

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE ARQUITECTURA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Cal de alta pureza en polvo como material alternativo en los procesos de restauración



Tesis

Para obtener el grado de

Maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos

Presenta:

Arq. Elena Guadalupe Navarro Mendoza

Tutor:

Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán

Cotutor:

Dr. Juan Alberto Bedolla Arroyo

Sinodales:

Dra. Ma. Del Carmen López Núñez

Dr. Wilfrido Martínez Molina

Dr. Herwing Zeth López Calvo

Morelia, Michoacán

Noviembre 2019

Agradecimientos

Al apoyo brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) a través de los programas de becas para realizar estudios de maestría.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por su gran apoyo, confianza e impulso para la realización de esta investigación.

Al Dr. Juan Alberto Bedolla Arroyo, quién me brindó la oportunidad de realizar esta investigación.

Al equipo del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, quienes me apoyaron durante la investigación en todo momento.

A mis amigos que fueron un gran apoyo durante este proceso formativo.

Dedicatoria

A mí hermano...

Salvador,

Quien no pudo ver concluido mi trabajo pero sé que me diría:

Ya ves, te dije que la universidad era fácil.



Índice

Resumen	3
Abstract.....	4
Introducción	5
Capítulo I	19
Antecedentes de la cal	19
Ciclo de la cal.....	20
Tipos de cales.....	23
Proceso de producción	26
Trabajos de restauración y conservación con cal.....	36
Capítulo II	38
Caracterización de las cales	38
Selección de cales para la experimentación.....	39
Diseño de muestras	41
Elaboración de especímenes para las pruebas.....	42
Caracterización Física	45
Área superficial	45
Caracterización de pastas y morteros	47
Prueba de fluidez.....	48
Velocidad de pulso ultrasónico, PVU.....	49
Resistividad eléctrica, R_E	51
Caracterización mecánica	54
Resistencia a la compresión, f_c	54



Capítulo III	57
Resultados de la caracterización de las cales para su uso en restauración y conservación	57
Caracterización física de las cales	57
Pastas	59
Morteros.....	73
Capítulo IV	84
Discusión de resultados de las cales para su uso en la restauración y conservación.	84
Caracterización física	84
Caracterización mecánica	95
Mortero	96
Caracterización física	97
Caracterización mecánica	105
Conclusiones	107
Glosario	112
Bibliografía.....	115
Anexos	132



Resumen

La cal apagada artesanalmente ha sido el cementante más usado en los trabajos de restauración patrimonial en México por su compatibilidad con los materiales y sistemas constructivos tradicionales. Las principales características de la cal son excelente adherencia, trabajabilidad y plasticidad. Estas cualidades son muy apreciadas en la restauración, por ello se considera que la cal apagada artesanalmente cumple con estas características al pasar por el proceso de añejamiento o hidratación con una recomendación de seis meses.

El proceso de manufactura de la cal ha evolucionado con el avance tecnológico de los hornos, permitiendo una calcinación óptima y la producción de distintas cales, entre ellas están las de alta pureza.

El objetivo principal de esta investigación es conocer las propiedades de las cales de alta pureza respecto a la cal apagada y su uso en los procesos de restauración. Las cales de alta pureza pueden ser empleadas en estos trabajos sin tener que pasar por un proceso de añejamiento, ahorrando tiempo y recursos en la obra. En este documento se muestra la caracterización física y mecánica de cinco tipos de cales que pueden ser usadas en la restauración.

La caracterización física consiste en conocer la fluidez de las mezclas, la resistencia eléctrica y velocidad de pulso que nos aporta información sobre la homogeneidad del material y su porosidad. La caracterización mecánica es la resistencia a la compresión, que aunque en la restauración no es necesario altas resistencias es necesario conocer el comportamiento de cada cal y cuál puede ser usada en las distintas partes de la estructura.

Palabras claves: Cal, Alta pureza, restauración.



Abstract

The lime turned off by hand has been the most commonly used cement in heritage restoration work in Mexico for its compatibility with traditional building materials and systems. The main characteristics of lime are excellent adhesion, workability and plasticity. These qualities are highly appreciated in the restoration, so it is considered that the lime turned by hand meets these characteristics when going through the aging or hydration process with a recommendation of six months.

The lime manufacturing process has evolved with the technological progress of the furnaces, allowing optimal calcination and the production of different limes, among them are high purity.

The main objective of this research is to know the properties of high purity limes with respect to the lime turned off and its use in restoration processes. High purity limes can be used in these jobs without having to go through an aging process, saving time and resources on site. This document shows the physical and mechanical characterization of five types of limes that can be used in the restoration.

The physical characterization consists in knowing the fluidity of the mixtures, the electrical resistance and pulse rate that gives us information about the homogeneity of the material and its porosity. The mechanical characterization is the resistance to compression, although in the restoration it is not necessary high resistances it is necessary to know the behavior of each lime and which can be used in the different parts of the structure.



Introducción

La cal, la arcilla y el yeso fueron los primeros cementantes en usarse en la construcción, y fueron parte de la creación de sistemas constructivos únicos, actualmente la cal se usa en la restauración y consolidación por la compatibilidad que tiene con los materiales y sistemas constructivos.

En el ámbito de la restauración se considera que la cal debe tener ciertos atributos como cohesión, flexibilidad y plasticidad que son las necesarias para garantizar una buena compatibilidad entre los materiales de las estructuras patrimoniales, los morteros y pastas que se emplean en la restauración. Comparada contra el cemento pórtland, aún que tienen casi el mismo origen respecto a los materiales, la temperatura de fabricación es diferente, lo que conduce a que la cal presenta mayor elasticidad aun estando fraguada que las matrices base cemento pórtland, por lo que sus usos tienen destinos muy diferentes en la Arquitectura.

En la construcción actual tradicional, por la facilidad de la forma de expendirse, la cal grado construcción contra los cementos de albañilería, algunos constructores eligen la adquisición de sacos preparados de cementante, y no realizar mezclas de cemento-cal en obra. Respecto a los acabados de las edificaciones, los aplanados se eligen en función de la protección que proporcionan a corto plazo. En el campo de la restauración se ha recomendado por mucho tiempo el uso de la cal apagada artesanalmente, que es cal viva hidratada en artesas hasta convertirla en pasta y dejando añejando por un periodo de tiempo que va desde tres semanas a seis meses, los resultados han sido prometedores.

El método de apagado que sigue siendo usado actualmente:

“[...] los morteros de cal apagada en la restauración y conservación de las mamposterías de los inmuebles históricos han sido utilizados hasta la fecha por



tradición; sin embargo su efectividad no ha sido totalmente comprobada con cálculos numéricos que garanticen que sea mejor opción en el campo de la conservación." (Bedolla Arroyo J. A., 2008)

Lo que nos lleva a considerar que la cal apagada artesanalmente necesita de investigación con otras técnicas y comparada contra las nuevas versiones de cales con mayor grado de pureza. Otras cales en polvo pueden ser usadas en la restauración y consolidación como sustituto de la cal apagada artesanalmente, si acaso los resultados mostraran su capacidad de reacción y untuosidad, disminuyendo algunos trabajos previos. Algunos constructores han tenido la necesidad de recurrir a distintos productos que no son óptimos, o recetas que carecen de normatividad (Bedolla Arroyo J. A., 2008), y algunas veces materiales que no han sido caracterizados pueden producir un daño mayor al patrimonio al no ser materiales compatibles.

El proceso de apagado de la cal presenta diversos problemas, ya que se debe adquirir cal viva directamente en las caleras y actualmente estos materiales se expenden sobre pedido, también ocurre que pueden llegar a tardar hasta un mes, lo que ocasiona atraso en la obra. Su traslado e hidratación es peligroso al ser un material que al estar en contacto con el agua reacciona exotérmicamente.

Poco se sabe de las nuevas cales producidas con otros procesos, y tampoco se ha abundado mucho en sus "características que desempeñan un papel crucial en su máximo rendimiento como componente de los morteros" (Galván-Ruiz & Velázquez-Castillo, 2011).

Se ha observado que las cales de alta pureza y también conocidas como cales químicas, son compatibles con los sistemas constructivos antiguos por que poseen las características como flexibilidad, cohesión y plasticidad similares a la cal apagada artesanalmente, pero esta al adquirirse en polvo esta lista para realizar una mezcla.



Lo mencionado anteriormente nos llevó a generar preguntas de investigación:

- ¿Cómo ha evolucionado la producción de cal a través de la historia?
- ¿Qué tipo de cales ha producido esa evolución y para que se usan actualmente?
- Las cales en polvo tienen el mismo proceso de producción que la cal viva, entonces, ¿qué características tienen cada una de ellas?
- ¿Qué diferencia tienen las cales de alta pureza contra la cal apagada artesanalmente?, ¿cómo pueden ser medidas y analizadas esas características respecto a su uso en la restauración patrimonial?

La industria de la cal al igual que otras se ha beneficiado de los avances tecnológico en la producción de cal, entre ellos el uso de hornos más eficientes que permiten la producción de cales de alta pureza, una calcinación completa evitando desperdicios y obteniendo cales de calidad.

Es necesario realizar pruebas físicas y mecánicas que nos porten información de sus principales particularidades para considerar cual es óptima para cada trabajo de restauración y consolidación en base a cada característica que se requiera.

Por medio de la obtención de datos cuantitativos en los cuales podemos comparar cada una de ellas y por medio de gráficas y tablas podremos tener sustento técnico del porqué se debe usar cada tipo de cal en la restauración y tener opciones para restaurar de una manera adecuada.

El objetivo de esta investigación es caracterizar física y mecánica las cales de alta pureza, cal apagada artesanalmente y cal de construcción para comprender las diferencias que existen entre cada una de ellas, y el porqué



de sus características en particular, como y donde pueden ser utilizadas en la restauración y consolidación del patrimonio.

Para cumplir con el objetivo es preciso:

- Conocer la historia y evolución tecnológica de la producción de la cal que da como resultado la existencia de diversos tipos de cales.
- Realizar caracterizaciones físicas y mecánicas que nos porten datos sobre el comportamiento y características de cada tipo de cal.
- Obtener resultados cuantitativos que nos aporten conocimiento técnico-arquitectónico en base a pruebas experimentales
- Analizar los resultados para que ayuden a comprender las características de las diferentes cales y sus posibles usos en la restauración y consolidación del patrimonio.

Estado del arte

La cal ha sido un material tratado por distintas culturas y civilizaciones a lo largo de la historia, reflejándose esto en la literatura científica e histórica. *Los diez libros de la Arquitectura* (Vitruvio, 2000), fue la primera fuente de información sobre la construcción y arquitectura que existió y plasma la experiencia de Vitruvio como constructor durante su vida. Consta de varios tratados sobre la arquitectura y sus partes, también los materiales que se utilizaban en la época, entre ellas la cal. Otros temas tratados son el diseño de templos, teatros y arquitectura clásica, proporciones de edificios, solidez de los edificios, sistemas constructivos, ingeniería hidráulica, astronomía y máquinas de guerra.

Respecto a la historia de la cal y su evolución, esta temática ha sido plasmada en distintos libros, como *las Artes de la cal* (Garate Rojas, 2002), donde se explica su papel en la arquitectura con el uso de la cal pigmentada y su impacto en las ciudades; la evolución de la cal desde su



descubrimiento hasta los conglomerantes modernos, sistemas constructivos y técnicas de aplicación, siendo visto desde los tratadistas como Don Ramón Pasquial Diez y Manuel Fornés Gurrea igualmente muestra las distintas herramientas para la aplicación, términos y vocabulario de distintas épocas en Europa.

La Cal, Historia, Propiedades y Usos (Barba Pingarrón & Villaseñor Alonso, 2013) es otro de los textos de referencia en México. Este texto aborda la historia y usos de la cal desde la época prehispánica hasta la colonial: los morteros desde su preparación y aplicación, la cal como material para la conservación de acabados, caracterización y análisis de morteros de cal.

Otra de las lecturas más importantes del material es a partir de sus procesos de fabricación, encontrando también valiosos antecedentes.

Los orígenes tecnológicos de la cal (Villaseñor Alonso & Barba Pingarrón, 2012), revisa los sitios arqueológicos donde se conocía el uso de la cal en México, para comprender la tecnología usada en la producción de cal. En *Historia de la producción de cal en el norte de la cuenca de México* (Palma Linares, 2009), se encuentra la historia de la producción de cal en Tula, Apaxco y Ajoloapan de Hidalgo, en México y cómo los habitantes de la región accedían al recurso de la cal desde la época prehispánica y durante la colonia.

También los hornos son estudiados, al ser parte fundamental de la producción. En *Los hornos de cal de Vlaverde de Leganés (Badajoz): estudio arqueológico y puesta en valor* (Conejo Delgado, 2017), se dan a conocer los vestigios industriales, por medio la arqueología, de los hornos de cal. En *Tres hornos de cal en la isla de Gran Canaria. Tipologías y funcionamiento* (Manzano Cabrera, Serrano Ortiz de la Luna, & Díaz-Ramos, 2018) se estudian tres hornos para ser puestos en valor patrimonial, presentando su ubicación y conservación.



También otra de las partes importantes del proceso de fabricación es el apagado. Sobre el proceso de apagado de la cal, *Una perspectiva general del apagado de la cal y los factores que afectan el proceso* (Hassibi, 1999), presenta los factores que afectan la eficiencia y resultado de la calcinación y de los sistemas de apagado, por medio de una discusión y revisión de los resultados.

A un nivel más particular, esta investigación se basa en la caracterización de morteros a base de cal, por lo que estos dos conceptos serán claves en el trabajo y se referirán en el estado del arte. Actualmente la cal ha empezado a resurgir como otra opción de material para la construcción. En la restauración ha sido investigada como componente de los morteros en sistemas constructivos. Viendo los antecedentes aplicados a investigaciones relacionadas con el patrimonio, encontramos varios trabajos pertinentes.

Distintas tesis de la Maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos que se han enfocado en morteros de cal apagada en obra y aditamentos orgánicos, como la tesis *Aditivos orgánicos e inorgánicos en morteros de cal: revisión histórica para su aplicación en intervenciones actuales*. (Díaz Calderón, 2017).

La tesis de doctorado, *Caracterización física mecánica de los morteros de cal apagada* (Bedolla Arroyo, 2008), contiene una caracterización de los morteros de cal pagada y una comparación con cal de construcción, mezclando ceniza volcánica y cactus opuntia.

En el área de la ingeniería civil se encontraron varias investigaciones sobre morteros de cal, entre ellas: *Arqueología experimental en morteros base cal para uso patrimonial* (Velazquez Pérez, 2015) en ella se presentan las distintas pruebas realizadas a morteros con aditivos orgánicos para una compresión sobre su comportamiento físico-mecánico en función de los diferentes morteros.



Sobre la incompatibilidad del cemento para los edificios patrimoniales el artículo *Lightweight natural lime composites for rehabilitation of Historical Heritage* (Sala, Cristina, Passoni, & Alessandra, 2016), hace un comparación sobre morteros de cemento y de cal sobre muros.

También la aplicación de cal viva e hidratada en otro tipo de obras como en la construcción de infraestructura de ingeniería civil en España, *Aplicaciones de la cal en la Ingeniería civil* (Sampedro Rodríguez, 2018), donde se expone el reuso de la cal en la obra actual de España, siendo lecturas muy interesantes para el conocimiento del estado del arte.

Respecto a la caracterización material de la cal, distintos artículos alrededor del mundo aportan datos desde distintos puntos de vista, como: *Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions?* (Veiga, 2017), en este se aporta sobre las aplicaciones de la cal aérea sobre la pérdida y recuperación de los morteros que son ideales para las intervenciones de rehabilitación

Los morteros de cal como material ecológico y sustentable, *Aglomerantes, morteros y aplanados adecuados para proteger el medio ambiente* (Cedeño Valdiviezo, 2011), considera la cal como un material de bajo consumo energético en comparación con el cemento.

Fenómenos como la carbonatación en las pastas de cemento y cal son estudiados en *Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes* (Arandigoyen, Bicer-Simsir, Alvarez, & Lange, 2005) para conocer las propiedades de microestructura y la porosidad, distribución de los poros y el área específica. En *Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar* (Oliveira, y otros, 2017), se analiza la evolución de la carbonatación de los morteros de cal. También se encontró *Estudio comparando los morteros de cal apagada*



artesalmente y cal en polvo en España para los trabajos de restauración (Luque, y otros, 2006), comparado su carbonatación.

En *Evaluación del desempeño térmico y estudio termográfico de revoques de cal y cemento* (Elías López, Roux Gutiérrez, Lucero González, & Gómez Cruz, 2012), se mide la transferencia de calor a los aplanados. *Liesegang rings in differential deterioration patterns of lime mortars* (Delgado Rodrigues, 2016), analiza la diferencia del deterioro de las piedras y los morteros de cal ante el medio ambiente, siendo lecturas muy variadas de las propiedades de la cal que aportan puntos de vista muy válidos.

Respecto al desarrollo tecnológico de nuevos materiales y aditivos, la caracterización de pastas de cal con aditivos puzolánicos es una línea de investigación muy importante, en *Effect of puzzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters* (Cerný, Kunca, Tydlitát, Drchalová, & Rovnanílová, 2005) se realizan pruebas como resistencia a la compresión y flexión, conductividad térmica, capacidad calorífica específica, capacidad de absorción de agua, difusividad de la humedad, el coeficiente de difusión de vapor de agua de tres pastas de cal con aditivos puzolánicos.

También los morteros de cal sin necesidad de cemento, *Hormigones de cal: nuevos "viejos" materiales* (Ramon Rosell & Bosch, 2028), muestra el uso de cal sin necesidad del cemento, sólo cuidando el proceso de realización y aplicación de las mezclas.

El artículo, *Cal, un material como una renovada opción para la construcción* (Galván-Ruiz & Velázquez-Castillo, 2011), se aborda el tema de las cales de construcción en polvo que existen en México, se mencionan marcas y se hacen estudios de difracción de rayos X, Microscopía electrónica de barrido (MEB), Espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR),



Espectrometría de masas por inducción de plasma acoplado (ICP-MS) y Dispersión dinámica de luz (DLS).

La aplicación de la pasta de cal es parte importante del acabado final y es lo que trata el artículo *Influencia del tratamiento "a fuego" en las características del estuco tradicional con cal* (González-Yunta, González-Cortina, & Lasheras- Merino, 2015), donde se recupera la técnica tradicional del estuco al fuego o planchado, utilizando instrumentos metálicos a altas temperaturas.

Por último es importante tratar la cal desde las instituciones y normativas existentes; en la revisión bibliográfica se encontraron algunas fuentes interesantes. En España la Asociación Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España creó la *Guía Práctica para los Morteros con Cal* (Asociación Nacional de Fabricantes de Cales), el objetivo es dar a conocer a los profesionales de la construcción el procedimiento de la aplicación de morteros de cal en todo el ámbito de la construcción. Contiene la definición de los morteros de cal, los componentes, características y normativas, las ventajas de los morteros de cal, morteros de cales industriales, morteros realizados en obra, revestimientos con morteros de cal, estucos, encalado con pasta o lechada, mezclas de yeso y cal, etc. Además se complementa con la normativa actual de Europa, las precauciones de su manejo y los miembros asociados a la ANCADE.

En México, la empresa OXICAL realizó un manual sobre *La Cal de Alta Pureza en la Conservación* (Soledad Carvajal, y otros, 2017), en este documento promocionan sus productos de cal apagada artesanalmente de alta pureza, para el uso de la restauración de bienes muebles e inmuebles. El contenido contempla: la cal en la conservación del patrimonio cultural, ciclo de la cal aérea: proceso de elaboración, uso en conservación, ventajas de la cal, cal de alta pureza, diferencias entre la cal de alta pureza



y la cal común, apagado de la cal de alta pureza en forma de pasta, efectos del añejamiento, uso de la argamasa, aplicaciones estructurales, aplicación en acabados finos e impermeabilizante base cal.

Marco de referencia

La cal fue uno de los primeros cementantes producidos para la edificación, ha sido parte de la historia de la construcción y diversas civilizaciones. Sin embargo, con el surgimiento del cemento su uso e investigación fue disminuyendo al considerarlo material de baja calidad en comparación con el concreto.

La cal es un material versátil por sus tantas posibles aplicaciones, por lo que es necesario conocer sus cualidades desde los diferentes usos, como en los morteros de cal. Se considera que las principales características son su plasticidad, trabajabilidad, adherencia, buen aislamiento térmico, desinfectante y fungicida natural (Fernández Aller, 2014) entre otros.

El uso de la cal apagada artesanalmente hasta hoy se sigue considerando como el material más óptimo para la restauración, pero no existe una base técnica escrita que nos pueda aportar el porqué de dicha afirmación. Por este motivo en esta investigación se recopila información cuantitativa para que el restaurador o/y constructor pueda tomar una mejor decisión sobre la mejor opción según el caso de aplicación y cuál puede tener a su alcance sin entorpecer el avance la obra.

Marco metodológico

Para el desarrollo de la investigación se consideró la metodología por combinación de técnicas cuantitativas y cualitativas (figura 1). Se dividió en partes o fases, siendo tres: la historia, la arquitectura (con mayor pertinencia de la restauración) y la ciencia de los materiales (ingeniería de materiales) (figura 2). Consta de tres partes que son los antecedentes de la cal,



caracterización y análisis, siendo un trabajo multidisciplinario donde varias líneas se conjuntan para realizar la investigación. Este enfoque es necesario en los trabajos académicos ya que permite lograr grandes resultados con la unión de distintas perspectivas y el trabajo colaborativo.



Figura 1. Líneas que se conjuntan para la realización de la investigación

En los antecedentes se define el concepto de la cal, su ciclo, la evolución tecnológica, los tipos de cales que existen actualmente y los trabajos de restauración donde es el material componente. En la parte experimental se realizan la caracterización física y mecánica de algunas de las cales que existen y por último se realiza un análisis de los resultados para ayudar al restaurador o constructor a tomar la mejor decisión.



Figura 2. Pensamiento para el proceso de la metodología

Criterio de selección de muestras

Al comenzar la investigación fue necesario definir cuáles son las cales que se usan en la restauración. Se consideran las siguientes cales:

Tipo de cal	Presentación
Cal apagada artesanalmente con un añejamiento de dos años y medio	En pasta añejada en cubeta de 19 litros.
Cal de alta pureza con un contenido de hidróxido de calcio del 95%	En polvo en saco de 25 kilos de papel kraf.
Cal de alta pureza con un contenido de hidróxido de calcio del 90%	En polvo en saco de 25 kilos de papel kraf.
Cal de construcción macerada por dos años y medio.	En pasta añejada en cubeta de 19 litros.
Cal de construcción	En polvo en saco de 25 kilos de papel kraf.



La cal apagada artesanalmente es la recomendada por restauradores y por el Instituto de Nacional de Antropología e Historia (INAH), por considerar las características como adhesividad, trabajabilidad, plasticidad y su color blanco, que son propiedades que se buscan en el tratamiento de los sistemas constructivos de los edificios antiguos.

El proceso para trabajar con esta cal es complejo, porque se debe adquirir la cal viva en piedra, posteriormente colocar en artesas donde previamente debe haber suficiente agua para su hidratación y su posterior transformación en pasta, se debe estar mezclando cuidándose de la reacción exotérmica que se genera, y se debe mantener con un espejo de agua, también se recomienda mantenerla en la artesa un mínimo de tres semanas a seis meses.

La cal de alta pureza o conocida también como cal química es un polvo muy fino, por su alto contenido de hidróxido de calcio, ésta se ha usado en algunas restauraciones siendo los resultados muy similares a la cal apagada en obra pero sin un proceso previo de apagado ya que esta hidratada y en polvo, listo para mezclarse.

La cal de construcción, ha sido una alternativa de los constructores para sustituir la cal apagada artesanalmente por ser necesaria una cantidad mínima, al dificultarse la adquisición de la cal viva y al desconocer el proceso de apagado. Es una buena opción porque al ser cal, sigue teniendo las características de plasticidad y adherencia pero es necesario conocer las proporciones correctas para ser utilizada en la restauración ya que por su bajo contenido de hidróxido de calcio su comportamiento en seco es distinto que las otras cales.

La cal de construcción macerada por dos años y medio, fue elegida para conocer si la cal de construcción con un mayor tiempo de hidratación lograba adquirir las características similares a la cal apagada



artesanalmente. Por ello, un saco de 25 kg se transformó en pasta dejándola en recipiente plástico con tapa, con su espejo de agua para su posterior análisis.

Cada cal fue seleccionada al conocerse que ha sido usada a nivel de la República Mexicana para los trabajos de restauración y aunque se sabe que la cal de grado alimenticia también ha sido usada en la restauración solo se realizó la prueba de área superficial para conocer su valor y al no ser similar a las cales de alta pureza o cal apagada artesanalmente se descartó de la caracterización física y mecánica, dejando la posibilidad en una futura investigación de realizar y comparar dichos resultados.



