



División de Ciencias y Artes para el Diseño
Maestría en Ciencias y Artes para el Diseño
Área de Conservación de Patrimonio Cultural

La piedra artificial ornamental en Mérida, Yucatán

Finales del siglo XIX y principios del siglo XX

Idónea Comunicación de Resultados
que para obtener el grado de Maestría presenta:

Nancy Rocío Coronado Guajardo

Tutor: Dr. Rubén Alfonso López Doncel

RESUMEN

Durante el siglo XIX surge un nuevo paradigma en las técnicas constructivas y el empleo de nuevos materiales que modificaron la forma de ver y construir en la arquitectura. Este cambio se dio de acuerdo con las necesidades y avances tecnológicos de la época, así la piedra natural fue poco a poco sustituida por la piedra artificial, término común empleado en el siglo XIX. Dicha piedra se caracterizó por el uso de nuevos conglomerantes hidráulicos, materiales que podían fraguar bajo el agua y con la presencia del aire. El cemento natural, así como la cal hidráulica fueron los principales conglomerantes usados, pero su uso fue muy corto debido a la formulación de un cemento artificial que prometía un trabajo más rápido y con mejores resultados, siendo el material que actualmente predomina. El objetivo de esta investigación es identificar el tipo de conglomerante utilizado en la mezcla para la elaboración de la piedra artificial, en términos de las ciencias de la conservación. Para ello se llevó a cabo una estancia de investigación en el Instituto de Geología de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) así como el apoyo interdisciplinario de otras áreas como la química, la física y la ingeniería de materiales. Permite determinar las características físicas, químicas y mineralógicas de las muestras. Los resultados muestran una composición variada en cuanto a los materiales usados, algunos con una calidad hidráulica. El conocimiento material y su interpretación ha llevado a otorgar un significado cultural a la piedra artificial.

Palabras clave: piedra artificial, cemento, morteros, caracterización, técnicas analíticas, valores.

A mis padres por su apoyo, confianza y seguridad

Agradecimientos

A las siguientes personas quiero expresar mi más profundo agradecimiento, que con su apoyo hicieron posible este trabajo.

En primer lugar, al Dr. Rubén Alfonso López Doncel por la dirección de esta tesis. Gracias por su confianza, paciencia, seguimiento y orientación. Por permitirme realizar la estancia de investigación en el Instituto de Geología y darme acceso a laboratorios y análisis necesarios para llevar a cabo mi investigación. Ich bin dankbar für alles.

A mis sinodales la Dra. Lucía C. Ibarra Cruz y la Dra. Nora A. Pérez Castellano, por sus aportaciones, consejos, paciencia y recomendaciones.

Agradezco a la directora del Museo Casa Montejo, Guillermina García Herrera y a la propietaria de la Casa Museo Montejo 495, María Magdalena “Maruja” Barbachano Herrero, por recibirme y permitirme trabajar con los elementos ornamentales y proporcionarme las muestras para su análisis.

Así como también a la Sección de Conservación y Restauración del Centro INAH Yucatán por el apoyo y permiso otorgado. En particular a la Dra. Claudia A. García Solís.

Un agradecimiento al Ingeniero Marco Rojas Beltrán, por sus aportaciones y asesoría para la observación en el microscopio petrográfico de las muestras de ambas casas. Al Ingeniero Erasmo Mata, por su ayuda en la elaboración de las láminas delgadas, así como al Dr. Alfredo Aguillón Robles y al Lic. Miguel Ángel Cortina, por su ayuda en la elaboración de los análisis químicos en el Instituto de Geología y el Laboratorio de Geoquímica de la UASLP.

Al Ing. Mario Betancourt Urbina, por darme acceso al Laboratorio de Materiales de Construcción y Geotecnia del Área Civil, de la Facultad de Ingeniería de la UASLP; así como por guiarme en el proceso para la elaboración de probetas de los conglomerantes modernos.

A la Lic. en química Claudia Hernández Galván y a la M.M.I.M Rosa Lina Tovar Tovar, por permitirme llevar a cabo el análisis de las muestras, en el Laboratorio del

Difracción de Rayos X, del Instituto de Metalurgia, UASLP, y la entrega de resultados.

Agradecer también al Quím. Rufino Lozano Santa Cruz por haberme permitido llevar a cabo el análisis de las muestras en el Laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología, UNAM. Así como por el tiempo que dedico para explicarme los procesos y la entrega de resultados. También agradecer a la M. en C. Samantha Y. García Hernández y al técnico del laboratorio Santiago Avilés Puntos por su apoyo y asesoría.

A la Dra. Patricia Quintana Owen, responsable del Laboratorio Nacional de Nano y Biomateriales, del Departamento de Física Aplicada del CINVESTAV-IPN Unidad Mérida, así como al Dr. Víctor Rejón, por su apoyo en el uso del equipo de Microscopía Electrónica de Barrido para el análisis de las muestras.

A la Dra. Maribel Hernández Guerrero, profesora del Departamento de Procesos y Tecnología de la UAM unidad Cuajimalpa por el apoyo para llevar a cabo los análisis de FT-IR, así como para la interpretación y obtención de gráficos.

Al Dr. Lauro Bucio Galindo, del Laboratorio de Cristalografía y Materiales Naturales del Instituto de Física de la UNAM, por su ayuda en la elaboración e interpretación de los análisis térmicos.

Al Mtro. John J. Walsh y la Dra. Cristina Mayo, por responder mis dudas y compartir su conocimiento sobre los cementos naturales y su identificación.

A mis profesores del posgrado en Ciencias y Artes para el Diseño y la Rectoría de la unidad Xochimilco por el apoyo otorgado para concluir mi trabajo de investigación.

También agradezco a mi familia y amigos sus consejos y palabras de aliento. Así como a mis compañeras que conocí durante la maestría, en particular a Rocío Kislev y Alba Mariana, gracias por su amistad.

A el Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por proporcionarme la beca durante la maestría.

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	¡Error! Marcador no definido.
Introducción.....	1
Capítulo 1. Antecedentes de la piedra artificial y conglomerantes	6
1.1. Antecedentes de la piedra artificial	7
1.2. Antecedentes de los conglomerantes hidráulicos	10
1.2.1. Clasificación de los conglomerantes: espectro de la cal	11
1.3. El cemento en Yucatán	23
Capítulo 2. La piedra artificial ornamental de las Casas Montejo.....	25
2.1. La piedra artificial ornamental en Mérida, Yucatán.....	26
2.2. Antecedentes de la Casa Museo Montejo	28
2.3. Antecedentes de la Casa Museo Montejo 495	32
Capítulo 3. Propuesta metodológica	34
3.1. Descripción de la metodología	35
3.2. Fase de campo.....	37
3.2.1. Toma de muestra. Casa Montejo.....	38
3.2.2. Toma de muestras. Montejo 495	39
3.3. Análisis experimental.....	42
3.3.1. Métodos experimentales	49

3.4. Metodología de análisis de los morteros	55
Capítulo 4. Resultados.....	57
4.1. Análisis experimental. Resultados	59
4.1.1. Ensayos físicos	59
4.1.2. Resultados del análisis de la superficie.....	61
4.1.3. Resultados de Microscopia electrónica de barrido con microanálisis (SEM-EDS) 65	
4.2. Resultados de los morteros	75
4.2.1. Mortero de finales del siglo XIX, Casa Montejo.....	75
4.2.2. Morteros de principios del siglo XX, Montejo 495.....	83
4.3. Discusión sobre los morteros históricos	95
4.4. Identificación del significado cultural de la piedra artificial.....	98
Conclusiones.....	100
Referencias	102
Anexos	117
Anexo 1. Glosario de términos	118
Anexo 2. Ficha de registro.....	121
Anexo 3. DRX. Difractogramas individuales.....	123

INTRODUCCIÓN

Esta investigación se centra en la caracterización material de la piedra artificial ornamental de dos objetos de estudio, la fachada de finales de siglo XIX de la Casa Museo Montejo y de la fachada de principios del siglo XX de Montejo 495 Casa Museo, conocida como las casas gemelas o casa Cámara, ubicadas en la ciudad de Mérida, Yucatán.

Ambas casas presentan un diseño ecléctico afrancesado que integra en los edificios el conocimiento de la historia del arte con la ciencia, debido al uso de nuevos materiales hidráulicos que llegaron para cambiar el paradigma de las técnicas constructivas.

Las dos casas forman parte del perímetro “A” de la zona de patrimonio cultural del municipio de Mérida y son consideradas patrimonio de acuerdo con el Decreto de Zonas de Monumentos Históricos de la ciudad de Mérida (8 de octubre de 1982) y la Ley Federal sobre Monumentos y Zonas Arqueológicas, Artísticas e Históricas¹ (6 de mayo de 1972). Por lo tanto, están bajo el resguardo de la normativa del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH).

Tienen una relevancia cultural y “su cuidado merece un enfoque minucioso y basado en el conocimiento a fin de poder conservarlo para generaciones futuras” (Macdonald y Arato, 2020:8). Por lo que se ha procurado la conservación de estos bienes, a través del mantenimiento y/o la restauración para frenar el deterioro de sus materiales y su durabilidad funcional-estética e histórica.

A pesar de que se han realizado trabajos de intervención, estos no se han desarrollado con el objetivo de profundizar en el conocimiento material del objeto, solo en la parte estética, dando por hecho la composición material de la piedra artificial lo que ha llevado a ocupar materiales que no son compatibles y que a la larga pueden llegar a dañar el material original. En los principios que norman el actuar de la conservación, se ha insistido en la compatibilidad entre el mortero original y los morteros de restauración con respecto a sus componentes. Esta

¹ Artículo 5º.- Son monumentos arqueológicos, artísticos, históricos y zonas de monumentos los determinados expresamente en esta Ley y los que sean declarados como tales, de oficio o a petición de parte.

compatibilidad debe de reflejarse no solo en el aspecto físico, sino también en sus propiedades químicas y estructurales (Lanas et. al. 2004). Actualmente en el área de la conservación se ha dado prioridad al uso e importancia de la cal en la reparación y mantenimiento de edificios y elementos patrimoniales. Esto debido a los problemas reportados por el uso del cemento aprobado en la Carta de Atenas (1931) en consolidaciones del patrimonio arqueológico e histórico. Con la Carta de Venecia (1964) se reprueba el uso del cemento en intervenciones debido a que es un material incompatible con objetos elaborados con cal.

A partir de ello es que aún persiste el pensamiento dicotómico entre los dos materiales, al poner a la cal como buena y al cemento como el malo. Aun así, las cosas nunca son blancas o negras, ya que la cal pura y el cemento son los extremos de un amplio espectro en el que existen otros materiales como las cales hidráulicas y el cemento natural². Conglomerantes que se usaron durante el siglo XIX y principios del siglo XX para la elaboración de la piedra artificial, y que en su momento representaron una novedad en la tecnología constructiva, pero que tuvieron un periodo corto de uso en comparación con la cal y el cemento portland (Hughes, Swann y Gardner, 2007), debido a la alta demanda y popularidad que adquirió este último material en el área de la construcción.

En un primer acercamiento con el bien cultural, una de las primeras preguntas que se realiza es: “¿cuál es el material constitutivo?” A simple vista se podría pensar que es piedra, un mortero de cal o concreto. Durante la revisión visual y documental de los elementos ornamentales se identificó posible factura con cemento. Información cualitativa la cual no proporciona información como el tipo de conglomerante utilizado, proporciones y agregados.

Por lo que es imprescindible ir más allá de la información cualitativa y es necesario un análisis detallado, cuantitativo. Ya que, el cemento que conocemos actualmente no es el mismo que el utilizado hace más de 100 años (Weber, Bayer y Pintér, 2010). Es necesario conocer el conglomerante utilizado en los morteros que se emplearon en ambas casas; se plantea la necesidad de recurrir a la investigación científica y

² También llamado cemento romano, material muy diferente a los conglomerantes hidráulicos que usaban los romanos (Adamski et al, 2009).

aportar en el conocimiento del pasado (Martín, Menéndez y Bueso, 2017) de la piedra artificial ornamental por medio de la identificación de los materiales constitutivos.

A pesar de que, son varios los casos de estudio particulares que se han realizado en Europa y Estados Unidos, en el contexto mexicano existe un vacío de información con respecto a la caracterización de la piedra artificial ornamental, un material poco conocido, al menos en México. Contar con el punto de vista de la ciencia de materiales, sus implicaciones sociales, el conocimiento respecto a las relaciones cuantitativas entre composición y características; requiere de una metodología de caracterización para identificar los materiales, para generar conocimiento sobre sus materiales constitutivos, con la intención de fundamentar intervenciones de conservación y restauración a futuro.

Para tener un sustento metodológico se plantearon las siguientes preguntas:

- ¿Qué tipo de conglomerante se utilizó para la elaboración de la piedra artificial ornamental de ambas casas?
- ¿Cuáles técnicas analíticas aportaran la información para identificar un cemento?

Por lo tanto, la investigación se enfocó en el análisis de la piedra artificial empleada en los elementos ornamentales de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, presentando las siguientes hipótesis:

- a) El material empleado para el diseño de la piedra artificial ornamental de la Casa Museo Montejo es cemento natural y no cemento portland.
- b) El uso de técnicas analíticas aporta información necesaria para caracterizar el material y poder identificar el tipo de conglomerante utilizado.
- c) La información obtenida de los análisis contribuye al significado cultural de la piedra artificial.

El objetivo general es analizar los materiales empleados en el diseño de la piedra artificial ornamental de la Casa de Montejo de finales del siglo XIX y la Casa Cámara de principios del siglo XX.

Como objetivos particulares:

- Identificar el uso y función de los conglomerantes empleados a finales del siglo XIX e inicios del siglo XX en la piedra artificial ornamental
- Proponer una metodología accesible y con resultados certeros para determinar el tipo de conglomerante empleado en la piedra artificial ornamental
- Aplicar la metodología de caracterización para obtener información petrográfica, mineralógica y química
- Identificar la contribución de la piedra artificial al significado cultural

La metodología se ha planteado desde cuatro aspectos fundamentales: la investigación documental, fase de campo, análisis experimental y la implementación de una metodología de identificación analítica por medio de estancias de investigación en el Instituto de Geología de la UASLP (DRX, Microscopio óptico y de luz polarizada, ICP-MS), en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (FRX, MEB-EDS) y el Laboratorio de Cristalografía (TGA-DSC) de la UNAM, permitiendo con cada una de las técnicas caracterizaciones que se complementan. El primer aspecto permitió conocer a través de la revisión documental, la contextualización histórica y constructiva del cemento en México y Yucatán. Antecedentes, importación, desarrollo de fábricas, así como una descripción de cada uno de los conglomerantes.

El segundo aspecto, la toma de muestras, se llevó a cabo con el reconocimiento de los edificios. Se elaboró una ficha de datos general del bien cultural, así como una ficha de datos para el muestreo *in situ* (ver anexo 2), en la que se plasmaron los datos de cada una de las ejemplares que se tomaron.

El tercer aspecto, el análisis experimental, permitió conocer las propiedades físicas, mecánicas y químicas de los conglomerantes actuales. Se elaboraron probetas de cada material, se caracterizaron y se obtuvieron parámetros comparativos que ayuden a identificar las muestras tomadas *in situ* de los edificios.

El cuarto aspecto, en cuanto al estudio con técnicas analíticas, se ha basado en una revisión del estado de la cuestión en cuanto a la identificación de morteros históricos y cementos. Se ha reconocido que la utilización de una combinación de métodos es la forma más efectiva, ya que cada una ayuda en la complementación de la información obtenida.

Los datos obtenidos han contribuido a obtener más información para la conservación de la piedra artificial ornamental. Por lo que, la conservación del patrimonio cultural ya no solo puede ser una tarea técnica, sino que debe de apoyarse en las ciencias, debido a que las acciones de conservación son procesos creadores de conocimiento y no solo actividades manuales de mantenimiento. Por lo tanto, el significado patrimonial de ambas casas yace en los materiales y la información obtenida que permita intervenciones más respetuosas y comprometidas con su conservación. Teniendo un enfoque interdisciplinario en el estudio de los materiales para un mejor conocimiento y conservación del patrimonio.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES DE LA PIEDRA ARTIFICIAL Y CONGLOMERANTES



1.1. ANTECEDENTES DE LA PIEDRA ARTIFICIAL

El término piedra artificial fue definido en 1929 por el American Concrete Institute como: “concrete or mortar cast into blocks or small slabs in special molds so as to resemble natural building stone”. Otra definición ha sido dada por la norma ASTM C1364, la cual define a la piedra artificial como: “a refined architectural concrete building unit manufactured to simulate natural cut stone, used in unit masonry applications”. Ambas definiciones coinciden en que es una piedra manufacturada, la cual emplea cal o un conglomerante hidráulico, mezclado con cargas y agua, usada para simular la piedra natural y ser colocada o aplicada en fachadas de edificios.

La tecnología de la piedra artificial no es nueva y se remonta desde la antigüedad con los tapiales, el adobe y los ladrillos (Varas, Álvares de Buergo y Fort, 2007). Si bien el uso de materiales no es el mismo, comparten el mismo método de fabricación ya que son elaborados por el hombre por medio de un proceso en frío o fabricadas por cocción. Los materiales y técnicas empleados han mejorado desde la antigüedad y su mejora se ha debido a un progreso y modernización tecnológico en el uso de morteros hidráulicos (Alejandre, 2019) que le confieren a la piedra artificial resistencia y mayor duración.

Durante el siglo XIX surge un nuevo paradigma en las técnicas constructivas y el empleo de nuevos materiales que modificaron la forma de ver la arquitectura y de construir. Este cambio se dio de acuerdo con las necesidades y avances tecnológicos de la época. En el siglo XIX se le conoció con el nombre de piedra artificial (Prudon, 1989) especialmente para los elementos colocados in situ, y concreto modelado. Otro nombre que también se le dio es “Artistic concrete” para referirse al concreto prefabricado decorativo residencial, sin embargo, fue poco usado y conocido. A principios del siglo XX se le conoció como “piedra de concreto”, “piedra fundida” o “piedra cortada” (Pieper, 2001 y 2022) a la piedra artificial obtenida por medio de molde.

El desarrollo de la piedra artificial tiene una estrecha relación con la historia del block de cemento, debido a que la piedra artificial ha sido definida también como “un

material de bloque monocromático utilizado en el exterior” (Prudon, 1989: 80). Por lo tanto, podía ser elaborada a partir de la forma de un bloque o en forma de elemento ornamental (antropomorfo, zoomorfo, fitomorfo), pensada para uso en el exterior y con el objetivo de simular piedras del tipo calizas o areniscas, diferenciándolo de la escayola o yeso por ser usado solo en acabados del interior de los edificios.

El conocimiento de la elaboración de la piedra artificial y sus materiales empleados provino del continente europeo y americano. En la época en que se fabricaron los elementos ornamentales de piedra artificial en México, en Europa y Estados Unidos ya se encontraban desarrollando mejores tecnologías para la fabricación de piedra artificial. La primera fábrica y taller de piedra artificial en España se da a partir de 1850 (Burgos, 2009). En cambio, en Estados Unidos se tiene registro desde 1869 (Cowden y Wessel, 2014), 16 años después. Algunas de las patentes de piedra artificial se desarrollaron en Estados Unidos, Francia e Inglaterra. Una de ellas es la del “Sistema Coignet” del francés François Coignet (1814—1888) quien construyó una casa completamente con piedra artificial (bloques) (Curl, 2006). Otra de las piedras artificiales es la “Frear Stone” patentada en 1868 por G. Frear, este tipo de piedra se fabricaba con cemento hidráulico, arena y goma laca en una solución alcalina utilizando un molde presurizado.

En cuanto al contexto mexicano, Lira (1990, citado en De Anda Alanís, 1986) menciona que a finales del siglo XIX existían dos fábricas en el país en donde producían cemento exclusivamente para la fabricación de piedra artificial y mosaico, una se encontraba en Tlatelolco, Ciudad de México y la otra en el Estado de Hidalgo (Gonzales, 2018); en Yucatán se dio en 1882 (Suárez, 1977), con el establecimiento de la Fábrica de mosaicos hidráulicos perfeccionados y piedras artificiales de Felipe Ybarra Ortoll, ubicada en la ciudad de Mérida.

Dicha fábrica en Mérida, contaba con un técnico americano, el señor Carssford, para dirigir los trabajos. En cuanto a los materiales que utilizaba “le daba preferencia a los importados, como el yeso y el cemento” (Suárez, 1997), que los locales como la cal. En 1886 consiguió exclusividad “por sus pastas para fabricar losetas, ladrillos,

tejas y otros objetos artificiales” (Suarez, 1977:347) siendo por varios años la única fábrica con permiso para fabricar. Hay un registro en el que se señala los materiales para elaborar piedra artificial, formada por arena calcárea, cal, cemento y piedra triturada, hecha por una fábrica de materiales de construcción y ornamentación (AGEY, 1904). Sin embargo, no especifica si fue la fábrica de Ybarra o de alguien más.

Como todo material novedoso recibió críticas y desconfianza en su uso. Hubo esfuerzos destinados a popularizar la piedra artificial, anunciándola como un material barato, pero con la ventaja de tener la apariencia de la piedra natural, un material costoso. Ger y Lóbez (1915) hablan sobre las ventajas del uso de esta piedra:

“La fabricación de piedras con cemento constituye hoy una industria que proporciona cuanto es necesario en construcción, siendo principalmente de gran utilidad y economía cuando se necesita ornamentarla por la ventaja del moldeo que evita una labra costosa si se hubiera de hacer con piedra” (p.63)

En la revista *La Construcción Moderna*, Carril (1905) habla sobre las ventajas y bondades que tiene el uso de la piedra artificial sobre la piedra natural; así como señala el uso de materiales modernos como el cemento portland y armaduras de hierro que le confieren resistencia a la piedra artificial. Las primeras producciones de piedra artificial se basaban en los procedimientos europeos empleando cementos naturales o portland importados (Prudon, 1989). Caracterizándose por el uso de nuevos conglomerantes (cemento natural, cemento portland, cementos de oxícloruro y cementos a base de silicato de sodio), agua, arena y agregado, el cual podría ser piedra molida del color deseado según el acabado final que se buscara, mezclado todo se colocaba en un molde (previamente diseñado, de cualquier material como, la madera, yeso, cola, arena, chapa o gelatina), se deja secar, se desmolda y se deja curar (Prudon, 1989; Pieper, 2001; Cowden y Wessel, 2014). Introduciendo una variedad de formas de elaboración y con ello experimentación e incertidumbre sobre las propiedades de los materiales empleados.

1.2. ANTECEDENTES DE LOS CONGLOMERANTES HIDRÁULICOS

Hasta finales del siglo XVIII el conglomerante de morteros fue a base de cal (Blezard, 1998), la cual por sus propiedades químicas era incapaz de fraguar bajo el agua, es decir no era hidráulico. Durante la revolución industrial que ocurrió en Inglaterra (1730-1830) varios procesos técnicos tuvieron un impulsó, uno de ellos fue la industria de la construcción, en específico el cemento. El primer trabajo sobre cementos calcáreos lo llevo a cabo John Smeaton en 1756, quien “identifico los requisitos de composición necesarios para obtener la cal hidráulica, debido a la presencia de ciertas cantidades de arcilla en la piedra caliza” (Gurtner, et al, 2012:4). El faro Eddystone construido en 1755 dio el inicio de una nueva era de aglutinantes hidráulicos. Después en 1780 Brindley Higgins realiza experimentos y observaciones para mejorar la aplicación de los cementos calcáreos (Blezard, 1998). En 1756 Joseph Parker logra producir un nuevo tipo de cemento al cual le llamo romano, obteniendo la patente el 28 de julio de 1796 por su invención de “A certain cement or terras to be used in aquiatic and other buildings, and stucco work” (Gurtner, et al, 2012:4) a este tipo de cemento también se le conoció como cemento natural.

Blezard (1998:6) en su trabajo sobre cementos calcáreos, realiza una revisión cronológica sobre el desarrollo del cemento y señala que es hasta principios del siglo XIX que L. J. Vicat inicia investigaciones sobre las cales hidráulicas y cementos artificiales, en 1822 surge la patente de un cemento británico, y es hasta dos años después que Joseph Aspdin patenta el primer (proto³) cemento portland. El descubrimiento del cemento en Estados Unidos se dio primero por Canvass White y otros ingenieros, obteniendo la patente en 1820 y cinco años después establecen una fábrica en Nueva York (McKee, 1971; Krumnacher, 2001).

El cemento portland que conocemos actualmente tiene tres etapas históricas en su desarrollo, se han clasificado de acuerdo con un estudio mineralógico con la siguiente terminología (Blezard, 1998: 10):

³ es una mezcla de piedra calcárea calcinada y arcilla con una pequeña evidencia de CaO-SiO₂, la temperatura de calcinación es baja (menor a los 1450°C). El cemento patentado por Aspdin elaborado en Wakefield puede ser llamado proto.

Subsecuentemente en Nueva York y otros estados del país norteamericano se descubrieron otros depósitos de roca de cemento natural, uno de ellos fue en 1828 en Rosendale, Ilster County, N.Y. (Krumnacher, 2001), actualmente este cemento se sigue produciendo y vendiendo.

En 1845 William Aspdin desarrolla el cemento portland meso⁴, Pasando 28 años entre la patente del cemento romano y el primer cemento portland y casi 50 años del cemento portland meso con respecto al cemento natural. Sin embargo, este último fue perdiendo uso a partir de 1865 (Blezard, 1998) debido a que el cemento portland lo fue reemplazando de forma gradual, al menos en Inglaterra y algunos países europeos.

