1	106,5	99,0
Cal 2	98,0	108,0
Cal 3	104,0	109,5
Sin Cal	117,5	105,0
Arena industrial		
Cal 1	105,0	100,0
Cal 2	86,0	115,0
Cal 3	118,5	113,5
Sin Cal	117,5	105,5

Cuadro C.5. Datos de resistencia a la compresión a los 28 días para cubos de mortero de las mezclas fabricadas en campo

f' mortero (kg/cm²)	Tipo M	Tipo S
Arena de tajo		
Cal 1	248,73	203,87*
	248,73	191,64
	240,57	183,49
Promedio	246	188
Cal 2	228,34	175,33
	224,26	159,02*
	220,18	171,25
Promedio	224	173
Cal 3	219,20	179,41
	216,02	167,18
	219,98	171,25
Promedio	218	173
Sin Cal	207,95	110,09
	216,11	101,94
	220,18	106,01
Promedio	215	106
Arena industrial		
Cal 1	224,26	126,40
	232,42	122,32
	224,26	130,48
Promedio	227	126
Cal 2	187,56	118,25
	195,72	122,32
	195,72	122,32
Promedio	193	121
Cal 3	179,45	118,25
	180,71	114,17
	181,16	114,17
Promedio	180	116
Sin Cal	242,12	134,56
	238,04	134,56
	236,00	134,56
Promedio	239	135

*Los datos fueron descartados por superar el 8,7% de variación en el rango permitido por ASTM C109 y no fueron tomados en cuenta para calcular el promedio.