Capítulo I

Antecedentes de la cal

En este primer capítulo se tratará la cal, desde el enfoque del material constructivo y sus propiedades, ya que este material es el más usado en la restauración y conservación del patrimonio. Se retomará desde el inicio del ciclo de la cal, los tipos de cal más comunes que se producen actualmente en México, el proceso de producción y el uso de la cal en la restauración.

Para entender la cal debe antes entenderse su composición, siendo un material derivado de la calcinación de carbonato de calcio. La arcilla fue el primer material que se utilizó como aglomerante, puesto que es un suelo fino con propiedades cementantes bajas. Posteriormente se derivó su uso en la producción de cal y yeso que lograban una mayor resistencia que la arcilla simple. Todos estos materiales ayudaron a la consolidación de diversas y distantes civilizaciones gracias a su uso en la edificación e infraestructura. Actualmente todos estos materiales son usados en la construcción de edificios y caminos, de ahí la importancia de conocer los antecedentes de los materiales de construcción.

Los primeros documentos que se refieren al uso y producción de cal los encontramos en Vitruvio en sus tratados donde se describe el proceso de producción de cal como:

[...] una vez consumidos y desaparecido el agua y el aire inherente en estas piedras, en su interior poseerán un calor latente y subsistente; mojándolas en agua, antes de recibir la fuerza del fuego, al ir penetrando la humedad en la porosidad de sus pequeñas aberturas, comienzan a calentarse y, de este modo, al refrescarlas, sale el calor del interior de la cal (Vitruvio, 2000)

Sintetizando el proceso Vitrubio explica cómo se elegían las mejores piedras que desde su consideración eran óptimas, las calcinaban y posteriormente las mojaban con agua hasta obtener una pasta que podía usar, este proceso no ha cambiado con los siglos, sólo se ha implementado una mejor



tecnología en la calcinación e hidratación, además de estar regidos por normas de calidad.

En México la cal tuvo gran importancia en las culturas antiguas, se cree que muchas de las técnicas de producción tradicionales, así como los usos actuales de este material, se derivan de prácticas y tecnologías prehispánicas. (Villaseñor Alonso & Barba Pingarrón, los orígenes tecnológicos de la cal, 2012). Estos usos de la cal conllevan a que en la restauración de edificios antiguos siga siendo usada por su compatibilidad con los sistemas constructivos y materiales. Es necesario conocer los antecedentes de la cal para una mayor comprensión de su proceso y su actual uso en la construcción y sobre todo en la restauración y conservación de monumentos.

Ciclo de la cal

El proceso de elaboración de la cal es parte de un ciclo (figura 3), donde comienza siendo una roca caliza que pasa por un proceso de transformación por medio de la mano del hombre para poder ser utilizada, pero por su composición química llegará de nuevo a convertirse en carbonato de calcio y el ciclo puede volver a comenzar.

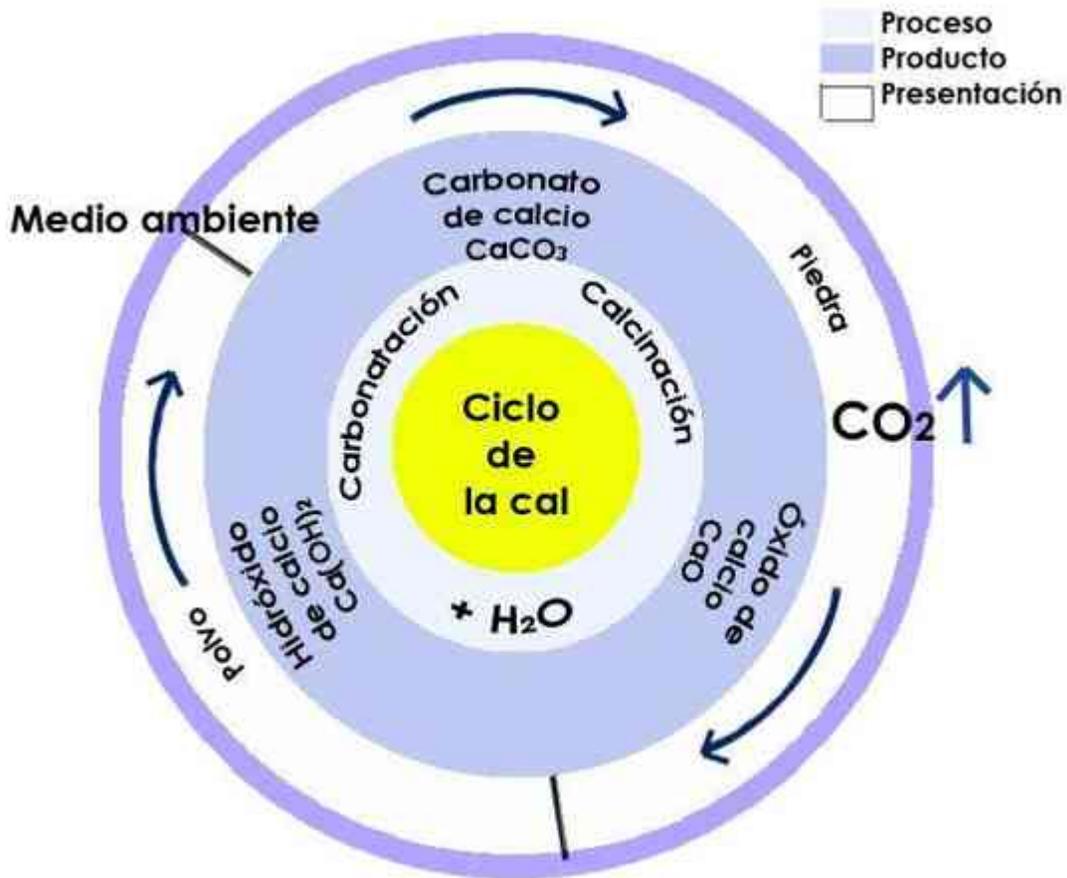


Figura 3. Ciclo de cal
Esquema realizado por el autor

La materia prima para producir la cal es el carbonato de calcio, Hassibi lo describe como:

"[...] es un mineral que se encuentra en forma natural, su composición química y características físicas varían de un área a otra área, pero sin variación en las vetas de un mismo banco." (Hassibi, 1999).

Las calizas presentan colores distintos de acuerdo a su lugar de origen o composición química y éste da como resultado el color final de la cal, en la figura 4 se observan dos tonalidades de piedra: una beige que da como



resultado la cal del mismo color y la gris también llamada azul, que da como efecto cal blanca.



Figura 4. Piedras calizas del banco de Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán, México

Foto: tomada por el autor

El óxido de calcio también conocido como cal viva lo define la Secretaría de Comunicaciones y Transportes como:

"[...] el producto de la calcinación de la roca caliza, constituido en su mayor parte por óxido de calcio (CaO), o bien óxido de calcio asociado con óxido de magnesio (MgO), capaces de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación." (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, N-CMT-4-03-001/02)

El hidróxido de calcio, cal hidratada o simplemente conocida como cal queda definido como según SCT:

[...] es un polvo seco, obtenido al tratar cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química, provocando su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio (Ca (OH)₂) o una mezcla de hidróxido



de calcio, óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de magnesio y de calcio (Mg (OH)2). (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, N-CMT-4-03-001/02)

El ciclo de la cal está formado por tres principales componentes, carbonato de calcio, óxido de calcio (cal viva) e hidróxido de calcio (cal), y de ahí surgen distintos productos. Con carbonato de calcio se obtienen distintas granulometrías (gravas, arenas, gravilla y finos) que pueden ser usados en mezclas de concretos y morteros. La cal viva puede ser usada para secar suelos, estabilizador de arcillas, o como material fundente entre otros usos. Para la cal en polvo existen distintos tipos que pueden ser usados para distintas industrias como se plantea en el siguiente apartado.

Tipos de cales

La versatilidad de la cal permite que se tenga una gran variedad de aplicaciones en distintas industrias por lo que existen en el mercado distintos tipos de cales, que de acuerdo a la Asociación de Fabricantes de Cal A.C., dependen de su contenido de hidróxido de calcio, carbonato de calcio y otros compuestos. La ANFACAL las clasifica de la siguiente manera:

Cal química: es un hidróxido de calcio o cal hidratada de alta concentración de Ca(OH)_2 , normalmente por arriba del 90%. (ANFACAL, 2018)

Cal de construcción: comprende los hidróxidos de calcio con o sin magnesio, denominados cales hidratadas con contenidos del 75% al 85% en dichos hidróxidos, su campo de aplicación se enfoca a la industria de la construcción. (ANFACAL, 2018)

Cal siderúrgica: es un tipo de cal viva con al menos 90% de óxido de calcio y muy bajos contenidos de sílice, azufre y fósforo. (ANFACAL, 2018)

Cal química grado alimenticio: Es una particularidad de la cal química que además de la alta concentración de hidróxidos cumple las normas de



contenidos máximos de metales pesados y compuestos nocivos para la industria de alimentos. (ANFACAL, 2018)

Cal agrícola: envuelve toda la gama de cales incluidos los carbonatos precursores de las mismas, la particularidad es que su aplicación es como un mejorador de suelos agrícolas. (ANFACAL, 2018)

Cal dolomítica: es la que para su fabricación se partió de un carbonato doble de calcio y magnesio y no de una caliza que es rica solo en carbonato de calcio. (ANFACAL, 2018).

Estos distintos tipos de cales se crearon por las necesidades de las distintas industrias. Por ese motivo muchas no son conocidas en el ámbito de la construcción y restauración. En la tabla 1 se concentran algunos de los usos y las industrias que pueden llegar a utilizar las distintas cales de acuerdo a la ANFACAL (<http://anfocal.org/>).

Tabla 1. Usos de la cal de acuerdo a la ANFACAL

Industria	Para que se usa la cal	Tipo de cal que se emplea
Restauración	Morteros y pastas	Cal química
Construcción en general	Mezclas asfálticas	Cal química Cal de construcción
	Estabilización de suelos	
	Producción de block de tierra comprimida (BTC)	
	Morteros	
	Pinturas e impermeabilizantes	
Concretos como aditivo		
Minería metálica (oro, plata)	En la formación de pilas de lixiviación para dar consistencia granular y elevar el pH.	Cal química Cal siderúrgica
Industria para las aleaciones del hierro y Metalúrgica	Se utiliza como fuente fundente, reduce la temperatura de fusión y mantiene la escoria líquida, captura el azufre, reacciona con los silicatos y elimina el fósforo.	Cal química Cal siderúrgica



(aluminio/cobre)	Protege el fierro esponja y evita su oxidación a la intemperie.	
	En procesos de fundición concentración y refinación de los metales.	
Industria del vidrio	Sirve como estabilizantes de la mezcla del vidrio.	Cal química
Acuicultura	En los crustáceos se utiliza como agente de desinfección y control de patógenos	Cal química
	En los moluscos y peces, en la protección contra vectores infecciosos provee una fuente de calcio esencial.	
Agricultura	Neutraliza la acidez del suelo, se puede usar cal hidratada o carbonato de calcio molido y evita problemas relacionados con el aluminio intercambiable.	Cal química Cal agrícola
	Las cales dolomíticas neutraliza los suelos, evitan problemas relacionados con el aluminio y aportan contenidos de magnesio al suelo.	Cal Dolomítica
Usos ecológicos	Tratamientos de aguas	Cal química
	Tratamientos de lodos	
	Desulfuración de gases	
	Remediación de suelos contaminados	
	Confinamiento de residuos	
Alimentación	Para su uso en la nixtamalización	Cal química grado alimenticio
	En la clarificación de los jugos concentrados de la caña o remolacha azucarera	
	En los lácteos para neutralizar los ácidos que se forman en los diferentes procesos.	
Químicos	Regenerar sosa cáustica a partir de residuos de procesos ricos en bicarbonato de sodio y disminuir el costo de la misma, es muy utilizado en una gran cantidad de industrias entre otras la de la pulpa y el papel	Cal química
	Industria farmacéutica como medio de encapsulamiento de los comprimidos y formar compuestos absorbentes del bióxido de carbono que se emplean en los respiradores de las salas de cirugía.	
	En la industria de los lubricantes se utiliza junto con los fenoles para formar fenatos de calcio que son los aceites automotrices e industriales que utilizamos día a día	



En el hogar	Desinfección de frutas y verduras	Cal química
	Como bactericida y eliminación de olores	

Proceso de producción

El uso de la cal en las civilizaciones prehispánicas fue limitado ya que para su producción se requería de varios procesos complejos (Guerrero, 2013, pág. 50), entre ellos la mano de obra calificada, el tiempo requerido, materiales óptimos para la calcinación y la cantidad de agua requerida para su apagado y transformación a pasta.

Como se mencionó, el ciclo de la cal es un proceso en el que la mano humana está presente, lo menciona Luis Guerrero: “[...] en el desarrollo de las culturas constructivas, seguramente de manera accidental, se descubrieron las singulares propiedades aglutinantes que adquirían algunas piedras al ser calcinadas, humedecidas y luego secadas.” (Guerrero, 2013, pág. 50) A partir del descubrimiento el proceso de producción ha tenido una importante evolución, esto debido en gran parte a la nueva tecnología que transformó la industria de la cal con hornos e hidratadoras más eficientes.

La producción de cal se puede separar en etapas o fases (figura 5):



Figura 5. Fases de la producción de cal

Extracción

Los bancos de carbonato de calcio son abundantes en la corteza terrestre, para su extracción comúnmente se requiere de explosivos por medio de barrenar las rocas y mediante maquinaria son transportadas. (figura 8).



Figura 6. Cantera de Carbonato de Calcio, Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán

Foto tomada por el autor, febrero 2015



Figura 7. Banco de Carbonato de Calcio, Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán

Foto tomada por el autor, febrero 2015

Trituración

En la extracción, el tamaño de roca es muy grande por lo que es necesario un proceso de trituración (figura 9), en él se obtienen distintos tipos de granulometrías, el tamaño para la calcinación comúnmente es de 4" (pulgadas). Los tamaños de granulometrías más pequeñas son utilizadas como grava y arena; por último, las todavía más pequeñas se van a molienda para convertirlas en polvo.



Figura 8. Proceso de extracción. Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán

Foto tomada por el autor, febrero 2015



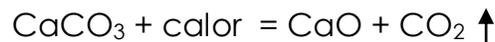
Figura 9. Trituración. Calera de Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán

Foto tomada por el autor, febrero 2015



Calcinación

La calcinación es uno de los procesos principales del ciclo de la cal, en esta fase: “[...] el carbonato de calcio (CaCO_3) es calentado en hornos para evaporar el anhídrido carbónico (CO_2) y se produce óxido de calcio.” (Hassibi, 1999). El dióxido de carbono se convierte en gas, que anteriormente evacuaba a la atmósfera pero por cuestiones ecológicas los nuevos hornos reciclan este gas.



Carbonato de calcio + calor = óxido de calcio + dióxido de carbono(gas)

La temperatura que se requiere es alrededor de 900°C .

Los factores según Hassibi, que fijan la calidad de la cal viva son los siguientes (Hassibi, 1999):

- A) Composición química de la caliza
- B) Temperatura de horneado durante la calcinación
- C) Tiempo de permanencia del CaO en el horno calcinación.
- D) Permanencia del CO_2 en la atmósfera del horno de calcinación.

El tamaño de la piedra caliza que es calcinada es de vital importancia ya que afecta el producto final de la siguiente manera: “La partícula grande (figura 10) en que el calor no penetra hasta el centro de esta quedando carbonato de calcio en el corazón de la partícula y recubierta por óxido de calcio, el centro de esta partícula es lo que llamamos arenilla.” (Hassibi, 1999) También se le conoce como corazón, en el sector de la restauración. Al apagarse artesanalmente este desperdicio es necesario desecharlo, tomando tiempo y mano de obra.

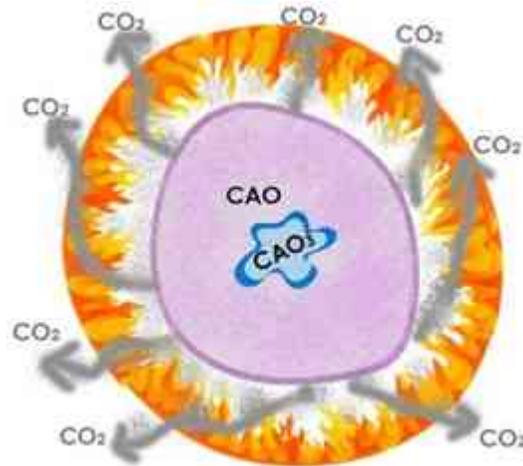


Figura 10. Partícula grande de óxido de calcio
Realizado por el autor

“Para las partículas de tamaño medio (figura 11), el calor penetra en su totalidad completando la conversión de todo el carbonato de calcio a CaO.” (Hassibi, 1999). En los hornos Mearz¹ el tamaño de piedra caliza para una óptima calcinación es de 4” (pulgadas).

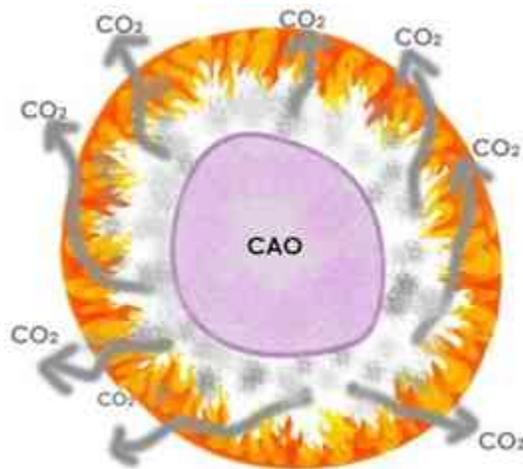


Figura 11. Partícula mediana de Óxido de Calcio
Realizado por el autor

¹ Horno desarrollado en 1965 en Zúrich, Suiza, se les conoce como hornos regenerativos por que utilizan los gases de la combustión para precalentar la piedra, consiste de dos cámaras paralelas verticales y permite obtener cales de alta pureza.



“En la partícula pequeña (figura 12) el calor llega rápidamente al corazón de la partícula y la cubierta de esta se sobrecalienta formando una capa dura. Donde el agua no puede penetrar, entonces el proceso de apagado es retardado o impedido.” (Hassibi, 1999). Este fenómeno anteriormente generó varios problemas en la construcción, porque al aplicarse la cal sigue hidratándose con la humedad del medio ambiente generando el concepto conocido como “palomeo²” que consiste en la liberación de gases que provocan “burbujas” o expansiones en los morteros dando un mal aspecto al acabado final.

Este fenómeno puede ocurrir en los procesos de restauración ya que al apagarse la cal se debe mover constantemente la pasta para que la hidratación sea homogénea, Vitruvio lo menciona en su capítulo segundo: “Cuando la cal no está perfectamente macerada y es reciente, como tienen pequeñas piedrecitas sin cocer, al echarla produce ampollas, se va deshaciendo y acaba destruyendo la superficie del estuco, sí se macera una vez comenzada la obra.” (Vitruvio, 2000, pág. 265).

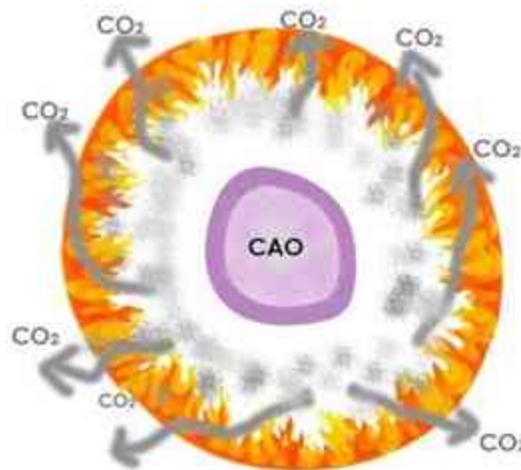


Figura 12. Partícula pequeña de Óxido de Calcio
Realizado por el autor



Hornos

Lo anterior mencionado ayuda a comprender que el proceso de calcinación debe ser de calidad, optando por el correcto tamaño de piedra caliza y mantenimiento de la temperatura constante: “[...] la temperatura del horno de secado afecta la calidad de la cal viva producida, por consiguiente el resultado de la lechada de cal producida en el apagador de cal.” (Hassibi, 1999).

La fabricación de la cal ha tenido una renovación de “[...] las antiguas técnicas de fabricación, intentándose con esto que las cales que actualmente se fabrican presenten mejores propiedades de trabajabilidad y de acabado.” (Luque, y otros, 2006).

Los hornos para la calcinación de la cal han evolucionado desde los primeros hornos artesanales hasta los de alta tecnología. El material principal para la calcinación usado en el periodo prehispánico fue la madera, vegetación seca y en algunos casos carbón; este mismo combustible fue utilizado hasta que comenzaron a comercializarse los derivados de petróleo dando la oportunidad de usar gas o coque³, entre otros insumos que permiten un mejor control de la temperatura.

La tecnología es el reflejo de la temporalidad y esto se observa en la producción de cal donde los hornos se han ido modificando a través del tiempo (figuras 13, 14, 15 y 16).

³ Combustible sólido, ligero y poroso que resulta de calcinas ciertas clases de carbón mineral (Real Academia Española)

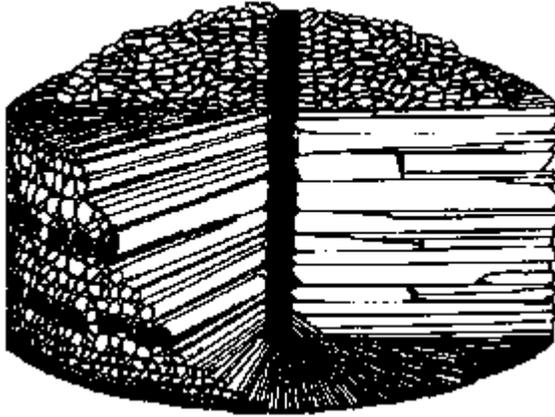


Figura 13. Calcinado de cal tradicional de algunas regiones culturales prehispánicas mediante piras al aire libre.

Encontrada en (Bedolla Arroyo J. , 2008)



Figura 14. Horno del siglo XIX y XX.

Foto: Jaime Reyes



Figura 15. Horno vertical del siglo XX, Planta Calidra en Jungapeo, Michoacán.

Foto: tomada por el autor, febrero 2015



Figura 16. Horno Maerz del siglo XXI Planta Calidra en Jungapeo, Michoacán.

Foto: tomada por el autor, febrero 2015



Figura 17. Horno rotatorio siglo XX, REBASA
Fuente: www.rebasa.com.mx/historia.php Julio 2019

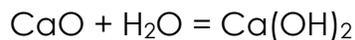


Figura 18. Horno Maerz siglo XXI, REBASA
Fuente: www.rebasa.com.mx/historia.php Julio 2019

Se sabe que la temperatura y mantenimiento del calor en el horno es crucial. La calidad de las cales de los hornos antiguos es cuestionable porque generar la cantidad de calor necesaria y que se mantenga constante alrededor de la piedra es difícil de lograr, produciendo cal quemada o cruda en algunos casos con una calidad insuficiente.

Hidratación

La hidratación consiste en utilizar agua para transformar la cal a polvo: “[...] cuando se hacer con la cantidad de agua justa se llama “Hidratación Seca”. En este caso de hidratación el producto es un polvo seco. Cuando se usa un exceso de agua en la hidratación el proceso de llama “apagado”, en este caso el producto resultante tienen la forma de lechada.” (Hassibi, 1999, pág. 2) , ambos procedimientos generan la cal hidratada o hidróxido de calcio.



Óxido de calcio+ agua = Hidróxido de calcio

Cal viva + agua = cal hidratada



Dentro del ramo de la restauración es conocido que al apagar la cal esta crece en volumen un 30%, esto se debe a que: “[...] el volumen de agua estimada para apagarla suele ser un tercio del peso de la cal (Calama Rodríguez, 2014, pág. 126). Exactamente es necesario 1 kg de CaO + 0.32 kg de agua y producen 1.32 kilos de lechada de cal.” (Hassibi, 1999, pág. 2). Se debe considerar que la relación agua-cal también afecta el tiempo de apagado.

Al igual que todos los procesos mencionados es necesario tener en cuenta los factores que afectan el apagado, directa o indirectamente, los cuales son menciona Mohammad Hassibi (Hassibi, 1999):

- A) Tipo de caliza usada para la calcinación
- B) Proceso de calcinación para producir óxido de calcio
- C) Temperatura de apagado
- D) Relación Agua-óxido de calcio
- E) Grado de agitación durante el apagado
- F) Viscosidad de la lechada
- G) Tiempo de Apagado
- H) Temperatura del agua
- I) Apagado aéreo

Dentro del apagado artesanal de la cal existen diversas recomendaciones que dan la calidad terminal de la cal entre ellos: “[...] los clásicos recomiendan para el apagado que la cal sea muy reciente y muy cocida la piedra, pues tardará si no más en calentarse y convertirse en polvo y quedará mal dividida.” (Garate Rojas, 2002), esto se debe a que el óxido de calcio comienza a hidratarse con el medio ambiente y no tendrá la misma reacción exotérmica que se espera.