1.2.1. CLASIFICACIÓN DE LOS CONGLOMERANTES: ESPECTRO DE LA CAL

La cal ha sido el principal conglomerante empleado en la elaboración de los morteros, desde la época prehispánica hasta nuestros días. Sin embargo, con la importación de otros cementantes es que se tiene registro del uso de la cal hidráulica y el cemento natural y artificial, desde mediados del siglo XIX, en la elaboración de morteros.

La cal y el cemento natural fueron poco a poco desplazados con la llegada del cemento portland, debido a las cualidades de rápido endurecimiento que posee este material. Así también hubo un cambio en el uso de agregados, con el empleo de arenas afiladas, diferenciadas por su granulometría y sin contenido de arcillas – para el uso de morteros de cal – para pasar a usar arenas blandas, de granulometría fina y ricas en arcillas – en el caso de los agregados de cemento - este cambio se

⁴ este cemento es extremadamente heterogéneo y hay mayor evidencia de CaO-SiO_2 ya que la temperatura de calcinación es mayor y se produce B-2CaO.SiO_2 y pequeño contenido de 3CaO.SiO_2 . Presenta granos de sílice sin reaccionar.

Cemento Portland-normal: es el cemento que se conoce actualmente, su elaboración se basa a partir de normas y se emplea un horno rotario. Este cemento es una mezcla sintética de silicatos de calcio y componentes arcillosos. El tiempo de calcinación, la temperatura y el tiempo de permanencia en el horno producirán la minimización de la cal y una mayor presencia de silicatos de calcio, produciendo una proporción adecuado de silicato tricálcico y silicato dicálcico. El cemento actual contiene una cantidad controlada de sulfato de calcio intermolido el cual tiene la función de retardar el fraguado

dio para tener mayores ventajas al momento de la aplicación de los morteros (Young, 2021), es decir tener mayor trabajabilidad en la mezcla.

El conglomerante es un “material capaz de unir fragmentos de una o varias sustancias y dar cohesión al conjunto, originando nuevos compuestos” (RAE), por ejemplo, la cal, el yeso, el cemento, ya que ocurre por transformaciones químicas en su masa. La función de los conglomerantes en los morteros es fundamental, ya que sirve de unión entre los materiales.

Por lo que los conglomerantes tiene una función física y química. Física al unir las cargas por medio de la adhesión a la superficie, así como rellenan los huecos que quedan entre los áridos de las cargas; y químicas al obtener adherencia, resistencia y una estructura por medio de la combinación formando compuestos químicos (Pitarch Roig, Valiente y Aznar, 2003). Las propiedades y características de la naturaleza y composición del conglomerante dependerán de si es uno de tipo aéreo, endurece con la presencia del aire, o hidráulicos, fragua y endurece en presencia del aire o en condiciones de mucha humedad o agua.

Para una mejor comprensión de los diferentes tipos de morteros considerados en esta investigación, se ha partido del estudio de los componentes principales que se utilizaron para elaborar los morteros empleados en la piedra artificial, estos son los cuatro diferentes conglomerantes: cal, cal hidráulica, cemento natural y cemento portland. Los cuales se encuentran en el espectro de materiales (Figura 1) que históricamente se han empleado, mostrando las principales reacciones químicas que presenta cada material (Brocklebank, 2006), se puede observar que con el aumento de los grados de calcinación se obtienen nuevos compuestos artificiales como la belita y la alita, los cuales no es posible encontrar en la cal debido al bajo grado de calcinación, pero sí en los cementos.

Así también hay un aumento en la fuerza a la compresión, impermeabilidad y en la velocidad de fraguado, en cuanto a la fragilidad esta depende de factores externos al conglomerante como los agregados y la cantidad de agua al mezclarse.

ESPECTRO DE LA CAL (Diagrama)

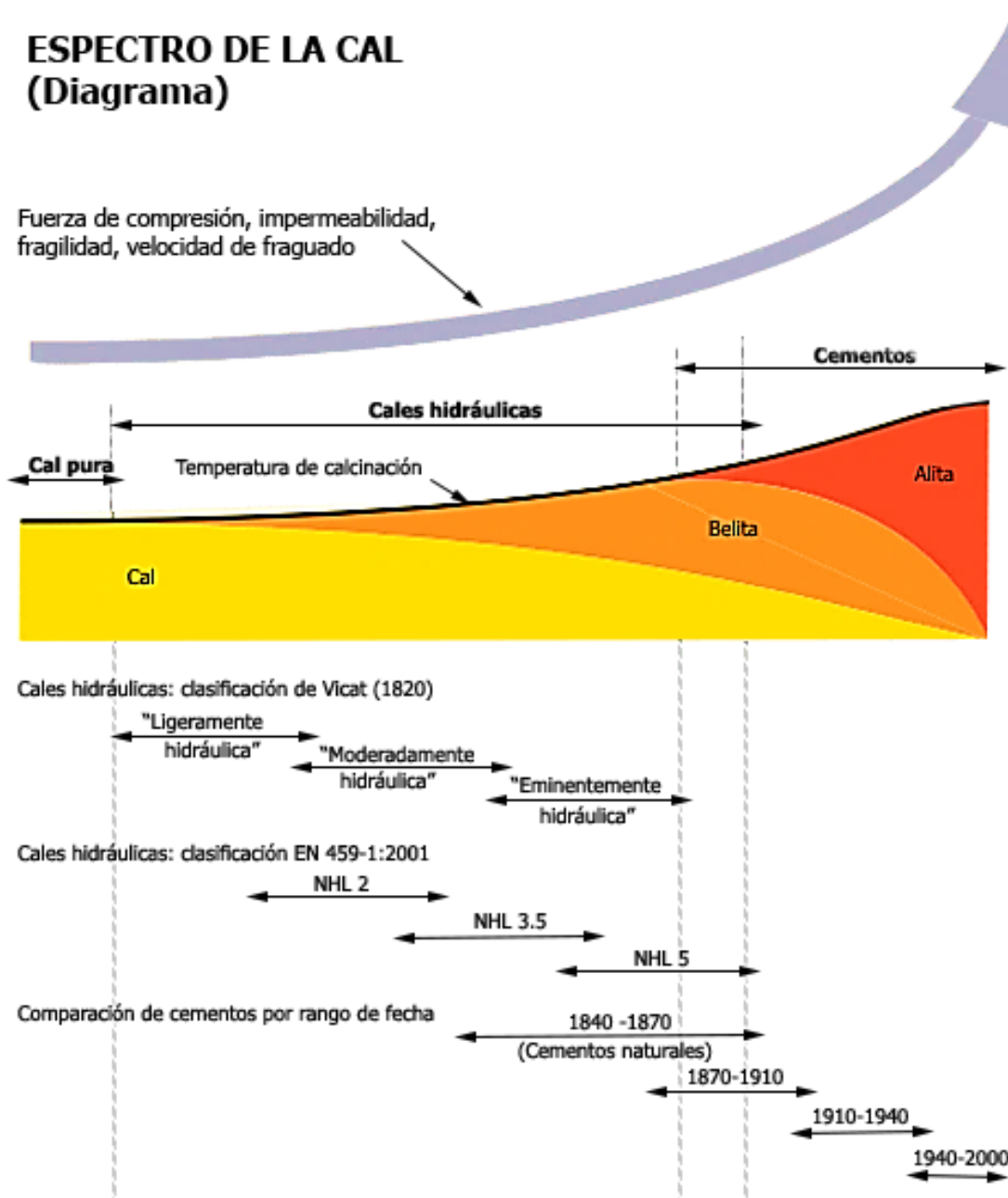


Figura 1. Representación simplificada del espectro de la cal

Fuente: Adaptado de "The lime spectrum" (Brocklebank, 2006)

Cal

La cal pura se encuentra en el lado izquierdo del espectro (ver diagrama 1), es el material más empleado y conocido. Fragua y carbonata en contacto con el CO_2 . Los principales constituyentes son el óxido de calcio (CaO) y/o de Magnesio (MgO) con algunas impurezas como la alúmina (AlO_3), sílice (SiO_2) y el óxido de hierro (Fe_2O_3). Los elementos que componen a la cal se obtienen dos tipos: la cal aérea grasa, esta presenta un alto contenido de calcio y cantidades menores de magnesio (al menos 5%). Es fácil de hidratar y al apagarse se obtiene una pasta manejable. La cal aérea magra o dolomítica por su más del 5% de magnesio, el tiempo de hidratación es lento y desprende mayor calor que la cal grasa, al secarse al aire libre se reduce a polvo por lo que no tiene las mismas propiedades que la otra cal (Sepulcre, 2005) y su uso es limitado.

El proceso de obtención de la cal aérea es a partir de la materia prima, la piedra caliza (CaCO_3), se calcina a unos $900 - 1000^\circ\text{C}$ para obtener cal viva, en el proceso de apagado o hidratación se le agrega agua (H_2O) y se obtiene una cal apagada o portlandita, al aplicarse como mortero es que se da el proceso de endurecimiento o carbonatación y se tiene nuevamente calcita (CaCO_3).

Cal hidráulica natural y materiales puzolánicos

El otro tipo de clasificación de la cal es la que tiene propiedades hidráulicas de forma natural (NHL⁵) y por medio de agregados puzolánicos llamadas artificiales (HL⁶), las cuales tienen la propiedad de fraguar bajo el agua, pero también en contacto con el aire. Los materiales puzolánicos tienen formas amorfas o cristalinas, se clasifican en dos tipos, los naturales que tienen su origen volcánico (cenizas volcánicas o tobas) como un material vítreo; y las artificiales, que son las arcillas y pizarras calcinadas que pueden venir de un material externo o como impureza en la cal, así como productos cerámicos como polvo de ladrillo (Linares-Fernández, 2007). Los productos que se originan al reaccionar la cal con las puzolanas son muy similares a los productos hidráulicos del cemento portland (Frías, 2005) por lo tanto puede llegar a confundirse entre un cementante y otro.

En comparación con las cales aéreas, las hidráulicas son más duras, compactas y por lo tanto tiene una mayor resistencia a la compresión (Villaseñor y Schneider, 2013:103). Esto se debe a su composición, ya que contiene cantidades variables de calizas margosas (<35 % de arcilla) así como cantidades pequeñas de algunas impurezas como óxidos de hierro.

Con esas condiciones se forma óxido de calcio (CaO) el cual se combina con la sílice y la alúmina de la arcilla formando silicatos y aluminatos de calcio hidráulicos (ver figura 2), es decir, se obtienen dos nuevos productos hidráulicos durante la calcinación, silicato bicálcico ($C_2S / 2CaO SiO_2$) y Gehlenita (C_2AS) al agregar el agua reaccionan químicamente para formar hidratos estables e insolubles que permiten que el material endurezca y sean estables bajo el agua (Barbero, 2016) otorgándole la propiedad de ser hidráulicas.

Con esas condiciones se forma óxido de calcio (CaO) el cual se combina con la sílice y la alúmina de la arcilla formando silicatos y aluminatos de calcio hidráulicos, es decir, se obtienen dos nuevos productos hidráulicos durante la calcinación, silicato bicálcico ($C_2S / 2CaO SiO_2$) y Gehlenita (C_2AS) al agregar el agua

⁵ Por sus siglas en inglés *Natural Hydraulic Lime* (UNE-EN 459-1:2011).

⁶ Por sus siglas en inglés *Hydraulic Lime* (UNE-EN 459-1:2011).

reaccionan químicamente para formar hidratos estables e insolubles que permiten que el material endurezca y sean estables bajo el agua (Barbero, 2016) otorgándole la propiedad de ser hidráulicas.

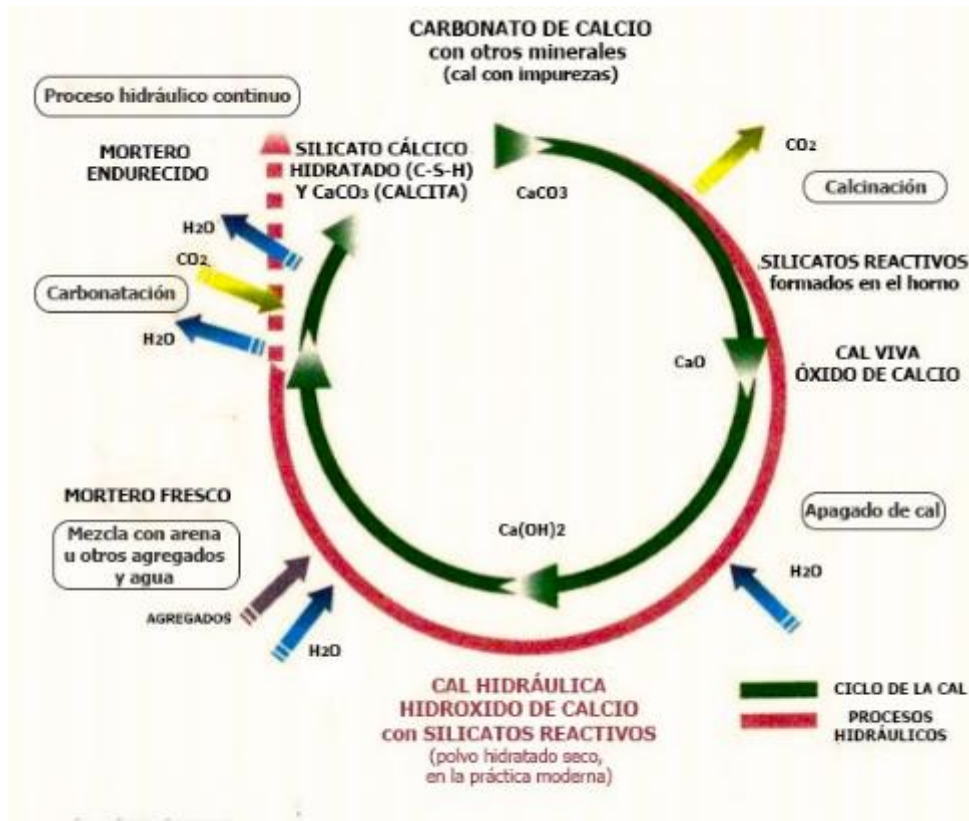


Figura 2. Ciclo de la cal hidráulica . Adaptado de Materials for lime mortars. (The Scottish lime center, 2003:10)

De acuerdo con el espectro de la cal se han otorgado dos clasificaciones a la cal hidráulica, la primera la dio Louis Vicat (1786-1861) en 1920, momento en que por primera vez se le nombra cal hidráulica y ya no cales de agua, categorizándolas como “débil”, “moderadas” y “eminentemente hidráulica” (Ashurst, 1983) (Ver tabla 1, caracterización de la cal). Esa clasificación fue reemplazada por la UNE EN 459-1:2001 como NHL2, NHL3.5 y NHL5, esta última alcanza una resistencia muy similar al cemento natural (Brocklebank, 2007) debido a que en composición son similares, aunque el tiempo de fraguado es más rápido para un cemento natural debido a que tiene una mayor cantidad de arcillas.

La piedra artificial ornamental en Mérida, Yucatán. Finales del siglo XIX y principios del siglo XX

Tabla 1. Clasificación de la cal

Clasificación de la cal	Materiales de arcilla activa	Tiempo de fraguado en agua	Tiempo de apagado	Expansión	Colores típicos
“Fat” (“grasas”, “puras” o “altas en calcio”	<6% (normalmente <2%)	No fragua	Muy rápido	Considerable	Blanco
“Lean” “magras”	<12% (normalmente <6%)	No fragua	Rápido	Mucha (el doble”	Blanco
“Magnesian” “Magnesianas” (Dolomíticas”	Normalmente <10%	No fragua	Muy lento	Varia	Blanco
“Feebly Hydraulic” “Ligeras”	<12%	<20 días	Lento	Ligero	Blanquecino, gris pálido
“Moderately Hydraulic” “Moderadas”	12% - 18%	15 – 20 días	Lento	Ligero	Gris pálido, amarillo pálido
“Eminently Hydraulic” “Eminentemente hidráulicas”	18% - 25%	2 – 4 días	Muy lento	Ligero	Gris, gris oscuro, café
“Natural cements” “Cementos naturales”	30% - 40%	12 horas	Muy lento	Ligero	Café claro a café oscuro

Fuente: adaptado de Ashurst, 1997. “Lime characterisation” The Technology and Use of Hydraulic Lime.

Cemento natural

El cemento natural, es uno de los principales materiales empleados en la arquitectura de mediados del siglo XIX y principios del XX (Kozłowski, Hughes y Weber, 2010). Se utilizó como material cementante para recrear elementos artificiales pétreos ornamentales arquitectónicos, en el periodo del siglo XIX y principios del XX en Europa. Su principal característica es que su fraguado es rápido, aproximadamente en 15 minutos, y su color característico que va de un amarillo claro a café o marrón (Adamski et al, 2009) dependiendo de la cal y las impurezas contenidas.

Se encuentra dentro de la clasificación de las cales hidráulicas, sin embargo, no está considerado como una cal hidráulica (Barbero, 2022) debido a que los grados de calcinación y cantidad de arcillas que varían considerablemente. Existen dos tipos de cementos naturales, ambos calcinados por debajo de la temperatura de sinterización (Barbero, 2015; Weber, Köberle y Pintér, 2014):

1. Endurecimiento rápido. Se constituyen a partir de margas (=25% arcilla), los grados de calcinación oscilan entre los 1000 – 1200°C, el tiempo de fraguado es de <30 min debido al alto contenido en cal y alúmina.
2. Endurecimiento lento: a partir de margas con un alto contenido de arcillas (=40%), los grados de calcinación son menores y oscilan entre los 800 – 1000°C durante un tiempo de 8 – 12 horas, el tiempo de fraguado puede comenzar a los 30 min o hasta las 12 horas debido al abundante sílice, por lo que su durabilidad es mayor.

Este tipo de cemento se fabrica de forma similar a una cal hidráulica, pero el producto final calcinado y molido no es necesario hidratarlo, ya que tiene muy poca cal libre (Hughes, et al, 2009). Tiene en su composición el origen de la formación de marga arcillosa o “nódulos” (Webb, 2016), constituidas por una alúmina muy fina que no reaccionó con el agua, y a pesar de una exposición prolongada a la atmosfera no llegan a hidratarse.

Como se puede observar en el ciclo del cemento natural (ver fig. 3), al quemar la piedra caliza con las impurezas de los silicatos y aluminatos, se disipa el CO₂ y

queda la “cal viva” (CaO) fusionándose con el contenido de sílice y alumina (Webb, 2016), originando dos fases reactivas. La primera es responsable de dar resistencia en los primeros días de elaboración y son los aluminatos, presentes en una fase amorfa; y la segunda fase da resistencia a largo plazo y son los silicatos, que son los polimorfos de la belita ($C_2S-\beta$ y $C_2S-\alpha'$), que en su forma mineral es conocida como larnita y se obtiene por calentamiento a los $1.100\text{ }^\circ\text{C}$ (Treviño, 1984). Se encuentran en los bordes de reacción que rodean a los cuarzos o en el fondo de la matriz. El cuarzo o la calcita son elementos no calcinados de la marga.

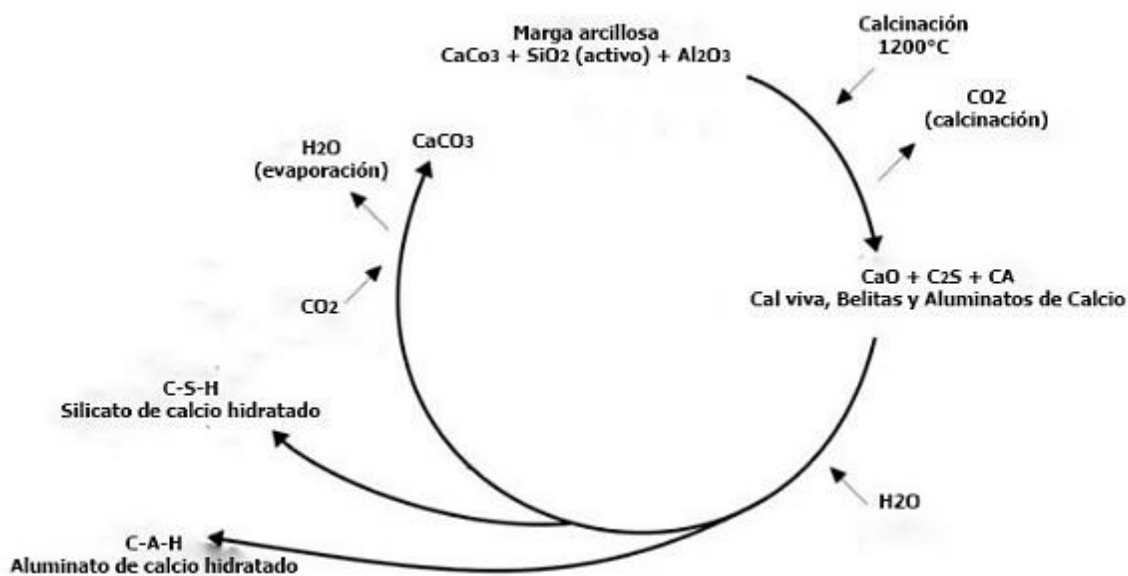


Figura 3. Ciclo del cemento natural. Adaptado de “Natural cement cycle” (Webb, 2016).

Dependiendo del tipo de horno que se haya empleado, es posible encontrar pequeñas cantidades de silicato tricálcico – alita- (Gurtner et. al, 2012). El material obtenido después de la quema se muele hasta obtener un polvo fino y puede ser mezclado con agregados y agua. Al mezclar con agua el aluminato de calcio reacciona y se hidrata (C-A-H) y los silicatos (belitas) se hidratan y forman el compuesto C-S-H (se explican a detalle en el apartado de cemento portland). Al aplicar y dejar reposar entra en contacto con el CO_2 , hay una evaporación del agua y con el tiempo regresa a ser un $CaCO_3$.

El uso de una cal con impurezas sin modificar o agregados como el cemento portland, da como resultado un cemento natural con características particulares, como señala Hughes, et al, (2009) el termino cemento romano (o natural) más que ser un material único corresponde a un género de cemento, ya que el tipo de cal y las impurezas dependerán de la región de donde se obtenga la materia prima y la temperatura de calcinación.

Cemento Portland

El cemento portland es definido como un “cemento hidráulico producido a partir de la pulverización del Clinker PC, y usualmente contiene sulfato de calcio” (ASTM C 219, 2020). Al realizar la mezcla en proporciones de 3 - 4 partes de carbonato y 1 de silicato de aluminio y someterlo a una temperatura de 1400 - 1500°C hay una combinación de los materiales y una fusión parcial, obteniendo el Clinker como resultante (Lawrence, 1998.) Luego, el Clinker se muele agregando un 3 a 5% (en masa) de yeso para obtener el cemento portland.

La composición mineralógica del Clinker está constituida por cuatro fases mayoritarias: dos silicatos de calcio: Silicato tricálcico (Ca_2SiO_4 , 50%, alita o C_3S), Silicato dicálcico (Ca_3SiO_5 , 25%, belita o C_2S) los cuales representan el 75% de la masa total, el restante es representado por el aluminato tricálcico ($\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ o C_3A , 12%) y Ferritoaluminato tetracalcico ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ o C_4FA , 8%) y el 4% es de yeso (CSH) (Tokyay, 2016), como es posible ver no da un total del 100% ya que existen otros componentes minoritarios presentes. Castañón, et al, (2012) señala que la composición química típica de un clinker portland es, 67% de CaO , 22% de SiO_2 , 5% de Al_2O_3 , 3% de Fe_2O y el 3% restante de otros componentes. Los porcentajes podrán variar dependiendo del tipo de cemento portland que se analice o emplee.

Las fases de la formación del Clinker comienzan en el horno, en el cual la mezcla pasa por diferentes temperaturas. El primer proceso es el secado del crudo, este ocurre a una temperatura de 150°C, después ocurre una descarbonatación de la caliza y pérdida de agua de las arcillas, este proceso se da entre una temperatura

de los 500 y 950 °C, entre los 1000 y 1200 °C se produce la fase líquida fundiéndose el óxido de aluminio y el óxido de hierro reaccionando con el CaO para obtener aluminato y ferrito. Con este fundido se forman los silicatos de calcio en su fase sólida, al aumentar la temperatura a 1250 – 1300 °C se forma el silicato bicálcico (belita, C₂S) y por último al llegar a los 1450°C la belita reacciona con la cal restante de la mezcla para formar el silicato tricálcico (alita o C₃S) (Scrivener, 1984).

Aunque las interacciones entre los compuestos de las fases principales del Clinker afectan al mecanismo de hidratación, generalmente se considera primero las hidrataciones de cada uno de los compuestos. Los principales grupos de hidratación de acuerdo con Giraldo y Tobón (2006) son silicatos de calcio hidratados (C-S-H), hidróxidos de calcio (Ca(OH)₂) y sulfoaluminatos de calcio hidratados.

Hidratación del silicato tricálcico (C₃S – alita). Su red cristalina contiene cationes de calcio, silicato y aniones de oxígeno. No es un compuesto puro por lo que puede contener aluminio, magnesio, sodio, potasio y hierro como iones extraños (Tokyay, 2016). La hidratación de C₃S tiene como resultado dos productos: gel de hidrato de silicato de calcio (C-S-H) o conocido como tobermorita gel (Giraldo y Tobón, 2006) e hidróxido de calcio (CH) también conocido como portlandita.

Hidratación del silicato dicálcico (C₂S – belita). Presenta cinco posibles formas polimórficas (α , α' 1, α' H β y γ). γ -C₂S no es un polimorfo cementoso, α' 1, α' H y α -C₂S se obtienen a temperaturas de 860°, 1160° y 1420°C, respectivamente. Al enfriarse cada uno de estos, a unos 650°C, al ser reversible se forma β -C₂S. Es metaestable, pero si hay impurezas en la red cristalina puede convertirse en γ -C₂S. Sin embargo, β -C₂S es el único polimorfo que reacciona con el agua (Glasser, citado en Tokyay, 2016) y que también se convierte en tobermorita gel y en hidróxido de calcio, pero en menor proporción que C₃S (Giraldo y Tobón, 2006). El C₂S es menos reactivo que el C₃S.

Hidratación de aluminato tricálcico (C₃A – celita). La hidratación de los tres polimorfos de C₃A es similar.

Sin embargo, ninguno de esos productos es estable y se convierten en C₃AH₆, que es la única forma estable de aluminato de calcio hidratado. La hidratación de C₃A

es muy rápida, llega a cierto punto en que se vuelve lenta y al volver a acelerarse es que se tiene la forma estable. Otro producto de hidratación que se obtiene es la etringita, esta se da al mezclar C_3A + sulfato de calcio, ya que sirve para ralentizar la hidratación y tener mayor trabajabilidad. La etringita puede convertirse en monosulfoaluminato hidratado (C_4AS_{12}) y al entrar con una nueva fuente de iones la etringita se forma nuevamente y se da un proceso conocido como ataque de sulfatos, es uno de los principales problemas de durabilidad del cemento (Tokyay, 2016).

Hidratación de la fase de ferrita. También se le conoce como browmillerita, celita o ferrito aluminato tetracalcico ($Ca_4Al_2Fe_2O_{10}$ o C_4AF , nomenclatura química de los cementos) es de carácter hidráulico, ya que reacciona con el agua para dar un hidrato hexagonal ($(C_4AF) H_6$) estable e insoluble en agua (Alejandre, 2012:75-76). Consta de una serie de compuestos que varía de $C_2(A_{0.7}, F_{0.3})$ a $C_2(A_{0.3}, F_{0.7})$ formando una solución sólida. Los productos de hidratación que se forman son muy similares a los de C_3A , lo mismo pasa con la presencia del yeso (Tokyay, 2016). Los periodos de hidratación ocurren en cuatro etapas: 1) Periodo de preinducción; 2) periodo de inducción (inactivo); 3) periodo de aceleración; y 4) periodo de desaceleración (Tokyay, 2016), en estas etapas ocurre diferentes reacciones químicas de los componentes del cemento.

1.3. EL CEMENTO EN YUCATÁN

El uso del cemento en Yucatán se dio por la industrialización e importación de este material, debido a que en México no se contaban, al menos para el siglo XIX, con suficientes fábricas de cemento para abastecer a todo el país, como se indica en la revista *Construcción Moderna* No. 3 (1903) señalando que el cemento se tenía que importar del extranjero, el principal país fue Alemania con el 95% e Inglaterra con el 5%, sin embargo, esta exportación era para toda Latinoamérica y no exclusivamente para México.

Entre las principales producciones de la industria de Yucatán a mediados del siglo XIX solo aparece la cal entre sus artículos de consumo (Suárez, 1977). Por otro lado, se tiene registro en el Reglamento de Comercio de 1845, en el apartado de aranceles, el rubro de “Cimiento Romano” el cual debía pagar un 25% de arancel. Por lo que se puede inferir que para mediados del siglo XIX ya se comenzaba a importar cemento.

Vega (2012) señala que además de ser importado el cemento de Alemania e Inglaterra también pudo venir de Bélgica, aunque el primer registro de operación con el que se cuenta es del año de 1851 de Estados Unidos (Nueva Orleans y Nueva York). Para ese año la cantidad de barriles que se importaban era muy pequeña, apenas 11 barriles. La situación cambió, como lo indica Vega (2012:125), al incrementar la cantidad de barriles importados, para 1883 fueron 341 barriles, para 1896 aumenta considerablemente a 2,331 barriles y para 1900 aumenta el doble, aunque se desconoce el tipo de cemento que se importaba o la marca.

En cuanto a la publicidad que le daban al cemento para su venta se han encontrado tres anuncios. El primero en el periódico 69 del comercio del 7 de enero de 1882 en el que el Moro Muza anuncia el “Cimiento Romano de Roquefort” como “la mejor marca que hay en el mundo, premiado en muchas exposiciones”, este cemento como se indica su nombre proviene de la comuna Roquefort-la-Bédoule, en la región de Marsella, Francia. Es Hyppolite de Villeneuve-Flayosc (1803 – 1874), quien funda en 1835-36 la primera fábrica de cemento natural, con dos presentaciones de fraguado rápido, usado para la ornamentación de fachadas, trabajos de sellado y

reparación; se le conocía por ser un producto más barato que la cal hidráulica. La fábrica cesó su actividad en 1937 (Valageas et al., 2012).

El otro anuncio surge hasta 1892 con la marca “Lafarge Gris” vendido por El siglo XIX y anunciado como el “que usan los primeros constructores de Europa”. Este cemento tiene sus orígenes en 1833 en el pueblo de Teil, en Ardèche, Francia. Cuando León Pavin de Lafarge se hace cargo de la empresa familiar de piedra caliza para la fabricación de cal aérea e hidráulica. En 1887 funda el primer laboratorio para el análisis de materiales y en 1890 fabrica un cemento de escoria de rápido endurecimiento (Barjot, 2007) Siendo de los primeros cementos portland históricos que se importan y se venden en la península de Yucatán.

Así también en El Eco del Comercio de 1898 presenta un anuncio de la ferretería y mercería “La llave”, donde señala que sus importaciones son directas de Estados Unidos y de Europa. Por lo que la importación de cemento era favorecida entre las casas de materiales, beneficiando a los cementos extranjeros entre sus ventas, posiblemente por el origen extranjero de algunos dueños – en particular franceses - pero también por el tratado comercial México – Francia de 1888, que favoreció el comercio francés durante el gobierno de Porfirio Díaz.

La industria del Cemento Portland rápidamente desplazó el uso de la cal aérea, la cal hidráulica y el cemento natural y su tecnología constructiva. Sin embargo, como lo señala Silva (2016:75) era fácil diferenciar entre un cemento “de fraguado rápido, romanos o naturales” y los “de fraguado lento, Portland o artificiales”. Con la información anterior es posible inferir que entre ingenieros y arquitectos conocían bien los materiales que utilizaban para la construcción.

CAPÍTULO 2

LA PIEDRA ARTIFICIAL ORNAMENTAL DE LAS CASAS MONTEJO



2.1. LA PIEDRA ARTIFICIAL ORNAMENTAL EN MÉRIDA, YUCATÁN

El empleo de la piedra artificial ornamental para revestir las fachadas de los edificios puede ubicarse en la última década del siglo XIX -correspondiente a la época porfiriana en México y el auge del henequén en Yucatán - hasta principios del siglo XX, con el término de la Guerra de Castas y la llegada de la arquitectura moderna⁷. Durante esos años Mérida alcanza una prosperidad, motivando la comunicación con el comercio exterior europeo y norteamericano, en particular con Francia, el cual se convirtió en un referente para el academismo y como un modelo a seguir (Piña, 2013), propiciando la importación de nuevos materiales y la llegada de arquitectos y artesanos extranjeros (Arana, 2011), quienes trajeron ideas y diseños europeos. Son los hijos de los hacendados y comerciantes quienes, al ser enviados a estudiar a Francia, al regresar a Yucatán trajeron los estilos franceses (Aledo, 1995). Al formar lazos económicos y culturales con Europa, especialmente con Francia, cambiando por completo la tradición arquitectónica hispano-yucateca. Estos cambios fueron evidentes en las fachadas, las cuales constituyen el centro de interés de la arquitectura civil, utilizando el estilo afrancesado como son los órdenes clásicos, balaustradas, etc (Piña, 2013) para agregar detalles y formas elaboradas que realzan las fachadas.

Mérida se transformó para imitar París (Canto, 2011), durante ese tiempo hubo una transición en la arquitectura al dejar del lado la casa novohispana y pasar a la casa porfiriana. Dos ejemplos claros son la Casa de Francisco de Montejo el Adelantado (ver figura 4), al concebirse como una casa con diseño español, y que a finales del siglo XIX se añaden elementos con un diseño ecléctico francés. Siendo la transformación de los ventanales una imitación del estilo francés-imperio. Otros ejemplos de estas innovaciones son el Paseo Montejo y la variedad de casas con estilo afrancesado que se fueron construyendo a principios del siglo XX. En particular la Casa de la familia Cámara Zavala⁸ (ver figura 5), la cual fue concebida con una arquitectura y diseño de estilo francés del siglo XX, sustituyendo

⁷ Adolf Loos (1972) introdujo el principio de la racionalidad en el diseño de las casas, sostuvo que el ornamento es un delito y por lo tanto debía de evitarse su uso en fachadas para tener un diseño sobrio y sencillo.

⁸ Conocida también como "Casas gemelas"

completamente la arquitectura novohispana y aumentando las posibilidades ornamentales en su fachada.



Figura. 4 Casa Museo Montejo. Tomada por autora en junio 2022.



Figura 5. Casa de la familia Cámara

Fuente: "Grandes Casas de México, Casa Cámara, 2022.
<https://grandescasasdemexico.blogspot.com/2018/07/casa-camara-barbachano-en-paseo-montejo.html>

A través de estos elementos decorativos se puede apreciar una evolución social, política y económica por la que pasaba Mérida a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El uso de la piedra artificial en la ornamentación arquitectónica no se pudo haber dado sin el impulso de la industria henequenera y el surgimiento de nuevos materiales hidráulicos, permitiendo imitar formas y figuras mediante un proceso industrializado, que solo artesanos podían hacer con la piedra natural.

2.2. ANTECEDENTES DE LA CASA MUSEO MONTEJO

La casa de Francisco de Montejo “El adelantado” (de aquí en adelante se le llamara Casa Montejo) se encuentra ubicada al sur de la plaza grande, en la calle 63, en el centro histórico de la ciudad de Mérida, Yucatán. Se construyó en 1543 de acuerdo con la inscripción que se encuentra en la entrada principal del inmueble, y se terminó de construir en 1549 (Rubio, 2000). Los españoles vivían en torno a dicha plaza, la cual era un centro simbólico y de concentración de poderes de la colonización española.

La casa de Montejo es uno de los monumentos históricos de la arquitectura civil del periodo virreinal que aún se conservan en el estado de Yucatán. Pertenece a lo que se le denomina arquitectura doméstica hispano-yucateca (Aledo, 1995). Esta casa sirvió como modelo para el resto de las casas de clase alta durante el periodo colonial. La residencia en el siglo XVI comprendía la portada de estilo plateresco de piedra tallada, cuatro ventanas sencillas de la planta baja y el primer piso, la cornisa, y el portón de madera tallada. En 1547 la fachada solo contaba con la portada baja de estilo plateresco labrada en piedra caliza, probablemente importada de España, y para 1549 se construye la portada alta de estilo gótico-isabelino con piedra conchuela traída de la costa yucatanense (Espadas, 2014), trabajada con manos mayas, pero de diseño europeo.

Inicialmente la mansión ocupaba cuatro solares, pero con los años la propiedad fue perdiendo terreno, así para 1828 deja de corresponder a la familia Montejo, después de pertenecer por más de 280 años, para ser vendida y comprada entre varios particulares y ser dividida (Rubio, 2000). En 1839 la casa correspondió a don Simón Peón Cano quien encomendó al ingeniero Manuel de Arrigunaga, de parques y jardines de la Universidad de la Sorbona de París, conocido como “Tío Melo” (Siller y Abundis, 1985) el remodelar el interior y las ventanas de la fachada poniente (ver fig. 6). El Arq. Aercel Espadas (2014) señala que la Casa Montejo fue sustituida en el año 1896 por la casa Peón-Arrigunaga -al pasar de un estilo novohispano a uno ecléctico porfirista- al transformarse por completo la residencia que habitó el conquistador, ya que fueron muchos los cambios que se le realizaron a la casa, únicamente respetando la fachada de piedra del siglo XVI.

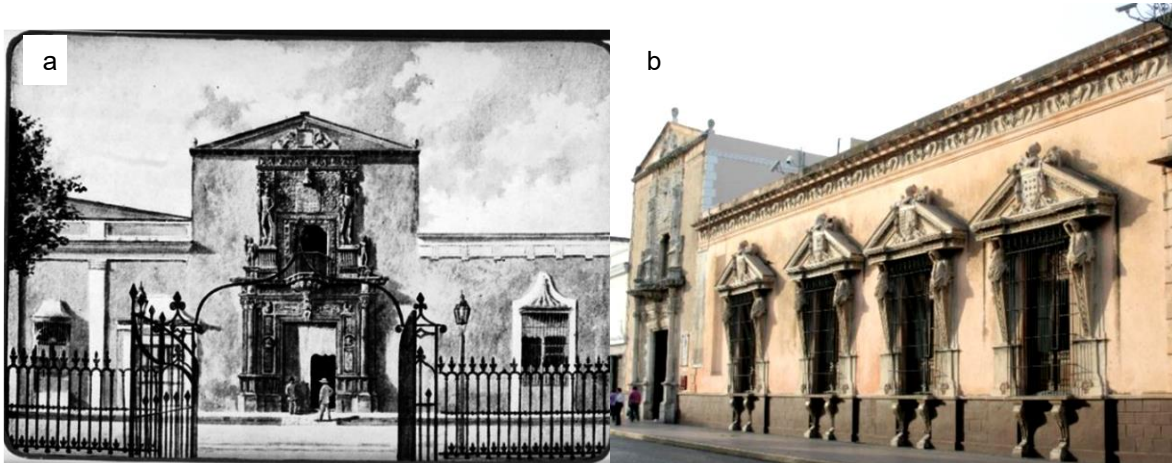


Figura 6. Fachada de la Casa Montejo a) antes de realizar las modificaciones en los ventanales. Mediateca INAH (2021) b) Fachada actual con los ventanales modificados. Tomada por autora en mayo 2015.

Una de las transformaciones evidentes son los ventanales, los cuales dotó de balcones en los que se observa en cada uno, elementos ornamentales de una pareja de mujer y hombre, quienes sostienen un blasón. De izquierda a derecha los escudos corresponden al reconocimiento de Montejo concedido por Carlos V, el escudo de apellidos maternos de la esposa del conquistador, García de Herrera y Ayala. El tercero corresponde a los apellidos paternos de la misma Álvarez de Castañeda y el último escudo corresponde al tradicional de los Montejo; en el friso se observan animales y flores. De acuerdo con Roman (2018:18) “aunque fue construida con más de tres siglos de diferencia (...), presenta las formas y motivos de los elementos ornamentales retomados de los de la portada de piedra, pero con la diferencia de haber sido hechos de concreto”, la elaboración de estos elementos por moldeo agilizó la fabricación, así como redujo costos, sin embargo, también significó traer la “modernidad” a la casa del siglo XVI.

Técnica de manufactura

Los elementos ornamentales de gran tamaño son exentos, es decir se trabajaron en el taller para después ser llevados y colocados en el sitio. La forma probable en que se trabajaron la describen Cowden y Wessel (2014) por medio de fundición en húmedo, por lo que la mezcla a emplear es más plástica debido a que contiene suficiente agua para que el mortero fluya en el molde. El curado dependerá del método empleado, en el caso del proceso húmedo, se debe de dejar entre 1 a 5 días en un área con humedad. Para el acabado final la superficie se desgasta o es lavada con un ácido para eliminar la capa de cemento y crear el acabado deseado.

Durante el siglo XIX se publicaron varios procedimientos sobre los primeros experimentos con morteros, cementos y moldes para fabricar piedra artificial.

Aunque no hay información precisa de cómo se confeccionaron los elementos ornamentales, se sabe que la Fábrica de mosaicos hidráulicos perfeccionados y piedras artificiales de Felipe Ybarra Ortoll elaboró dichos elementos en 1896, dirigidos por artistas italianos (Quesada, 2014). No se ha encontrado un documento de la Fabrica que señale las proporciones y materiales empleados para la elaboración de piedra artificial utilizada en la Casa Montejo. Sin embargo, Vega (2012:125) señala que dicha fabrica "...en 1886, obtuvo del Gobierno Federal privilegio exclusivo para fabricar pastas en las que interviniera el cemento romano en combinación con cualquiera de los materiales del país ya fuera arena, cal, etcétera". Otro documento que habla sobre la fabricación de piedra artificial y que puede dar indicios sobre los materiales empleados es un anuncio que hizo Felipe Ybarra en El Eco del comercio de 1892 dirigido a las personas que preparan las mezclas diciendo: "Coja Ud. un poco de cemento romano le pone Ud. sahcab y cal y un poco de agua y... ya está la "Piedra Artificial". Siguiendo la línea de materiales en el inventario de obra de 1887 se indica la existencia de "cemento natural y de colores, cal, arena y sahcab" (Ybarra, 1887, 4). Por lo anterior, es posible inferir que el uso del cemento natural o romano, como se le llamó en esos años, se usó para la fabricación de la piedra artificial.

Durante la inspección y toma de muestra de los elementos ornamentales se observó que se utilizó un alma de ladrillo para la unión y/o refuerzo de la piedra artificial (ver figura 7), una alternativa al uso del hierro. Ger y Lóbez (1915:63) describen este tipo de fabricación de piedras artificiales:

“Se pueden fabricar constituyendo su alma o núcleo ladrillos o baldosas de la mejor calidad... humedeciéndolos antes y durante la fabricación, pues así se favorece la adhesión y el endurecimiento.

Se prepara también con un hormigón (concreto) compuesto de trozos de teja, ladrillo, piedra caliza o arenisca y mortero de una parte de cemento Portland y dos a tres de arena limpia y angulosa, y después que se ha dado con esta masa la forma que se desea, se la recubre con cemento puro, al que algunas veces se agregan limaduras finas de hierro cuya oxidación da un buen color”.

Los agregados de trozos de teja o ladrillo fueron comunes en las mezclas de morteros de esa época para darle ya sea una coloración rojiza o café, o para mejorar las propiedades hidráulicas.



Figura 7. Alma de ladrillo. a) Alma de cerámica en rojo y negro y b) Fragmento desprendido. Tomada por autora en junio 2022

2.3. ANTECEDENTES DE LA CASA MUSEO MONTEJO 495

En la década en que se llevaba a cabo la transformación de la Casa Montejo, es que se planea la construcción del emblemático Paseo Montejo (1888) donde se construyeron elegantes residencias utilizando materiales de París y empleando diseños de arquitectos europeos.

Una de esas residencias son las conocidas “casas gemelas” (de aquí en adelante se le llamara Montejo 495) de la familia Cámara Zavala - casa Sur - con planos y diseños del arquitecto francés Gustave Umbdenstock pero, edificada por el Ing. Manuel Cantón Ramos en 1908, se terminó de construir en 1911.

El diseño de ambas casas edificadas en una misma propiedad -lado a lado- puede encontrarse publicado en la revista “La Construction Moderne n° 31” (1907) con el título “Hotels particuliers a Mérida del Yucatan (Mexique)”. La fachada principal de Montejo 495 (fig. 8) mira al oriente, hacia el Paseo Montejo, el acceso secundario se ubica al poniente.

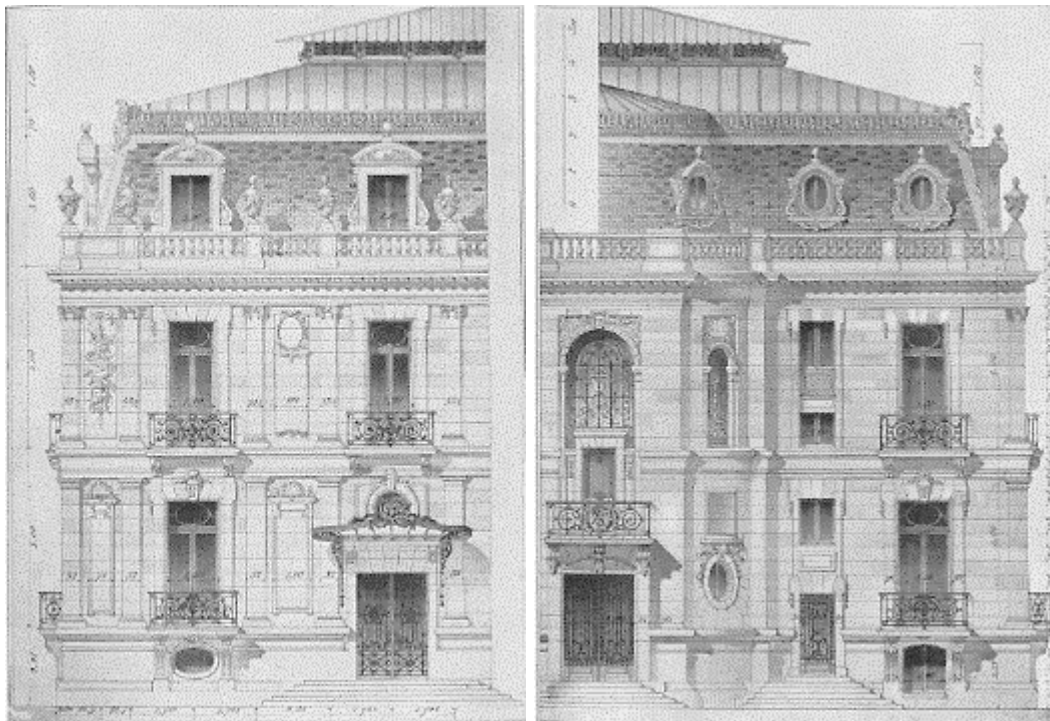


Figura 8. Diseño de Montejo 495. Fachada principal y acceso secundario. Fuente: “La Construction Moderne n° 31”, (Umbdenstoc, 1907)

La fachada tiene un diseño de estilo francés del siglo XVIII (“La Construction Moderne, 1907), tiene cuatro niveles, siendo el inferior o sótano para la servidumbre. En 1963 deja de pertenecer la casa a la familia Cámara Zavala y la adquiere don Fernando Barbachano Peón. Un año después realizan algunas adecuaciones menores en el interior, en cuanto a la fachada esta se mantiene igual que cuando se terminó de construir (Fierro, 2018), solo con detalles mínimos de mantenimiento. En enero del 2021 se cambió de un uso habitacional a un uso público, abrió como Casa Museo Montejo 495⁹.

Técnica de manufactura

Los elementos se pueden clasificar en dos: los que se aplicaron in situ como los aplanados y algunas molduras; y los exentos, los cuales se trabajaron en el taller para después ser colocados en la fachada cuando el mortero aún estaba fresco o con pernos de metal.

Fierro (2018) señala que la mayor parte de los acabados como el remate del techo, herrería, la ebanistería y la escalera de mármol se importaron de Francia; en cuanto a los trabajos de talla y molde (la decoración ornamental) fueron llevados a cabo en talleres en Mérida. Sin embargo, en la revista “La Construction Moderne” (1907, p.366) señala que “Todo lo que puede relacionarse con la construcción ordinaria ha sido directo de México, mientras que las obras artísticas fueron suministradas por casas francesas”. Se puede inferir que para los detalles estructurales se emplearon materiales y mano de obra yucatecos. Para los elementos decorativos y ornamentación fueron fabricados en Francia. Entre la decoración de la fachada destacan elementos como las cornisas, modillones, molduras, florones, balaustres, medallones, urnas o jarrones adornados con festones, cartela o tarjeta que enmarca relieves con motivos bélicos, capiteles en la parte superior de las pilastras, en las cuatro esquinas del techo están rematadas con una figura zoomorfa, el rostro de un león.

⁹ Aún pertenece a la familia Barbachano Herrero

CAPÍTULO 3

PROPUESTA METODOLÓGICA



3.1. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA

La presente propuesta metodológica se ha apoyado en la ciencia de la conservación con la aportación en el aumento del conocimiento del pasado del objeto (Martin, Menéndez y Bueso, 2017) por medio de la identificación de los materiales constitutivos con el apoyo de las ciencias experimentales como geología, ingeniería civil, química y física para la determinación de la composición de la piedra artificial. La identificación de recursos específicos en torno a la piedra artificial, morteros históricos¹⁰ y su identificación, suscita la comprensión del estado actual del conocimiento sobre el tema de investigación, identificar las técnicas analíticas más adecuadas para la caracterización y localizar las lagunas en la literatura para complementarlas con la actual investigación.

El estudio de la piedra artificial por medio de técnicas analíticas no ha sido muy extenso. Uno de los trabajos a destacar es el llevado a cabo por Valente (1995), quien se enfocó en la caracterización y análisis de la piedra artificial ornamental y estuco del Palacio Errazuriz en Buenos Aires, Argentina. Utilizó técnicas analíticas como análisis gravimétricos, microscopia óptica de secciones delgadas, microscopia electrónica de barrido con energía dispersada de rayos X (SEM-EDX) y análisis térmico-diferencial (DTA), logrando identificar el tipo de conglomerante utilizado en la piedra artificial. Otro trabajo de investigación relacionado con el estudio de la piedra artificial es el llevado a cabo por Pecchioni et al. (2005) en Florencia, quienes realizaron la caracterización petrográfica, mineralógica y química (microscopia petrográfica, DRX, TG-DTG, FRX). Ersen et al. (2010) investigaron la piedra artificial desde la ciencia de la conservación y la arquitectura para conocer los conglomerantes y agregados, concluyendo que las muestras estudiadas pertenecen al grupo de los materiales hidráulicos naturales y artificiales.

Para llevar a cabo esta investigación es necesario contar con un procedimiento estandarizado que este enfocado en la caracterización por medio de diversas técnicas para la identificación del conglomerante. Uno de ellos es el método propuesto por “The International Union of Laboratories and Experts in Construction

¹⁰ Debido a que la piedra artificial es un mortero constituido por un conglomerante, agregados y agua; es que se ha tenido en cuenta el tema de caracterización de morteros históricos.