Envasado

Este proceso es variado ya que depende del resultado de la hidratación o la necesidad del que va usar el producto. En la industria de la cal, el envasado más común en polvo es en bolsas de papel Kraft de 25 kg (figura 19), pero también puede ser distribuido en big bag⁴ (figura 20) o en camiones de volteo al aire libre o presurizado.



Figura 19. Bolsas de papel Kraft
Foto: tomada por el autor, 2016



Figura 20. Cal viva en big bag
Foto: tomada por el autor, 2016

El proceso de producción de cal no ha cambiado, sino ha evolucionado al manejar tecnología industrial para producir nuevas cales y de calidad en las mismas, lo que nos lleva a considerar que las nuevas cales puedan ser

⁴ Envase tejido de polipropileno con capacidad de 2000 kg, tienen forma de bolsa grande, disponen de una apertura total en la parte superior, cuentan con asas o cintas para el transporte y algunas de ellas tienen una apertura que puede cerrarse en la parte inferior para un vaciado rápido del material almacenado



utilizadas en los trabajos de restauración evitando el apagado previo y utilizar cales ya industrializadas y listas para realizar mezclas.

Trabajos de restauración y conservación con cal

La cal apagada artesanalmente es la que se recomienda ampliamente para los trabajos de restauración, esta debe tener un añejamiento para obtener las características necesarias para cada uso, en la tabla 2 se muestra la recomendación del añejamiento.

Tabla 2. Añejamiento recomendado de la cal apagada artesanalmente

Uso en la restauración	Tiempo recomendado de añejamiento
Mortero para asentado de mampostería irregular.	1 mes mínimo
Morteros como aglutinante para asentado en mampostería y sillerías.	2 meses mínimo
Morteros para recubrimientos exteriores en mampostería de piedra brasa (volcánica) irregular.	2 meses mínimo
Morteros para recubrimientos interiores o en mamposterías de piedra ignimbrita.	3 meses mínimo
Pastas para enlucidos y requemados.	4 meses mínimo

La cal principalmente es usada en acabados y estructura para la consolidación y restauración, Luis Guerrero comenta que: “[...] desde tiempo inmemorial, ha buscado dar respuesta a dos requerimientos constructivos; la unión de componentes estructurales y los recubrimientos.” (Guerrero, 2013), en forma de mortero de cal-arena y cal-cemento-arena o en pasta para acabados finos como el bruñido. En restauración de pinturas murales y bienes muebles. Principalmente estos trabajos son parte de las consolidaciones e integraciones (Tabla 3) que se realizan en la restauración,



en cada una de las dosificaciones o proporciones son recomendaciones o se basan de acuerdo a la experiencia del restaurador ya que son se cuenta con información de cada una de ellos.

Tabla 3. Trabajos en la restauración que es necesario usar la cal

Parti da	Acciones	Forma	Material
Consolidaciones	Rejunteo en elementos de mampostería	Mortero	Cal-arena
	Inyección de grietas en bóvedas, cubiertas o muros de mampostería	Mortero	Cal-arena fina-expansor
	Consolidación de muros de mampostería	Mortero	Cal-arena
	Consolidación murales	Mortero	Cal-arena
	Recalce de muros	Mortero	Cal-arena
Integraciones	Colocación de piezas	Mortero	Cal-arena
	Colocación de teja de barro	Mortero	Cal-arena
	Integración de piezas ornamentales	Mortero	Cal-arena
	Integración de aplanados interior y exterior	Mortero	Cal-arena
	Integración de ladrillo	Mortero	Cal-arena
	Pintura a la cal	Pasta	Cal-agua
	Restitución y/o colocación de enlucidos (bruñido)	Mortero	Cal-arena fina y pasta
	Inyección de grietas	Mortero	Cal-arena fina-expansor de volumen no ferroso
	Secado de terrados	Mezcla	Cal en polvo
Aca bad os	Impermeabilizante	Mezcla	cal-piedra lumbre-jabón de pan-agua

Los morteros de cal-arena en su mayoría son los más utilizados en los trabajos de restauración y consolidación por lo que es necesario tener una cal de calidad y que sus características se ajusten a los sistemas constructivos de la obra en particular por lo que es necesario conocer las cales que son usadas y las que pueden ser usadas en la restauración, por lo que en el siguiente capítulo se explican algunas de las pruebas que pueden ser realizadas para conocer más las particularidades de distintas cales, tanto en pasta como en polvo.



Capítulo II

Caracterización de las cales

La cal es el principal material cementante usado en la restauración y consolidación de monumentos, además de su uso generalizado en procesos de construcción. Por ello es necesario conocer las particularidades de las diferentes cales que pueden servir para mejorar los métodos de restauración. Para determinar estas propiedades es necesario realizar una caracterización de cada una de ellas.

La caracterización consiste en estudiar las particularidades físicas, químicas, morfológicas y micro estructurales de los materiales. En esta investigación en particular se realizaron caracterizaciones físicas y mecánicas de cales de alta pureza en polvo con un contenido de hidróxido de calcio de 90% y 95%, cal de construcción en polvo, cal apagada artesanalmente con un añejamiento, envejecimiento, hidratación de dos años y medio, y cal de construcción transformada en pasta y macerada por dos años y medio. Con estas cales se realizaron cubos de 5cm x 5cm x 5 cm de pasta⁵ y de mortero⁶, también especímenes de briquetas (3 pulgadas = 7.62 cm x 1 pulgada = 2.54 cm de ancho en parte estrecha, cilindros (5 cm Ø x 10 cm de altura y vigas (prismas de 4 cm x 4 cm x 16 cm).

Para la realización de estas pruebas es necesario un enfoque multidisciplinar de especialidades, como la arquitectura con un importante apoyo del área de las ingenierías y de la física que aportan una metodología de experimentación. Las técnicas usadas permitieron realizar estudios profundos de manera cuantitativa. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería

⁵ Mezcla de cal-agua

⁶ Mezcla de cal-arena-agua



Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y en el Laboratorio del Instituto de Investigación en Metalurgia y Materiales de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Con las pruebas físicas se obtuvieron datos del área superficial, que aportan información sobre la reactividad de la cal ante el agua; la velocidad de pulso, que permite teorizar sobre la homogeneidad de la pasta o mortero; y la resistividad del material en su estado endurecido, que aporta información sobre la estructura, densidad, homogeneidad, tamaño y distribución del poro.

Las pruebas mecánicas consistieron en encontrar los valores de resistencia a la compresión. Aunque para la restauración no se requiere una capacidad máxima de carga es necesario conocer la diferencia que existe entre las distintas cales y sus composiciones y cuál de ellas puede ser una mejor opción para ciertos trabajos donde sí se requiere una mayor resistencia.

Selección de cales para la experimentación

Para la etapa de experimentación se tuvieron en cuenta cinco tipos de cales, que han sido o pueden ser usadas en la restauración por distintas características:

Las cales en polvo se adquirieron en bolsas de papel Kraft de 25 kg como se expenden localmente. La cal apagada artesanalmente tuvo un apagado previo desde hace dos años y medio y se mantuvo en pasta añejada por ese periodo. La cal de construcción en pasta se maceró por dos años y medio. Ambas cales en pasta se mantuvieron con un espejo de agua para evitar el contacto con el medio ambiente en recipientes plásticos con tapa de 19 litros.



Para facilitar el proceso de experimentación de las cales se les identificó con una clave para marcar y vaciar datos más ágilmente. En la tabla 4 se encuentra el clave, la descripción de la cal, su presentación y su procedencia de fabricación

Tabla 4. Cales

Clave	Tipo de cal	Presentación	Procedencia
CAP95	Cal alta pureza con un contenido de hidróxido de 95%	Polvo	Calera de Acajete, Puebla, México
CAP90	Cal alta pureza con un contenido de hidróxido de 90%	Polvo	Calera de Piedras de Lumbre, en Jungapeo, Michoacán de Ocampo, México
CAA	Cal Apagada Artesanalmente con un añejado de 2.5 años	Pasta	Calera de Piedras de Lumbre, en Jungapeo, Michoacán de Ocampo, México
CCA	Cal de construcción hidratada por 2.5 años	Pasta	Calera de Piedras de Lumbre, en Jungapeo, Michoacán de Ocampo, México
CC	Cal de construcción	Polvo	Calera de Piedras de Lumbre, en Jungapeo, Michoacán de Ocampo, México

Propiedades de las cales en base a fichas técnicas del fabricante.

Tanto las cales de alta pureza como la cal de construcción se presentan en un polvo sólido blanco e inodoro, éste se puede deshidratar a una temperatura de 580°. La cal apagada en obra en su origen fue cal viva. La cal de construcción ya macerada se considera de la misma procedencia y tipología que la cal de construcción en polvo.

Las propiedades que tienen las cales cuando salen de la calera son:



Tabla 5. Propiedades de las cales de acuerdo a la ficha técnica del fabricante.

	pH en una solución de 1% en agua a 25°C	Concentración del contenido de hidróxido de calcio (%)	Óxido de sílice (%)	Peso molecular g/Mol	Densidad relativa kg/lt	Solubilidad al agua 20°C mg/l
Cal alta pureza 95	12.45	95-96	0.10-0.5	74.10	0.40-0.60	1650
Cal alta pureza 90	12.45	90-94	0.10-2.0	74.10	0.60-0.70	1650
Cal construcción	12.45	75-85	0.10-2.0	74.10	0.50- 0.70	1650
Cal viva	12.45	80-95	0.10-2.0	56.10	0.70- 1.30	1650

Tabla realizada con información de fichas técnicas (ver anexo) de los productos Quimex 95, Quimex 90, Calidra y OXID

Diseño de muestras

El diseño de las muestras consiste en plantear la dosificación adecuada de los materiales para obtener una mezcla con características físicas y mecánicas adecuadas para un uso en particular. La cantidad de agua utilizada para la realización de pastas y morteros fue la necesaria hasta lograr la consistencia ideal para aplicarse en un muro con una llana metálica. Para las cales que estaban en pasta no hubo necesidad de aplicar más agua ya que contenían exceso de agua en un porcentaje de la mezcla (ver tabla 6). Para realizar los morteros con las pastas se añadió una cantidad mínima de agua ya que los finos de la arena absorbieron la existente en las pastas.

Tabla 6. Contenido de agua de las pastas añejadas

Cal en Pastas		
Clave	Kilos de pasta de cal	Contenido de agua
CAA	10.89 *	31%
CCA	11.35	26%

*la pasta de cal ya había sido colada para eliminar los corazones



Como en la restauración no existen dosificaciones establecidas universales para los distintos trabajos de restauración se optó por realizar la proporción 4:5 que es la óptima y recomendable para el pegado de mampostería y aplanados en la muros de mampostería irregular.

Tabla 7. Dosificación para los morteros de cal

Cal	Arena	agua
4	5	1.5
Dosificación en volumen		

En cuanto el agua se pudo observar que la cantidad necesaria es de un litro de agua por cada kilo de cal en polvo que se añade a la mezcla. Se debe considerar que la arena se encontraba seca, por lo que puede variar de acuerdo al árido que se utilice para la realización de morteros.

Elaboración de especímenes para las pruebas

Para las pruebas físicas de velocidad de pulso ultrasónico VPU, resistividad eléctrica R_E y la prueba destructiva mecánica se elaboraron cubos de 5cm x 5cm x 5cm de arista, en pastas y morteros, además de briquetas, cilindros y vigas para investigaciones posteriores. La elaboración se basó en la norma para morteros de cemento NMX-C-061-ONNCCE-2010, ya que no existen normas solo de morteros de cal.

Se procedió de la siguiente manera para la elaboración de los cubos:

1. Lubricar los moldes (figura 21) en todas sus caras.
2. Llenar el molde en dos capas, golpeando 32 veces con un pisón de acrílico cada capa (figura 22 y 23).
3. En cada capa se golpeó el molde sobre la superficie donde se estaba trabajando cinco veces para sacar el exceso de aire.
4. Enrasar con una espátula (figura 24)



Debido al lento fraguado de la cal en comparación con otros cementantes como el cemento no fue posible desmoldar los especímenes⁷ a las 24 horas y se dejaron envejecer 7 días para evitar daños en su manipulación y evitar que se disgregaran (figura 25).

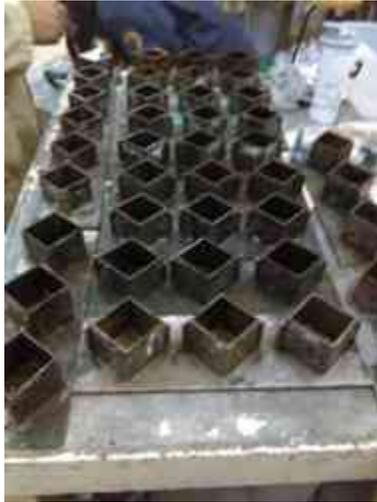


Figura 21. Moldes



Figura 22. Dos capas



Figura 23. Apisonamiento.



Figura 24. Enrasado.

⁷ Muestra, modelo, ejemplar. Definición de la Real Academia Española



Figura 25. Especímen fracturado en el desmolde a las 24 horas.

La cantidad de estos especímenes queda especificada en la Tabla 8:

Tabla 8. Cantidad de especímenes realizados

Tipo de cal	Mezcla	Cubos	Briquetas	Cilindros	Vigas
CAP95	Pasta	45	-	-	-
	Mortero	43	-	-	10
CAP90	Pasta	45	-	-	-
	Mortero	57	36	25	32
CAA	Pasta	27	-	-	-
	Mortero	56	26	-	11
CCA	Pasta	51	6	15	14
	Mortero	63	50	22	28
CC	Pasta	45	14	15	16
	Mortero	62	28	5	10



Caracterización Física

Área superficial

EL área superficial nos proporciona el dato de la reactividad de la cal, entre más elevado es el valor, mayores serán sus propiedades de adherencia y trabajabilidad⁸ tanto en pastas como en morteros. Tradicionalmente se consideró que la cal apagada artesanalmente contaba con unas propiedades de área superficial más elevadas que las de la cal de construcción comercial, con una área superficial hasta cinco veces mayor (Bedolla Arroyo J. A., 2008).

[...] se conoce el espacio en dos dimensiones (largo y ancho) que ocupa cualquier partícula de cualquier elemento. En las ciencias duras también se conoce como cuantificación del área superficial BET (norma para cuantificar el área superficial de materiales en estado sólido, teoría optimizada por los científicos Brunauer, Emmet y Teller) Para esta prueba es necesario un equipo que determina el área superficial de los polvos con gases nobles (nitrógeno y Helio) mediante un puente resistencias, el cual mide la adsorción⁹ y desorción¹⁰ del nitrógeno, midiendo de esta forma la diferencia de los gases (Bedolla Arroyo J. A., 2008).

Para realizar la prueba es necesario que las muestras estén en polvo y secas, por lo que las pastas de CAA y CCA fueron secadas al medio ambiente y posteriormente se molieron, mientras que las cales en polvo no hubo un trabajo previo. Las pruebas se realizaron en el equipo Modelo Horiba SA9601 STNE, MP, donde primeramente se colocaron las muestras en una probeta de vidrio y se secaron a 200° C (figura 26) para eliminar la humedad superficial. Posteriormente fueron colocadas en el lugar para que

⁸ Propiedad que determina la facilidad y homogeneidad con que puede ser mezclada, colocada, consolidada y terminada una mezcla de concreto y mortero fresco. Definición del Instituto Americano del Concreto.

⁹ Adsorción es el proceso por el cual los átomos, iones o moléculas son atrapadas o retenidas en la superficie de un material, en contraposición a la absorción, que es un fenómeno de volumen. En la química, la adsorción de una sustancia es su acumulación en una determinada superficie interfacial entre dos fases. El resultado es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un cuerpo sólido o líquido.

¹⁰ Emisión de un fluido previamente adsorbido por un material.



comenzara la prueba donde se ubicaba un vaso con hidrógeno líquido (figura 27) donde era sumergida la probeta (figura 28), después de este proceso se procedió a la medición (figura 29).



Figura 26. Equipo Modelo Horiba, en el lado derecho de la maquina se utilizaba para secar en material colocándolo dentro de una bolsa térmica.



Figura 27. Cal en la probeta.



Figura 28. Dentro del nitrógeno líquido



Figura 29. Concluida la prueba.



En esta parte de la investigación se tomaron en cuenta seis cales: las llamadas cales químicas que son de alta pureza con contenido de hidróxido de 90% y 95%, cal apagada artesanalmente con dos años y medio de añejamiento, cal de construcción macerada por dos años y medio, cal de construcción y cal alimenticia¹¹ con una pureza de 90%. El motivo del empleo de esta última cal fue para conocer si existe una diferencia entre las cales que tienen un mismo grado de pureza pero son de distintos bancos o diferente calcinación.

Conocer el área superficial de las cales que pueden ser usadas en la restauración y conservación nos puede dar información relevante para decidir técnicamente cuál es la mejor de material para las intervenciones.

Caracterización de pastas y morteros

En las mezclas de pastas y morteros existen dos etapas diferenciadas por su estado físico, estas se denominan estado fresco y estado endurecido. El estado fresco es la primera fase, cuando se realiza una mezcla y se amasa, la duración del este estado depende del cementante usado, aditivos, temperatura y humedad del medio ambiente. Las propiedades en estado fresco se relacionan principalmente con la fluidez de un material.

En el estado endurecido ocurre cuando comienza el fraguado en las mezclas hidráulicas y el proceso de carbonatación en la cal aérea. Las propiedades de este estado se relacionan con la resistencia a la compresión, porosidad del material, homogeneidad, adherencia, entre otras.

Para verificar las propiedades físicas se realizaron las pruebas de fluidez de la mezcla, velocidad de pulso y resistividad en los cubos.

¹¹ Se produce en la Calera de Acajete, Puebla, México



Prueba de fluidez

La fluidez define la trabajabilidad de una mezcla, y depende del cementante, la cantidad de agua, la granulometría utilizada, cantidad de finos, aditivos, condiciones ambientales. . La fluidez puede mejorar con la adición de aditivos como plastificantes o introductores de aire, tensores y tenso activos, aglutinantes.. Para realizar esta prueba fue necesario:

Equipo:

- Mesa de fluidez manual
- Varilla para compactar 5/8".
- Molde

Procedimiento

1. Se lubrica la mesa para que facilite la uniformidad de la mezcla.
2. El molde para realizar el espécimen de ensaye será de bronce o latón con una boca de diámetro superior de 70mm. Se coloca le molde al centro y se comienza a llenar en dos capas con el volumen del molde (Figura 30), se compacta cada una de ellas con 25 golpes (figura 31), al final se enrasa con una llana el exceso al molde y se remueve el mismo de un tirón firme hacia arriba (figura 32).
3. Se deja caer la mesa desde una altura de 13 mm 25 veces en 15 segundos.
4. Con el calibrador se determina fluidez, midiendo a los diámetros de la pasta o mortero a lo largo de las líneas ubicadas en la mesa (figura 33).



Figura 30. Colocación de mezcla



Figura 31. Compactación de la mezcla



Figura 32. Al remover el molde de un tirón firme.



Figura 33. Medición de la fluidez

Velocidad de pulso ultrasónico, PVU

Esta prueba es no destructiva, es una detección de la propagación de ondas ultrasónicas en un medio elástico, esta prueba se realiza para conocer qué tan densa y homogénea es la pasta o el mortero en estado seco. Se mide en metros por segundo (m/s). El equipo que se utilizó para la prueba fue V-Meter MKIV de la marca JAMES INSTRUMENTS (figura 34).



Figura 34. Equipo para medir la velocidad de pulso

La prueba consiste en que los transductores electro acústicos estén en contacto con los cubos un lubricante que sirva para tener medio continuo y posteriormente se generan los impulsos que son recibidos por el segundo transductor y se obtiene una lectura (figura 36) Se realizaron pruebas a tres especímenes de cada tipo de cal, para verificar que tan homogénea es la pasta o el mortero en su estado seco.



Figura 35. Prueba de velocidad de pulso.



Resistividad eléctrica, R_E

La resistividad eléctrica de una pasta o mortero se corresponde con la microestructura de la matriz de la cal, la porosidad, la propia estructura, disposición y tamaño de los poros. Si el resultado es bajo mayor será la porosidad y existe mayor riesgo de deterioro.

Es importante señalar que el caso de los morteros de cal difiere un tanto de los morteros de cemento, debido a que los morteros de cal reaccionan con la introducción de dióxido de carbono en su matriz para poder realizar su proceso de carbonatación. Dicha carbonatación en morteros de cal lleva consigo algunas modificaciones del comportamiento debido a la presencia de agregados. (Velazquez Pérez, 2015)

Para esta prueba se deben saturar en agua los especímenes a probar. Para esta investigación se realizaron dos pruebas con distintos cubos a diferentes edades, la primera fue con cubos de 100 días sin saturar, y otra con especímenes de 150 días de edad. Debido a que la cal tiene un lento fraguado y no se deben sumergir en agua ya que se disgregan (figura 36), se colocaron en un recipiente sobre una rejilla para evitar el contacto directo con el agua, se mojaban y se cubrían con un trapo húmedo, posteriormente se colocaba un plástico y la tapa para evitar pérdida de humedad.



Figura 36. Espécimen de mortero de cal deshecho en el agua



Se estuvieron pesando hasta que su peso fue constante, este periodo fue de seis semanas, en las que se pesaban una o dos veces a la semana para verificar también su estado y evitar que se disgregaran.

Las pruebas se realizaron con el Resistómetro marca NILSON ELECTRICAL LABORATORY INC. Modelo 400, número de serie N-4 -9932 (figura 37 y 38)



Figura 37. NILSON ELECTRICAL LABORATORY INC, exterior



Figura 38. NILSON ELECTRICAL LABORATORY INC

Para la prueba se humedecieron los cubos posteriormente se colocaron dos placas de cobre con toallas mojadas para un mayor contacto entre las placas (figura 41) y el espécimen y se procedió a hacer la prueba, primero midiendo en múltiplos de 0.01, 0.1, 1, 10,100, 1k, 10k y 100k, y luego para conocer el valor numérico más pequeño (figura 42).



Figura 39. Equipo listo para hacer la prueba de resistividad



Figura 40: colocación de espécimen en tela húmeda



Figura 41. colocación de peso para que no se muevan las placas de cobre durante la prueba



Figura 42. Panel del equipo del Resistómetro



Caracterización mecánica

Resistencia a la compresión, f_c

La resistencia a compresión es la medida máxima de resistencia a una carga axial en especímenes endurecidos de matrices de cal, cemento, yeso, polímeros, que contengan áridos o sin ellos endurecidos de matrices de cal, cemento, yeso, polímeros, que contengan áridos o sin ellos, se expresa en kilogramos fuerza por centímetro cuadrado (kgf/cm^2). Estos datos se utilizan principalmente en los cálculos para estructuras, en el caso de los morteros son utilizados para conocer la resistencia a los impactos en los aplanados, y también la carga que como mortero debe soportar para el pegado de mampostería y la ejecución de firmes, para inferir su adherencia, adhesividad, elasticidad y nivel de protección a los agentes meteóricos.

Antes de comenzar la prueba de resistencia es necesario conocer las medidas geométricas del espécimen para posteriormente hacer el cálculo respecto a cada pieza. Se utilizó la Máquina Universal de Pruebas TINIUS OLSEN, con capacidad de 50 toneladas y aproximaciones a 1 kgf (figura 43), esta máquina consta de tres velocidades, funciona por medio de un motor eléctrico, y está constituida de platina fija y una platina móvil.



Figura 43. Colocación del espécimen



Figura 44. TINIUS OLSEN



Figura 45. Disco de carga



Figura 46. Palanca niveladora

El procedimiento es colocar en la platina fija el espécimen (figura 43), en este caso un cubo de 5 cm x 5 cm x 5 cm, posteriormente se coloca carga (figura 44) cuando falla se toma la lectura (figura 45) que es dada en kilogramos fuerza, posteriormente es necesario calcular la carga por centímetro cuadrado que resiste. Se probaron tres especímenes de pasta y mortero de cada tipo de cal, para cada edad y para cada condición.



Figura 47. Especimen en platina



Figura 48. Falla de pasta.

Estas caracterizaciones pueden aportar información valiosa al conocer a profundidad las distintas calces que se pueden usar en la restauración que simultáneamente cumplan con los requisitos de la parte normativa como el INAH, la arquitectura tecnológica, la parte mecánica y discernir la mejor opción para los distintos sistemas constructivos.

El área superficial nos aporta el dato sobre el área que de manera micro presenta un material en polvo, mientras mayor sea el á en m^2/gr tanto mayor reactividad presentará, sin directamente proporcionales, y de manera indirecta nos dará una idea de la trabajabilidad de la mezcla; la velocidad de pulso ultrasónico indicará si es homogénea la mezcla en estado endurecido; la resistividad eléctrica dará una inferencia sobre cuantos poros pueden existir dentro del material estudiado, a mayor homogeneidad se prevé mayor durabilidad; por último, la resistencia mecánica permite tomar la decisión de cual cal se puede usar según la aplicación, por ejemplo en las juntas o las inyecciones de mortero. Y todos los valores obtenidos por medio de arqueología experimental pueden correlacionarse buscándose que sean coincidentes y permitirán una toma de decisiones más consciente e informada.