Materials, Systems and Structures” (RILEM) con publicación de varios documentos, en particular el “Historic Mortars: Characteristics and Tests” un documento editado por Bartos, Groot y Hughes (1999). En este documento se incluyeron temas de Hughes and Callebaut (2002) sobre la toma de muestras en morteros históricos. Así como esquemas de caracterización de morteros, como el presentado por Goins (1999), “A new protocol for the analysis of historic cementitious materials: Interim report”, quien propone una metodología para la identificación de morteros históricos y cementos. Así como el artículo escrito por Van Balen, et al. (1999) “Procedure for a mortar type identification: a proposal” quien plantea un procedimiento por pasos para la identificación del tipo de mortero. Por lo que se ha seguido la metodología de los autores anteriormente expuestos, con aportaciones de Goings (2004) “Standard Practice for Determining the Components of Historic Cementitious Materials” en el que combina los mejores métodos empleados para el análisis de materiales, pero, adaptado para la identificación de cementos históricos. Así como se tomó en cuenta las propuestas metodológicas de Varas, et al., (2005); Ramírez-Casas, et al. (2019) y Walsh (2007) relacionado con cementos naturales, quienes concuerdan que es posible identificar un cemento natural de otro conglomerante principalmente con el uso del microscopio petrográfico y complementando con técnicas como DRX y SEM-EDS. También se ha tomado como guía las directrices para la caracterización química, mineralógica y física de los morteros de la norma publicada en 2020 sobre “Conservación del Patrimonio Cultural. Caracterización de morteros utilizados en Patrimonio Cultural”, la cual aporta información actualizada sobre la metodología común para la caracterización.

3.2. FASE DE CAMPO

Al establecer la metodología de laboratorio es que se lleva a cabo el trabajo de campo. Con ellos es posible aplicar la metodología planteada a las muestras obtenidas y de manera conjunta comprobar la hipótesis que se plantea en esta investigación.

A pesar de que se ve la toma de muestras como un acto “destrutivo”, ya que se debe de retirar permanentemente parte del material constitutivo de una pieza o edificio con el propósito de realizar el análisis del material. Se ha recurrido a este método para contribuir al estudio y salvaguardia del patrimonio arquitectónico (art. 2, Carta de Venecia), siendo la toma de muestras un medio para cumplir los objetivos planteados.

El muestreo solo se va a realizar de los elementos que se han desprendido y que los custodios de los inmuebles han resguardado para su futura colocación, teniendo en cuenta que solo se va a tomar muestras de los elementos identificados originales y no de intervenciones anteriores (previamente identificados por medio de análisis visual). La toma de muestras se realizó teniendo en cuenta los siguientes puntos (Martín, 1990; Hughes y Callebaut, 2002):

- I. Pre-análisis visual e inspección del edificio. Se definieron las fases constructivas, así como se realizó una revisión bibliográfica y visual de intervenciones anteriores.
- II. Elección de los métodos analíticos para determinar los requisitos de muestreo, ya que cada técnica analítica a emplear requiere un mínimo de muestra.
- III. Máxima representatividad, pero el mínimo necesario de muestra.
- IV. Las muestras se han tomado compactas, observando su buen estado de conservación y de áreas poco visibles o con desprendimiento.
- V. Una vez tomadas las muestras se registró en la ficha (ver anexo 2) el área de extracción en el gráfico. Así como el correcto etiquetado, almacenamiento y transporte de las muestras.

3.2.1. TOMA DE MUESTRA. CASA MONTEJO

La muestra¹¹ pertenece a un elemento que conforma la segunda cariátide del segundo ventanal (ver fig. 9, recuadro azul, punto amarillo) este elemento se desprendió aproximadamente hace 5 o 6 años de acuerdo con la información proporcionada (M. Emerit, comunicación personal, 07 de junio de 2022). Su forma es circular y se repite en cada una de las cariátides. Este elemento desprendido está conformado por catorce fragmentos de los cuales solo se tomó uno, el que presenta en el centro un fragmento de cerámica (fig. 10).

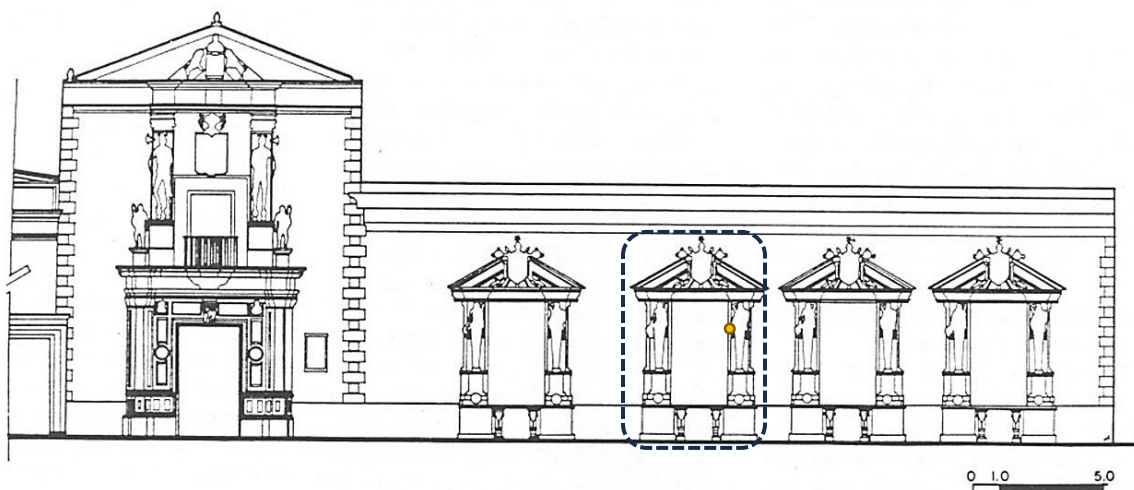


Figura 9. Gráfico general de la fachada Casa Montejo. Ubicación de la toma de muestra. Adaptado de Siller y Abundis, 1985.



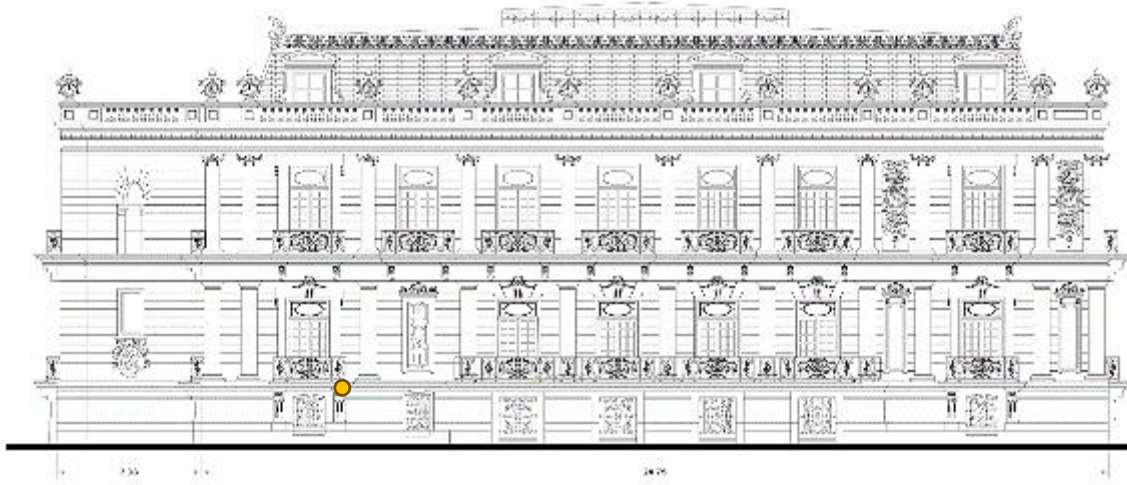
Figura 10. Fragmento de la cariátide, nomenclatura Montejo. Tomada y ditada por autora en agosto 2022.

¹¹ Proporcionada por la directora del Museo, la Sra. Guillermina García Herrera

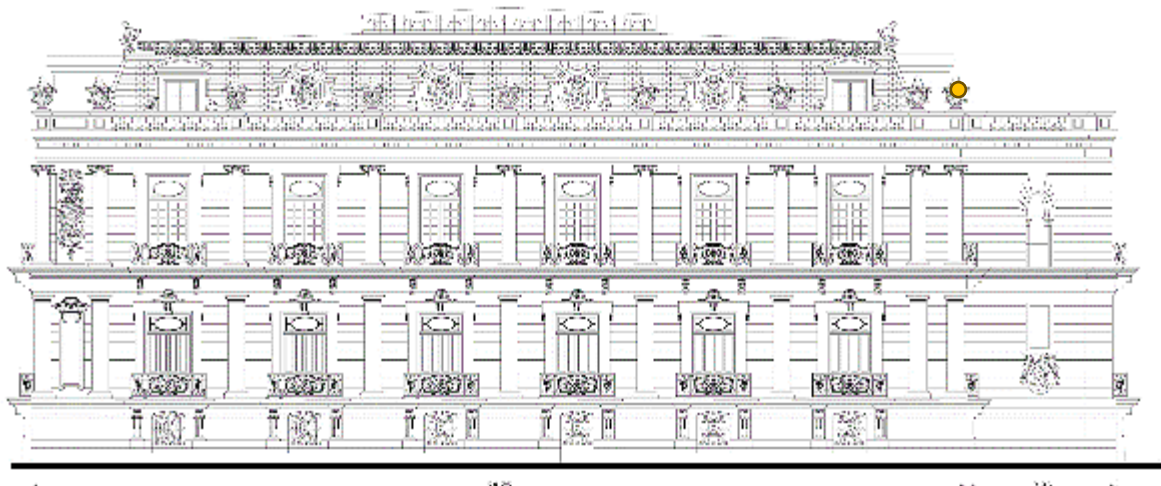
3.2.2. TOMA DE MUESTRAS. MONTEJO 495

En el caso de esta casa, se tuvo mayor oportunidad de muestreo. Se tomo una muestra de aplanado de la fachada sur (MCS2); de la fachada norte (MC2), se tomó la muestra de un jarrón que se encontraba en fragmentos y de la fachada oeste (MCO4), se tomaron dos muestras del elemento ornamental fitomorfo (fig. 11).

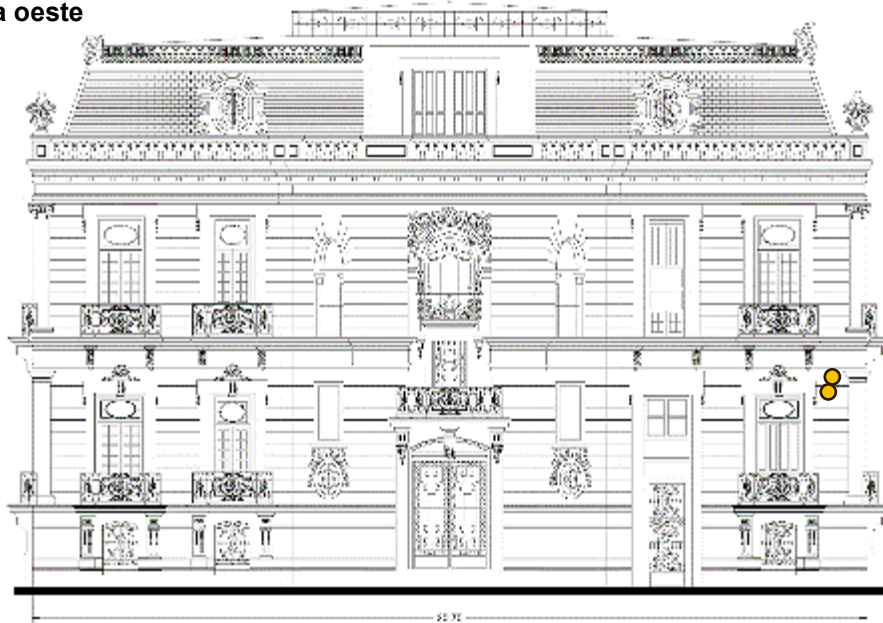
Fachada sur



Fachada norte



Fachada oeste



a



b



c



Fig. 11. Esquema de identificación, toma de muestras Montejo 495

Puntos de muestreo de la fachada sur, norte y oeste (puntos amarillos) y muestras tomadas de Montejo 495. a) MCS2, fachada sur, b) MC2, fachada norte y c) MCO4, fachada oeste. Tomada y editada por autora en junio 2022.

Fuente: Proyecto, Casa Cámara, levantamiento de fachadas, Ayuntamiento de Mérida. Nota: corregido

En la tabla 2 se muestra la relación de las muestras tomadas. En total son cinco muestras, las cuales se seleccionaron de acuerdo con su ubicación, color, textura y función en el edificio. Siendo Montejo y MCO4 y 3 las que corresponden a ornamentos de piedra artificial, MCS2 a un aplanado y MC2 a un ornamento exento de piedra artificial. Las muestras fueron tomadas de dos casas representativas de finales del siglo XIX y principios del siglo XX, con diseño y materiales franceses y en los que se ha identificado el posible uso de cemento natural o cemento portland.

Tabla 2. Relación de las muestras tomadas. Casa Montejo y Montejo 495.

Muestra	Nomenclatura	Ubicación	Tipo
1	"Montejo"	Casa Museo Montejo	Ornamento
2	MCS2	Casa Museo Montejo 495	Aplanado
3	MC2	Casa Museo Montejo 495	Ornamento exento
4	MCO4 (M)	Casa Museo Montejo 495	Ornamento
5	MCO3 (L)	Casa Museo Montejo 495	Ornamento

3.3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

Esta parte de la investigación fue llevada a cabo por medio de una estancia de investigación en el Instituto de Geología y la Facultad de Ingeniería de la UASLP durante el tercer trimestre del posgrado. De acuerdo con varios autores diferenciar entre una cal hidráulica, un cemento natural y un cemento portland histórico suele ser complicado y confuso, por lo anterior se ha planteado obtener parámetros que ayuden a diferenciar un cemento de otro por medio de una metodología experimental que se resume en la figura 12.

El trabajo de laboratorio se dividió en dos fases: la primera consistió en la elaboración y ensayos físicos de los conglomerantes actuales por medio de probetas. Se llevó a cabo en el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería de la UASLP. La segunda parte son los análisis experimentales aplicados para caracterizar las probetas previamente elaboradas y las muestras obtenidas, para poder establecer parámetros identificativos de los diferentes tipos de conglomerantes hidráulicos, llevados a cabo en el Instituto de Geología de la UASLP (microscopía óptica y petrográfica, DRX y análisis químicos), el Instituto de Geología y Física de la UNAM (FRX, SEM (EDS y WDS) y TGA/DSC), el LANBIO del CINVESTAV unidad Mérida (SEM-EDX) y el Departamento de Procesos y Tecnología de la UAM unidad Cuajimalpa (FT-IR).

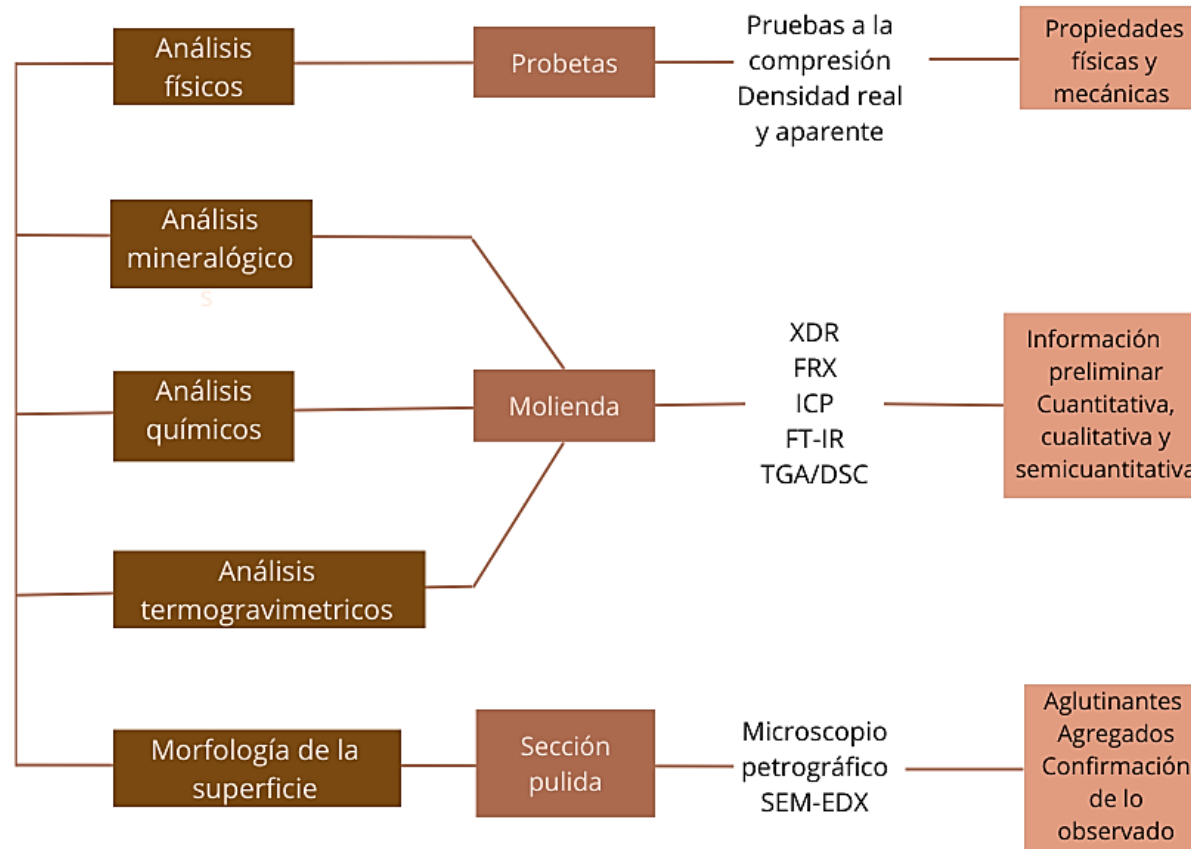


Figura 12. Cuadro experimental para la caracterización de los conglomerantes (material de referencia)

Adaptado de "Investigative methods for the characterization of historic mortars – Part 1: Mineralogical characterization, Middendorf et al, 2005.

1. Ensayos físicos. Elaboración de probetas

Las probetas se elaboraron de acuerdo con las siguientes Normas Mexicanas, NMX-C-085-ONNCCE-2002, NMX-C-061-ONNCCE-2001, la ASTM C 128 y la Norma EN 196-1 con modificaciones señaladas por Gurtner et. al. (2012, 110) para el caso del cemento natural y la cal hidráulica. Se elaboraron probetas cúbicas de 50 mm por cada lado utilizando moldes metálicos. La arena que se utilizó se clasificó utilizando las mallas de la 100 a la 16, con los parámetros indicados por la NMX-C-077-ONNCCE-1988 y la ASTM C-33-03. No se utilizó arena sílica como recomienda la norma, se decidió cambiar por polvo de piedra de la región de Yucatán para conocer el comportamiento del mortero. En cuanto a la prueba de resistencia a la compresión, esta se planteó realizar a los 7 días y a los 28 días.

Los conglomerantes seleccionados para las probetas fueron los siguientes:

1. **Cemento Pórtland Ordinario (CPO 30 RB). Marca Fortaleza:** “Es el cemento producido a base de la molienda de Clinker Pórtland y usualmente sulfato de calcio”¹² (NMX-C-414-ONNCCE, 2004, p.5). Este cemento además tiene la característica de ser blanco, de acuerdo con la ficha técnica (Cementos Fortaleza, Ficha Técnica) es de clase resistente 30, tiene una resistencia a la compresión mínima a 3 días y máxima a los 28 días: 30 n/mm² (306 kg/cm²). El tiempo de fraguado inicial es de 45 minutos como mínimo y 600 minutos como máximo. La temperatura de calcinación tiene un rango de los 1440 a los 1480 °C.
2. **Cemento Pórtland Compuesto (CPC 30R) Gris. Marca CEMEX:** Es el cemento que resulta de la integración de clínter Pórtland, sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser componente único. Es de uso general en la construcción, de color gris. Habitualmente se le utiliza en obras

¹² Es el producto natural o artificial que se utiliza para regular el tiempo de fraguado y se presenta en diferentes estados: anhidrita (CaSo₄), yeso (CaSO₄ – 2 H₂O) y hemihidrato (CaSO₄ ½ H₂O).

convencionales (casas, edificios, pisos, pavimentos, etc.) y en la industria del concreto elaborado. Calcinado a temperaturas de 1450°C.

3. Cemento Natural (CN) Rápido. Vicat: Este es un cemento hidráulico natural de fraguado rápido. Elaborado a partir de una caliza arcillosa (del 26% al 40%), su aspecto es terroso, de un color café claro, de composición regular, con una temperatura de cocción entre 800 y 1200 °C. La marca Prompt Vicat es de origen francés y se ha elaborado desde hace más de 150 años. Tiene una resistencia a la compresión a 28 y 90 días. Resiste el agua de mar y otras aguas agresivas, dependiendo de las proporciones y condiciones de temperatura y humedad el fraguado puede ser rápido y/o demorar (fragua entre los 3 y 5 min.). Contrario a otros cementos, este tiene una liberación muy baja de cal en su hidratación por eso su resistencia a las aguas puras y acidas (Cuaderno técnico Prompt, 2003).

4. Cal Hidráulica. Puzzolime® Restaura: “Es una cal hidráulica formulada conforme a la UNE-EN 459-1. Es un aglutinante hidráulico especialmente formulado a base de cal hidratada de alta pureza y puzolanas reactivas. No contiene sales solubles, cemento portland y un 0.10% de cal libre”. Es de un color blanco-beige, con una finura de 45 micrones. El tiempo de fraguado inicial es de 60 minutos aproximadamente y 120 minutos de fraguado final. Tiene una resistencia a la compresión a 1, 7 y 28 días (Puzzolime, ficha técnica). Calcinada a una temperatura entre los 950°C y 1100°C (Alanís, S. comunicación personal, 13 de julio de 2023).

Además, se prepararon probetas solo con los conglomerantes antes mencionados, sin agregados, así como una probeta de CPC+cal (1:1) y una probeta de cal+yeso (1:1). La cal utilizada fue de Oxical® de alta pureza en forma de pasta.

Se obtuvieron de 6 a 9 probetas las cuales fueron desmoldadas a las 48 horas (ver figura 13a) e introducidas en agua para el fraguado (ver figura 13b) y ser retiradas a los 7 y 28 días para realizar la prueba a la compresión (ver figura 13c).

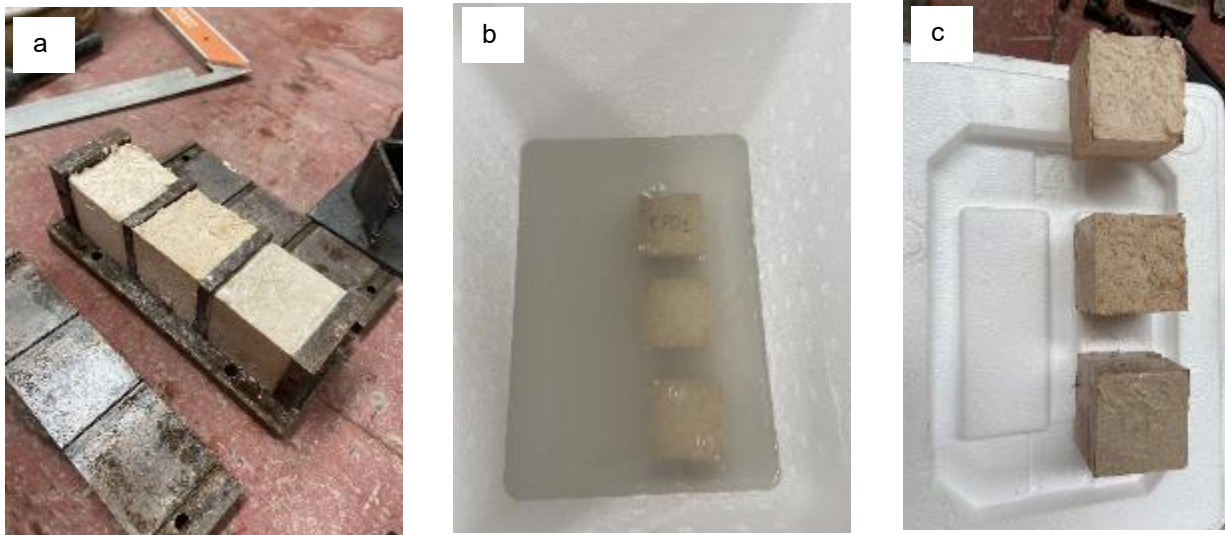


Figura 13. Probetas. a) Desmolde de las probetas, b) colocación en agua con cal para el fraguado y c) se retiraron del agua. Tomada por la autora en agosto 2022.

Resistencia a la compresión. Determina las propiedades mecánicas para establecer la resistencia a la compresión, se llevó a cabo utilizando una prensa hidráulica (Digital rock strenghtindex apparatus), la cual crea una tensión longitudinal en el cubo, hasta lograr una falla o ruptura.

Se decidió realizarla a los 7 días – un cubo por cada conglomerante - y a los 28 días – dos cubos por cada conglomerante –(ver figura 14). Los parámetros utilizados fueron: 25 kilos/segundo de velocidad, el parámetro de inicio 2 y una sensibilidad de 1 ½ tonelada.



Figura 14. Prueba de compresión. a y b) Cemento Portland Ordinario (CPO); c y d) cemento natural (CN). Tomada por la autora en septiembre 2022.

Prueba de porosidad-densidad. El objetivo de esta prueba es determinar la densidad real y aparente, así como, la capacidad que tienen las distintas muestras para absorber el agua, y por ende su porosidad. Con estos datos es posible conocer el comportamiento de cada material en relación con el agua.

Se comenzó por obtener el peso de cada muestra y probeta en seco, para después colocarla dentro de una capsula y retirar todo el oxígeno y sustituirlo por agua (fig. 15 a y b), un líquido del cual se conoce su densidad. Se pesan las muestras saturadas en agua para obtener el peso sumergido y el peso húmedo. Con los tres datos anteriores se obtiene la porosidad (%), la densidad de la matriz (g/cm³), la

densidad (g/cm^3) y la absorción de agua al vacío (prom. %). El mismo procedimiento se llevó a cabo en las muestras de ambas casas (fig. 15 c y d), para conocer en particular su porosidad con respecto a las probetas elaboradas.

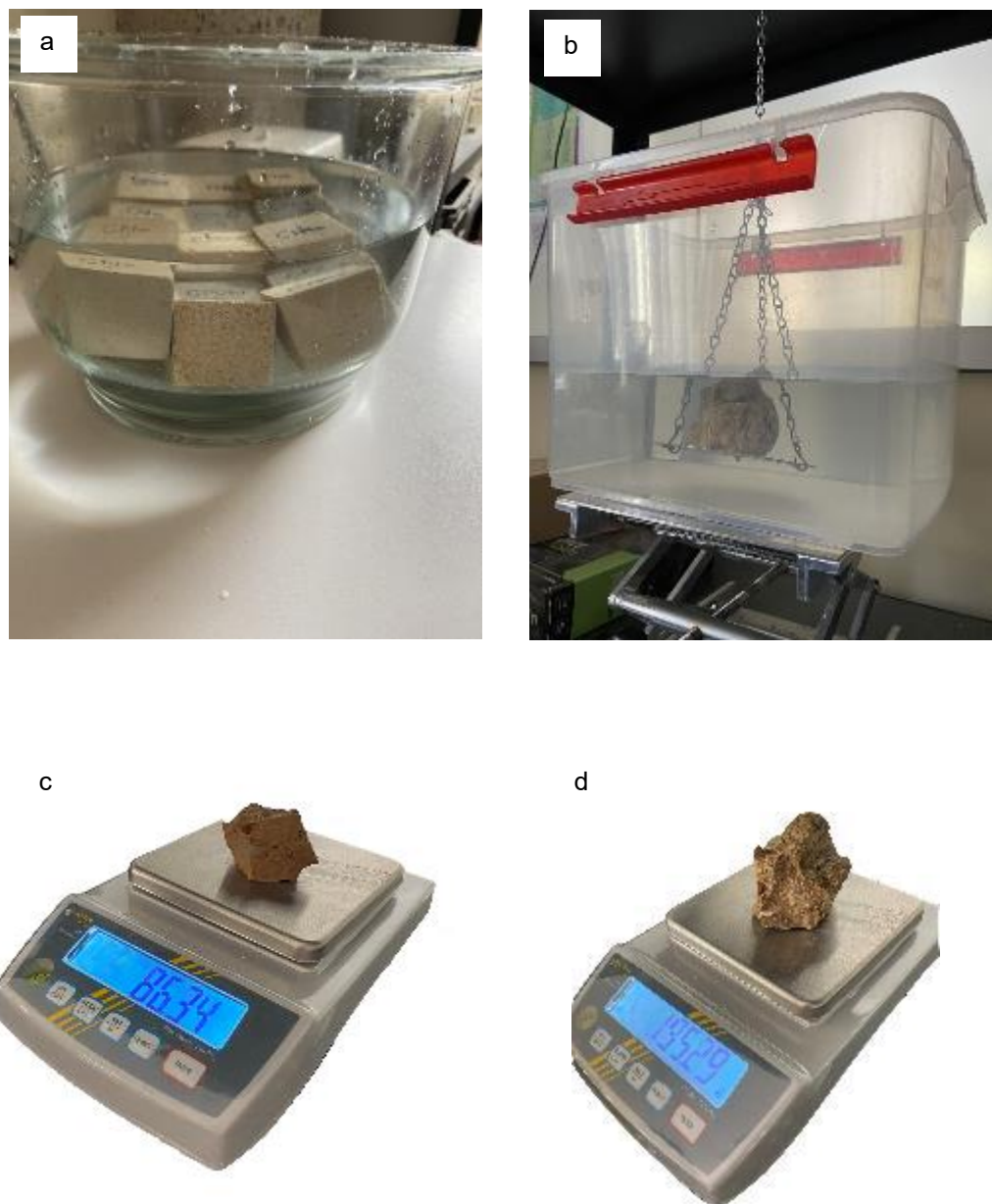


Figura 15. Prueba de porosidad-densidad. Tomada por la autora en agosto 2022.

3.3.1. MÉTODOS EXPERIMENTALES

Análisis mineralógicos. Para los siguientes análisis la muestra tiene que ser en polvo. Los instrumentos y métodos de preparación de las muestras que se utilizaron para la molienda son:

- La trituradora Retsch GmbH de mandíbulas BB100 Mangan 2011. Primero se dividió la muestra grande en varios fragmentos utilizando un mazo de hierro. Después se utilizó la trituradora, es utilizada en la secuencia de preparación de la muestra, empleándose en la trituración primaria de todo tipo de materiales, en este caso de concreto. El proceso consiste en colocar los fragmentos del material dentro del equipo y se ejerce presión sobre está teniendo una granulometría inicial de 50mm y una final de 4mm. Al terminar la molienda de cada una de las muestras se pasó por un tamiz #100.
- Para el pulverizado final se utilizó el equipo de discos vibratorios modelo Retsch 200, cada una de las muestras se colocó por 5 minutos a 700 rpm, la cantidad de producto que se colocó fueron 10 cucharadas.

Difracción de Rayos X (DRX). La técnica analítica de Difracción de Rayos X se ha utilizado para determinar la matriz y agregados minerales cristalinos. Esta técnica analítica se llevó a cabo en el laboratorio de Difracción de Rayos X del Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. La molienda se llevó a cabo en las instalaciones del Instituto de Geología de la misma Universidad.

El equipo que se utilizó para realizar la difracción es de la marca BRUKER D8 ADVANCE, los parámetros utilizados para analizar las muestras son los siguientes: $2\theta = 4 - 90^\circ$, Step size = 0.02, Time step = 0.3 seg, duración = 21 min. El software es DIFRAC.EVA. V5.2. Se analizó dentro de la categoría de minerales y cementos. Para la obtención de las fases minerales se realizó un descarte de elementos en la tabla periódica y por medio de una base de datos. Para graficar los espectros obtenidos se utilizó el programa OriginPro 2023®

Composición química

Fluorescencia de Rayos X (LRFX). Este análisis sirve como complemento al de difracción de rayos X y en sustitución de ICP-MS, puesto que su precisión es superior. Se llevo a cabo en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Para el análisis cuantitativo de elementos mayoritarios de SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃total, MnO, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, P₂O₅ y pérdida por ignición (LOI) en las muestras de cementos, fueron molidas a <74µm y fundidas con Li₂B₄O₇:LiBO₂. La cantidad mínima de muestra es de 7g¹³. Se empleó un espectrómetro secuencial RIGAKU PRIMUS II de WD-FRX equipado con tubo de Rh para ser manejado hasta una potencia máxima de 4000watts.

Se calcularon los índices de hidraulicidad¹⁴ (ecuación 1) e índice de cementación¹⁵ (ecuación 2) para conocer y comparar el grado de hidraulicidad de los conglomerantes modernos y los usados en ambas casas. De acuerdo con Boyton y Vicat (citado en Ponce-Antón et al., 2020) se clasifica en débil (HI = 0.1–0.2, CI = 0.3–0.5), moderada (HI=0.2-0.4, CI=0.5-0.7) y eminente (HI < 0.4, CI = 0.7–1.1).

Ecuación 1:

$$HI = \frac{SiO_2 + Al_2O_3}{CaO + MgO}$$

Ecuación 2:

$$CI = \frac{2.8 (SiO_2) + 1.1 (Al_2O_3) + 0.7 (Fe_2O_3)}{CaO + 1.4 (MgO)}$$

¹³ la muestra denominada MCO4 no pudo ser analizada con el método antes descrito debido a que se contaba con apenas 2g por lo que se colocó el fragmento de 1 cm para obtener un análisis semicuantitativo.

¹⁴ Hydraulicity Index (HI)

¹⁵ Cementation Index (CI)

Análisis termogravimétrico (TGA) y colorimetría diferencial de barrido (DSC).

El análisis térmico es un grupo de técnicas analíticas en las que, en función de la temperatura, “se analizan las propiedades físicas o reacciones químicas de una sustancia” (Földvári, 2011: 16) en este caso de los cementos. Esta técnica se ha utilizado para complementar los datos obtenidos en DRX y SEM-EDX, “particularmente para la detección de los compuestos hidráulicos que a menudo son poco cristalino y difícil de detectar con XRD” (Pecchioni, et al. 2005:229) como los geles que se forman después de la hidratación del cemento.

Las técnicas individuales por emplear son: Análisis termogravimétrico (TGA) y colorimetría diferencial de barrido (DSC). La primera mide la variación del peso de la muestra con respecto a los aumentos de la temperatura (Arizzi & Cultrone, 2021) y permite cuantificar los compuestos químicos o fases minerales de la muestra y con la segunda se obtiene información cualitativa de los componentes que provocan la pérdida de peso (Chiari, et al., 1996) es posible medirlas simultáneamente, así como obtener la cantidad de calcita a partir de la pérdida de CO₂.

El equipo utilizado es SDT Q600, se usaron crisoles de alúmina, en una atmosfera de aire estático, 20°C min grado de calentamiento, desde una temperatura ambiente a 1200°C. El rango es representativo de acuerdo con las muestras a analizar, se pueden comparar los resultados con otros estudios llevados a cabo. El análisis se llevó a cabo en el Laboratorio de Cristalografía y materiales naturales en el Instituto de Física de la UNAM. Las curvas se obtuvieron con el Software Universal Analysis. Los parámetros de las temperaturas en las que tiene lugar la disociación de las fases minerales presentes en los conglomerantes se han obtenido por analogía con otros parámetros conocidos, identificándolos en la tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de los eventos termales en varias temperaturas y su interpretación

Eventos termales en varias temperaturas °C	Interpretación
30 – 60	Perdida de agua libre (Jana, 2018)
150 - 250	Deshidratación del yeso en dos pasos (Ca ₂ SO ₄ · 2H ₂ O) (Földvári, 2011)

200 – 600	Perdida de agua estructuralmente unida de CSH y CAH (Philokyrou, 2012).
250 – 300	Pérdida de agua estructuralmente unida de CSH (pico endotérmico DSC) (Földvári, 2011)
300 – 620	Deshidratación del componente portlandita (Földvári, 2011)
500 – 700 700 734 650 - 890	Descarbonatación de la magnesita Magnesita pura, MgCO ₃ (Bhatty, 1991) Cal dolomítica (Lodardinis, citado en Brosnan, Sanders y Hartt, 2011) Calcita (CaCO ₃) (Földvári, 2011)
573	Transición polimórfica del cuarzo de forma alfa a beta (Jana, 2018)
693	Transición de la fase de belita (C2S) (solo en DSC) (Middendorf, et al., 2005)
600 – 700 650 – 850	Descarbonatación de calcita fina a partir de matriz de cal carbonatada. Descarbonatación de calcita gruesa (Jana, 2018)
750 – 800	Descarbonatación de la dolomita (Földvári, 2011)
800 - 850	Recristalización de CSH amorfo en wallastonita (CaSiO ₃) (pico exotermico DSC) (Földvári, 2011)

Espectroscopia Infrarroja Transformada de Fourier (FT-IR). Esta técnica “mide la absorción de radiación infrarroja (IR) del material de la muestra versus la longitud de onda de la radiación. Las longitudes de onda que absorbe la muestra son características de su estructura molecular” (Poole y Sims, 2016). Se suele utilizar para la identificación de compuestos orgánicos, pero también se usa para los compuestos inorgánicos ya que estos pueden producir un espectro infrarrojo. Desde los años 70’s se ha estudiado los compuestos artificiales de los cementos como la belita, alita y aluminato de calcio (Middendorf et al., 2005; Horgnies et al. 2013). Aniones complejos como el CaCO₃ si producen bandas características (Stuart, 2004:110), por lo que es una técnica útil para complementar los resultados de DRX, relacionando las características de los enlaces (FT-IR), en particular los compuestos a base de aluminosilicatos e hidroxilos, con las características de los minerales (DRX) (Yusuf, 2023.) obtenidos de cada conglomerante y de las muestras tomadas.

El análisis se llevó a cabo en el Departamento de Procesos y Tecnología de la UAM unidad Cuajimalpa, utilizando FT-IR Bruker Tensor 27 en modo de transmisión. A partir de la muestra en polvo se prepararon pastillas con KBr. Se registraron los

tiempos de absorción infrarroja medidos en un rango de $550 - 4000 \text{ cm}^{-1}$ con una resolución de 6 y 16 escaneos acumulativos. Los espectros obtenidos se analizaron con el software OPUS 2.1., se procesaron para la línea de base y se normalizaron utilizando el software Excel (Microsoft®). Los espectros se han determinado por analogía con otros espectros conocidos de compuestos con una estructura similar.

Morfología de la superficie. Secciones delgadas.

Microscopia óptica de Polarización. También conocido como microscopio petrográfico, ya que tiene un cristal polaroide, denominado polarizador los cuales permiten la identificación de los minerales según su comportamiento óptico ante la luz polarizada.

Para llevar a cabo este estudio se han empleado los microscopios que se encuentran en el Instituto de Geología, así como también de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Las láminas delgadas fueron analizadas en el microscopio óptico marca Nikon ECLIPSE LV100N POL empleando luz transmitida (PPL) y luz polarizada (XPL) con el fin de determinar la composición mineral, los residuos de cemento no hidratados y las fases secundarias de los agregados, así como para confirmar la presencia de los compuestos identificados en DRX. Los objetivos que se utilizaron son los de 4, 5x, 10x, 20x y 40x.

Microscopia Electrónica de Barrido con Microanálisis (SEM-EDX). El empleo de esta técnica es muy útil ya que ofrece una complementación detallada de lo observado en el microscopio petrográfico, debido a la posibilidad de obtener información simultánea de los compuestos minerales, las texturas por medio de imagen, así como identificar los constituyentes y aglutinantes de los morteros hidráulicos (Weber, Köberle y Pintér, 2013). En el caso de los residuos no hidratados que no reaccionan y que son de fases pequeñas, como ocurre en los morteros de cemento natural y cal hidráulica natural, el SEM proporciona imágenes de alta resolución y un análisis elemental

Las muestras se cortaron en laminas delgadas pulidas de aproximadamente 1cm³ se cubrieron con una capa de oro-paladio. Se utilizó el microscopio electrónico de barrido del Centro de Investigación y de estudios Avanzados (CINVESTAV) del Instituto Politécnico Nacional unidad Mérida. También se observaron las láminas delgadas utilizadas para el microscopio petrográfico, estas se cubrieron con una capa de carbono. El equipo utilizado es la microsonda electrónica JEOL modelo JXA-8900, Electron Probe Microanalyzer (EPMA). Se obtuvieron imágenes de los rayos X característicos de los elementos Ca, Al. Si. Se llevó a cabo en Laboratorio Universitario de Petrología (LUP) del Laboratorio Nacional de Geoquímica y mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geofísica.

3.4. METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DE LOS MORTEROS

La metodología que se emplea en esta investigación, después de una revisión del estado del arte, es a partir de las técnicas de análisis más adecuadas para la completa caracterización, adaptando la propuesta de identificación de conglomerantes de Van Balen, et al., (1999) la cual se desglosa en la figura 16, con la adaptación del cemento natural de acuerdo con Varas, et al., (2005); Ramírez-Casas, et al. (2019) y Walsh (2007) relacionado con la identificación de cemento natural.

Se utilizó para la identificación del conglomerante (cal, cal hidráulica, cemento natural o cemento) y componentes hidráulicos. El primer método por emplear es el análisis visual por medio de la microscopia óptica de secciones delgadas, para la identificación del tipo de conglomerante. Donde se podrá observar o no matrices de carbonato, puzolanas o remanentes de clinker sin hidratar (belitas o alitas), con esta información se puede comenzar a descartar si es un mortero de cal, mortero con puzolanas o un mortero con cal hidráulica o un cemento natural o uno artificial (cemento Portland histórico). La información obtenida del examen petrográfico es importante para interpretar adecuadamente los resultados de los siguientes análisis.

Para la confirmación de la información observada es necesario complementar con otras técnicas analíticas como: Análisis de difracción de rayos X (XRD), microscopia electrónica de barrido (SEM-EDX) con esta información se podrá saber con mayor exactitud si los morteros contienen puzolanas, son naturales o artificiales o solo cales (carbonatos). Para complementar la información obtenida y tener una respuesta veraz, se propone realizar Análisis Térmico Diferencial (DTA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), Florescencia de Rayos X (FRX) y Espectroscopia Infrarroja por Transformada de Fourier (FT-IR).

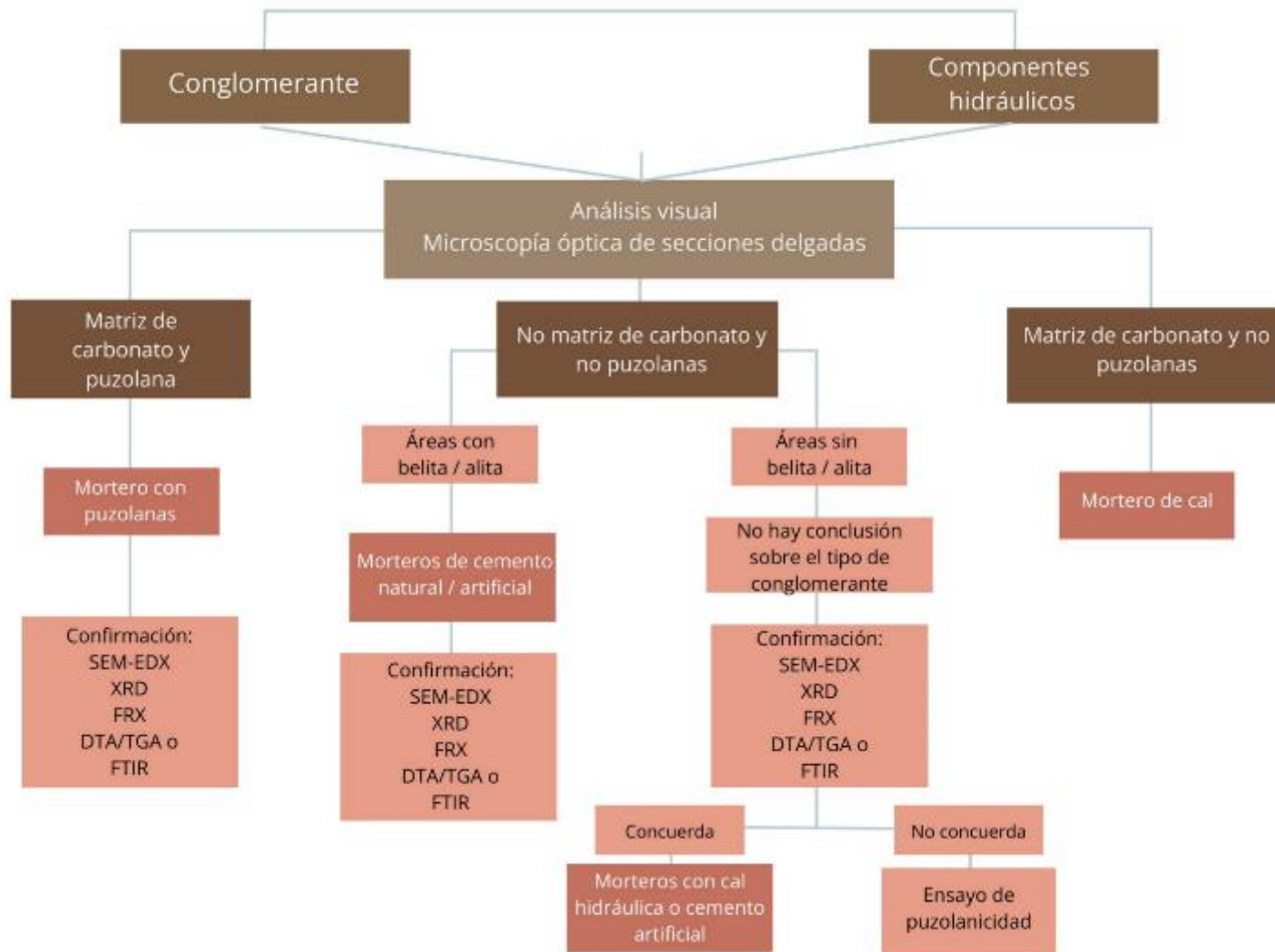
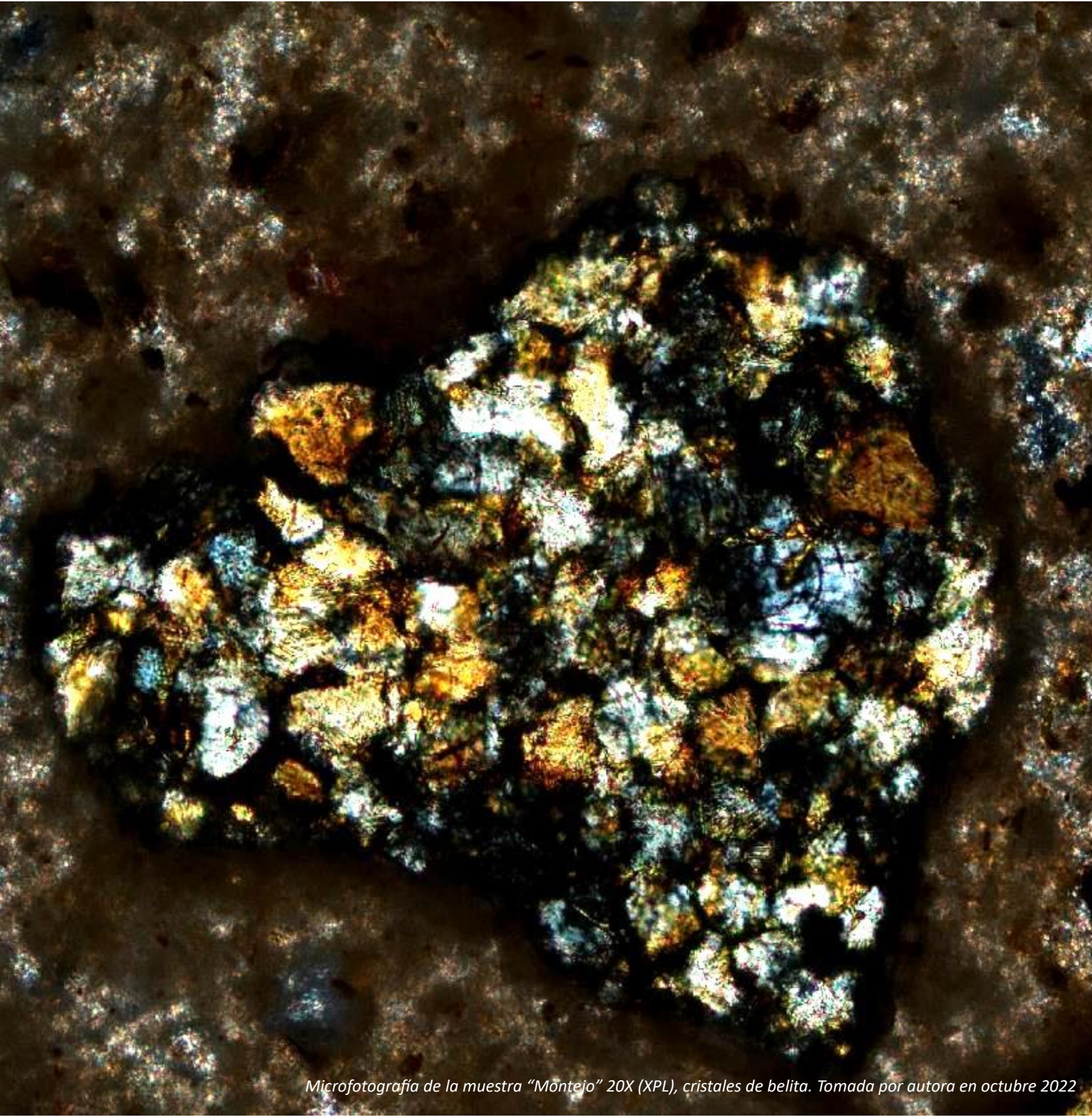


Fig. 16. Identificación de conglomerante y componentes hidráulicos. Adaptado de (Van Balen, et al., 1999), Flow chart for binder identification

CAPÍTULO 4

RESULTADOS



Microfotografía de la muestra "Montejo" 20X (XPL), cristales de belita. Tomada por autora en octubre 2022

En este capítulo se dan a conocer los resultados obtenidos de la caracterización del material de referencia y las muestras tomadas *in situ*, con el fin de conocer la composición y deferenencias de cada uno de los materiales analizados.

En total son 5 muestras recolectadas de ambas casas y seis muestras de referencia, para las láminas delgadas se usaron las probetas con conglomerante y agregados, para los demás análisis se elaboraron probetas de solo el conglomerante hidratado, se dejaron secar al aire libre para después llevar a cabo el proceso de triturado y pulverización. En la tabla 4, se enlistan las claves de los morteros que se recolectaron y de los conglomerantes hidratados, se describe el área de donde se tomó la muestra o el tipo de conglomerante (en el caso de los materiales de referencia), así como los análisis que se realizaron a cada uno.

Tabla 4. Clave de las muestras de los morteros históricos, material de referencia y análisis realizados.