Capítulo III

Resultados de la caracterización de las cales para su uso en restauración y conservación

Los resultados obtenidos nos proporcionan una idea más clara sobre las características de las cales que pueden ser usadas en la restauración y conservación, al conseguir un resultado cuantitativo se tiene una base sólida para crear una mezcla óptima para cada sistema constructivo en el cuál se requiera.

El área superficial nos da una idea de que tan reactiva es la cal lo que se refleja en su adherencia y trabajabilidad, que para la restauración es necesario que todas las piezas queden unidas y sin desperdicios. La velocidad de pulso y resistividad nos aporta la información del material que tan homogéneo y poroso es en estado seco por lo que podemos evitar un deterioro, sobre todo por humedad por capilaridad que es uno de los problemas más persistentes en los aplanados.

La resistencia mecánica nos aporta el dato que tan resistente es la pasta o mortero, aunque en la restauración no se requiere de resistencias altas, sí es necesario que se tenga una protección ante posibles golpes y daño del medio ambiente.

Caracterización física de las cales

Área superficial

El área superficial se midió en estado seco con las cales en polvo, tomando en cuenta seis cales: Cal de alta pureza con contenido de hidróxido de 90% y 95%, cal apagada artesanalmente con dos años y medio de añejamiento, cal de construcción macerada por dos años y medio, cal de construcción y cal alimenticia. Esta última se tomó en cuenta porque esta cal es de fácil



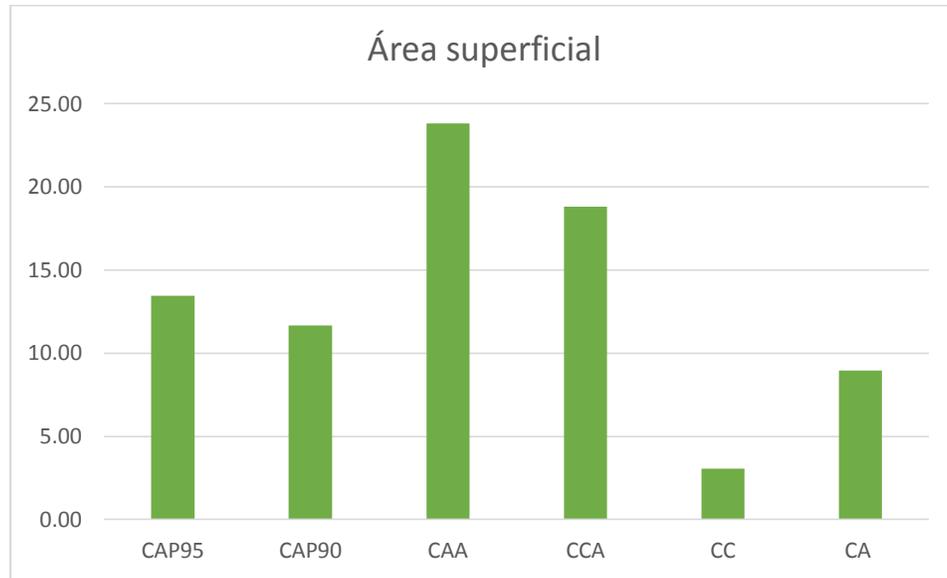
adquisición en distintas partes de la república y se tenía la inquietud sí podría ser usada en la restauración ya que también es cal de alta pureza con contenido de hidróxido de 90% con la diferencia que esta se calcina en horno a gas.

Tabla 9. Resultados del área superficial de las cales

Clave	Área superficial m ² /gr
CAP95	13.45
CAP90	11.67
CAA	23.83
CCA	18.81
CC	3.07
CA¹²	8.97

Los resultados que arrojan estos análisis (tabla 9 y grafica 1), mostraron que la cal apagada artesanalmente cuenta con una mayor área superficial, siguiendo la cal de construcción añejada, cal de alta pureza de 95%, cal de alta pureza de 90%, la cal alimenticia y con una cantidad muy baja la cal de construcción.

¹² Cal alimenticia con un contenido de hidróxido de calcio de 90%.



Gráfica 1. Área superficial de las cales

Al tener mayor área superficial se refiere que las partículas son más pequeñas y por lo tanto se pueden aglomerar mejor en las mezclas haciéndolas más adherentes y trabajables a las superficies que se van a pegar o cubrir.

La cal apagada artesanalmente como se comenta en la investigación de “Caracterización física mecánica de los morteros de cal apagada” (Bedolla Arroyo, 2008), sí tiene más área superficial en comparación contra las otras cales, y se observó que la cal de construcción macerada también su valor es alto por lo que podemos decir que sí influye en el crecimiento del área superficial de la cal el tiempo que se mantiene en pasta.

Pastas

Los resultados de las pastas nos pueden aportar datos para la realización de acabados finos como el bruñido donde la adherencia, trabajabilidad y resistencia al medio ambiente son necesarios en la restauración y conservación, ya que su objetivo es que el patrimonio pueda ser conservado para las siguientes generaciones.



Caracterizaciones físicas en estado fresco de las pastas

Fluidez de la mezcla

Esta prueba se realiza para determinar de manera indirecta el contenido de agua que tiene o requiere una mezcla para que sea fluida y pueda ser trabajable y plástica. Se consideró porque es importante conocer cuál es la fluidez que tiene las cales que se encuentran en pastas, y las cales en polvo y la cantidad de agua que requieren.



Figura 49. Pasta CAP95. Foto tomada por el autor



Figura 50. Fluidez de la pasta CAP95. Foto tomada por el autor



Figura 51. Pasta CAP90. Foto tomada por el autor



Figura 52. Fluidez de la pasta CAP90. Foto tomada por el autor



Figura 53. Pasta CAA. Foto tomada por el autor



Figura 54. Fluidez pastas CAA. Foto tomada por el autor



Figura 55. Pasta CCA. Foto tomada por el autor



Figura 56. Fluidez pasta CCA. Foto tomada por el autor



Figura 57. Pasta C. Foto tomada por el autor



Figura 58. Fluidez pasta C. Foto tomada por el autor

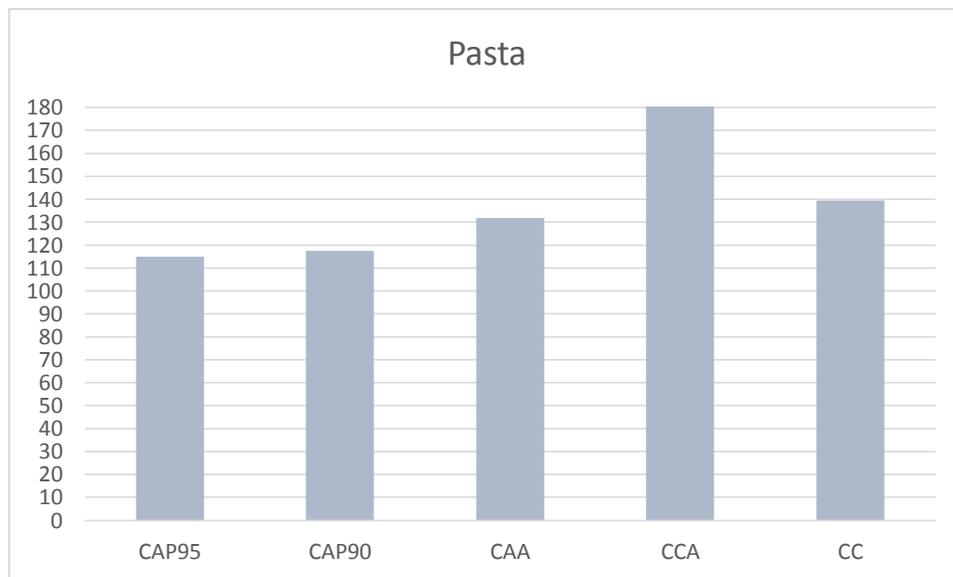


Durante la investigación se observó que las cales del banco de piedras de Lumbre Jungapeo tienden hacia un tono beige (figuras 51, 53, 55 y 57), mientras que las de Puebla conserva el blanco (figura 49).

La cantidad de agua añadida a las que se encontraban en polvo fue proporcional por cada kilo de cal un litro de agua y las cales en pasta no se puede controlar la cantidad de agua al estar ya con cierta cantidad de agua, lo que nos dio los siguientes resultados:

Tabla 10. Fluidez en pastas de cal

	%
CAP95	115
CAP90	118
CAA	132
CCA	185
CC	139



Gráfica 2. Fluidez de las pastas de cal



Las pastas con más fluidez fueron la cal apagada artesanalmente y la cal de construcción macerada, esto es debido a su exceso de agua. Siguiendo la cal de construcción, la cal de alta pureza 90% y la cal de alta pureza 95%.

La fluidez de la cal apagada artesanalmente influye en la aplicación, lo que nos lleva que al ser muy fluida existen varios desperdicios y no es trabajable y sea necesario añadir aditivos para cambiar su estado, en el caso de la restauración la fluidez de la mezcla es necesaria en la inyección de grietas.

Caracterizaciones físicas en estado seco de las pastas

Como se mencionó en el capítulo anterior, los cubos se dejaron en los moldes 7 días debido a su lento fraguado no era posible manipularlos sin algún daño, durante ese periodo se pudo observar una contracción (figuras 59 a 64) de las pastas, el cual fue más notorio en las pastas de cal pagada artesanalmente (CAA), cal de construcción macerada (CCA), cal de alta pureza de 95 (CAP95), mientras que las demás cales no fue tan visible.

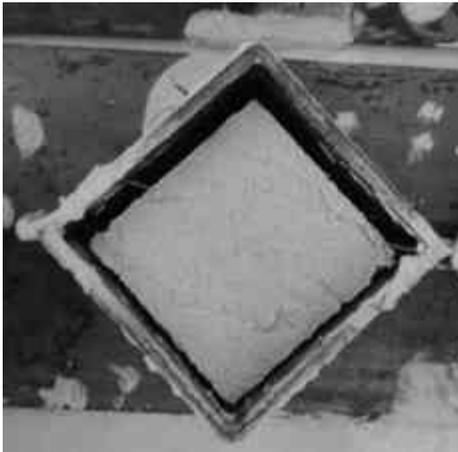


Figura 59. Pasta de CAA



Figura 60. Contracción visible en las pastas de CAA

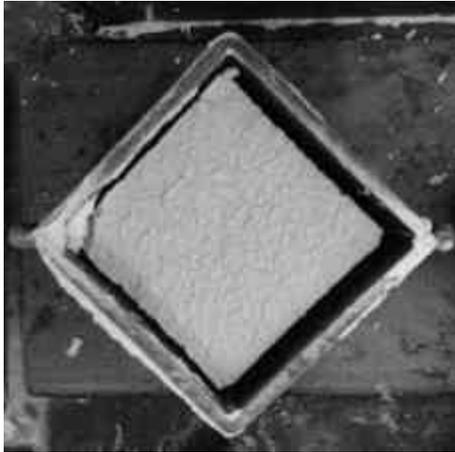


Figura 61. Contracción en cubo de pasta de CCA

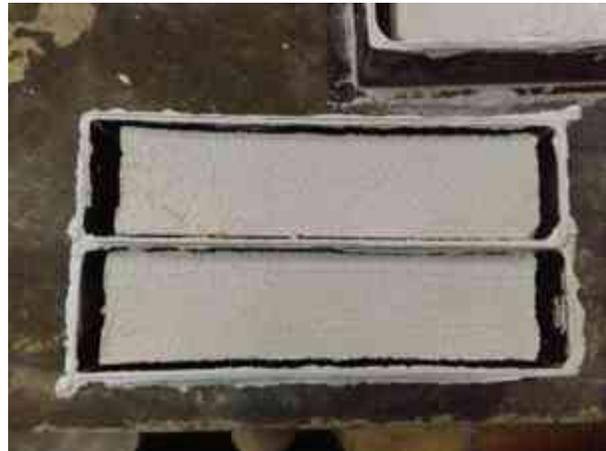


Figura 62. Contracción de vigas en pasta de CCA

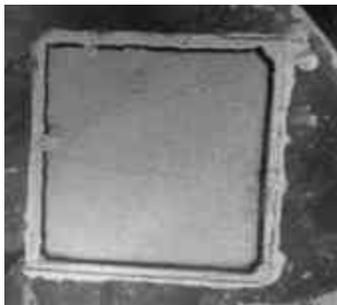


Figura 63. Pasta de CC

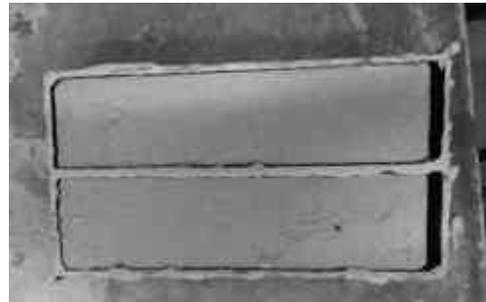


Figura 64. Contracción visible en vigas de pasta de CC

Al desmoldar los cubos de CAA (figuras 65 y 66), se puede observar disgregación del material y fisuras, además de ser muy frágiles al contacto sobre todo de las esquinas. Los especímenes de CCA también muestran disgregación y fisuras aunque en menos grado.



Figura 65. Pasta de CAA con fisura al desmoldarse



Figura 66. Pasta de CAA, el material se disgrega al desmoldar



Figura 67. Pasta de CAA disgregándose al desmoldar



Figura 68. Pasta de CAA con grietas a los 7 días de su colado



Figura 69. Especímenes de pasta de cal



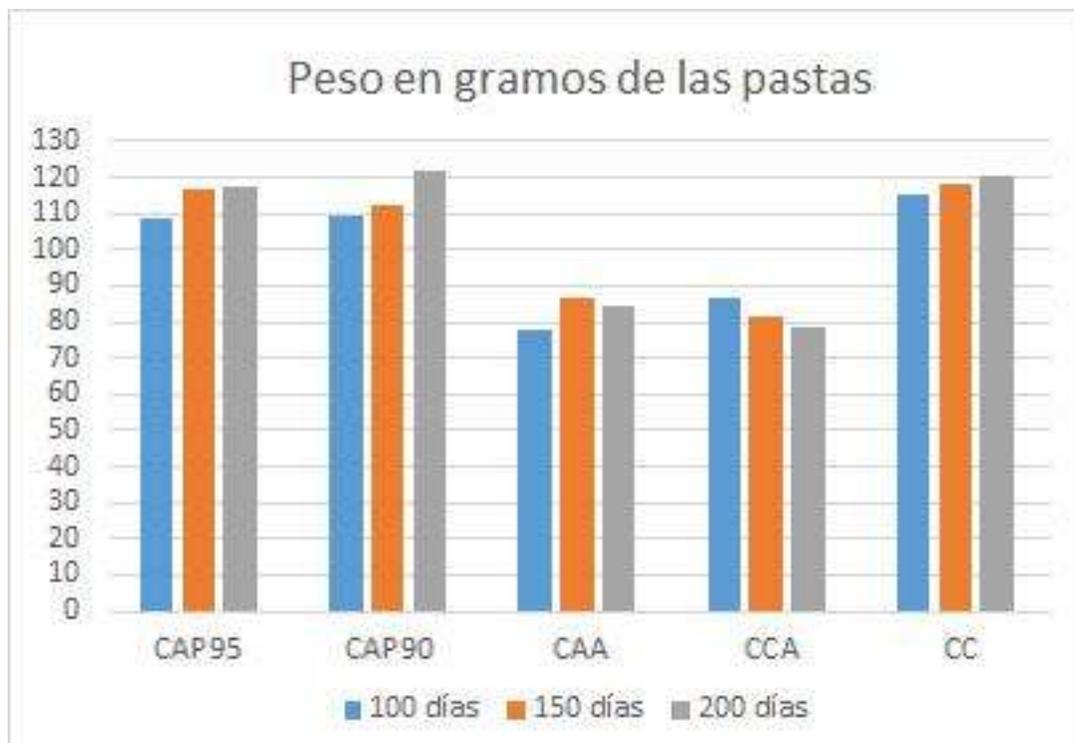
Peso y medidas

Se tomó el peso y medidas de los cubos de las pastas de especímenes de 100, 150 y 200 días de edad, donde se puede apreciar que entre las pastas del mismo tipo pero diferentes edades son muy similares el peso y medidas por lo que podemos deducir que la contracción solo fue durante el proceso de pérdida de agua.

Para presentar los datos se realizaron dos tablas para concentrar la información, la tabla de peso en gramos (tabla 11) que es el promedio de tres cubos de la misma edad y tabla de medidas (tabla 12) donde se representa en centímetros cúbicos, igualmente es el promedio de tres cubos de la misma edad.

Tabla 11. Peso promedio de las pastas

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CAP95	108.33 gr	116.4 gr	117.4 gr
CAP90	109.42 gr	112.27 gr	121.77 gr
CAA	78.16 gr	86.6 gr	84.82 gr
CCA	86.79 gr	81.87 gr	78.48 gr
CC	115.4 gr	117.93 gr	120.64 gr

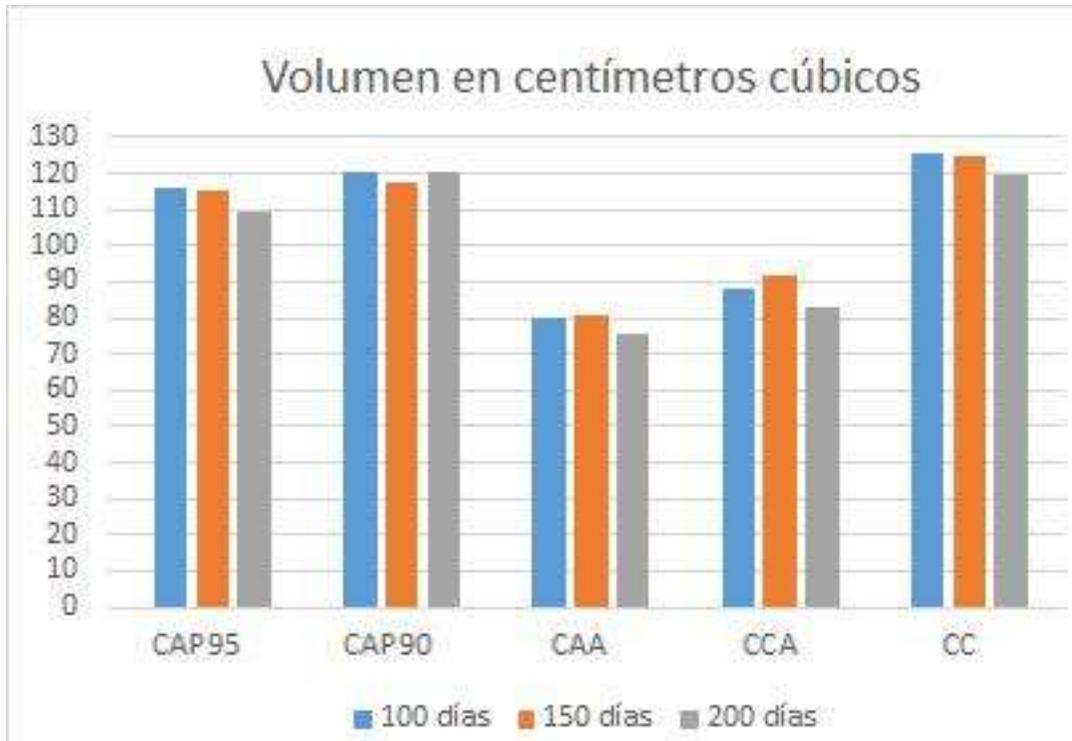


Gráfica 3. Peso promedio de las pastas

Se puede observar que las cales que se encontraban en polvo son las que tienen más peso, mientras que las cales maceradas su peso es mas bajo.

Tabla 12. Volumen en centímetros cúbicos de las pastas

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CAP95	116.25 cm ³	115.25 cm ³	109.12 cm ³
CAP90	120.35 cm ³	117.17 cm ³	120.68 cm ³
CAA	79.94 cm ³	81.12 cm ³	75.73 cm ³
CCA	88.19 cm ³	92.09 cm ³	83.19 cm ³
CC	125.39 cm ³	125.08 cm ³	119.9 cm ³



Gráfica 4. Volumen de los especímenes de las cales

Los cubos de las pastas maceradas se puede observar que hubo una pérdida de volumen por la construcción y las cales en polvo sus medidas se mantuvieron casi constantes.

Velocidad de pulso ultrasónico

Esta prueba es no destructiva y nos da idea de la homogeneidad de la pasta en estado endurecido, esto se refiere que se conoce si existen grietas o fisuras, vacíos y poros que pueden llegar afectar la resistencia y que puede ser un factor de deterioro rápido, que en la restauración y la construcción actual son importantes ya que se quiere cubrir la estructura del medio ambiente.

Los resultados de esta prueba se realizaron a cubos con diferentes edades, a 100 días y 200 días para observar si la edad en las pastas influye en la homogeneidad.

Tabla 13. Velocidad de pulso en distintas edades



Tipo de cal	100 días	200 días
CAP95	4211.7 m/s	2043 m/s
CAP90	1473.0 m/s	1781.7 m/s
CAA	1573.7 m/s	1897.3 m/s
CCA	1570.0 m/s	1631 m/s
CCA	1423.0 m/s	1584 m/s

Se considera que hubo un error en el equipo al tomar la medida de CAP 95 a los 100 días y es la razón por la que se desfasa a comparación de las otras cales que andan entre 1,473.7 a 1,423 m/s. Aunque podemos observar que el resultado de CAP95 a los 200 días también es la más alta de todas.



Gráfica 5. Velocidad de pulso en las pastas

Resistividad eléctrica

Está relacionada con la microestructura de la matriz de cal, con estos resultados podemos conocer la cantidad de poros en estado endurecido de las pastas. Como se mencionó en el capítulo anterior se realizaron dos pruebas, una con cubos a los 100 días de edad sin saturar de agua y otros por el tiempo que lleva saturar sin que desmoronen se realizó a los 200 días saturados.



En la restauración se tiene el problema de humedad en los aplanados, esto en una parte es debido a la capilaridad de los materiales y es más fuerte cuando existen más poros y estar interconectados, por lo que conocer que tan porosa puede ser una pasta de cal nos aporta el conocimiento de cuál es la más óptima para su uso.

Tabla 14. Resistividad en las pastas

Tipo de cal	Ohm por centímetro	
	100 Días	200 Días
CAP95	128850	1031.83
CAP90	209090	765.8
CAA	12030	418.94
CCA	51600	520.23
CCA	78000	513.36

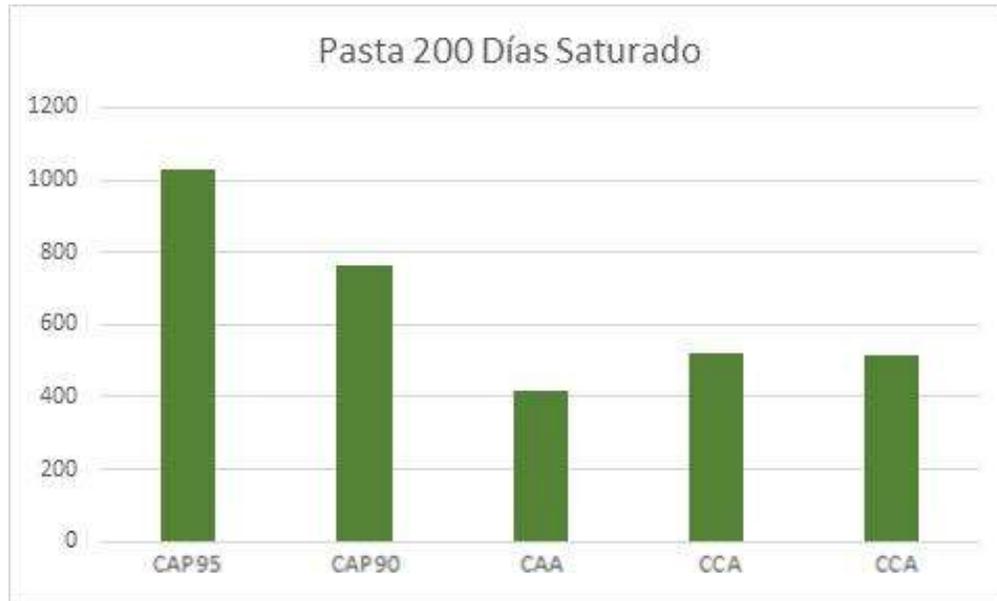
Los resultados de los especímenes sin saturar andan entre los 209,090 a 51,600 ohm por centímetros mientras que los saturados 1,031.83 a 418.94, ohm por centímetros esto nos da una idea clara de la cantidad de poros que contiene la pasta ya que entre más bajo es la resistencia del material es más poroso.