Muestra	Descripción	Análisis realizados						
		DRX	LFRX	ICP-MS	FTIR	DTA-TGA	SEM-EDS	Lamina delgada
MORTERO HISTORICO								
Montejo	Ornamento Fachada principal	x	x	x	x	x	x	x
MCO3 (L)	Ornamento Fachada oeste							x
MCO4 (M)	Ornamento Fachada oeste	x	x		x	x	x	
MC2	Ornamento Fachada norte	x	x	x	x	x	x	x
MCS2	Aplanado Fachada sur	x	x	x	x	x	x	x
MATERIAL DE REFERENCIA								
CN	Cemento natural	x	x	x	x	x	x	x
CH	Cal hidráulica	x	x		x	x	x	x
CPO	Cemento Portland Ordinario	x			x	x	x	
CPC	Cemento Portland compuesto	x	x		x	x	x	x
CPC+cal	Cemento Portland Compuesto + cal	x			x	x		
Cal+y	Cal + yeso	x			x	x		

Fuente: Elaborado por la autora, 2023

4.1. ANÁLISIS EXPERIMENTAL. RESULTADOS

Para comprender las características físicas, petrográficas, mineralógicas y químicas del cemento natural, cal hidráulica y cemento portland, se llevaron a cabo los análisis mencionados en la tabla 3 del material de referencia. Con la información obtenida es posible tener una aproximación del tipo de conglomerante empleado en los morteros históricos de ambas casas.

4.1.1. ENSAYOS FÍSICOS. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN, POROSIDAD, DENSIDAD Y ABSORCIÓN DE AGUA

Los resultados de las pruebas a los 7 y 28 días son los siguientes (Fig. 17), se observa que tanto CPO y CPC tienen una mayor resistencia en comparación con CN, en cambio CH no aumenta en el lapso de 7 y 28 días.

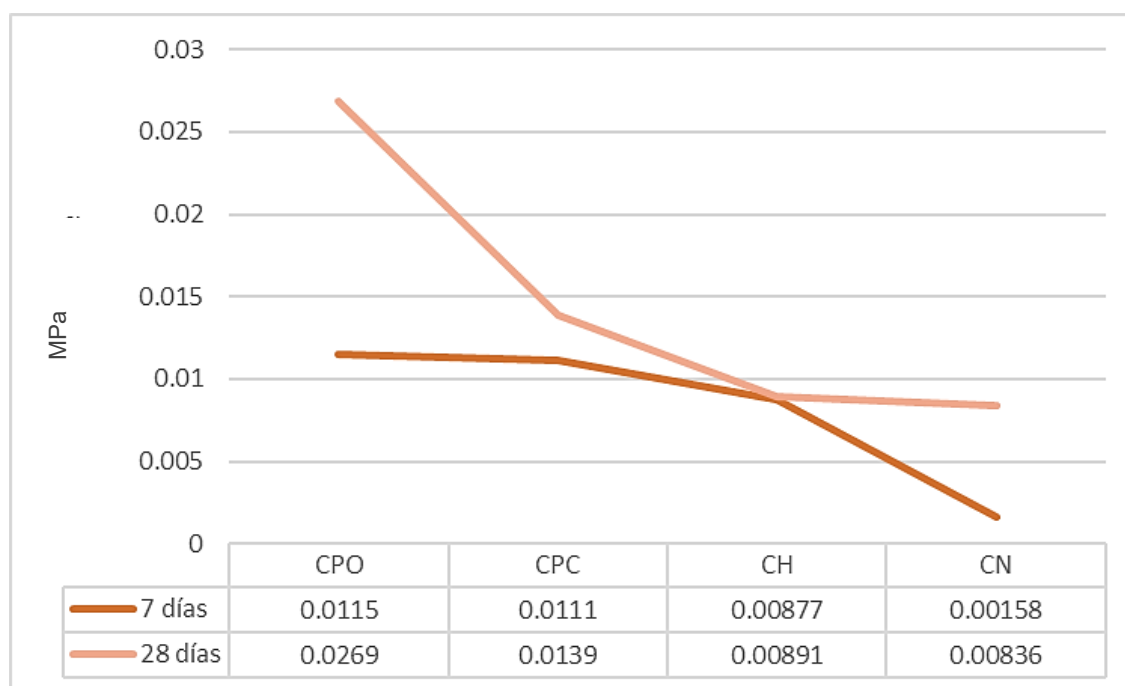


Figura 17. Gráfico de resistencia a la compresión (MPa) de las probetas. Elaborado por autora, 2023.

En cuanto a las propiedades físicas (fig. 18), en densidad los cuatro materiales son similares. Sin embargo, hay una diferencia en cuanto a porosidad y la cantidad de agua absorbida. CN y CH son mucho más porosos, por lo tanto, son permeables.

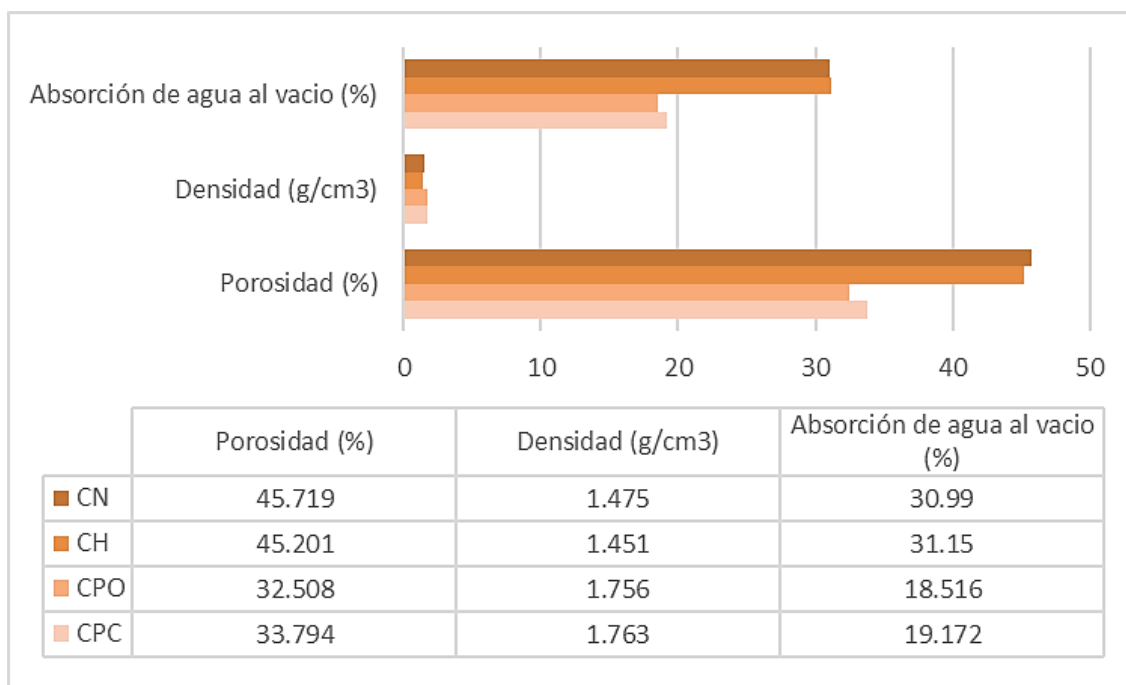


Figura 18. Resultado de las propiedades físicas. Elaborado por autora, mayo 2023.

4.1.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LA SUPERFICIE

En cuanto a color, las probetas en estado seco se observan (fig. 19):

CN, va de un café claro a medio, CH, va de una crema a blanco y CPC, gris.



Figura 19. Láminas delgadas y probetas. Fotografía tomada por la autora, agosto 2023.

Las láminas delgadas se observaron en el microscopio estereoscópico, las tres muestras presentan (fig. 20) una matriz que va de un color crema a uno café. CN, crema con puntos negros, CH, crema con puntos rojizos y CPC, café claro a medio con puntos crema.

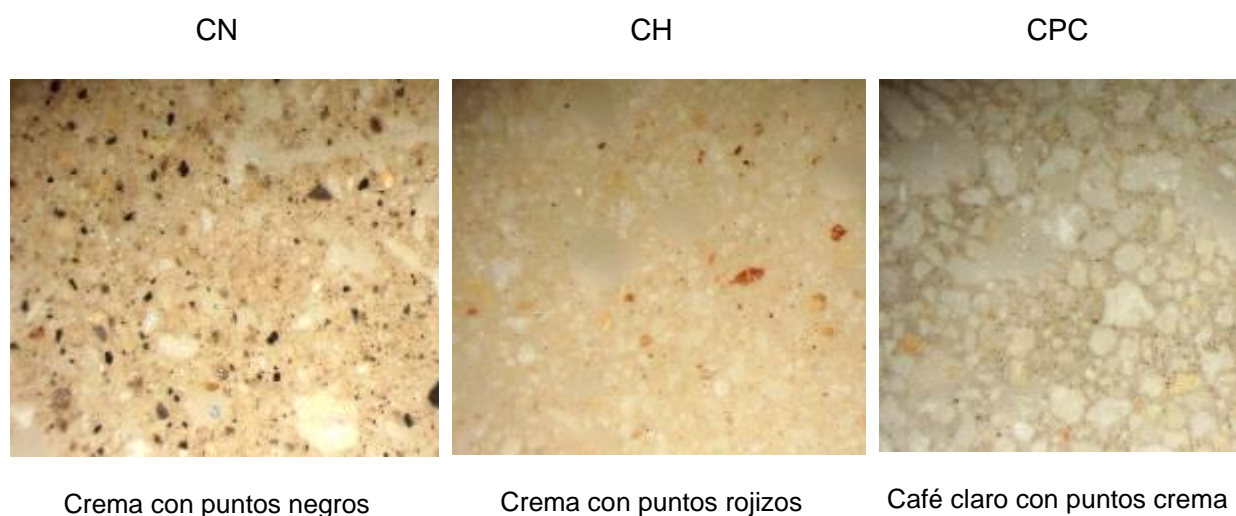


Figura 20. Microfotografía de las láminas delgadas observadas con luz incidente. 1.25 X. Tomada por autora en agosto 2023.

Para identificar el tipo de conglomerante, en la microscopía óptica polarizada, hay que poner especial atención en los restos sin reaccionar (Walsh, 2007; Gadermayr, Pintér y Weber, 2012). Al observar en el microscopio petrográfico las láminas delgadas de CN (Figura 21), es posible ver una combinación de fragmentos de margas¹⁶ y cristales de belita (Mayo, 2015; Bayer, et al. 2011) o margas redondeadas (Pérez, 2022), los cuales por su forma pequeña y redondeada, la hacen identificable. Presentan un color de interferencia y conjunto de laminillas mezcladas que se cruzan y hay ausencia de alitas.

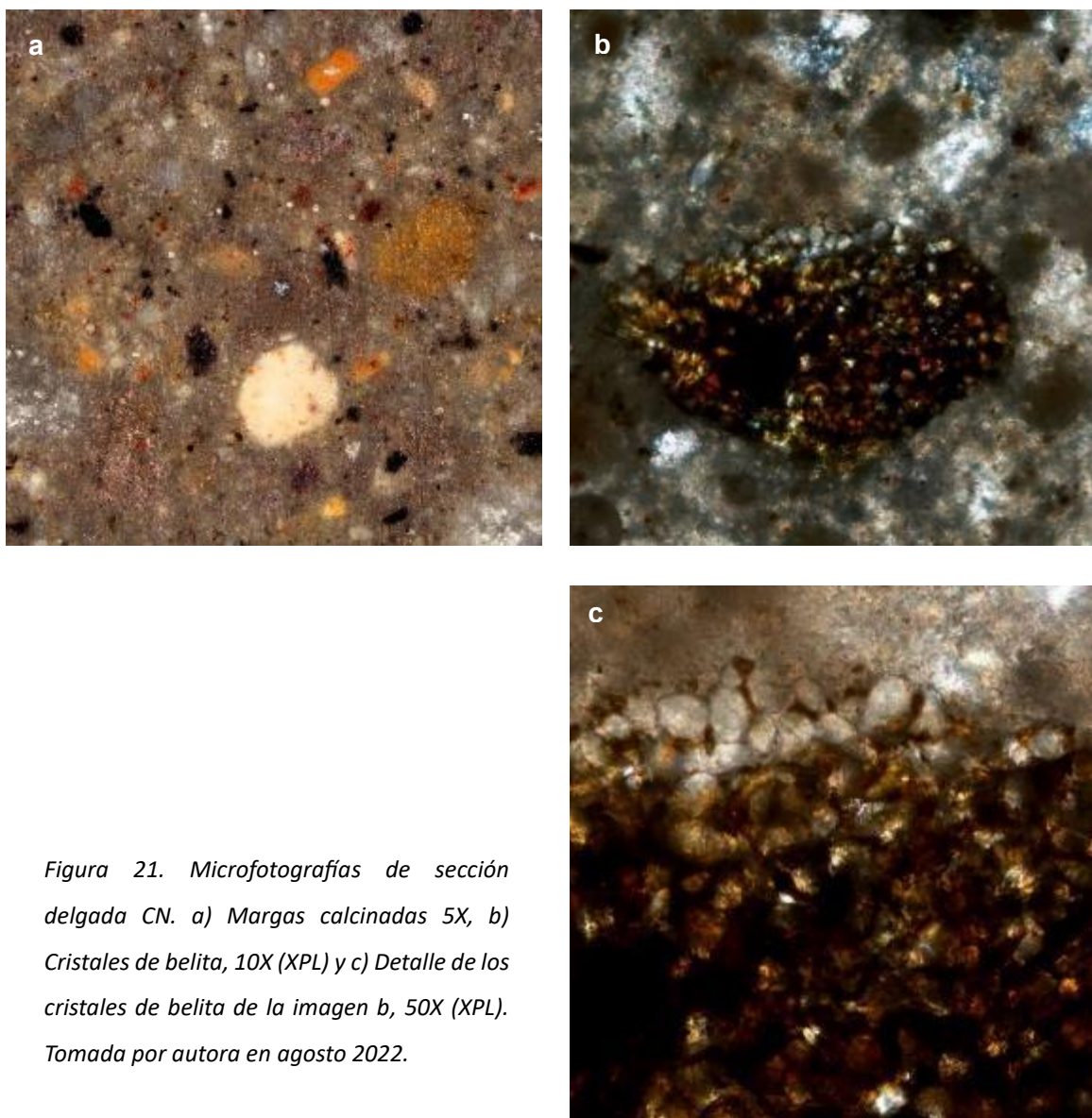


Figura 21. Microfotografías de sección delgada CN. a) Margas calcinadas 5X, b) Cristales de belita, 10X (XPL) y c) Detalle de los cristales de belita de la imagen b, 50X (XPL). Tomada por autora en agosto 2022.

¹⁶ Material compuesto por un 35 a 65% de carbonato de calcio y el resto por minerales arcillosos, su aspecto y propiedades es similar a una arcilla

Para la muestra de CH, hay ausencia de margas debido a que no alcanza los grados de calcinación que un CN, pero si hay presencia de nódulos o granos de cal (Elsen, 2005; Mayo, Sanz y Pineda, 2018 y Mayo, 2023) que es posible observar con poco aumento (fig. 22), identificado por la birrefringencia y laminado. Hay ausencia de belitas y alitas. A diferencia del cemento natural que es más arcillo, los agregados se entremezclan con la matriz, pero en la cal hidráulica es posible diferenciar la matriz y los agregados. La porosidad es menor, observando menos poros redondos en la lámina delgada.

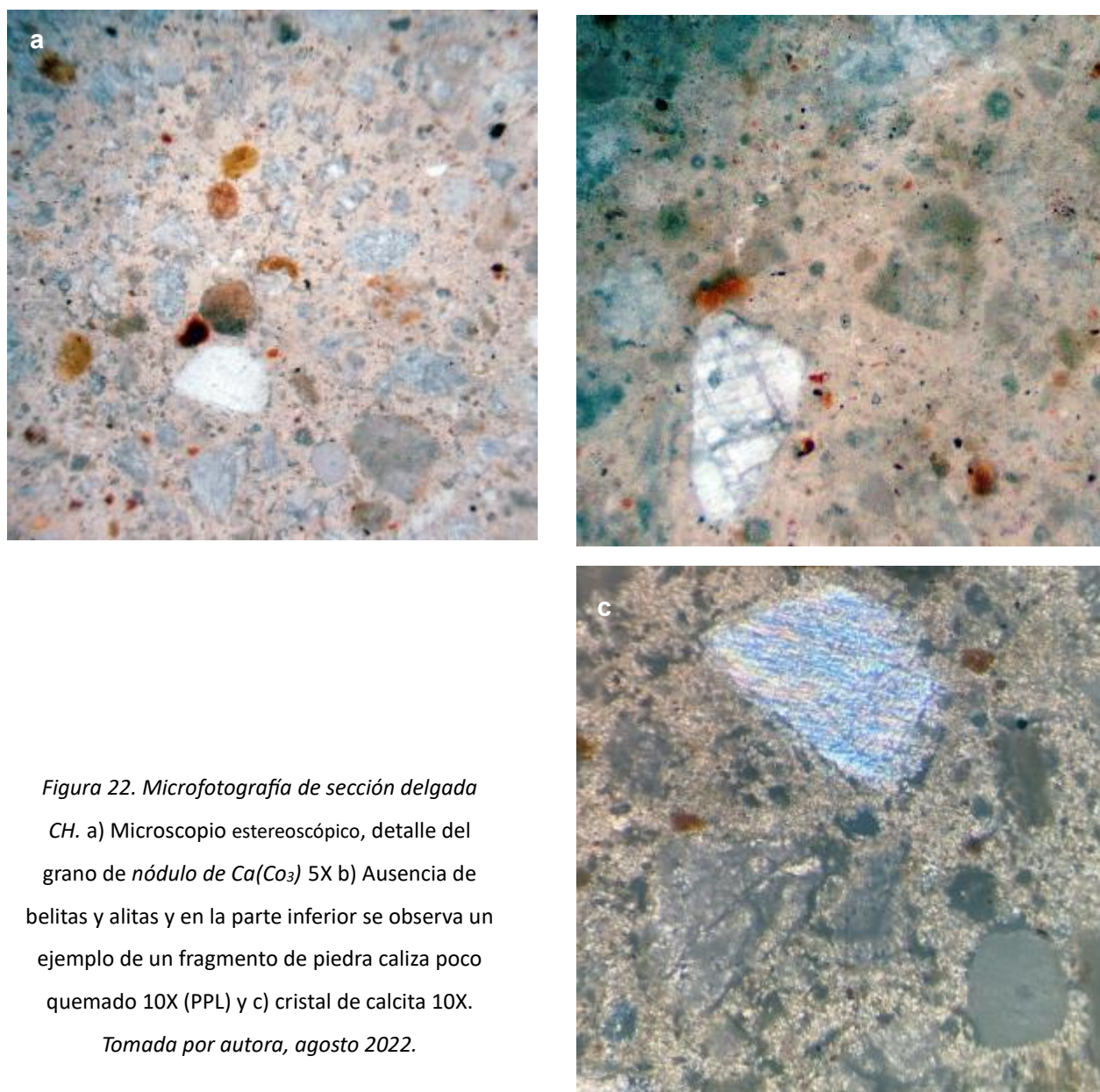


Figura 22. Microfotografía de sección delgada CH. a) Microscopio estereoscópico, detalle del grano de nódulo de $Ca(CO_3)$ 5X b) Ausencia de belitas y alitas y en la parte inferior se observa un ejemplo de un fragmento de piedra caliza poco quemado 10X (PPL) y c) cristal de calcita 10X.

Tomada por autora, agosto 2022.

Para la muestra CPC, lo que lo va a diferenciar de una CH y un CN es una mayor cantidad de belitas (Walsh, 2007), la ausencia de margas calcinadas (Mayo, 2023) y la presencia de alita (fig. 23). En esta muestra se observaron de forma aislada debido a que el cemento moderno esta más finamente molido, así como durante la mezcla quedaron pocos restos de clinker sin hidratar. En la figura 23c se puede observar la fase de clinker de un cemento moderno (Campbell, 1999), con presencia de largos cristales de alita (amarillo claro), los cuales rodean a los cristales redondos de silicato bicálcico (ocre con fondo oscuro).

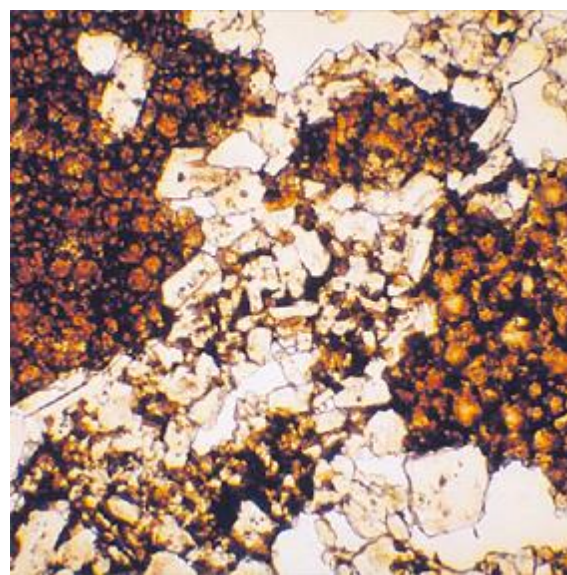
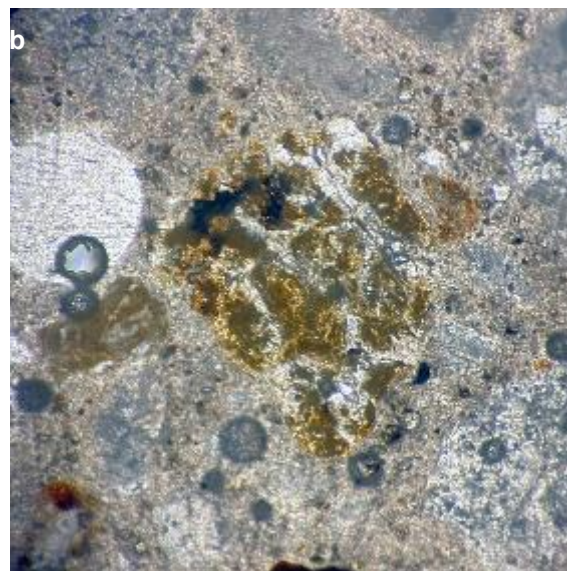
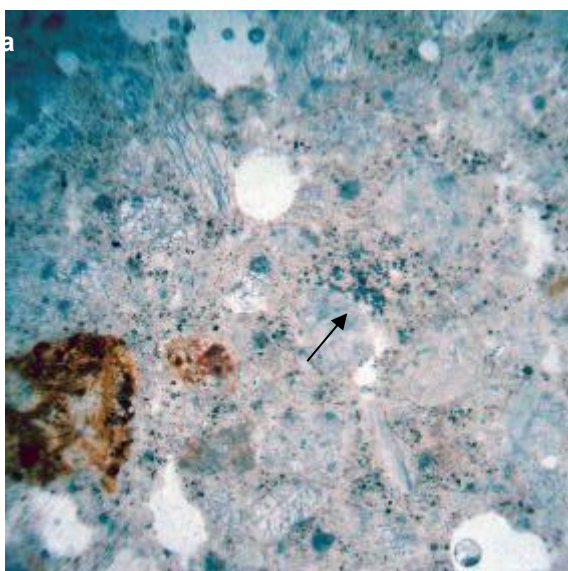
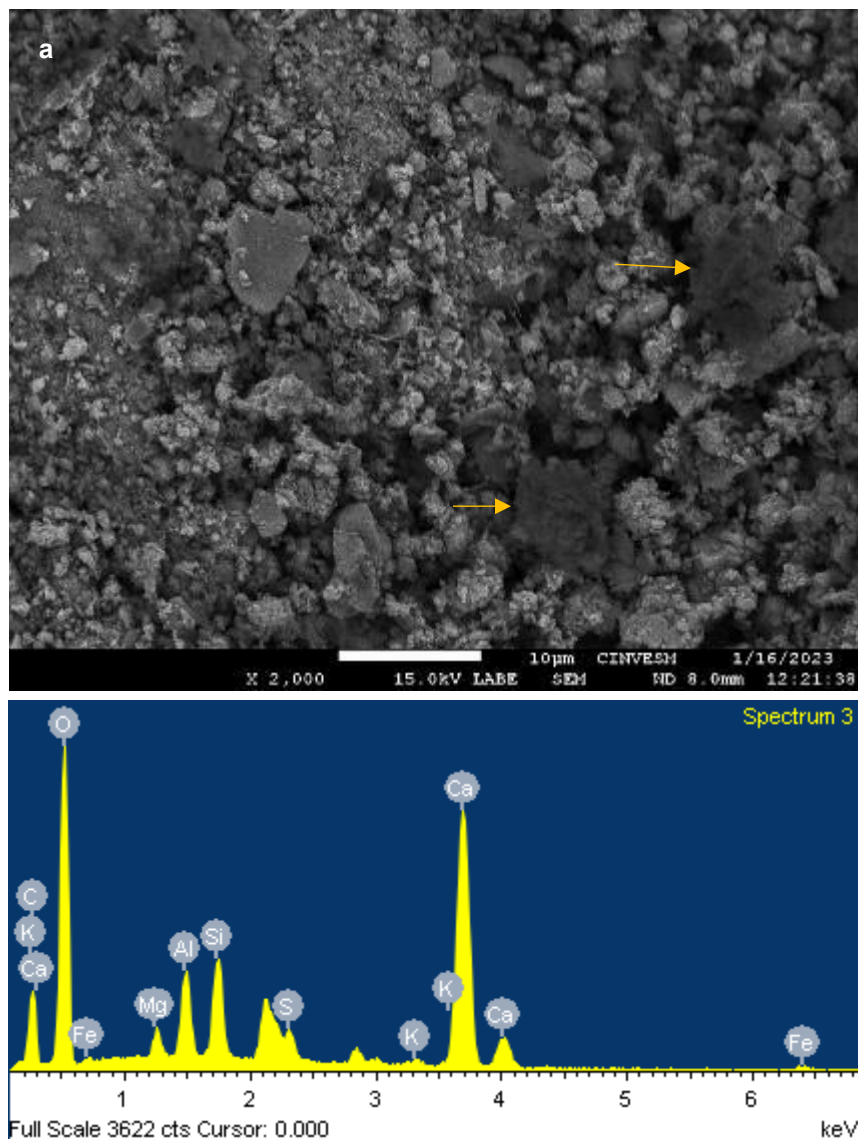


Figura 23. Microfotografía de sección delgada CPC, áreas identificadas con posibles alitas. a) Microscopio estereoscópico. Ausencia de margas calcinadas y la presencia de alita 5X (flecha negra)., b) Microscopio petrográfico. Alita sin hidratar. (Tomada por autora, agosto 2022.) y c) fases de clinker, alita y belita (Campbell, 1999:71).