Gráfica 6. Resistividad a los 100 días de edad sin saturadas en las pastas



Los resultados las pastas sin saturar se observa que la cal de alta pureza de 90% es la que tiene mas resistencia eléctrica, siguiendo la cal de alta pureza 95%, cal de construcción, cal de construcción macerada y la cal apagada artesanalmente.



Gráfica 7. Resistividad a los 200 días de edad saturadas en las pastas

Los resultados de las pastas saturadas se observa que la que presenta más resistividad eléctrica es la cal de alta pureza de 95%, siguiendo la cal de alta pureza de 90%, cal de construcción macerada, cal de construcción y la cal apagada artesanalmente.

Al comparar gráficamente los resultados podemos decir que la cal apagada artesanalmente en ambos casos su valor es el menor, mientras que las cales de alta pureza sus valores son los más altos de las cales.

Resistencia a la compresión

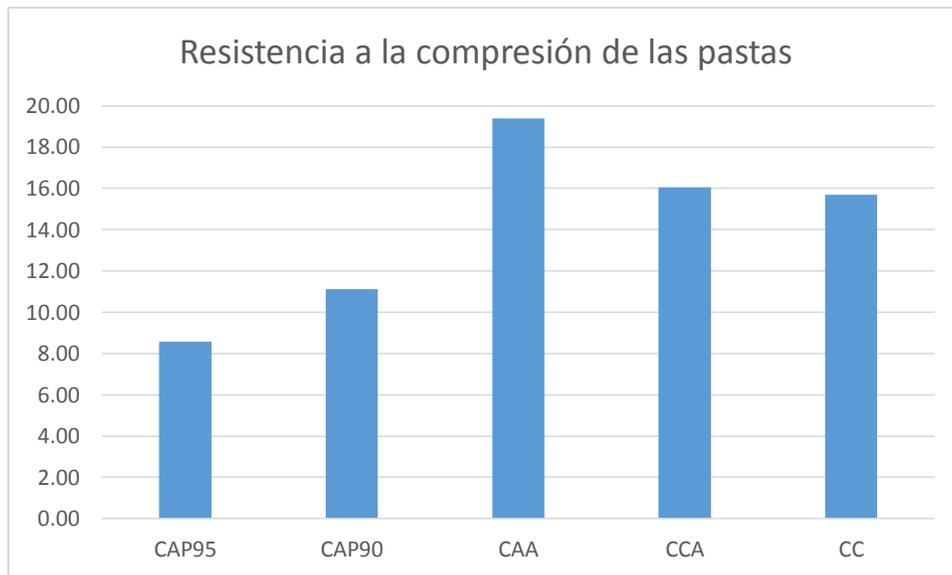
En el área de la restauración, las pastas no se requieren de una resistencia exacta, aunque es importante conocerlas para saber qué tipo de pasta puede ser usada en una aplicación en específico. Se realizaron las pruebas



a la edad de 100 días en cada tipo de cal, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 15. Resistencia a la compresión en las pastas

Resistencia al compresión	
Tipo de cal	100 días
CAP95	8.58 kg/cm ²
CAP90	11.12 kg/cm ²
CAA	19.39 kg/cm ²
CCA	16.05 kg/cm ²
CC	15.70 kg/cm ²



Gráfica 8. Resistencia a la compresión en las pastas

Podemos observar en la gráfica 8 que la resistencia más elevada es de la cal apagada artesanalmente, seguido de la cal de construcción macerada, la cal de construcción, cal de alta pureza de 90% y la cal de alta pureza de 95%.



Morteros

Son las mezclas de cementante, arena y agua, que comúnmente son empelados para pegar mampostería, colocación de aplanados y firmes de baja resistencia. En la restauración el mortero es más usado en la consolidación de piezas, además de protección contra el medio ambiente.

Caracterizaciones físicas en estado fresco de los morteros

Fluidez de la mezcla

Es importante conocer cuál es la cantidad de agua que requiere un mortero de cal para que sea una mezcla fluida, trabajable y plástica. Para la prueba se siguieron las normas para morteros de cemento NMX-C-486-ONNCCE-2014 que tiene como objetivo establecer el método y especificaciones de prueba que debe cumplir un mortero a base de cemento hidráulico, cemento de albañilería y/o cal hidratada, se debe considerar que los resultados que se busca esta prueba son para elementos de mampostería estructural. Se obtuvieron los siguientes resultados:



Figura 70. Mortero CAP5



Figura 71. Fluidez mortero CAP95



Figura 72. Mortero CAP90



Figura 73. Fluidez mortero CAP90



Figura 74. Mortero CAA



Figura 75. Fluidez de mortero CAA



Figura 76. Mortero CCA



Figura 77. Fluidez mortero CCA



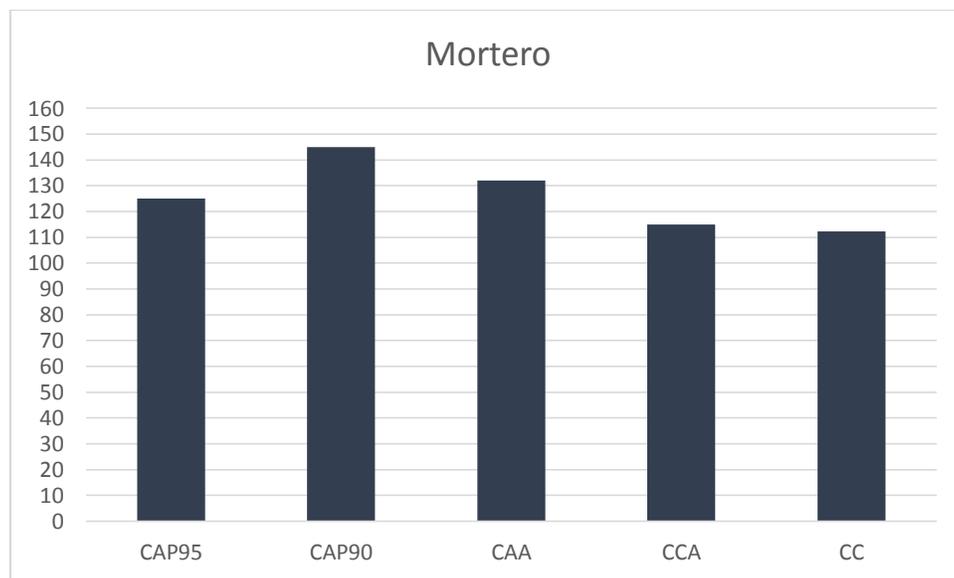
Figura 78. Mortero CC



Figura 79. Fluidez mortero CC

Tabla 16. Fluidez de morteros de cal

	%
CAP95	125
CAP90	145
CAA	132
CCA	115
CC	112



Gráfica 9. Fluidez de los morteros de cal



Las cales en polvo se puede añadir el agua necesaria y formar la mezcla, mientras que las cales en pasta ya tienen cierta cantidad que no se controla y por lo que se complica el manejo.

Caracterizaciones físicas en estado seco de los morteros

Es importante conocer si existe un cambio volumétrico de los morteros en estado endurecido, tanto en la construcción actual como en la restauración ya que la mayoría de los trabajos que se realizan son para consolidar piezas o protegerlas. Y en caso de existir alguna contracción puede afectar directamente en la cohesión que se tiene con los elementos constructivos.

Los morteros al igual que las pastas, se sacaron del molde a los 7 días y se observó que en menor medida también existe una contracción mínima en algunos especímenes de ciertas cales.

Peso y medidas

Se midieron y pesaron morteros a los 100, 150 y 200 días de edad para verificar si con el tiempo no cambia el peso o medida.



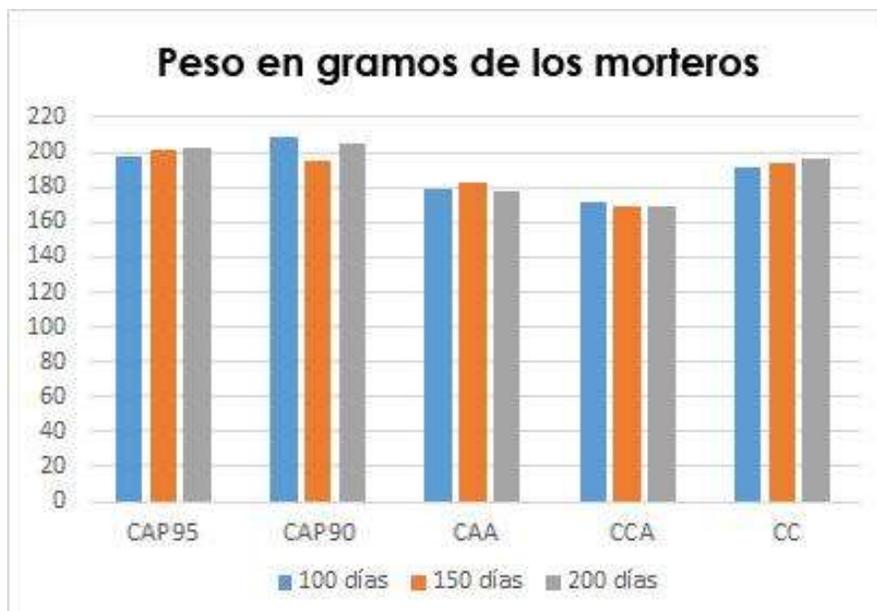
Figura 80. Mortero de las distintas cales

Los datos se concentraron en dos tablas, de peso en gramos (tabla 17) y las de medidas en centímetros cúbicos (tabla 18), cada una de ellas son el resultado del promedio de tres cubos de cada edad.



Tabla 17. Peso promedio de los morteros

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CAP95	197.9 gr	201.07 gr	202.52 gr
CAP90	208.7 gr	194.8 gr	205.58 gr
CAA	179.01 gr	182.67 gr	177.61 gr
CCA	171.12 gr	169.47 gr	168.57 gr
CC	191.83 gr	193.53 gr	196.29 gr



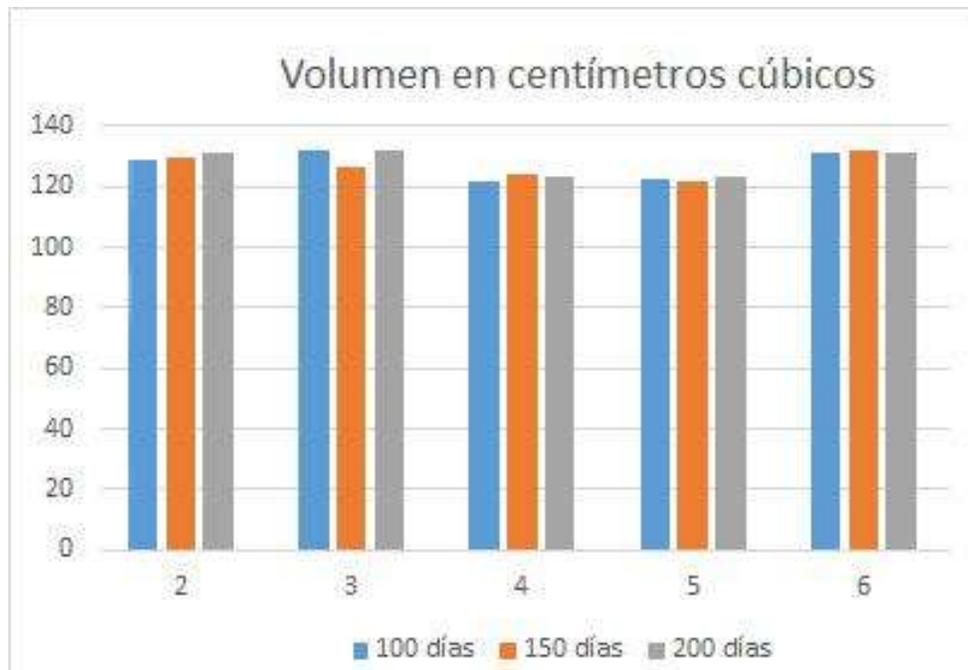
Gráfica 10. Peso promedio de los morteros

Se observa que con la edad los cubos tienen un peso similar, y los de peso más bajo al igual que las pastas son las cales que se encontraban meceradas.



Tabla 18. Volumen promedio de los morteros

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CAP95	129.16 cm ³	129.71 cm ³	131.18 cm ³
CAP90	131.74 cm ³	126.5 cm ³	132.12 cm ³
CAA	121.76 cm ³	124.41 cm ³	123.00 cm ³
CCA	122.59 cm ³	121.51 cm ³	122.99 cm ³
CC	131.58 cm ³	132.29 cm ³	131.27 cm ³



Gráfica 11. Volumen promedio de los morteros

Se puede observar que las cales que se entraban maceradas, los morteros sufrieron un cambio en cuanto a medida debido a la construcción por perdida de agua.

Velocidad de pulso ultrasónico

En la restauración los morteros son usados en la estructura y protección de los edificios, por lo que la homogeneidad de la mezcla en estado seco es necesaria para evitar deterioros que puede provocar el medio ambiente,

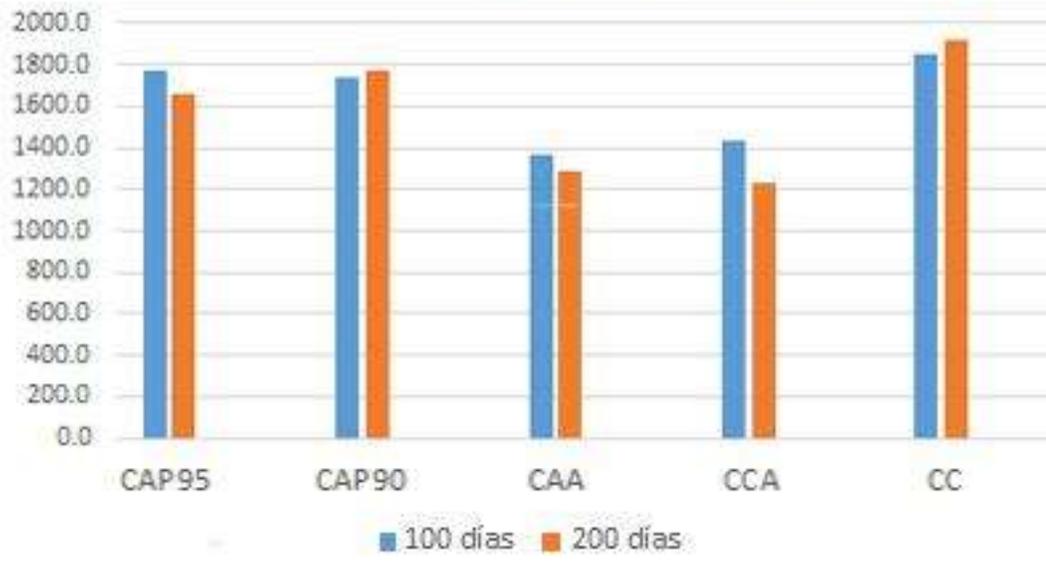


por medio de grietas, fisuras o poros que se pueden generar al evaporarse al agua.

Tabla 19. Velocidad de pulso de los morteros

Tipo de cal	100 DÍAS	200 DÍAS
CAP95	1769.0 m/s	1663.3 m/s
CAP90	1735.7 m/s	1772.7 m/s
CAA	1371.7 m/s	1286.7 m/s
CCA	1431.0 m/s	1229.3 m/s
CCA	1847.3 m/s	1925.0 m/s

Velocidad de pulso en morteros



Gráfica 12. Velocidad de pulso de los morteros

Los resultados de los 100 y 200 días son similares entre ellos, quedando con una mayor velocidad de pulso la cal de construcción, siguiendo las cales de alta pureza y por ultimo las cales que se encontraban en pasta.



Resistividad eléctrica

La resistencia eléctrica no indica que tanto se opone un material al paso de la corriente eléctrica y está relacionado a la porosidad, en la restauración se sabe por los poros el agua del suelo sube por capilaridad y entre más poros tenga el morteros más probable es que existe un deterioro rápido en comparación a los que no tienen poros y son más homogéneos.

Para esta prueba es necesaria saturar los especímenes para que los iones del agua sean los conductores de la electricidad. Como se mencionó en el capítulo anterior se realizaron dos pruebas, una con los cubos sin saturar y otros saturados para observar el resultado y sí existe una diferencia.

Tabla 20. Resistividad eléctrica de los morteros

Tipo de cal	ohm*cm	
	100 Días sin saturar	200 Días saturados
CAP95	111040	1546.35
CAP90	68200	2433.1
CAA	11150	1061.06
CCA	171660	2579.69
CCA	85280	1533.07



Gráfica 13. Resistividad eléctrica de los morteros sin saturar

Los cubos sin saturar el valor más alto fue la cal de construcción macerada, siguiendo la cal de alta pureza del 95 %, la cal de construcción, la cal de alta pureza del 90% y el más bajo fue la cal apagada artesanalmente.



Gráfica 14. Resistividad eléctrica de los morteros saturados

En los cubos saturados al igual que con los no saturados, la cal de construcción macerada fue le valor más alto, siguiendo la cal de alta pureza



de 90%, la cal de alta pureza de 95%, la cal de construcción y nuevamente el más bajo la cal apagada artesanalmente.

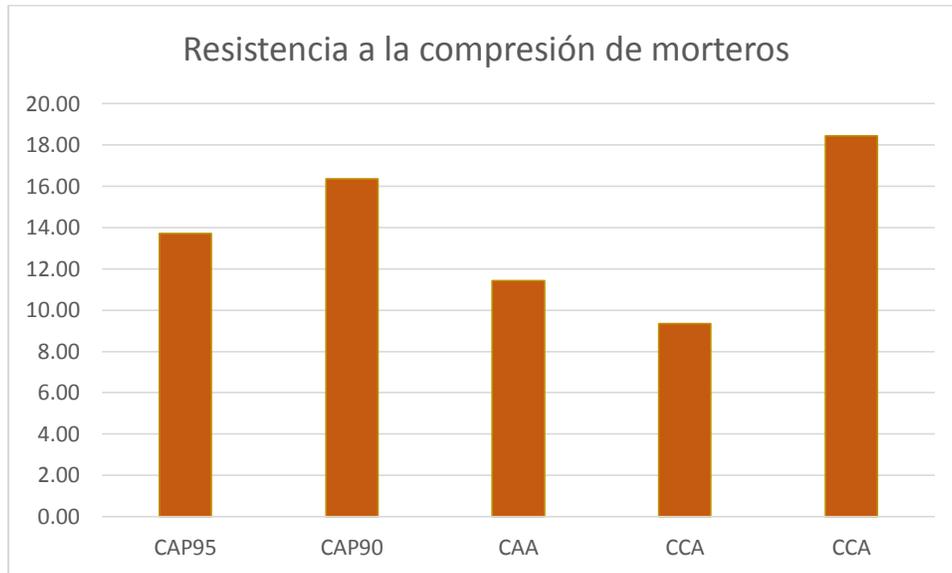
Los cubos sin saturar los resultados estuvieron entre los 172,660 a 11,150 ohm por segundo y los saturados estuvieron entre los 2,579.69 a 1,061.06 ohm por segundo, debido a la diferencia de resultados entres los no saturados y saturados no fue posible realizar una gráfica entendible y se realizaron por separado.

Resistencia a la compresión

Los morteros en la restauración se usan para la estructura, pegando mampostería y realizando inyección de grietas en muros; en cuanto a los acabados son para restituir los aplanados, por lo que al conocer los valores de resistencia que tiene cada tipo de cal con arena volcánica va ayudar al restaurador o constructor a tomar la decisión de cual cal es la óptima.

Tabla 21. Resistencia a la compresión de los morteros

Tipo de cal	100 DÍAS
CAP95	13.72 kg/cm ²
CAP90	16.35 kg/cm ²
CAA	11.42 kg/cm ²
CCA	9.34 kg/cm ²
CCA	18.44 kg/cm ²



Gráfica 15. Resistencia a la compresión de los morteros

En los resultados de los morteros podemos observar que la cal de construcción tiene una mayor resistencia, siguiendo la cal del alta pureza del 90%, la cal de alta pureza del 95%, la cal pagada artesanalmente y con el valor más bajo la cal de construcción macerada.

Los resultados que se obtuvieron de las pruebas de las pastas y morteros nos aportaran una idea más clara de sus características de las cales y cuáles son las que pueden ser usadas en la restauración, en el siguiente capítulo se analizaran y se podrá sugerir en base a los resultados cuales son viables para cada trabajo en la restauración y consolidación.



Capítulo IV

Discusión de resultados de las cales para su uso en la restauración y conservación.

En la restauración, la cal apagada artesanalmente ha sido recomendada por sus características de cohesión y trabajabilidad, mientras que las cales en polvo se han utilizado pero en menor medida por no considerarlas aptas, ya que se utiliza cal de grado construcción y ésta, debido a su bajo porcentaje de hidróxido de calcio, en comparación con la apagada en obra presenta un comportamiento distinto a ella.

Las cales químicas se han ido adentrando en el campo de la restauración al observar que se obtienen características similares a la cal apagada artesanalmente, por lo que en este capítulo se discuten los resultados obtenidos de las pruebas en pastas y morteros de las distintas cales, que nos aportan el conocimiento técnico sobre ellas y se tenga el conocimiento de cuales son adecuadas para cada trabajo de restauración.

Caracterización física

Área superficial

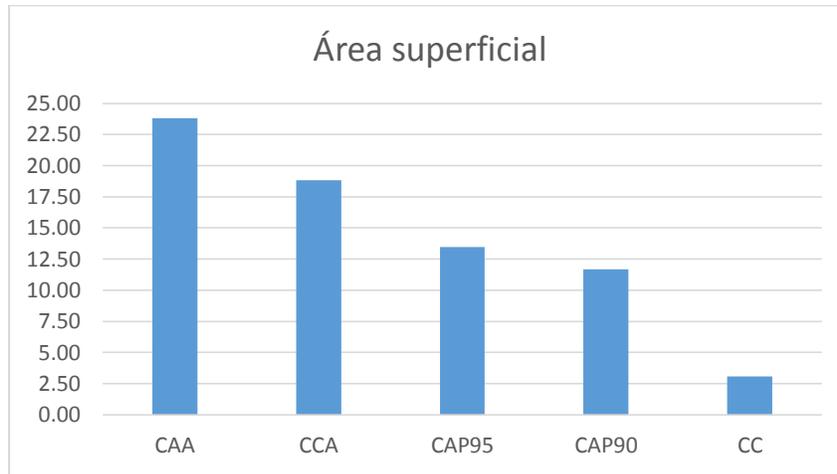
Este dato nos aporta una idea de que tan reactiva es la cal con el agua, su untuosidad, trabajabilidad y fluidez, nos sirve en la restauración y obra actual para tomar la decisión correcta de cuál cal me va a dar mejores resultados de acuerdo a cada trabajo que se requiera.

Tabla 22. Resultados de área superficial de mayor a menor

Clave	Área superficial m ² /gr
CAA	23.83
CCA	18.81
CAP95	13.45



CAP90	11.67
CC	3.07



Gráfica 16. Resultados de área superficial de mayor a menor

Con estos resultados, se confirma que el añejamiento o la maceración de la cal por un periodo de tiempo sí tiene un impacto sobre el comportamiento, al aumentar su área superficial y por lo tanto su trabajabilidad, untuosidad y fluidez es mayor.

Pero se debe considerar que el valor de las cales de alta pureza es alto sin pasar por un proceso previo y se pueden usar en la restauración ya que también tienen las mismas características que la cal apagada artesanalmente. En cuanto a la cal de construcción su valor es muy bajo en comparación con las otras cales, esto se le puede atribuir a su 80% de contenido de hidróxido de calcio y 20% de carbonato de calcio por lo que le da otras características que también son muy útiles para otros trabajos de arquitectura, como se podrán observar en las demás pruebas.

Pastas

Son la mezcla de cal y agua, en cuanto a las cales en polvo se añadió un litro de agua por cada kilo de cal y las pastas maceradas se utilizaron



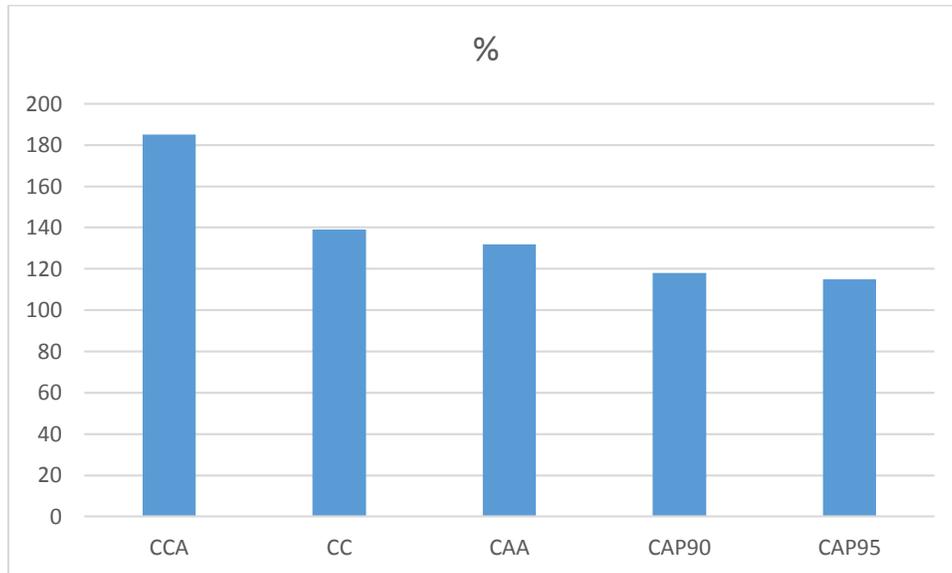
directamente del recipiente. La pasta en la restauración se requiere para acabados y consolidaciones, por lo que es indispensable que tenga buena cohesión, trabajabilidad, flexibilidad y resistentes a los deterioros antrópicos y del medio ambiente.