4.1.3. RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO CON MICROANÁLISIS (SEM-EDS)

Se analizaron las estructuras de las muestras en fractura fresca con recubrimiento de oro-paladio. Comprobando que CN es compacto y presenta algunos cristales laminares, CH presenta muchos más cristales fibrosos con forma de aguja y se observa más poros, y CPC tiene una estructura compacta similar a CN pero sin la presencia laminar. En cuanto al análisis cuantitativo general (fig. 24), se observó que en composición CN y CPC son muy similares, solo difieren en la cantidad de Na presente en CPC. En cuanto a CH la cantidad de Si y Al es menor y no se reconoció la presencia de Mg y Fe.



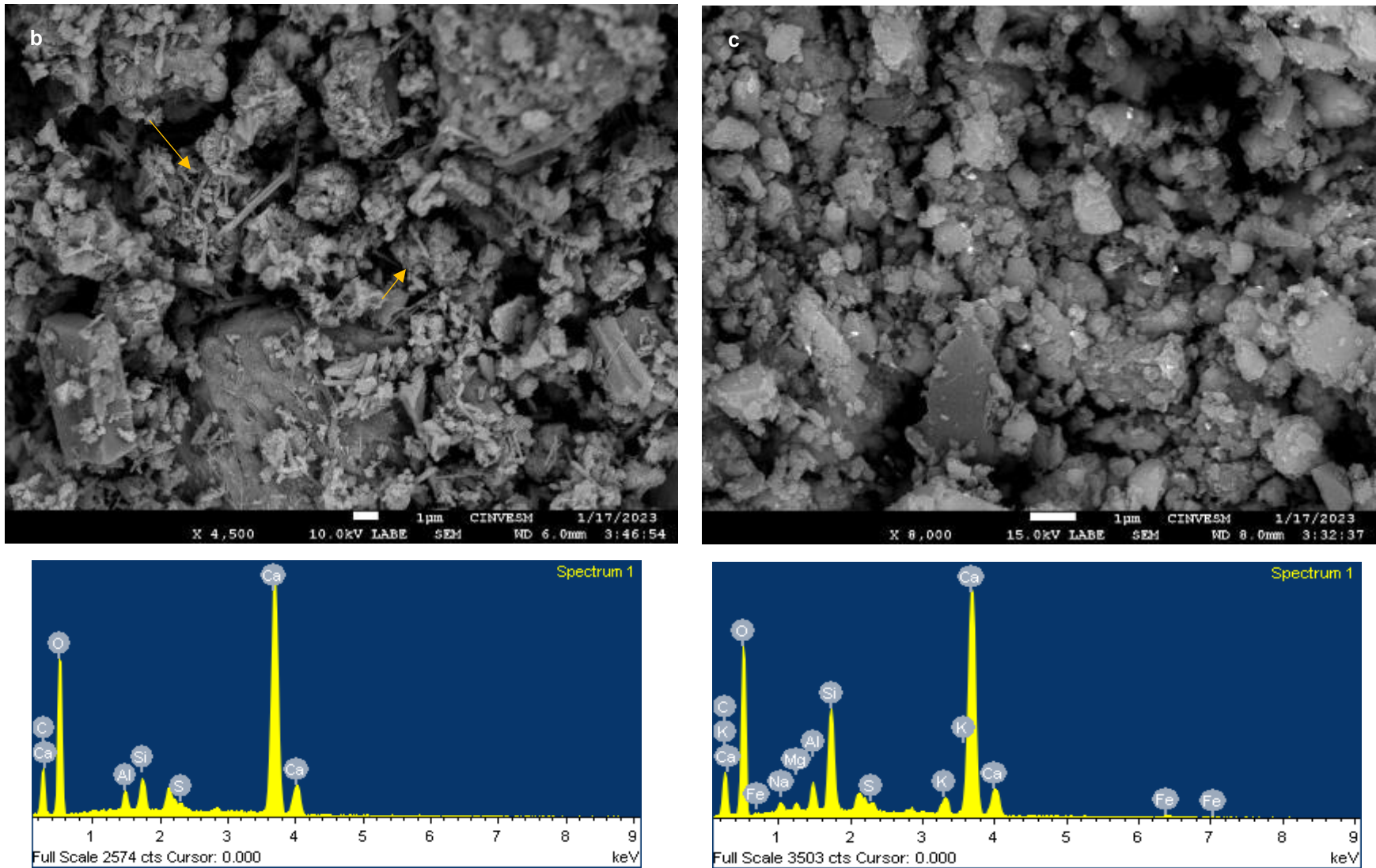


Figura 24. SEM-EDS de las muestras CN, CH y CPC. a) Estructura de un cemento natural (CN), b) estructura de una cal hidráulica (CH) y c) estructura de un cemento portland compuesto (CPC). Imagen y análisis realizado en el Laboratorio de Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBIO) Cinvestav-Unidad Mérida. Tomada por autora, enero 2023.

4.1.4. Resultados análisis mineralógicos. Difracción de rayos X (DRX)

Se obtuvieron los difractogramas de cada conglomerante (fig. 25), así como dos mezclas de CPC+cal y Cal+yeso, los difractogramas individuales se pueden ver en el anexo 3. Se puede observar que la portlandita (Port) es el pico de mayor intensidad en C+Y, CPC+C, CPO y CH, menor en CPC. En cuanto a CN no se registró la presencia de portlandita. El pico de calcita (Cal) predomina en CN, CPC y CPO, siendo menores en las muestras restantes. El cuarzo (Cua) solo fue identificado en las muestras CN y CH. El silicato dicálcico (β -C₂S) está presente en CN, CPO y CPC. La razón de que no esté presente en CH y C+Y, es debido a que la temperatura de calcinación es menor para formar la fase belita.

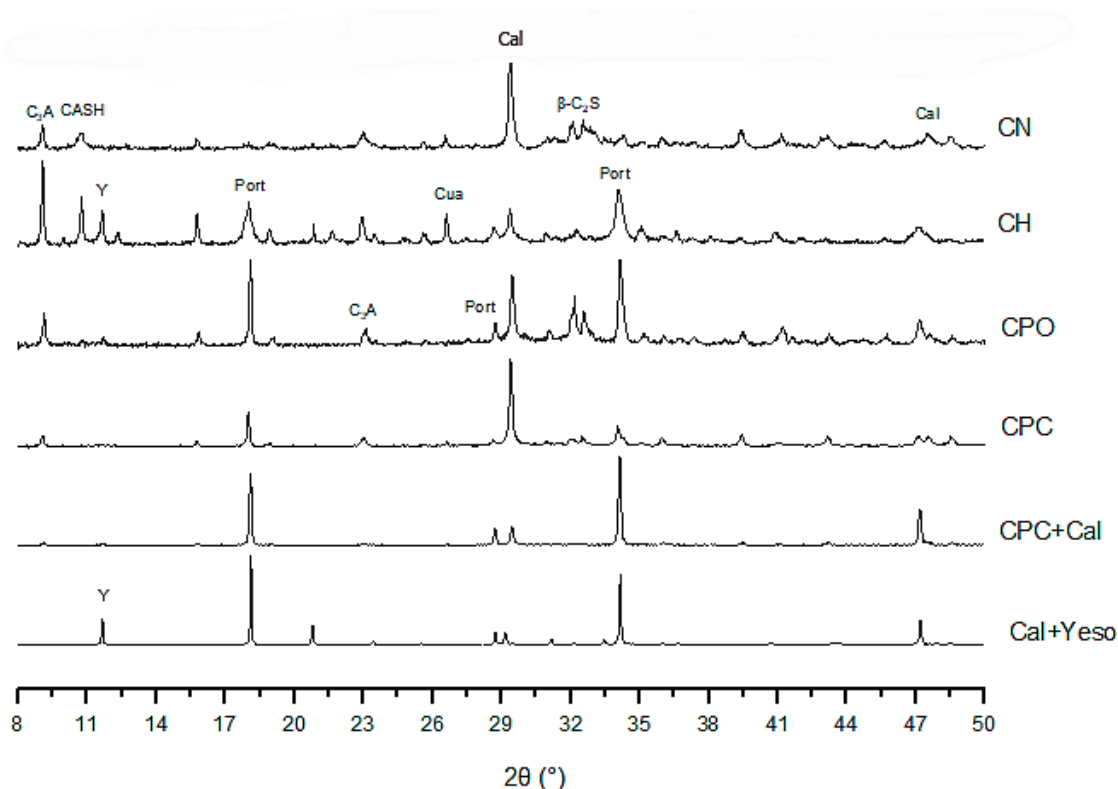


Figura 25. Difractograma comparativo de los conglomerantes modernos

Nota: Cal (Calcita), CaCO₃ (A) (Aragonito), Cua (Cuarzo), β -C₂S (silicato dicálcico), C₃A (Etringita), CASH (hidratos de aluminosilicatos de calcio), Port (Portlandita), Y (Yeso) y C₃A (aluminato tricálcico). Elaborado por la autora, datos obtenidos en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, Instituto de Metalurgia, UASLP.

La muestra CH no es una cal hidráulica natural, es puzolánica por lo que no hay formación de belita, ya que la hidráulidad se consigue con los agregados artificiales y los grados de calcinación de la cal no son suficientes para la formación de fases hidráulicas (clinkers). Un pico de gran intensidad de aluminato tricálcico (C_3A) se identificó en CH, en menor intensidad en CN, CPO y CPC. En cuanto al pico de Ca, Al, Si hidratados (CASH) solo están registrados en CN y CH.

En el caso de la muestra de CPC + cal, se puede observar que al agregar cal (una práctica común en el siglo XIX) esta elimina o difumina la presencia de larnita, cuarzo e hidrotalcita presentes en CPC, predominando los picos de portlandita y calcita. De acuerdo con Marie-Victorie y Bouichou (2019), la ausencia de la Portlandita en el cemento natural la hace resistente al ataque de sulfatos a diferencia del cemento portland y la cal hidráulica que es mucho más sensible. La ausencia de silicato tricálcico en los resultados se debe a la posibilidad de una pérdida total de la estructura cristalina (hexagonal) durante la hidratación del cemento (Giraldo y Tobón, 2015), por lo que se convierte en una fase hidratada tobermorita gel, un silicato de calcio hidratado, por lo cual no tiene un sistema de cristalización definido.

4.1.5. Resultado de los análisis químicos

Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Se analizaron los tres principales conglomerantes hidratados, sin agregados pétreos. Se midieron en forma de óxidos los elementos mayores (>1%) Si, Al, Fe, Ca, Mg, Na, K y P. Con los resultados obtenidos de la composición de cada conglomerante actual se podrá comparar con los resultados de los morteros históricos. Cabe señalar que en el análisis de los morteros no se realizó la separación de agregados por lo que los resultados no necesariamente podrán coincidir.

En la tabla 5, se presentan, las tres muestras, en mayor cantidad CaO, un alto contenido en SiO_2 lo que indica su capacidad hidráulica (Stewart y Moore, 1982) natural y artificial. En cuanto a los valores de Al_2O_3 varían teniendo CH los más altos y CPC los más bajos. CN presenta mayores concentraciones de Fe_2O_3 y MgO en comparación con los otros dos conglomerantes, estos dos elementos pertenecen a la cantidad de arcillas naturales

de la cal con que se elaboró el CN. Por otra parte, los tres presentan valores bajos de Na_2O , K_2O . De acuerdo con los valores de hidraulicidad y cementación los conglomerantes modernos entran en la clasificación de eminentemente hidráulicos.

Tabla 5. Resultados de LFRX, % en peso de los óxidos de los conglomerantes modernos

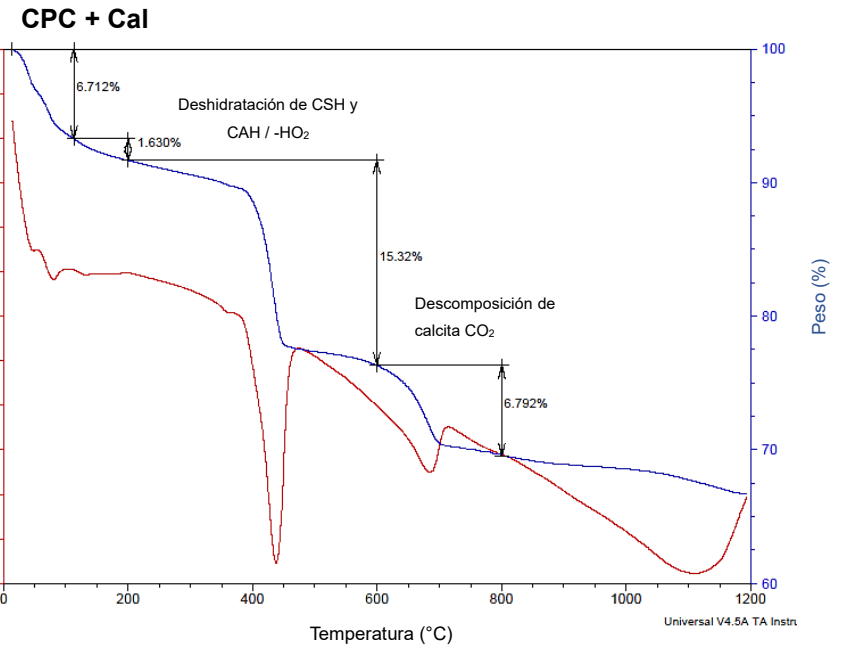
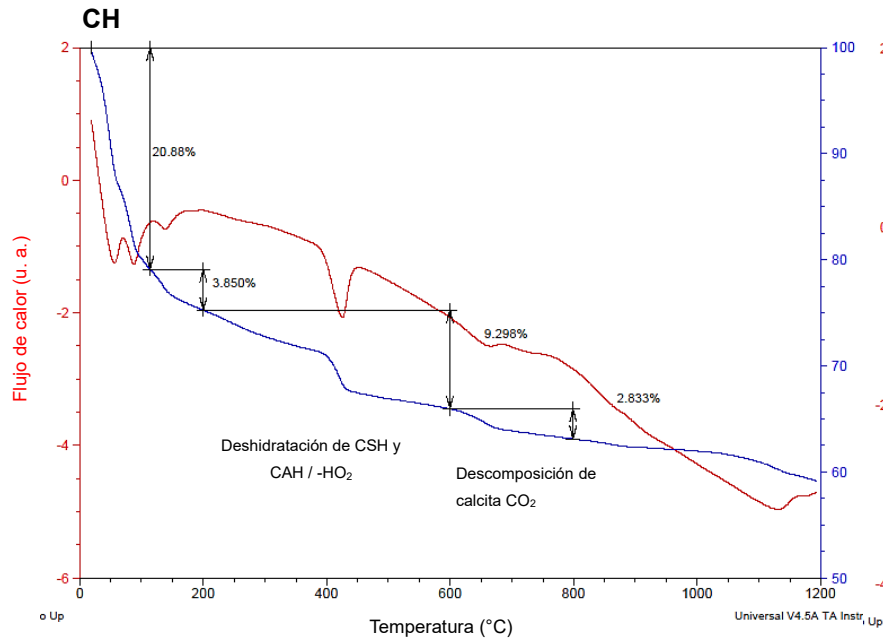
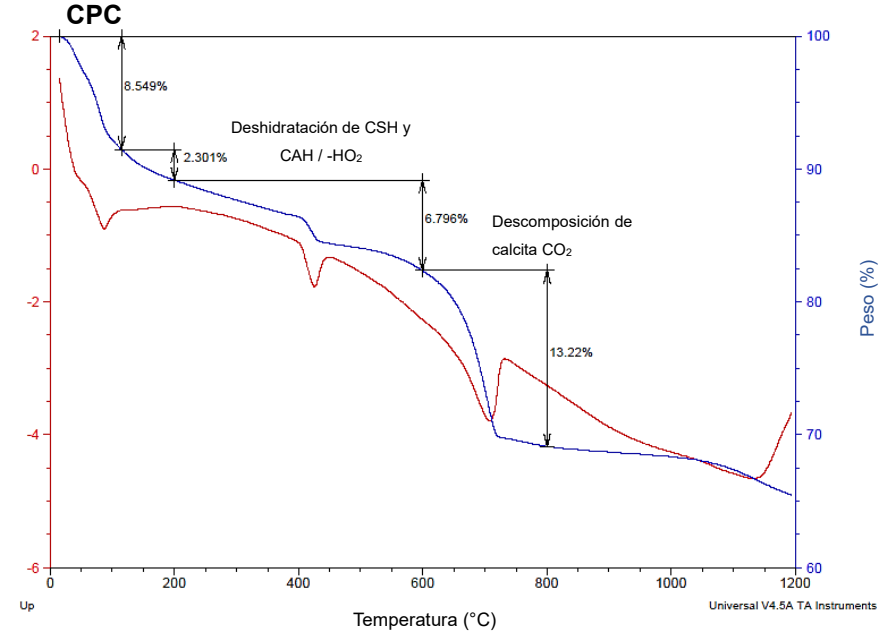
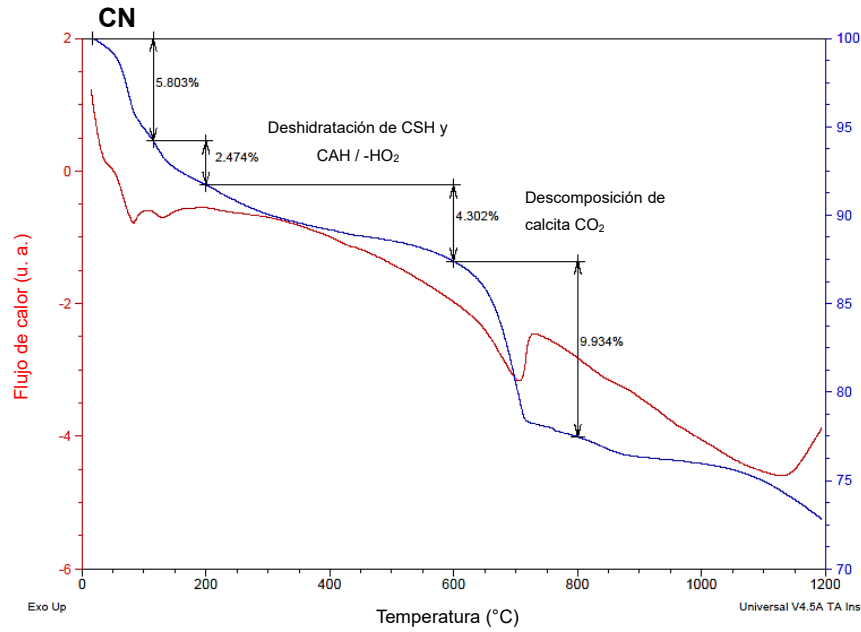
Concentración de elementos mayores										
%	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	LOI	HI	CI
CN	16.433	6.375	3.177	49.702	3.126	0.106	1.012	19.68	0.43	1.02
CH	17.933	10.229	0.673	46.358	0.527	0.021	0.126	23.4	0.60	1.31
CPC	14.092	3.627	1.628	52.334	1.227	0.315	0.5	25.97	0.33	0.82

Elaborado por la autora, datos obtenidos en el Laboratorio Fluorescencia de Rayos X – LANGEM - UNAM

Resultados de los análisis termogravimétricos (TGA/DSC)

En cuanto a los resultados de los análisis térmicos, las curvas de las muestras se observan en la figura 26. Para la identificación clara del yeso y el hidróxido de calcio, se analizó una muestra de cal + yeso (1:1) y para corroborar los resultados de DRX con respecto a la adición de cal en cemento, se preparó una muestra de CPC + Cal (1:1). Como ya se vio en DRX, CN no presenta la fase de Portlandita o hidróxido de calcio en comparación con el resto de las muestras y se confirma con este análisis.

Las curvas TGA (azul) de las cinco muestras presentan cuatro áreas con pérdida de peso. La primera es menor a los 120°C se le atribuye a la pérdida de agua libre, la segunda entre los 120 a 200°C corresponde al agua de capa intermedia y la deshidratación del yeso, la tercera pérdida de peso se da en la región entre los 200 a 600°C y se atribuye a la pérdida del grupo hidroxilo (OH^-) y a la pérdida estructuralmente unida de CSH y CAH (excepto las muestras con cal), la cuarta pérdida de peso, entre los 600 a 800°C , se relaciona con la descomposición de los carbonatos. De estas dos últimas pérdidas es que se pueden obtener el contenido de hidróxido de calcio y calcita, asociados a la pérdida de masa de las moléculas de hidróxido de calcio (portlandita) y carbonato de calcio.



La piedra artificial ornamental en Mérida, Yucatán. Finales del siglo XIX y principios del siglo XX

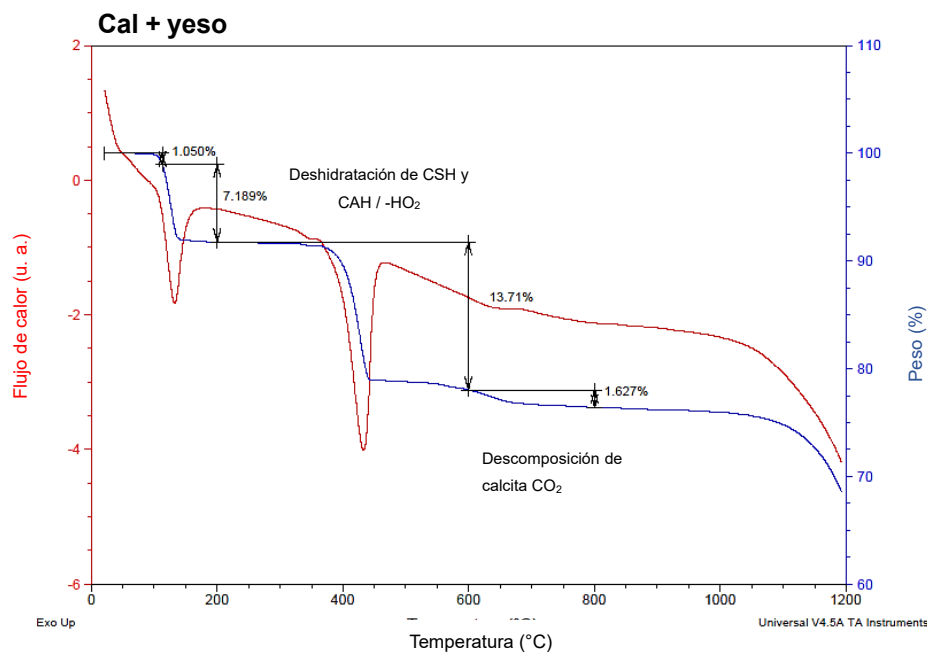


Figura 26. Curva TGA- DSC de las muestras CN, CPC, CH, CPC + cal y cal + yeso. Elaborado por la autora.

En la curva DSC (rojo), debido a que la fase de calcita en el cemento natural no es reactiva el componente Portlandita, no presenta un pico notable en la curva, así como tampoco se observa la curva del cuarzo a 573°C. Presentan CN, CPC y CPC+Cal, un pico endotérmico entre 650 – 750 que corresponde a la calcita, la fase dominante en los morteros, pero que es posible se sobreponga sobre la fase C_2S en 690°C que fue posible identificar en DRX.

En el resto de las muestras (CH, CPC, CPC+Cal y CAL+Y) es evidente la curva entre los 450 – 550°C correspondiente al hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) la cal reactiva del conglomerante, siendo más pronunciada en las muestras en donde se utilizó cal área con menor grado de calcinación. Otra curva definida es en la muestra de cal y yeso, este último en 150°C que corresponde a la deshidratación del yeso. La reacción endotérmica alrededor de 85°C corresponde a la liberación de agua evaporable que fue absorbida por el medio ambiente.

Los compuestos identificados en DRX fueron también identificados en los resultados de TGA/DSC, con la ventaja de diferenciar, en el caso de CN, la cal dolomítica por su curva de descomposición y las fases no cristalinas.

El contenido de calcita (expresado en CaCO_3 %, descomposición) se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{CaCO}_3 = [P(\text{CO}_2) \cdot \text{MM}(\text{CaCO}_3)] / \text{MM}(\text{CO}_2)$$

- $P(\text{CO}_2)$ es la pérdida de masa obtenida en el rango de temperatura de 200 – 600°C (descarbonatación del carbonato de calcio)
- $\text{MM}(\text{CaCO}_3)$ es la masa molar de la calcita
- $\text{MM}(\text{CO}_2)$ es la masa molar del dióxido de carbono

El contenido de hidróxido de calcio (expresado en $\text{Ca}(\text{OH})_2$ %, descomposición) se calculó de la siguiente manera:

$$\% \text{Ca}(\text{OH})_2 = [P(-\text{OH}) \cdot \text{MM}(\text{Ca}(\text{OH})_2)] / \text{MM}(\text{H}_2\text{O})$$

- $P(-\text{OH})$ es la pérdida de masa obtenida en el rango de temperatura de 600 – 800°C (descarbonatación del hidróxido de calcio)
- $\text{MM}(\text{Ca}(\text{OH})_2)$ es la masa molar del hidróxido de calcio
- $\text{MM}(\text{H}_2\text{O})$ es la masa molar del agua
-

Tabla 6. Contenido de carbonato

Muestra	$\text{Ca}(\text{OH})_2$ %	CaCO_3 %
CN	17.67	27.75
CH	27.54	10.37
CPC	37.82	34.84
CPC + Cal	62.9	19.18
Cal + Y	56.32	5.90

En la tabla 6 se presentan los resultados en lo que se puede observar que a mayor porcentaje de cal área (hidróxido de calcio) y menor el tiempo de estar expuesto al CO_2 (28 días) menor es la carbonatación, siendo CPC el de mayor porcentaje, seguido de CN el cual tiene una mayor presencia de arcillas.