Fluidez

La fluidez nos aporta de manera indirecta la cantidad de agua que se requiere en un mezcla para hacerla untuosa y trabajable, y por lo tanto para cada trabajo de restauración. En este caso de las pastas no existe un valor exacto a considerar, ya que se maneja en forma cualitativa, al realizar solo una descripción sin tener una intención cuantitativa y observar que tan fácil se puede mezclar, colocar, aplicar y consolidar la pasta.

Tabla 23. Fluidez de las pastas

	%
CCA	185
CC	139
CAA	132
CAP90	118
CAP95	115



Gráfica 17. Fluididad de las pastas

La fluidez de la pasta nos contribuye a que no existan tantos desperdicios, en este caso las la cal con más fluidez fue la CCA, continuando CC, CAA, CAP90 y CAP95. Hay que considerar que en las cales en polvo se pueden controlar la cantidad de agua que se añade, mientras que las que se encuentran en pasta no se puede eliminar el exceso de agua sin perder parte del material.

Lo que se considera que en las cales en pasta no se tiene el control de la cantidad de agua y existen desperdicios o pérdida de hidróxido de calcio.



Figura 81. Pasta CAP95



Figura 82. Pasta CAP90



Figura 83. Pasta CAA



Figura 84. Pasta CCA



Figura 85. Pasta CC

En las figuras 81a 85 se puede observar una cantidad de pasta que se mantiene en una espátula y nos da una idea de la reología que podemos asociarla con la viscosidad.

Medidas y peso

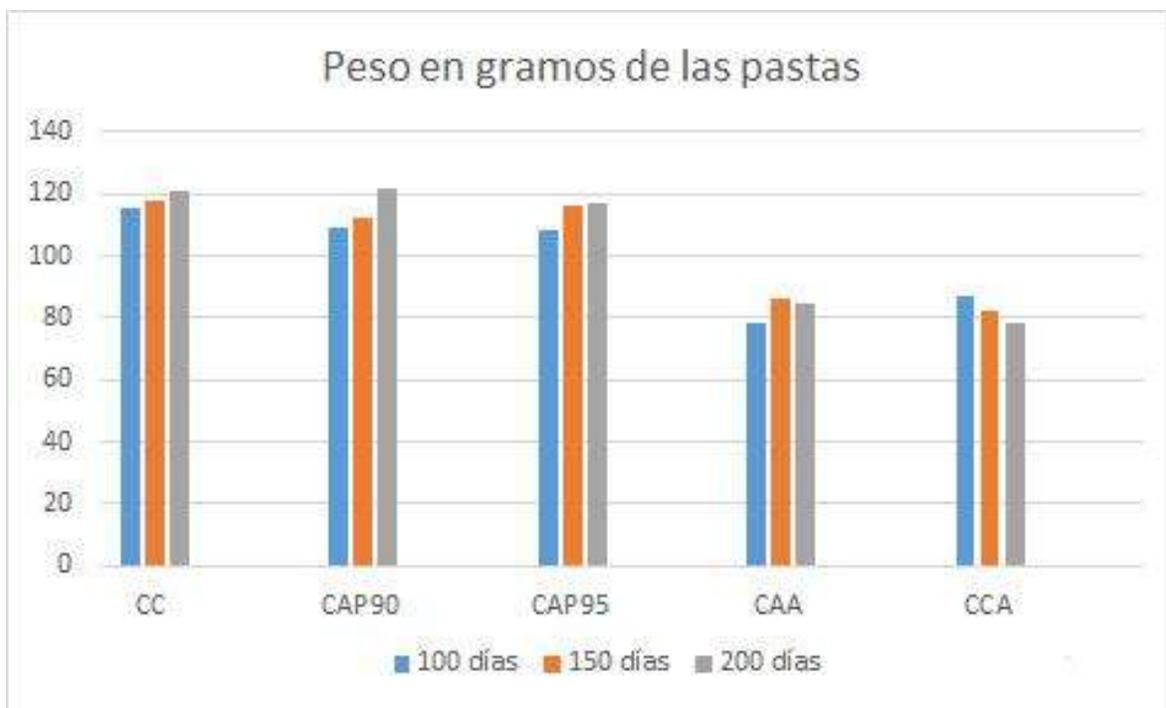
Los cubos de pastas permitieron observar la contracción por la pérdida de agua, así como la disminución del volumen total. En el caso de las pastas maceradas el peso y el tamaño son menores que las cales en polvo, por lo



que puede considerarse que el exceso de agua en una pasta de cal conlleva a una contracción equivalente.

Tabla 24. Promedio de peso de los cubos en gramos de las pastas

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CC	115.40	117.93	120.64
CAP90	109.42	112.27	121.77
CAP95	108.33	116.40	117.40
CAA	78.16	86.60	84.82
CCA	86.79	81.87	78.48



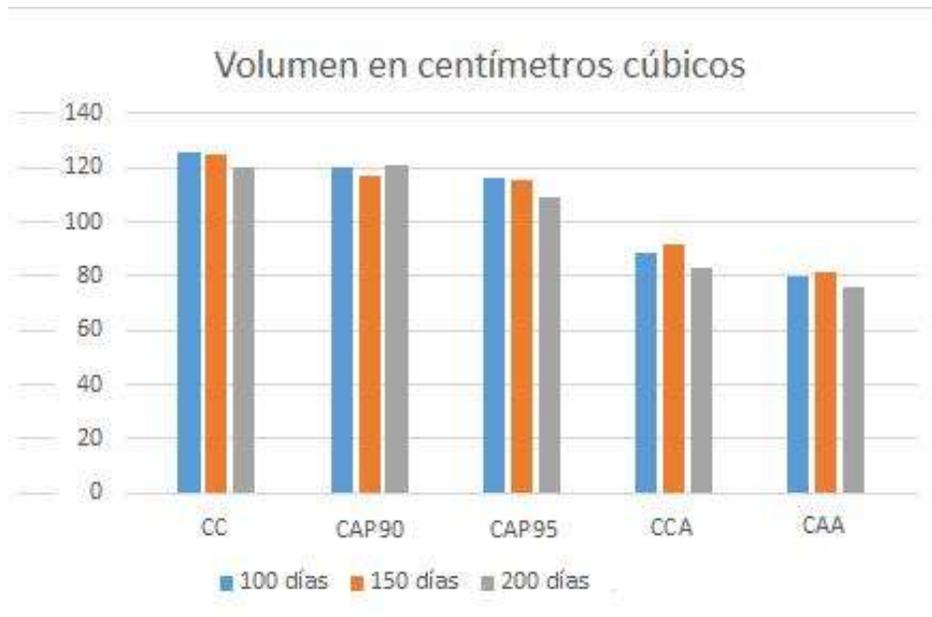
Gráfica 18. Promedio de peso de los cubos en gramos de las pastas,



Figura 86. Cubos de pasta de cal

Tabla 25. Volumen promedio de los especímenes cúbicos de pasta de cal.

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CC	125.39	125.08	119.90
CAP90	120.35	117.17	120.68
CAP95	116.25	115.25	109.12
CCA	88.19	92.09	83.19
CAA	79.94	81.12	75.73



Gráfica 19. Volumen promedio de los especímenes cúbicos de pasta de cal



Figura 87. Comparativa de los cubos de pasta de cal

Velocidad de Pulso Ultrasónico

Esta prueba nos da el dato de que tan homogénea o densa es la mezcla en estado endurecido, ya que el pulso ultrasónico que el equipo envía por un transductor, atraviesa la matriz, y es captado por otro transductor en el extremo opuesto, y ahí puede calcularse cómo viajaron las ondas, si hubo discontinuidades como poros o grietas, o si por el contrario se trata de un medio continuo. Los especímenes deben estar en estado endurecido, pero húmedos, lo cual es una acción compleja, ya que la cal, antes de carbonatarse de nuevo es soluble en agua.

Tabla 26. Velocidad de Pulso Ultrasónico en pastas, unidades m/seg

Tipo de cal	100 DÍAS	200 DÍAS
CAP95	4211.7	2043
CAA	1573.7	1897.3
CAP90	1473.0	1781.7
CCA	1570.0	1631
CC	1423.0	1584



Gráfica 20. Velocidad de pulso Ultrasónico en m/s en las pastas de cal

Podemos observar en la tabla y la gráfica que las pastas de cal que presentan mayor homogeneidad en todas las edades es la CAP95, siguiendo CAA, CAP90, CCA y con los valores más bajos es la CC, en esta última se pueden observar en algunos especímenes que comenzaron surgir fisuras a unos 30 días de su realización (figuras 88 y 89) por lo que por esta razón se considera que su valor fue bajo.



Figura 88. Fisura y hueco en cubo de CC en pasta.



Figura 89. Fisura y grieta en cubo CC en pasta.



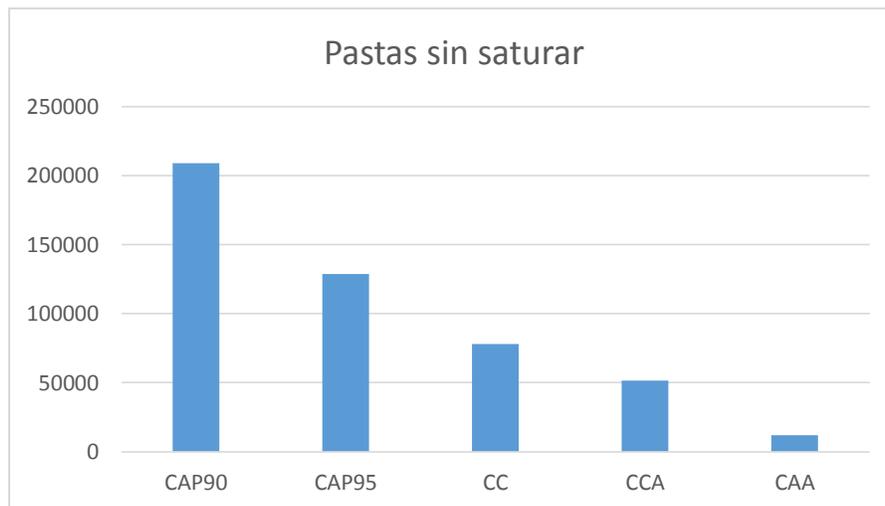
Resistividad eléctrica

Con la resistividad eléctrica también de manera indirecta se puede calcular la porosidad u homogeneidad, ya que se mide la resistencia al paso de corriente eléctrica o a la conductividad eléctrica o la conductividad de electrones, los especímenes deben estar saturados para realizar las cuantificaciones:

En el caso de las pastas de cal no es posible saturarlas por inmersión por su solubilidad, por lo que se realizó una primera prueba en estado seco, en la tabla 27 los valores están listados en forma decreciente.

Tabla 27. Resistividad eléctrica de las pastas sin saturar

Tipo de cal	ohm*cm
	100 Días
CAP90	209090
CAP95	128850
CC	78000
CCA	51600
CAA	12030



Gráfica 21. Resistividad de pastas sin saturar

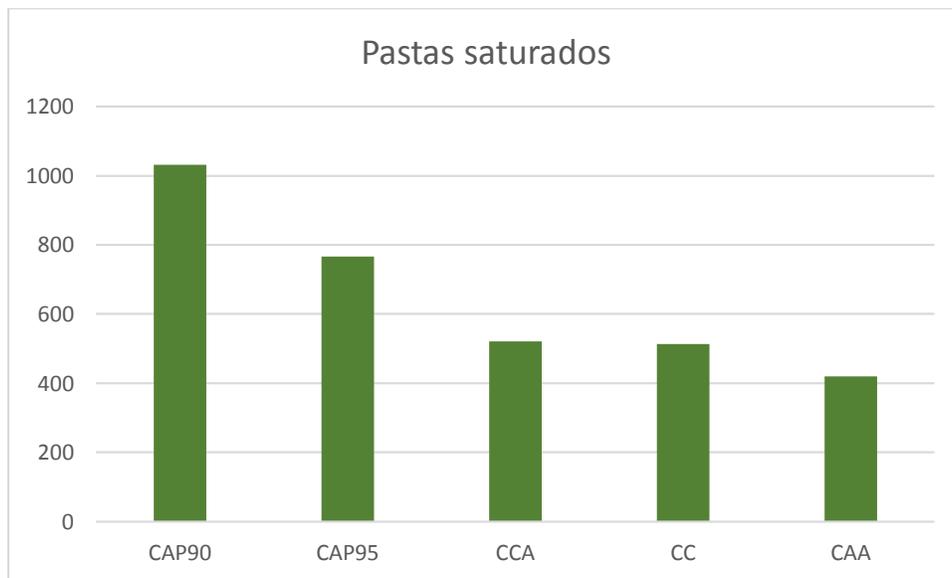


Se considera que la pasta más porosa es la llamada CAA, siguiendo la CCA, CC, CAP95 y CAP90, esto nos indica que las cales que se encontraban en pastas tienden a ser más porosas que las que se encuentran en polvo, además que las de alta pureza son las que tienen un resultado más alto.

En la segunda prueba, los especímenes saturados se midieron a los 200 días de edad, la razón fue que la saturación fue lenta para evitar que los cubos se disolvieran, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 28. Resistividad eléctrica en pastas saturadas

Tipo de cal	ohm*cm 200 Días
CAP90	1031.83
CAP95	765.8
CCA	520.23
CC	513.36
CAA	418.94



Gráfica 22. Resistividad de pastas saturadas



Los resultados más bajos son los de CAA, siguiendo CC, CCA, CAP95 y CAP90. Estos resultados son muy parecidos a los especímenes sin saturar, ya que la CAA en ambas pruebas es el valor más bajo por lo que se considera que es muy poroso y esto puede ocasionar un mayor deterioro ya que el agua puede almacenarse en esos poros generando disgregación del material.

Las cales de alta pureza en ambas pruebas tiene un valor alto por lo que su porosidad es menor en comparación con las otras cales, se puede considerar que la cal de construcción tanto macerada y en polvo tiene un valor medio entre las cales.

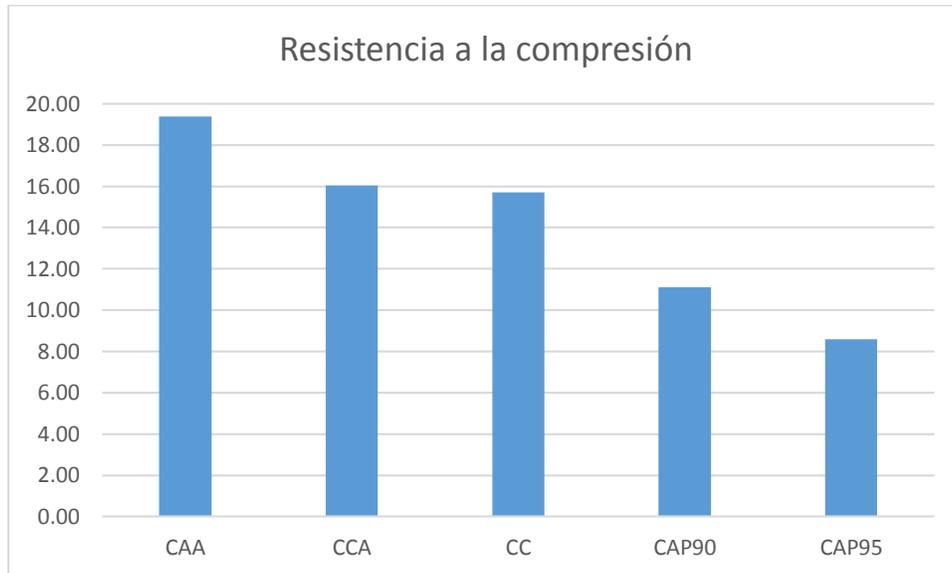
Caracterización mecánica

Resistencia a la compresión

Para esta investigación era necesario realizar esta prueba en las pastas aunque se sabe que en la restauración no se busca en específico que presenten altas resistencias pero se requería saber de su resistencia a los impactos en acabados. Los resultados a los 100 días fueron los siguientes:

Tabla 29. Resistencia a la compresión de las pastas

Tipo de cal	100 DÍAS
CAA	19.39
CCA	16.05
CC	15.70
CAP90	11.12
CAP95	8.58



Gráfica 23. Resistencia a la compresión de las pastas

La resistencia más alta fue de la CAA, siguiendo la CCA, CC, CAP90 y CAP95, lo que observamos es que las cales en pasta tienen mayor resistencia pero se debe considerar que estas cales tuvieron una contracción, reduciéndose hasta un centímetro.

Se debe considerar que estos resultados fueron a los 100 días de edad y las cales tienen una lenta carbonatación por lo que los resultados de las cales serán bajos en comparación con el cemento portland, que también se fabrica a partir de la misma materia prima, pero calcinado a temperaturas mayores.

Mortero

Los morteros son esenciales en la restauración, ya que son con los que se consolida la mampostería para que trabaje de manera monolítica, y no como elementos aislados, se puede usar en restauración y conservación del patrimonio tangible, en la inyección de muros, rejunteo y pegado de piezas ornamentales, entre otras actividades constructivas. Se reintegran aplanados y firmes. Se colocan como elementos de sacrificio o protección. Por lo que conocer las propiedades de cada uno de los morteros elaborados



con las distintas cales nos ayudará a tomar una decisión sobre que cal puede ser usada en los diversos trabajos de restauración.

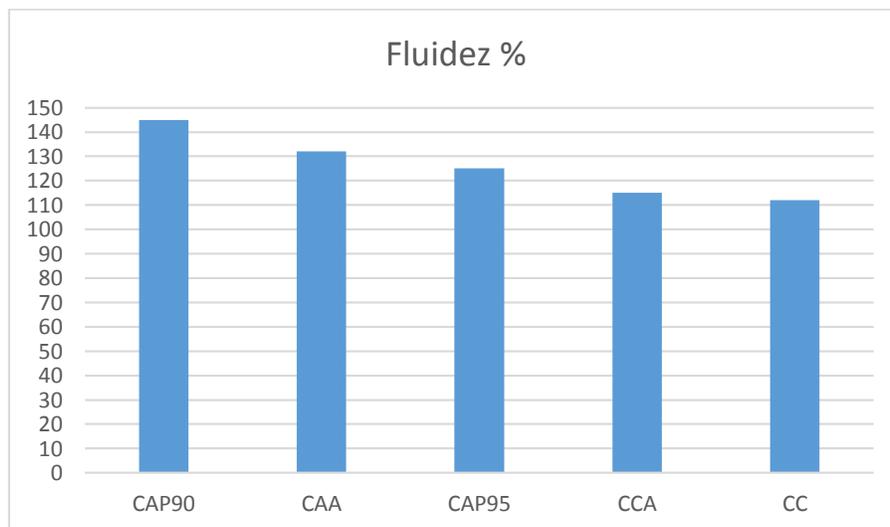
Caracterización física

Fluidez

La fluidez se mide en las mezclas en estado fresco y da la idea sobre la cantidad de agua que se requiere para hacer un mortero trabajable, se considera que si los valores están entre 105 a 130% de la fluidez, el mortero puede ser usado en pegado de mampostería y de 125 a 130% se considera que se puede utilizar para relleno.

Tabla 30. Fluidez de los morteros

Fluidez	%
CAP90	145
CAA	132
CAP95	125
CCA	115
CC	112



Gráfica 24. Fluidez de los morteros



Las arenas o áridos influye sobre la fluidez del mortero ya que de acuerdo a sus características puede absorber agua de la mezcla, en la gráfica nos indica que el mortero con mayor fluidez fue la CAP90, siguiendo CAA, CAP95, CCA y CC.

Los resultados de la fluidez pueden variar en la obra ya que aunque se considera una clasificación de acuerdo a su uso, cada trabajo en la restauración es diferente la fluidez que se requiere. Como en el caso de una inyección de muros que es necesario que pueda pasar a través de una manguera y rellenar los huecos del muro o en un aplanado donde la mezcla debe cubrir la estructura y adaptarse a la forma del muros.

Medida y peso (masa)

El peso (masa) de los morteros en estado seco influye con la arena con la que se realicen, este caso fue arena volcánica, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 31. Peso (Masa) promedio de los cubos de morteros, en gramos

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CAP90	208.7	194.8	205.58
CAP95	197.9	201.07	202.52
CC	191.83	193.53	196.29
CAA	179.01	182.67	177.61
CCA	171.12	169.47	168.57



Gráfica 25. Peso (Masa) promedio de los cubos de morteros, en gramos.

Al igual que las pastas, las cales que se encontraban en pasta, presentan una masa o peso inferior a las cales en polvo, el peso promedio de tres diferentes edades es mayor en las cales de alta pureza, siguiendo CC, CAA CCA.



Figura 90. Comparativa de los cubos de mortero en estado seco

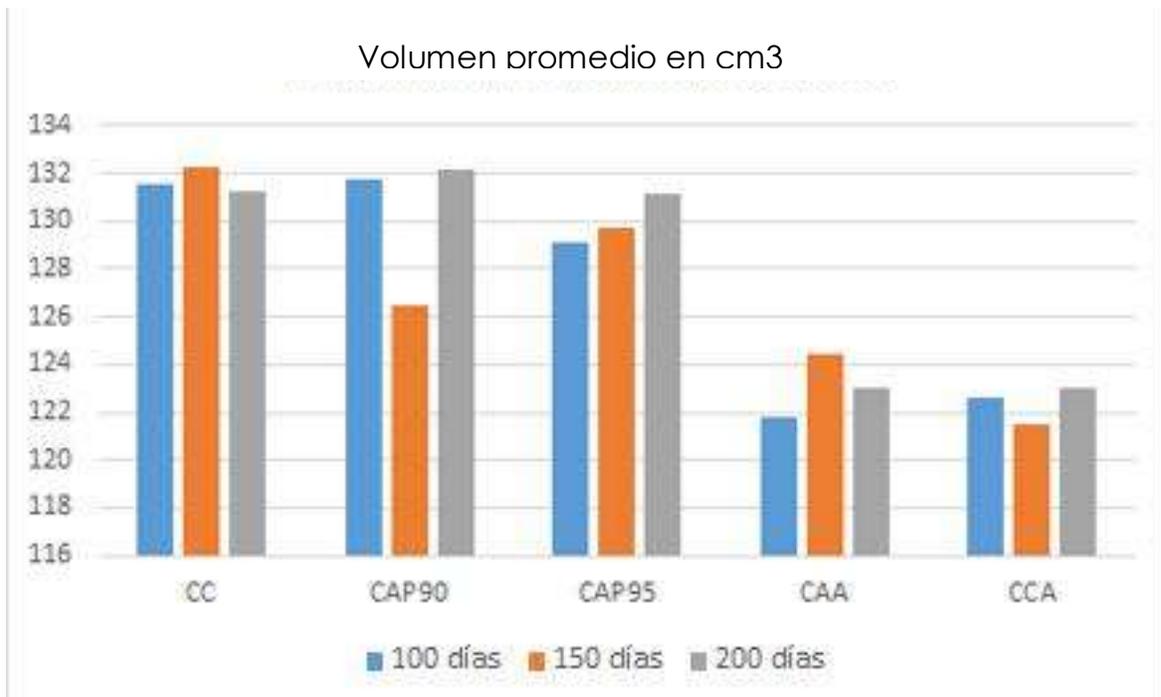
Medidas

Es necesario conocer si existe una contracción o deformación en los especímenes de los morteros, ya que se espera que se sean la unión entre dos piezas en el caso de las juntas y que no aparezcan grietas en los aplanados, la cuantificación nos arrojó los siguientes resultados:



Tabla 32. Volumen promedio de los cubos de los morteros base cal

Tipo de cal	100 días	150 días	200 días
CC	131.58	132.29	131.27
CAP90	131.74	126.5	132.12
CAP95	129.16	129.71	131.18
CAA	121.76	124.41	123
CCA	122.59	121.51	122.99



Gráfica 26. Volumen promedio de los morteros base cal

Los morteros presentaron menor contracción que las pastas, un resultado obvio y esperado, dado que los áridos son estabilizantes volumétricos, la mayor contracción la presentaron los especímenes cúbicos elaborados con las cales que se encontraban en pasta: la CCA, siguiendo CAA, CAP95, CAP90 y la CC que no tuvo ningún cambio en cuanto a su volumen.



Los resultados son el promedio de tres cuantificaciones de los morteros, donde se puede observar (figura 91) que la cal de construcción fue la que presentó menos cambios volumétricos, mientras que las cales en pasta aunque disminuidas, sí tuvieron un cambio.



Figura 91. Cubos de morteros de mayor a menor tamaño

Velocidad de pulso ultrasónico

Esta prueba no destructiva en los especímenes fraguados de los morteros nos puede dar la idea de si existen vacíos, grietas o fisuras que puedan ser parte del comienzo de un deterioro, ya que por estos defectos se puede comenzar con un daño mayor. Lo que nos indica que el resultado entre más alto tendrá menos defectos el mortero en estado seco. Se realizaron dos pruebas con diferentes edades, siendo estos los resultados:

Tabla 33. Velocidad de pulso ultrasónico de los especímenes de los morteros en m/s

Tipo de cal	100 DÍAS	200 DÍAS
CC	1847.3	1925
CAP90	1735.7	1772.7
CAP95	1769.0	1663.3
CCA	1431.0	1229.3
CAA	1371.7	1286.7



Gráfica 27. Velocidad de pulso ultrasónico de los especímenes de los morteros en m/s.

Lo que podemos observar es que los morteros más homogéneos son los de CC, siguiendo CAP90, CAP95, CCA y por último CAA. Por lo que la cal de construcción es la mezcla más homogénea, junto con las cales del alta pureza, presentando los menor valores las cales que se encuentran en pasta. Esto nos puede ayudar a tomar una mejor decisión en que cal usar en los aplanados y firmes que son los que están directamente ante el medio ambiente.

Resistividad eléctrica

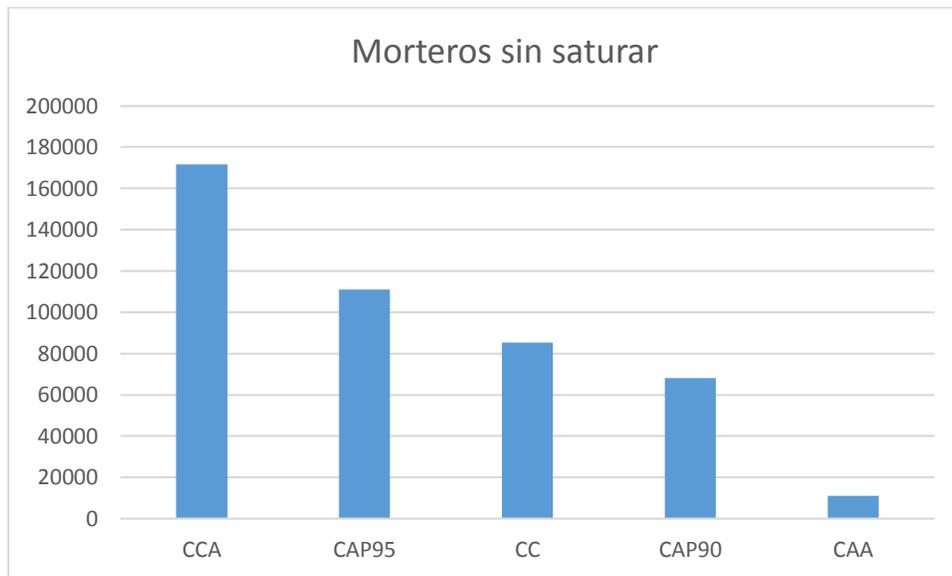
Esta prueba no destructiva en los morteros nos da la idea de la porosidad del material en estado seco, ya que se sabe que en los poros interconectados el agua pueda acumularse haciendo que el material se disgregue y existan un deterioro en el material, se considera que entre más bajo es el resultado mayor es la existencia de poros. En los trabajos de restauración es de vital importancia conocer este dato para aplicar la cal que tenga menor porosidad para que evitar el daño causado por el medio



ambiente. Esta prueba se realizó con los morteros saturados y sin saturar de agua, arrojando los siguientes resultados:

Tabla 34. Resistividad eléctrica de los morteros sin saturar en Ohm-cm

Tipo de cal	ohm*cm
	100 Días
CCA	171660
CAP95	111040
CC	85280
CAP90	68200
CAA	11150



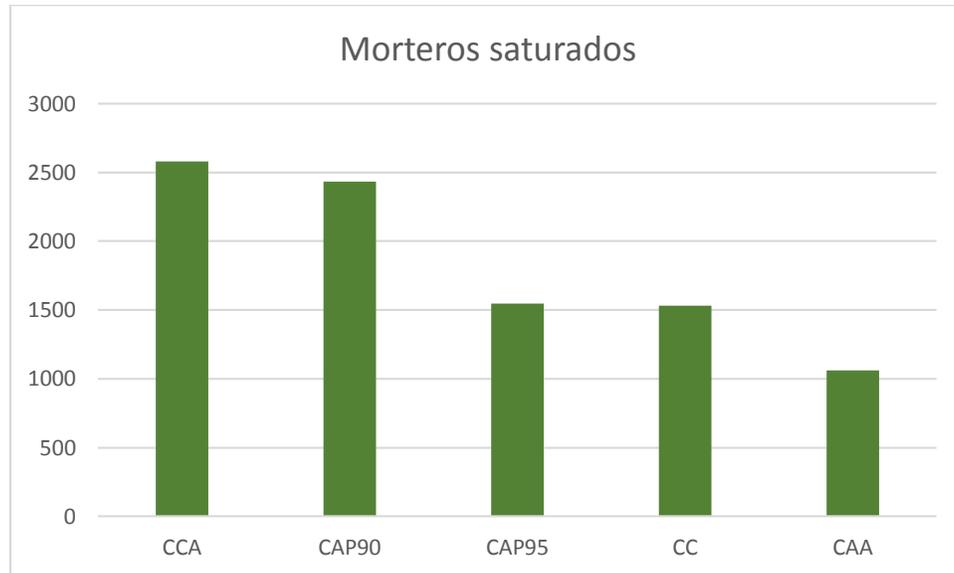
Gráfica 28. Resistividad eléctrica de los morteros sin saturar en Ohm-cm.

En los especímenes fraguados no saturados los resultados más altos fueron de 171,660 ohm por centímetro, estos fueron de la CCA, siguiendo CAP95, CC, CAP90 y por último CAA. Lo que nos indica que la cal apagada artesanalmente es el mortero con mayor porosidad en comparación con las otras cales.



Tabla 35. Resistividad eléctrica de los morteros saturados

Tipo de cal	ohm*cm
200 Días	
CCA	2579.69
CAP90	2433.10
CAP95	1546.35
CC	1533.07
CAA	1061.06



Gráfica 29. Resistividad eléctrica de los morteros saturados

En los especímenes cúbicos fraguados saturados, el mayor resultado fue de 2,579.69 ohm por centímetro de la CCA, siguiendo CAP90, CAP95, CC y por último la CAA. Realizando la comparativa de las dos pruebas se puede considerar que la cal con menos porosidad fue la cal de construcción macerada, mientras que las cales en polvo como las de alta pureza y cal de construcción sus valores son medios, y con un valor más bajo nuevamente la cal apagada en obra.



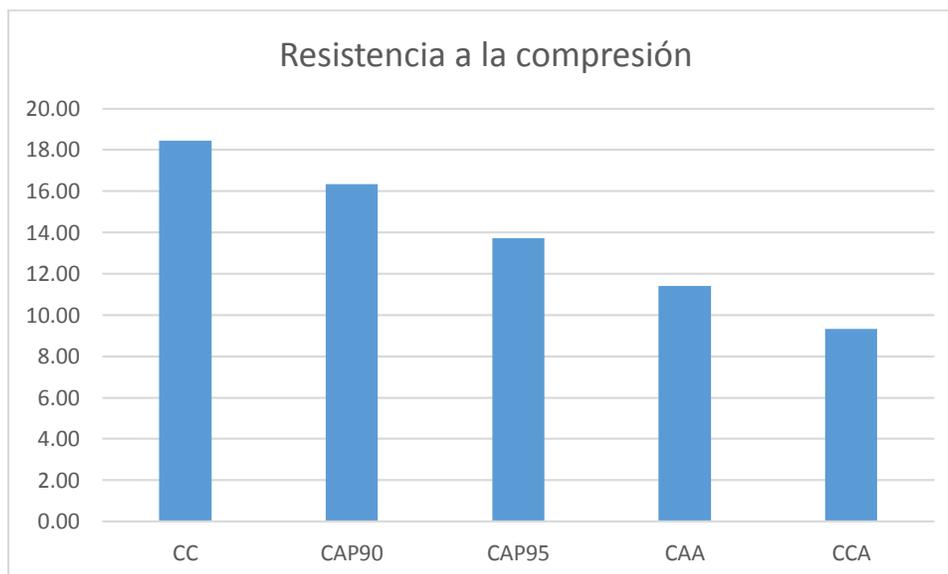
Caracterización mecánica

Resistencia a la compresión

En la restauración, por los materiales con los que se trabajan no es necesario que los morteros tengan resistencias altas para evitar que sean más rígidos como el cemento y dañen el sistema constructivo y por lo tanto el edificio, los resultados fueron:

Tabla 36. Resistencia a la compresión de los morteros

Tipo de cal	100 DÍAS
CC	18.44
CAP90	16.35
CAP95	13.72
CAA	11.42
CCA	9.34



Gráfica 30. Resistencia a la compresión de los morteros

Se puede observar que la cal de construcción tiene un valor más alto, siguiendo las cales de alta pureza y por último las cales maceradas. Por lo



que la cal de grado construcción sí puede ser usada cuando se requieren resistencias más altas en los trabajos de restauración.

El análisis de las pruebas en las diferentes cales nos puede aportar información valiosa, para tomar la decisión de que material usar para los trabajos de restauración y conservación. Al conocer las características de la cal en su estado fresco y endurecido, y el sistema constructivo con el que se va a trabajar se puede trabajar de manera óptima para la protección del patrimonio edificado.



Conclusiones

Los edificios antiguos tienen sistemas constructivos parecidos alrededor de México pero sus materiales pueden variar, solo la cal como cementante es el que está presente en mayor medida, por lo que la investigación de la cal por sí sola es de vital importancia para ampliar el conocimiento universal, para lograr durabilidad, quizá para erradicar mitos y leyendas sobre su uso. En esta investigación se encontraron nuevos datos que aportan y se confirmaron otros datos que eran supuestos o empíricos, con las pruebas realizadas y analizando los resultados sobre las cales que existen actualmente.

La cal se le ha considerado que tiene características únicas que otros materiales no tienen, como: adherencia, trabajabilidad, plasticidad y puede actuar como insecticida por su pH.

La fabricación de la cal es parte de un ciclo, donde se transforma el carbonato de calcio más temperatura y se convierte en óxido de calcio y posteriormente se hidrata transformándolo en hidróxido de calcio, para que de nueva cuenta con el medio ambiente, con el aire que tiene CO₂, vuelva a convertirse en carbonato de calcio. Este ciclo le permite a la cal volverse piedra y por lo tanto mantenerse por años, esto contribuye a que los edificios antiguos aún estén en pie.

En México, para el uso de la cal en la restauración se recomienda que se realice el proceso de apagado de cal artesanalmente porque se considera que esto le da propiedades óptimas como la adherencia, flexibilidad y trabajabilidad, mientras que la cal comercial en polvo (cal de construcción) no suele considerarse porque tiene distinto comportamiento, aunque ambas son hidróxido de calcio. Por lo que esta investigación se enfocó a realizar pruebas con estas cales y las de alta pureza para tener un sustento arquitectónico técnico sobre las propiedades de las distintas cales.



Las cales de alta pureza son el resultado de tecnología de los hornos, ya que la calcinación controlada permite la existencia de dichas cales. Estos materiales son poco reconocidas por los restauradores o constructores ya que usualmente están enfocadas para diferentes industrias. Esta investigación pretende aportar al conocimiento de las propiedades de las cales de alta pureza en polvo y sus características, junto con la cal apagada artesanalmente y la cal de grado construcción.

Las pruebas que se realizaron fueron de caracterización física y mecánica, de los cinco tipos distintos de cales para analizar y comprobar qué propiedades tienen y cuáles son las óptimas para cada trabajo de restauración. La investigación se realizó en pastas, para conocer sus propiedades para usarlas en acabados; y en morteros, para utilizarlos en la estructura o protección de la estructura.

Dentro de la caracterización física, se contempló el área superficial de las cales, esta prueba es necesario realizarla en polvo, por lo que las que se encontraban en pasta se dejaron secar y se molieron. Con los resultados del área superficial de las cales se puede afirmar que la cal al macerarse sí aumenta su área superficial y aunque haya pasado por un proceso previo de hidratación como es el caso de la cal de construcción, su área sí puede mejorar con un añejamiento, además de conocer dicha área nos aporta una idea de su reactividad, trabajabilidad y cuánta agua requiere para realizar una mezcla.

Analizando los resultados del área superficial, el material que presentó las mayores áreas superficiales fueron de las cales maceradas-hidratadas, siguiendo en valor, la cales de alta pureza en polvo; su resultado fue alto en comparación con la cal de grado construcción. Podemos afirmar que estas cales de alta pureza en polvo sin tener un proceso previo de maceración-hidratación para convertirla en pasta, puede tener características idóneas



para poder usarse en la restauración, lo que disminuiría notablemente tiempo y mano de obra, al solo realizar la mezcla con el árido para formar el mortero y aplicar. Con esto se reducen tiempos, almacenaje y se tiene un certificado de calidad de la hidratación de la calera donde se produce la cal. Sin embargo por supuesto debe continuarse con la investigación de las cales de alta pureza bajo otras caracterizaciones físico-químico-mecánicas, de durabilidad, colorimetría, para tener aún más elementos.

Para exponer los principales planteamientos sobre esta investigación, las cales se clasificaron por su tipo, indicándose en la identificación y nomenclatura de las mismas, para poder comparar sus propiedades entre ellas.

Las cales identificadas como:

Cal de alta pureza con contenido de hidróxido de calcio de 95% (CAP95) y Cal de alta pureza con contenido de hidróxido de calcio de 90% (CAP90)

Estas cales presentaron una homogeneidad alta y menor porosidad con respecto a las cales maceradas-hidratadas, por lo que se pueden considerar para la restauración, sobre todo para lugares donde hay humedad, ya que al provocar matrices menos porosas, la humedad por capilaridad será menor. En cuanto a la fluidez, en estas mezclas puede controlarse la dosificación y diseño de los morteros.

Estos morteros pueden ser usadas en la estructura y los acabados, la colocación de mampostería, aplanados, firmes, inyección de muros, entre otros. Su resistencia a la compresión, no es lo que las distingue, pero tampoco es lo que se busca al diseñar estos materiales.

Cal apagada artesanalmente (CAA)



Esta cal presentó excelente trabajabilidad, pero se debe considerar que en las pruebas de pastas y morteros presentó alta porosidad, por lo que puede ocasionar deterioros con mayor rapidez respecto al tiempo, al poder absorber más agua y comenzar un deterioro por disgregación, en cuanto su homogeneidad en los especímenes se pudieron observar grietas y fisuras en las pastas, además de alta contracción que puede afectar los aplanados o pegado de mampostería, haciendo que se despegue y por lo tanto no exista una unión de las piezas, trabajando de manera aislada y no monolítica, se sabe que se pueden añadir aditivos para modificar las propiedades de estos morteros, pero no es el fin de la presente investigación, es algo que sí debe realizarse.

Sí se hace necesario someter a la cal a una hidratación en la obra, que se recomienda de 6 meses a 3 semanas y colado previo para eliminar los corazones de carbonato de calcio que quedaron en la pasta y posteriormente poder usarse. En cuanto a la fluidez, no se tiene un control exacto de la cantidad de agua ya que se mantiene siempre con un espejo de agua para evitar el contacto con el medio ambiente y evitar que comience el proceso de carbonatación, por lo que la cal en pasta es muy fluida.

Cal de grado construcción macerada (CCA)

Esta cal se preparó para erradicar la idea que la cal hidratada en polvo al tener un proceso de hidratación previo ya no puede aumentar su área superficial y mejorar sus características. Lo que se comprobó fue que sí puede aumentar su área, en cuanto a sus características son muy similares a la cal apagada artesanalmente al presentar alta porosidad en pastas y morteros. Es una buena opción para la realización de trabajos en volumen como morteros para usarse en aplanados y pegado de mampostería.



Cal de grado construcción (CC)

Esta cal en polvo sí puede ser usada en la restauración, ya que sus características son adecuadas para los morteros, al no presentar altas contracciones, presentar homogeneidad, baja porosidad y alta resistencia a la compresión, se puede usar en la restauración para restituir aplanados, pegado de mampostería y en firmes.

En cuanto a usarse en pasta no se recomienda ya que tiende a fisurarse con el tiempo. Esta cal es de fácil adquisición en cualquier parte de la República pero hay que asegurarse que la cal de grado construcción tenga como mínimo un contenido de hidróxido de calcio de 80%.

El propósito de esta investigación fue dar al restaurador, arquitecto o constructor, distintas opciones para la realización de mezclas de cal para usarse en la restauración de una manera eficiente, accesible y durable, protegiendo el patrimonio edificado al evitar el uso de otros materiales que puedan dañar el sistema constructivo o al material con el que está construido.

De este trabajo se pueden generar distintas líneas de investigación sobre las cales y su uso como morteros. Surgiendo algunas preguntas como: ¿la inyección de muros con cal apagada en obra realmente está trabajando monolíticamente?, ¿Cuáles son las opciones de cales que se pueden usar para la inyección?, ¿Cuáles son los aditivos que pueden ser usados en las cales que sean compatibles?



Glosario

Apagado de cal.- Cuando se usa un exceso de agua en la hidratación el proceso se llama “apagado”. (Norma NMX-C-491-ONNCCE-2014)

Barrenar.- Abrir agujeros con barrena o barreno en algo (RAE)

Cal.- Es un producto blanco, sólido, con un elevado punto de fusión. Tiene avidez por el agua que tras reacción exotérmica, se transforma en hidróxido de calcio. (Garate Rojas, 2002, pág. 106)

Cal viva: Producto de la calcinación de la roca caliza, constituido en su mayor parte por óxido de calcio (CaO), o bien óxido de calcio asociado con óxido de magnesio (MgO), capaces de reaccionar con el agua exotérmicamente, lo que produce su apagado o hidratación. (SCT)

Cal apagada o hidratada: Polvo seco, obtenido al tratar cal viva con suficiente agua para satisfacer su afinidad química, provocando su hidratación. Consiste esencialmente en hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio (MgO) e hidróxido de magnesio de calcio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$). (SCT)

Cal química: es un hidróxido de calcio o cal hidratada de alta concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, normalmente por arriba del 90%. (ANFACAL, 2018)

Cal de construcción: comprende los hidróxidos de calcio con o sin magnesio, denominados cales hidratadas con contenidos del 75% al 85% en dichos hidróxidos y que su campo de aplicación se enfoca a la industria de la construcción. (ANFACAL, 2018)

Cal siderúrgica: es un tipo de cal viva con al menos 90% de óxido de calcio y muy bajos contenidos de sílice, azufre y fósforo. (ANFACAL, 2018)



Cal química grado alimenticio: Es una particularidad de la cal química que además de la alta concentración de hidróxidos cumple las normas de contenidos máximos de metales pesados y compuestos nocivos para la industria de alimentos. (ANFACAL, 2018)

Cal agrícola: envuelve toda la gama de cales incluidos los carbonatos precursores de las mismas, la particularidad es que su aplicación es como un mejorador de suelos agrícolas. (ANFACAL, 2018)

Cal Dolomítica.- es la que para su fabricación se partió de un carbonato doble de calcio y magnesio y no de una caliza que es rica solo en carbonato de calcio. (ANFACAL, 2018)

Caliza.- Roca sedimentaria de formula CaCO_3 , de origen natural. Carbonato de calcio. (Norma NMX-C-491-ONNCCE-2014)

Estabilización de Suelos: Es una reacción química que involucra los elementos componentes de las arcillas, sílice y aluminio que en contacto con el calcio de la cal forman un sistema puzolánico el cual forma compuestos que fraguan y son insensibles al contenido de humedad, de tal manera que los terrenos inestables a la humedad comúnmente conocidos como áreas lodosas son perfectamente susceptibles de estabilizarse con cal y convertirse en superficies estables y servir de bases para estructuras trátense de carreteras, estacionamientos, cimentaciones para vivienda, edificios públicos, naves industriales o centros comerciales. (ANFACAL, 2018)

Caliche.- son calizas sin apagar, son blancas. (Garate Rojas, 2002, pág. 106)

Densidad.- Es la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. (Norma NMX-C-491-ONNCCE-2014)

Lixiviación. Acción de lixiviar.- Tratar una sustancia compleja, como un mineral, con un disolvente adecuado para separar sus partes solubles de las insolubles. (Real academia Española, 2019)



Mortero.- Mezcla de conglomerantes a base de cementante, agregados áridos finos inorgánicos y agua y ocasionalmente aditivos. Es utilizado para pegar elementos de construcción, elemento de relleno, agarre, revestimiento, etc. (Norma NMX-C-491-ONNCCE-2014)

Plasticidad.- Término utilizado en albañilería para referir a la consistencia de un mortero. Es la característica medible de la consistencia de los morteros. (Norma NMX-C-491-ONNCCE-2014)

Segregación.- Separación de los constituyentes de una mezcla heterogénea.

Trabajabilidad.- Facilidad de colocación, consolidación y acabado del mortero o pasta fresco y el grado que resiste a la segregación.



Bibliografía

- Aguilar Aguilar, A. (2009). *El papel de la formación del edificador en la modernización de la arquitectura en Morelia entre 1960 y 1975*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Alcocer, S. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. *Memoria del XI COngreso Nacional de Ingeniería Sísmica* (págs. 164-191). Veracruz: Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C.
- Anaya Gómez , P. (2015). Modificación y estabilización en suelos arcillosos. En P. F. Anaya Gómez, *Estabilización de suelos con cal* (págs. 15-16). Asociación Nacional de Fabricantes de cal, A.C.
- Anaya Gómez, P. (2015). Calcular el contenido óptimo de cal. En A. Asociación Nacional de Fabircantes de cal, *Manual práctico para la estabilización de suelos con cal* (págs. 31-36). Distrito Federal: ANFACAL.
- ANFACAL. (17 de Mayo de 2018). *Asociación Nacional de fabricantes de cal*. A.C. Obtenido de <http://anfocal.org/pages/datos-tecnicos-de-la-cal-y-sus-derivados.php>
- Arandigoyen, M., Bicer-Simsir, B., Alvarez, J., & Lange, D. (Octubre de 2005). Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. *Science Direct*, 7562-7569.
- Asociación Nacional de Fabricantes de Cales, y. D. (s.f.). *Guía Práctica para los Morteros de Cal*. Madrid: ANCADE.
- Asociación Nacional de Fabricantes de cales, y. (s.f.). *Guía Práctica para los Morteros de Cal*. Madrid: ANCADE.



- Barba Pingarrón, L., & Villaseñor Alonso, I. (2013). *La Cal. Historia, propiedades y usos*. Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas; Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C.
- Bauzá Castelló, J. D. (2014). Aplicaciones de la cal en la obra civil: La estabilización de suelos arcillosos. En F. J. Alejandro Sánchez, *La cal, Investigación y restauración* (págs. 63-79). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Bedolla Arroyo, J. (2008). *Caracterización física mecánica de klos morteros de cal apagada*. Programa Interinstitucional de doctorado en arquitectura. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Bedolla Arroyo, J. A. (2008). *Caracterización física mecánica de los morteros de cal apagada*. Programa Interinstitucional de doctorado en arquitectura. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Blyth, F., & de Freitas, M. (1989). *Geología para ingenieros*. Distrito Federal: Compañía Editorial Continental S.A de C.V.
- Bonfil Batalla, G. (1997). Nuestro patrimonio cultural: un laberinto de significados. En E. Flores Cano, *El Patrimonio Nacional de México* (págs. 28-56). México: CONACULTA.
- Calama Rodríguez, J. M. (2014). Idoneidad de los morteros de cal para revestimientos en resturación patrimonial. En F. J. Alejandro Sánchez, *La cal, investigación y restauración* (págs. 119-134). Sevilla: Universidad de Sevilla.



- Cedeño Valdiviezo, A. (2011). Aglomerantes, morteros y aplanados adecuados para proteger el medioambiente. *Revista de Arquitectura*, 106-117.
- Cerný, R., Kunca, A., Tydlitát, V., Drchalová, J., & Rovnanílová, P. (2005). Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plasters. *Construction and Building Materials*, 849-857.
- Chanfón Olmos, C. (1996). *Fundamentos teóricos de la restauración*. Distrito Federal: Facultad de arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Chanfón Olmos, C. (1997). *Historia de la arquitectura y el urbanismo mexicanos (Vol. 2)*. Distrito Federal: UNAM.
- Conejo Delgado, N. (2017). Los Hornos de cal de Valverde de Leganés (Badajoz): estudio arqueológico y puesta en valor. *Otaq*, 3-15.
- De la Iglesia Santamaría, M. Á. (1998). El conocimiento de los edificios antiguos". En I. Represa, *Restauración arquitectónica II* (pág. 163). Valladolid: Secretariado e Intercambio Científico, Universidad de Valladolid.
- Delgado Méndez, A. (2014). Propuestas de salvaguardia de la actividad calera en Santa Ana la Real (Huelva). En F. J. Alejandro Sánchez, *La cal, Investigación y restauración* (págs. 135-148). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- Delgado Rodrigues, J. (2016). Liesegang rings in differential deterioration patterns of lime mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 819-822.
- Díaz Calderón, M. G. (2017). *Aditivos orgánicos e inorgánicos en morteros de cal; revisión histórica para su aplicación en intervenciones actuales*.



Morelia: Tesis para obtener el grado de Maestría en Arquitectura, Investigación y Restauración de Sitios y Monumentos.

Eco, U. (2001). *Cómo se hace una tesis*. Barcelona: Gedisa.

Elías López, P. D., Roux Gutiérrez, R. S., Lucero González, D. A., & Gómez Cruz, L. (2012). *Evaluación del desempeño térmico y estudio termográfico de revoques de cal y cemento*. Tamaulipas: Universidad Autónoma de Tamaulipas.

Espinosa Gaitán, J. (2014). Estudios de morteros de cal en pasta y en polvo para su empleo en proyectos de intervención del IAPH (Sevilla). En F. J. Alejandro Sánchez, *La cal, Investigación y restauración* (págs. 39-52). Sevilla: Universidad de Sevilla.

Fernández Aller, R. (2014). Preámbulo. Estructura de la producción de cal en España. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, & J. J. Martín del Río, *La cal. Investigación, patrimonio y restauración*. (pág. 313). Sevilla: Universidad de Sevilla.

Galván-Ruiz, M., & Velázquez-Castillo, R. (2011). Cal, un antiguo material como una renovada opción para la construcción. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, XII(1), 93-102.

Garate Rojas, I. (2002). *Artes de la cal*. Madrid: Munilla-Lería.

Gobierno del Estado de Michoacán, S. d. (s.f.). *Catálogo de Fuentes de Morelia*. Morelia: Gobierno del Estado de Michoacán, Secretarías de Comunicaciones y Obras Públicas.

González, M. D. (2014). Ennoblecimiento de la arquitectura con morteros de cal, en restauración y en obra de nueva planta. En F. J. Alejandro Sánchez, V. Flores Alés, F. J. Blasco López, & J. J. Martín del Río, *La cal* (págs. 189-198). Sevilla: Universidad de Sevilla.



- González-Yunta, E., González-Cortina, M., & Lasheras- Merino, F. (2015). Influencia del tratamiento "a fuego" en las características del estuco tradicional con cal. *Informes de la Construcción*, 67,537, eo52.
- Guerrero, L. (2013). La cal y los sistemas constructivos. En L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal. Historia, Propiedades y Usos* (págs. 49-72). Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Antropológicas; Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C.
- Guerrero, L. (2013). La cal y los sistemas constructivos. En L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal. Historia, Propiedades y Usos* (págs. 49-72). Distrito Federal: UNAM, Instituto de Investigaciones Antropológicas; ANFACAL.
- Gutiérrez , O., Pineda, Y., & Vera, E. (s.f.). Estudio del comportamiento electroquímico de pasta de cemento modificada durante etapa de fraguado y endurecimiento. *Revista Colombiana de Materiales*, 297-302.
- H. Ayuntamiento constitucional de Morelia, M. (2015). *Reglamento de construcciones y de los servicios urbanos*. Morelia: Periódico Oficial.
- Hassibi, M. (1999). Una perspectiva general del apgado de la cal y los factores que afectan el proceso. *3er Simposium Internacional Sorbalit*, (págs. 1-19).
- ICOMOS. (1964). *Carta Internacional sobre la conservación y la restauración de monumentos y sitios Carta de Venecia*. Venecia.
- ICOMOS. (1964). *Carta Internacional sobre la Conservación y la resturación de Monumentos y Sitios (Carta de Venecia 1964)*. Venecia.
- ICOMOS. (1999). *Carta del patrimonio Vernáculo construido*. México.



Kusch, E. (1957). *Imágenes de México*. (E. Köhler, Trad.) Alemania: Hans Carl, Nürnberg.

Luque, A., Sebastián, E., De La Torre, M. J., Cultrone, G., Ruiz, E., & Urosevic, M. (2006). Estudio comparado de morteros de cal en pasta y cal en polvo. Control de carbonatación. *MACLA*, 293-296.

Magar, V. (2013). El uso de la cal en conservación: la experiencia internacional. En I. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal. Historia, propiedades y usos* (págs. 161-184). Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México; Instituto de Investigaciones Antropológicas; Asociación Nacional de Fabricantes de Cal A.C.

Maletta, H. (2009). *Epistemología aplicada: Metodología y técnica de la producción científica*. Lima: CIES-CEPES-Universidad del Pacifico.

Manzano Cabrera, J., Serrano Ortiz de la Luna, J., & Díaz-Ramos, I. (2018). Tres hornos de cal en la isla de Gran Canaria. tipologías y funcionamiento. *Tradición, versatilidad e innovación de la cal: un material de excelencia VI Jornadas FICAL* (págs. 283-295). Pamplona: Universidad de Navarra, Fórum Ibérico de la Cal.

Martinez, W., Alonso, E., Rubio, J., Bedolla, J., & Velasco, F. A. (2008). Comportamiento Mecánico de Morteros de Cal apagada artesalmente, adicionados con mucílago de cactácea y ceniza volcánica, para su uso en restauración y conservación de monumentos. *Revista de construcción*, 7(2), 93-102. Obtenido de www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612584009

Mendonca De Oliveira, M. S. (1990). The study of accelerated carbonation of lime-stabilized soils. *6th International Conference on the*



Conservation of Earthen Architecture: Adobe 90 preprints: Las Cruces, New Mexico, USA (págs. pp. 166-170). New Mexico: .

Navarro Mendoza, E. G., Alonso Guzmán, E. M., & Bedolla Arroyo, J. A. (2019). La cal en México, su historia y su presente. En *III Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción* (págs. 767-772). Ciudad de México: Facultad de Arquitectura, Universidad Nacional Autónoma de México, Sociedad Española de Historia de la Construcción, Instituto Juan Herrera, Escuela Técnica Superior de Arquitectura, Universidad Politécnica de Madrid.

Navarro, A., Ramírez-Casas, J., Gamarra, A., & Seco, M. (2014). La cal en el antiguo egipto. En F. J. Alejandro Sánchez, *La cal, Investigación y restauración* (págs. 27-38). Sevilla: Universidad de Sevilla.

Oliveira, M. A., Azenha, M., Lourenco, P. B., Meneghini, A., Guimaraes, E. T., Castro, F., & Soares, D. (2017). Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar. *Construction and building materials*, 38-48.

Orea Magaña, H. (2013). EL uso de la cal en la conservación de los monumentos arqueológicos e históricos: de la teoría a la práctica. En L. Barba Pingarrón, & I. Villaseñor Alonso, *La cal. Historia, propiedades y usos* (págs. 141-160). Distrito federal: Universidad Nacional Autónoma de México, y Asociación Nacional de fabricantes de cal A.C.

Organismo Nacional de Normalización, y. C. (2011). *Industria de la construcción- Cal hidratada especificaciones y métodos de ensayo*. Distrito Federal.

Pahlavan, P., Manzi, S., Rodriguez-Estrada, M. T., & Bignozzi, M. C. (2017). Valorization of spent cooking oils in hydrophobic waste-based lime



mortars for restorative rendering applications. *Construction and Building Materials*, 199-209.

Palma Linares, V. (2009). Historia de la producción de cal en el norte de la cuenca de México. *Ciencia Ergo SUM*, 16(3), 227-234.

Ramon Rosell, J., & Bosch, M. (2028). Hormigones de cal:nuevos "viejos" materiales. En V. J. FICAL, *Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de excelencia* (págs. 82-92). Pamplona.

Robador González, M. D. (2014). Ennoblecimiento de la arquitectura con moreteros de cal, en restauración y en obras de nueva planta. En F. J. Alejandro Sánchez, *La mcal, investigación y restauración* (págs. 189-198). Sevilla: Universidad de Sevilla.

Rodríguez Morales, L. (Enero- abril de 2011). Ley sobre Conservación de Monumentos Históricos y Artísticos y Bellas Naturales. *Boletín de monumentos Históricos, Tercera época*(21), 206-211.

Sala, E., Cristina, Z., Passoni, C., & Alessandra, M. (13 de August de 2016). Lightweight natural lime composites for rehabilitacion of Historical Heritage. *Construction an building material*, 81-93. Obtenido de www.elsevier.com/locate/conbuildmat

Salamanca Correa, R. (diciembre de 2001). La tecnología de los morteros. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*(11), 41-48.

Sampedro Rodríguez , Á. (2014). Otras aplicaciones de la cal en la ingeniería civil. En F. Alejandro Sánchez, *La cal, investigación y restauración* (págs. 81-90). Sevilla: Universidad de Sevilla.

Sampedro Rodríguez , Á. (2018). Aplicaciones de la cal en la ingenierpia civil. En V. J. FICAL, *Tradición, Versatilidad e inovación en la cal: un material*



- de excelencia. (págs. 93-101). Pamplona: Grupo de Investigación MIMED-Servicio de Publicaciones de la Universidad de Navarra.
- SCT. (s.f.). N-CMT-4-03-001/02. *Características de los materiales*.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (2015). Dentro y fuera de México. En S. d. Transportes, *Manual práctico para la estabilización de suelos con cal* (págs. 67-70). SCT.
- Secretaria de Comunicaciones y Transportes. (s.f.). N-CMT-4-03-001/02. *Características de los materiales*.
- Secretaria_de_comunicaciones_y_transportes. (2002). Materiales para mamposterías. En Secretaria_de_comunicaciones_y_transportes, *Características de los materiales* (págs. 1-5).
- Soledad Carvajal, M. E., Castilla Morales, C., Xochitemo Cervantes, G., Cuan Rojas, M., Osorio Gonzalez, R., & Cuan Alarcón, M. (2017). *La Cal de Lata Pureza en la Conservación*. Tecali de Herrera: OXICAL.
- Tavera Montiel, F. (1999). *La antigua Valladolid, hoy Morelia. Instrumentos legales, instructivos y recomendaciones para su conservación*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- Torres Montes, L. (2013). Recomendaciones para la caracterización de la cal. En L. Barba Pingarrón , & I. Villaseñor Alonso, *La cal. historia, propiedades y usos* (págs. 259-269). Distrito Federal: Universidad Nacional Autónoma de México, Asociación Nacional de Fabricantes de Cal.
- Veiga, R. (2017). Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review. *Construction and building materials*, 132-140.



Velazquez Pérez, J. A. (2015). *Arqueología experimental en morteros base cal para uso patrimonial*. Morelia: Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil.

Villaseñor Alonso, I., & Barba Pingarrón, L. (Septiembre- diciembre de 2012). los orígenes tecnológicos de la cal. *Cuicuilco*, 19(55), 11-41.

Villaseñor Alonso, I., & Barba Pingarrón, L. (2013). *La cal. Historia, propiedades y usos*. Distrito Federal : Universidad Nacional Autónoma de México.

Vitruvio. (2000). *Los diez libros de Arquitectura*. (J. L. Domingo, Trad.) España: Alianza forma.



Índice de Figuras

Figura 1. Líneas que se conjuntan para la realización de la investigación ..	15
Figura 2. Pensamiento para el proceso de la metodología	16
Figura 3. Ciclo de cal	21
Figura 4. Piedras calizas del banco de Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán, México	22
Figura 5. Fases de la producción de cal	26
Figura 6. Cantera de Carbonato de Calcio, Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán.....	27
Figura 7. Banco de Carbonato de Calcio, Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán.....	27
Figura 8. Proceso de extracción. Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán	27
Figura 9. Trituración. Calera de Piedras de Lumbre, Jungapeo, Michoacán	27
Figura 10. Partícula grande de óxido de calcio.....	29
Figura 11. Partícula mediana de Óxido de Calcio	29
Figura 12. Partícula pequeña de Óxido de Calcio.....	30
Figura 13. Calcinado de cal tradicional de algunas regiones culturales prehispánicas mediante piras al aire libre.	32
Figura 14. Horno del siglo XIX y XX.....	32
Figura 15. Horno vertical del siglo XX, Planta Calidra en Jungapeo, Michoacán.....	32
Figura 16. Horno Maerz del siglo XXI Planta Calidra en Jungapeo, Michoacán.	32
Figura 17. Horno rotatorio siglo XX, , REBASA.....	33
Figura 18. Horno Maerz sigloXXI, REBASA	33
Figura 19. Bolsas de papel Kraft	35
Figura 20. Cal viva en big bag	35



Figura 21. Moldes.....	43
Figura 22. Dos capas	43
Figura 23. Apisonamiento.	43
Figura 24. Enrasado.....	43
Figura 25. Espécimen fracturado en el desmolde a las 24 horas.	44
Figura 26. Equipo Modelo Horiba, en el lado derecho de la maquina se utilizaba para secar en material colocándolo dentro de una bolsa térmica.	46
Figura 27. Cal en la probeta.	46
Figura 28. Dentro del nitrógeno líquido.....	46
Figura 29. Concluida la prueba.....	46
Figura 30. Colocación de mezcla.....	49
Figura 31. Compactación de la mezcla.....	49
Figura 32. Al remover el molde de un tirón firme.	49
Figura 33. Medición de la fluidez.....	49
Figura 34. Equipo para medir la velocidad de pulso	50
Figura 35. Prueba de velocidad de pulso.	50
Figura 36. Espécimen de mortero de cal deshecho en el agua	51
Figura 37. NILSON ELECTRICAL LABORATORY INC, exterior.....	52
Figura 38. NILSON ELECTRICAL LABORATORY INC	52
Figura 39. Equipo listo para hacer la prueba de resistividad.....	53
Figura 40: colocación de espécimen en tela húmeda.....	53
Figura 41. colocación de peso para que no se muevan las placas de cobre durante la prueba.....	53
Figura 42. Panel del equipo del Resistómetro.....	53
Figura 43. Colocación del espécimen.....	55
Figura 44. TINIUS OLSEN.....	55
Figura 45. Disco de carga	55
Figura 46. Palanca niveladora.....	55



Figura 47. Espécimen en platina	56
Figura 48. Falla de pasta.....	56
Figura 49. Pasta CAP95. Foto tomada por el autor	60
Figura 50. Fluidez de la pasta CAP95. Foto tomada por el autor	60
Figura 51. Pasta CAP90. Foto tomada por el autor	60
Figura 52. Fluidez de la pasta CAP90. Foto tomada por el autor	60
Figura 53. Pasta CAA. Foto tomada por el autor.....	61
Figura 54. Fluidez pastas CAA. Foto tomada por el autor.....	61
Figura 55. Pasta CCA. Foto tomada por el autor	61
Figura 56. Fluidez pasta CCA. Foto tomada por el autor.....	61
Figura 57. Pasta C. Foto tomada por el autor	61
Figura 58. Fluidez pasta C. Foto tomada por el autor.....	61
Figura 59. Pasta de CAA.....	63
Figura 60. Contracción visible en las pastas de CAA.....	63
Figura 61. Contracción en cubo de pasta de CCA.....	64
Figura 62. Contracción de vigas en pasta de CCA.....	64
Figura 63. Pasta de CC	64
Figura 64. Contracción visible en vigas de pasta de CC	64
Figura 65. Pasta de CAA con fisura al desmoldarse.....	65
Figura 66. Pasta de CAA, el material se disgrega al desmoldar.....	65
Figura 67. Pasta de CAA disgregándose al desmoldar.....	65
Figura 68. Pasta de CAA con grietas a los 7 días de su colado.....	65
Figura 69. Especímenes de pasta de cal.....	65
Figura 70. Mortero CAP5	73
Figura 71. Fluidez mortero CAP95.....	73
Figura 72. Mortero CAP90	74
Figura 73. Fluidez mortero CAP90.....	74
Figura 74. Mortero CAA.....	74
Figura 75. Fluidez de mortero CAA	74



Figura 76. Mortero CCA	74
Figura 77. Fluidez mortero CCA	74
Figura 78. Mortero CC	75
Figura 79. Fluidez mortero CC	75
Figura 80. Mortero de las distintas cales	76
Figura 81. Pasta CAP95	88
Figura 82. Pasta CAP90	88
Figura 83. Pasta CAA	88
Figura 84. Pasta CCA.....	88
Figura 85. Pasta CC	88
Figura 86. Cubos de pasta de cal.....	90
Figura 87. Comparativa de los cubos de pasta de cal.....	91
Figura 88. Fisura y hueco en cubo de CC en pasta.....	92
Figura 89. Fisura y grieta en cubo CC en pasta.....	92
Figura 90. Comparativa de los cubos de mortero en estado seco	99
Figura 91. Cubos de morteros de mayor a menor tamaño	101

Índice de tablas

Tabla 1. Usos de la cal de acuerdo a la ANFACAL	24
Tabla 2. Añejamiento recomendado de la cal apagada artesanalmente	36
Tabla 3. Trabajos en la restauración que es necesario usar la cal	37
Tabla 4. Cales	40
Tabla 5. Propiedades de las cales de acuerdo a la ficha técnica del fabricante.....	41
Tabla 6. Contenido de agua de las pastas añejadas	41
Tabla 7. Dosificación para los morteros de cal	42
Tabla 8. Cantidad de especímenes realizados.....	44
Tabla 9. Resultados del área superficial de las cales.....	58
Tabla 10. Fluidez en pastas de cal	62



Tabla 11. Peso promedio de las pastas	66
Tabla 12. Volumen en centímetros cúbicos de las pastas	67
Tabla 13. Velocidad de pulso en distintas edades.....	68
Tabla 14. Resistividad en las pastas	70
Tabla 15. Resistencia a la compresión en las pastas.....	72
Tabla 16. Fluidéz de morteros de cal.....	75
Tabla 17. Peso promedio de los morteros.....	77
Tabla 18. Volumen promedio de los morteros.....	78
Tabla 19. Velocidad de pulso de los morteros	79
Tabla 20. Resistividad eléctrica de los morteros	80
Tabla 21. Resistencia a la compresión de los morteros	82
Tabla 22. Resultados de área superficial de mayor a menor.....	84
Tabla 23. Fluidéz de las pastas.....	86
Tabla 24. Promedio de peso de los cubos en gramos de las pastas	89
Tabla 25. Volumen promedio de los especímenes cúbicos de pasta de cal.	90
Tabla 26. Velocidad de Pulso Ultrasónico en pastas, unidades m/seg	91
Tabla 27. Resistividad eléctrica de las pastas sin saturar.....	93
Tabla 28. Resistividad eléctrica en pastas saturadas	94
Tabla 29. Resistencia a la compresión de las pastas	95
Tabla 30. Fluidéz de los morteros.....	97
Tabla 31. Peso (Masa) promedio de los cubos de morteros, en gramos	98
Tabla 32. Volumen promedio de los cubos de los morteros base cal	100
Tabla 33. Velocidad de pulso ultrasónico de los especímenes de los morteros en m/s.....	101
Tabla 34. Resistividad eléctrica de los morteros sin saturar en Ohm-cm.....	103
Tabla 35. Resistividad eléctrica de los morteros saturados	104
Tabla 36. Resistencia a la compresión de los morteros	105



Índice de gráficas

Gráfica 1. Área superficial de las cales	59
Gráfica 2. Fluidéz de las pastas de cal	62
Gráfica 3. Peso promedio de las pastas.....	67
Gráfica 4. Volumen de los especímenes de las cales	68
Gráfica 5. Velocidad de pulso en las pastas.....	69
Gráfica 6. Resistividad a los 100 días de edad sin saturadas en las pastas.	70
Gráfica 7. Resistividad a los 200 días de edad saturadas en las pastas	71
Gráfica 8. Resistencia a la compresión en las pastas.....	72
Gráfica 9. Fluidéz de los morteros de cal	75
Gráfica 10. Peso promedio de los morteros.....	77
Gráfica 11. Volumen promedio de los morteros	78
Gráfica 12. Velocidad de pulso de los morteros	79
Gráfica 13. Resistividad eléctrica de los morteros sin saturar	81
Gráfica 14. Resistividad eléctrica de los morteros saturados	81
Gráfica 15. Resistencia a la compresión de los morteros.....	83
Gráfica 16. Resultados de área superficial de mayor a menor	85
Gráfica 17. Fluidéz de las pastas.....	87
Gráfica 18. Promedio de peso de los cubos en gramos de las pastas,	89
Gráfica 19. Volumen promedio de los especímenes cúbicos de pasta de cal	90
Gráfica 20. Velocidad de pulso Ultrasónico en m/s en las pastas de cal	92
Gráfica 21. Resistividad de pastas sin saturar	93
Gráfica 22. Resistividad de pastas saturadas	94
Gráfica 23. Resistencia a la compresión de las pastas	96
Gráfica 24. Fluidéz de los morteros	97
Gráfica 25. Peso (Masa) promedio de los cubos de morteros, en gramos. .	99
Gráfica 26. Volumen promedio de los morteros base cal	100



Gráfica 27. Velocidad de pulso ultrasónico de los especímenes de los morteros en m/s.....102

Gráfica 28. Resistividad eléctrica de los morteros sin saturar en Ohm-cm. 103

Gráfica 29. Resistividad eléctrica de los morteros saturados 104

Gráfica 30. Resistencia a la compresión de los morteros..... 105



Anexos

Resultados de las pruebas de resistencia a la compresión

En este apartado pueden observarse los especímenes de morteros y pastas tras ser sometidos a las pruebas de resistencia a compresión. Los resultados son pertinentes y permiten observar un comportamiento muy distinto de los cubos efectuados de mortero y de pasta de cal, puesto que reaccionaron de distintos modos. De manera cualitativa y también cuantitativa podemos considerar el comportamiento de cada tipo de cal y cuál sería más factible para su empleo según la disgregación observada y sus cambios en la estructura.

Cal de alta pureza con contenido de hidróxido de calcio 95% (CAP95)

Pasta



El cubo se separó en varias piezas completas con distintas morfología, algo interesante fue la inexistencia de polvo

Mortero



La forma de cubo se mantuvo y la disgregación fue mínima

Cal de alta pureza con contenido de hidróxido de calcio 90% (CAP90)

Pasta



Una cuarta parte del cubo queda intacta, la rotura de las demás piezas se da en forma de lascas

Mortero



El cubo se mantuvo prácticamente intacto y la disgregación del material fue mínima

Cal apagada artesanalmente con dos años y medio de añejamiento (CAA)

Pasta



El cubo se mantuvo casi intacto pero mucho material se disgregó en piezas pequeñas

Mortero



La forma de cubo se perdió y solo quedó una esfera correspondiente al centro, mientras que el material sobrante se disgregó a un tamaño de arena

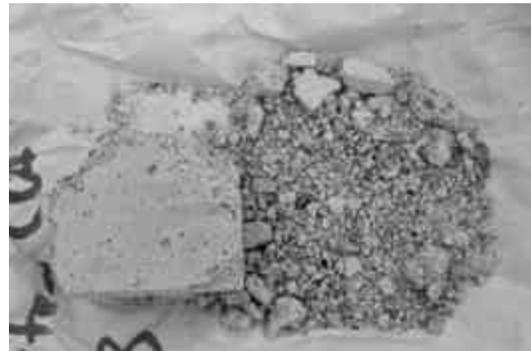
Cal de construcción macerada dos años y medio (CCA)

Pasta



La pieza se desintegró completamente en forma de lajas y pequeños pedazos

Mortero



Se mantuvo la mitad de cubo, mientras que el material sobrante se disgregó

Cal de construcción (CC)

Pasta



La mitad del cubo mantuvo su forma, mientras que el material sobrante se disgregó en lascas

Mortero



El cubo mantuvo su forma y se desprendieron piezas de tamaños grandes y polvo

PRODUCTORAS DE CAL EN MÉXICO

Marca registrada	Marca	Óxido de calcio Cal	construcción	Cal alta pureza	Cal grado alimenticio	Cal farmaceutica	Cal Dolomítica	Cal Agrícola	Ubicación
	Calidra	x	x	x	x	x	x	x	Monterrey, Torreón, Sonora, Puebla; Morelos, Estado de México, Hidalgo, Querétaro, Guanajuato, Jalisco, Michoacán, Aguascalientes, San Luis Potosí, Zacatecas
	REBASA	x	x	x		x	x		Monclova Cohauila
	Cales y Morteros del Grijalva	x	x	x				x	Chiapa de Carzo, Chiapas
	Cal Bertran	x	x	x	x			x	Atotonilco de Tula Hidalgo
	Calera de Bernal		x					x	Querétaro
	Oxical			x	x				Puebla