Resultados de espectroscopia infrarroja (FT-IR)

Los espectros de los conglomerantes modernos de CN, CH, CPC, CPC+CAL y CAL+YESO se presentan la figura 27. En los espectros de las seis muestras los picos identificados son muy similares, solo varían en la muestra de cemento con adición de cal (CPC+C) y la de cal con yeso (C+Y), al presentar un pico de intensidad de portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) en la banda de O-H con el número de onda 3642 cm^{-1} (Horgnies, chen y Bouillon, 2013) así como en el estiramiento de H-O-H y S-O para la presencia de yeso o sulfatos (Hughes, et al., 1995; Yusuf, 2023). En el resto de las muestras se presenta el hidróxido de calcio en menor intensidad o casi nulo en la muestra CN. Coincidiendo con los resultados obtenidos en DRX.

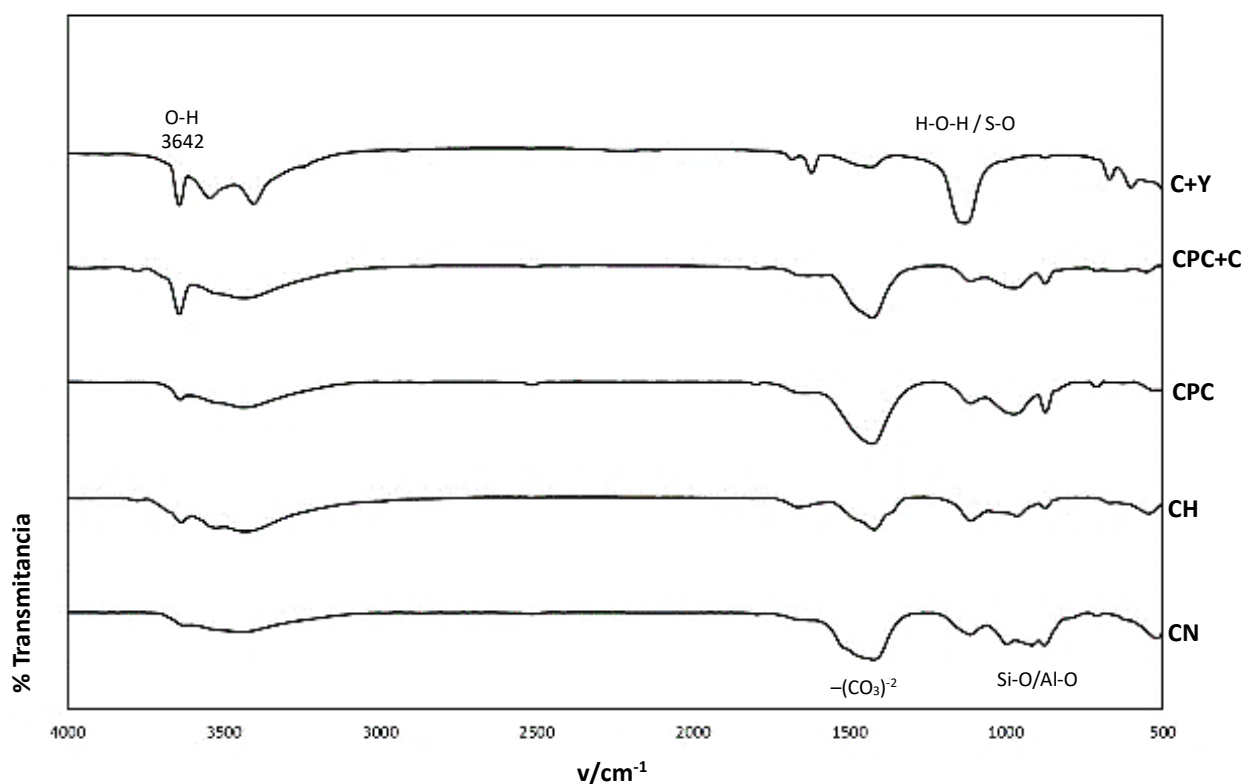


Figura 27. Espectros de FT-IR de los conglomerantes modernos.

Datos obtenidos de del Departamento de Procesos y Tecnología de la UAM unidad Cuajimalpa. Elaborado por la autora, 2023.

Todas las muestras con características hidráulicas presentan un pico intenso de la calcita en la banda de $\text{ion}-(\text{CO}_3)^{-2}$ o en el estiramiento $-\text{O}-\text{C}-\text{O}-$ en 712, 875, 1390–1475, 1403, 1439 y 1797 cm^{-1} (Šoptrajanov, 2015; Ravi, 2018; Yusuf, 2023). Los números de onda entre 3800 – 3400 cm^{-1} en el estiramiento O-H corresponde a minerales arcillosos como sílice y aluminio (Stuart, 2004: 122), los cuales no son muy marcados y que en DRX no fue posible identificarlos.

Las bandas de absorbancia características para minerales de cemento, en particular las fases del clinker de los cementos se encuentran en la región de 2100 – 500 cm^{-1} . Las bandas principales de Si-O en 938, 935, 883, 521 cm^{-1} (C_3S), 991, 995, 900, 879, 847, 509 cm^{-1} (C_2S), Al-O en la región de 900 – 760, 889, 860, 812, 785, 762, 621, 586, 518, 506 cm^{-1} (C_3A) y Fe-O en 700 – 500 cm^{-1} (C_4AF) aunque son bandas poco definidas (Hughes et al., 1995; Horgnies, chen y Bouillon, 2013; Yusuf, 2023). Para las fases hidratadas como C-S-H o C-A-S-H encontradas en la estructura Al-Si se encuentran en la región 950 - 1055 cm^{-1} (Yusuf, 2023) y la etringita se encuentra en la banda O-H con un numero de onda fuerte en 3637 cm^{-1} (Horgnies, chen y Bouillon, 2013) el cual no se debe de confundir con la hidróxido de calcio. Fueron identificadas en todas las muestras, en menor medida en la muestra con adición de cal y no hay presencia de las fases de clinker en la muestra C+Y, debido a que los grados de calcinación de la cal no son suficientes para presentar las fases del clinker.

4.2. RESULTADOS DE LOS MORTEROS DE FINALES DEL SIGLO XIX Y PRINCIPIOS DEL SIGLO XX

Una vez identificados los parámetros que diferencian un cemento natural, una cal hidráulica y un portland, es que se procede a presentar los resultados de los análisis llevados a cabo en las muestras tomadas de ambas casas de acuerdo con la metodología para la identificación del conglomerante de la fig. 12. Primero se presentan los resultados de la Casa Montejo y después los de la Casa Montejo 495. Se presenta la discusión de los resultados en el apartado 4.4.

4.2.1. MORTERO DE FINALES DEL SIGLO XIX, CASA MONTEJO

Resultados de las observaciones macroscópicas y microestructurales

Durante la observación en el microscopio petrográfico de la lámina delgada (fig. 28), se identificaron margas calcinas con pequeños cristales de belita en el interior sin hidratar. Con un mayor aumento (fig. 28a) se observa la marga calcinada y en el interior cristales de belita que fueron reconocidos por su birrefringencia, se confirmó la información por medio de imagen (fig. 28b) y puntos de análisis en el MEB obteniendo como resultado la presencia de Ca y Si en el área de la belita y en la marga Ca, Si y Al.

En la imagen 28 (c y d) se observa a mayor aumento el detalle de los cristales de belita que es posible identificar por su forma, color de interferencia y conjunto de laminillas mezcladas que se cruzan. La coloración marrón más oscura general de la matriz se produce por minerales arcillosos (Walsh, 2007) y residuos de arcilla calcinada (fig. 28e) distribuidos por la matriz carbonatada, que se caracteriza por un color marrón rojizo-naranja de naturaleza amorfa, le dan ese color café rojizo que se aprecia en la muestra y en todos los elementos ornamentales.

Se ataco la muestra con Nital (1.5 ml de HNO_3 en 100 ml de alcohol isopropílico) dejando actuar entre 6 y 10 segundos. Obteniendo una coloración café claro en el área de belitas y gris en la matriz carbonatada (figura 28f). Por lo que corresponde a la belita (Campbell, 1999) y no se registró presencia de coloración azul para alitas.

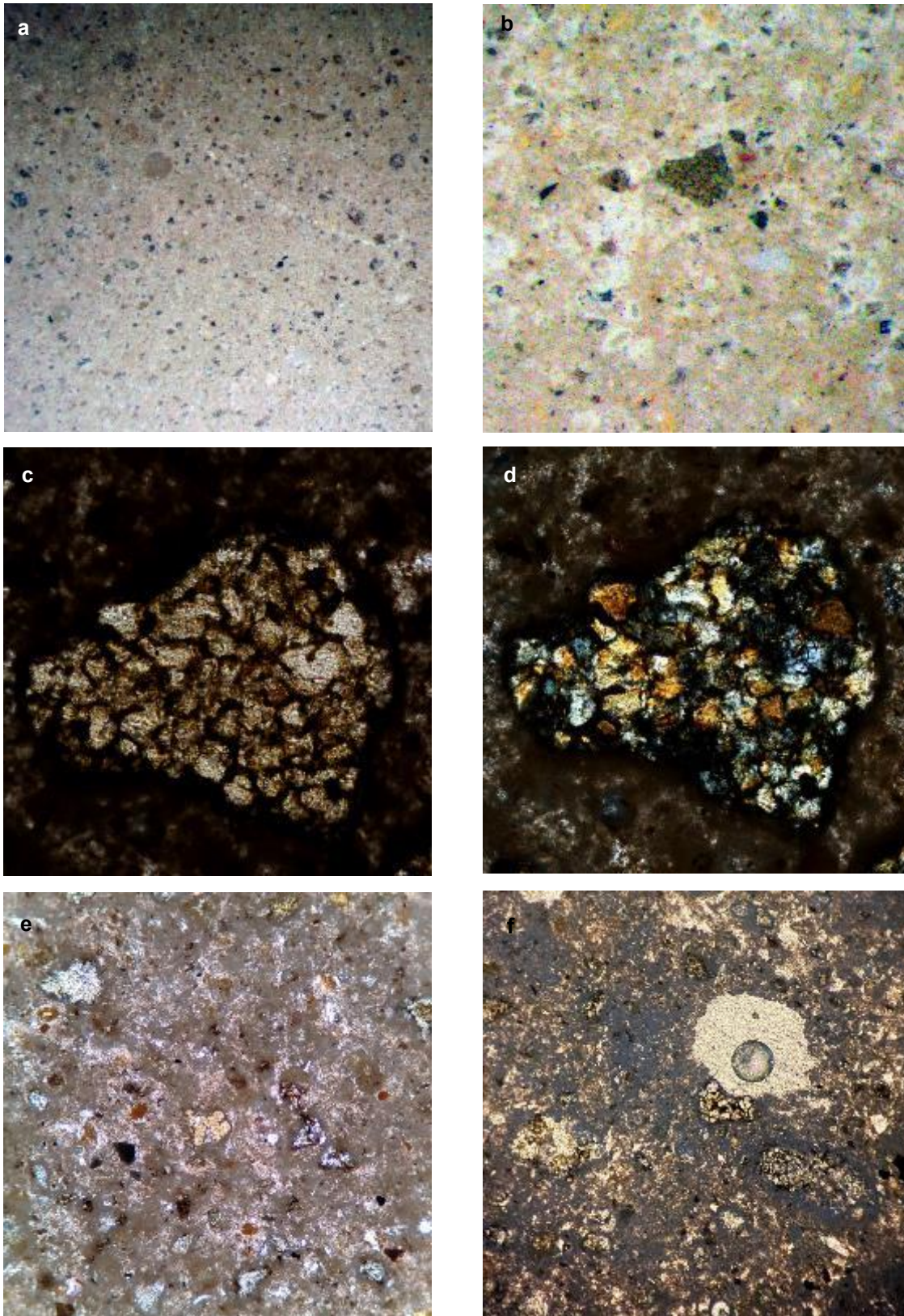


Figura 28. Microfotografía lamina delgada muestra "Montejo". a) microscopio óptico, estructura del mortero 1.25X, b) microscopio petrográfico 5X (XPL) restos de cemento sin hidratar (posibles margas) señaladas con la fecha amarilla, c) cristales de belita 20X (PPL), d) cristales de belita 20X (XPL), e) residuos de arcilla calcinada 5X (PPL) y f) ataque con Nital 5X (PPL).

Resultados SEM-EDS

Con un mayor aumento (fig. 29a) se observa en la lámina delgada pulida, la marga calcinada y en el interior cristales de belita que fueron reconocidos por su birrefringencia, se confirmó la información por medio de imagen (fig. 29b) y puntos de análisis en el MEB obteniendo como resultado la presencia de Ca y Si en el área de la belita y en la marga Ca, Si y Al.

Se analizó en fractura pulida la muestra Montejo en el SEM-EDS (figura 30) identificando que a) presenta una estructura compacta, con pocos cristales fibrosos y laminares, b) en los análisis EDS se obtuvo en mayor cantidad Ca y Si, en menor cantidad Al y Mg y trazas de S, Fe, K y Ti y c) se observa un grano residual de cemento presenta lo que posiblemente sean cristales de belita redondos de un componente de silicato de calcio con bajo porcentaje de calcio.

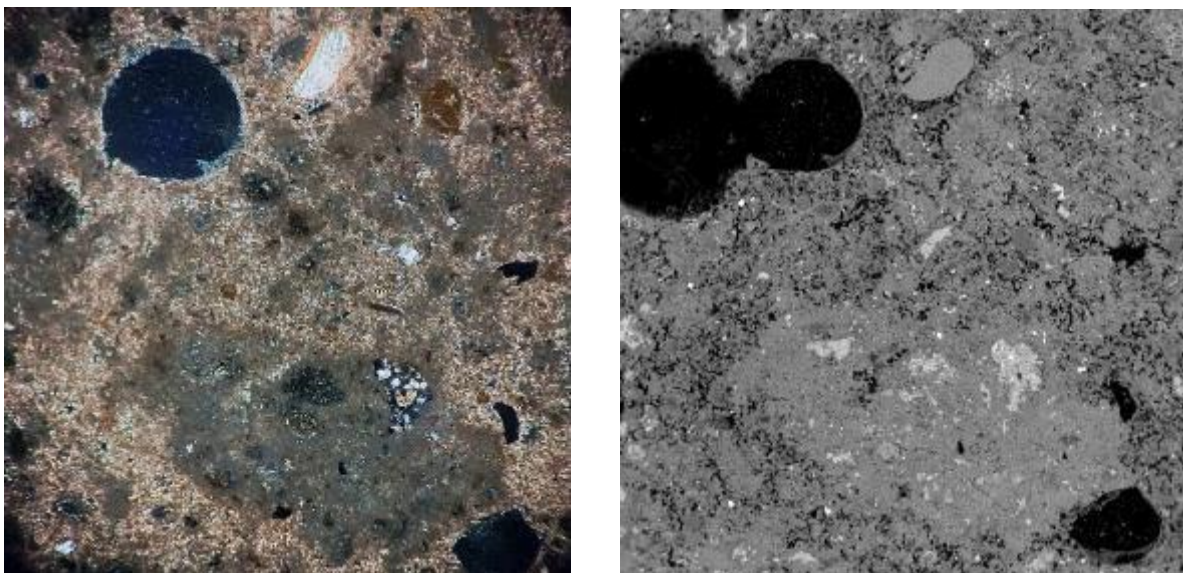


Figura 29. Microfotografía e imagen SEM de la lámina delgada. a) microfotografía 10X (XPL), de restos de cemento sin hidratar (fotografía tomada por autora, en octubre 2022 (imagen obtenida en el Instituto de Geología, UASLP) y b) Imagen SEM de la microfotografía (imagen obtenida en el Laboratorio de Geoquímica, UNAM)

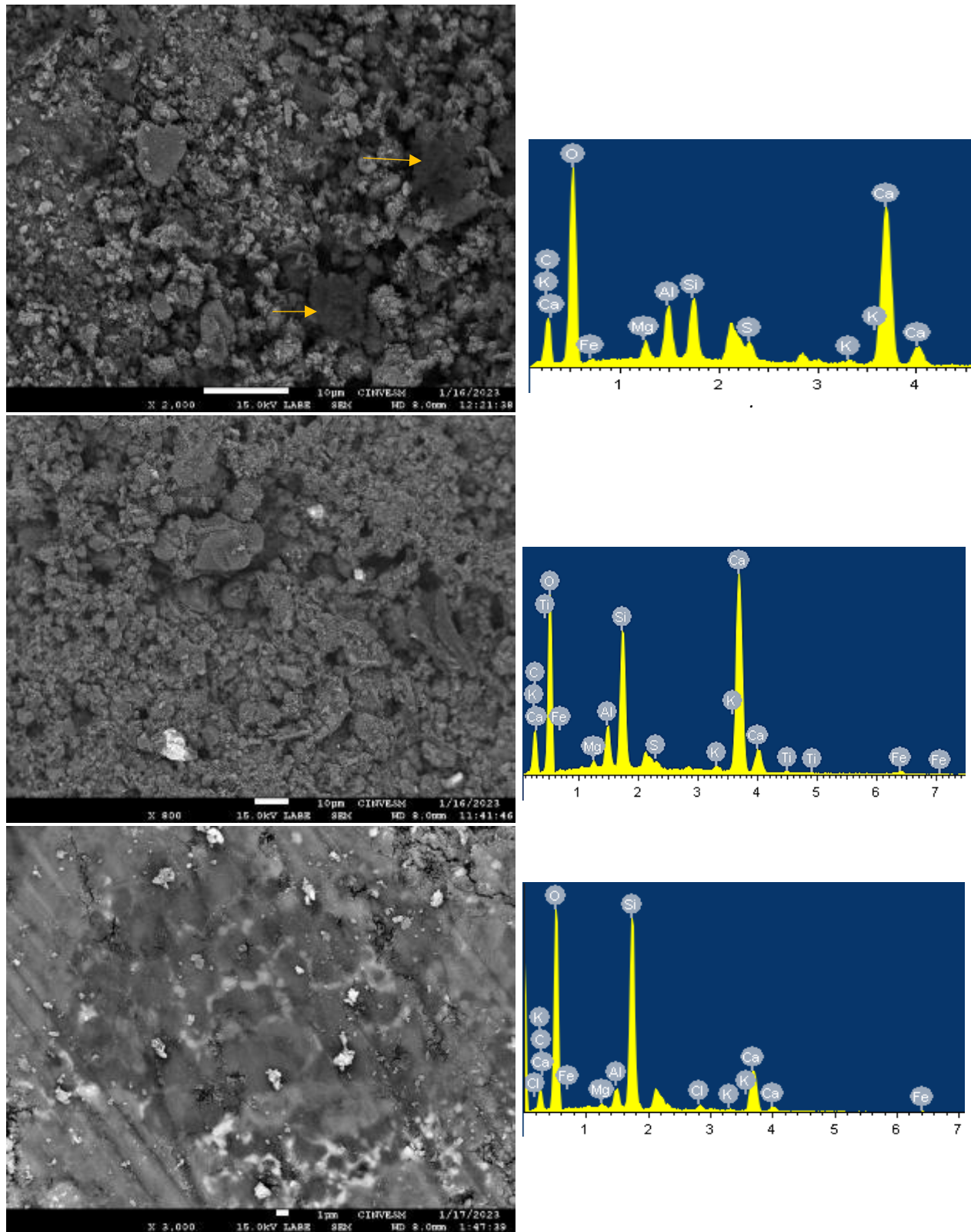


Figura 30. SEM-EDS de la muestra Montejo. a) estructura compacta con cristales fibrosos, b) estructura compacta con cristales laminares y c) cristales de belita.

Resultados de DRX

La composición mineralógica de la muestra se presenta en el siguiente difractograma de la figura 31. Se puede observar que el pico de gran intensidad es el de la calcita (Cal), seguido de picos de menor intensidad cuarzo (Cua), aragonito (Ara) y vaterita (Vat) - polimorfos de la calcita -, silicato dicálcico (β -C₂S) y Brownmillerita (C₄AF).

La calcita y vaterita constituye la parte carbonatada de la materia prima empleada (conglomerante). En cuanto al aragonito, este es uno de los tres minerales más abundantes en las rocas carbonatadas de la península de Yucatán – además de la calcita y la dolomita- (Estrada et al, 2019), por lo que es parte de las cargas del mortero al igual que la calcita, así como es raro encontrarlo entre los componentes de cemento Portland (Goings, 2002). La belita forma parte del conglomerante, al ser un producto de la calcinación. El cuarzo se puede pensar que es parte de los agregados, pero, como se presenta más adelante en los análisis de TGA/DSC, no hay una curva característica de este compuesto, por lo que corresponde al conglomerante. En cuanto a la Brownmillerita esta puede ser de la materia prima (CaCO₃) o una arcilla o pigmento agregado para obtener una coloración café rojiza.

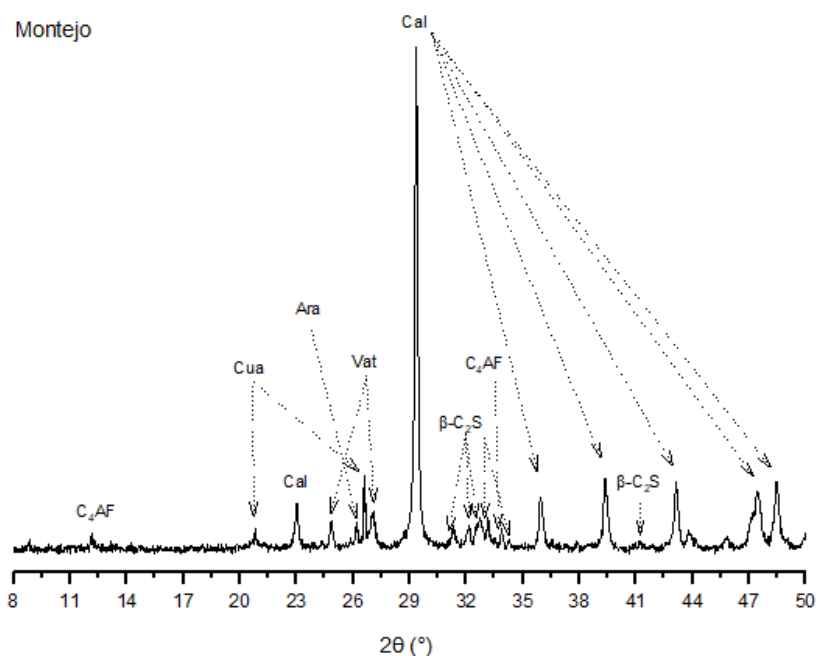


Fig. 31. Difractograma de la muestra "montejo". Elaborado por la autora, datos obtenidos en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, Instituto de Metalurgia, UASLP, 2022.

Resultado de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

En cuanto a los análisis químicos presenta similitud con las muestras CN y CH en los compuestos de CaO, y SiO₂, en cuanto a Al₂O₃ y Fe₂O₃ se aproxima más a CN. Los niveles relativamente altos de Fe₂O₃ en Montejo y CN, en comparación con las otras muestras, indica que presenta arcillas ricas en hierro. La cantidad baja de MgO puede ser que no se utilizara una caliza dolomítica como la de CN o que esta con más de un siglo de haber sido colocada, carbonatara y su contenido de MgO sea menor. Presenta menores cantidades de CaO en comparación con un CPC. De acuerdo con los valores de hidraulicidad y cementación la muestra entra en la clasificación de eminentemente hidráulica, siendo superior a los valores del cemento natural y cemento portland, pero similares a los de una cal hidráulica artificial.

Tabla. 7. Resultados de FRX, % en peso de los óxidos.

Concentración de elementos mayores										
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	HI	CI
Montejo	17.527	5.157	3.027	42.76	0.72	0.133	0.556	29.63	0.5	1.29

Fuente: Elaborado por la autora, datos obtenidos en el Laboratorio Fluorescencia de Rayos X – LANGEM - UNAM

Resultado del Análisis Térmico

De los resultados de TGA/DSC (fig. 32), muestra pérdidas de peso debido a la descomposición (pérdida de agua y dióxido de carbono) de varias fases del cemento durante el calentamiento controlado. Presenta una leve curva de reacción endotérmica entre los 50 y 200 °C corresponde a la liberación de agua evaporable que fue absorbida por el medio ambiente y la descomposición de las fases hidratadas de los silicatos y aluminatos, lo cual indica la presencia de arcillas y componentes hidráulicos. Se puede observar una curva clara en los 734°C que corresponde a una posible cal dolomítica. Sin embargo, también se encuentra entre los grados que corresponden a la descarbonatación del calcio en el compuesto hidratado (calcita). No se observa una curva de la transición polimórfica del cuarzo, por lo que se descarta la presencia de agregados

silicios. El contenido de carbonato (expresado en CaCO_3 %) es de 54.38, siendo casi el doble en comparación con las muestras de referencia, esto debido a los más de 100 años que se elaboró. El contenido de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es de 30.42%.

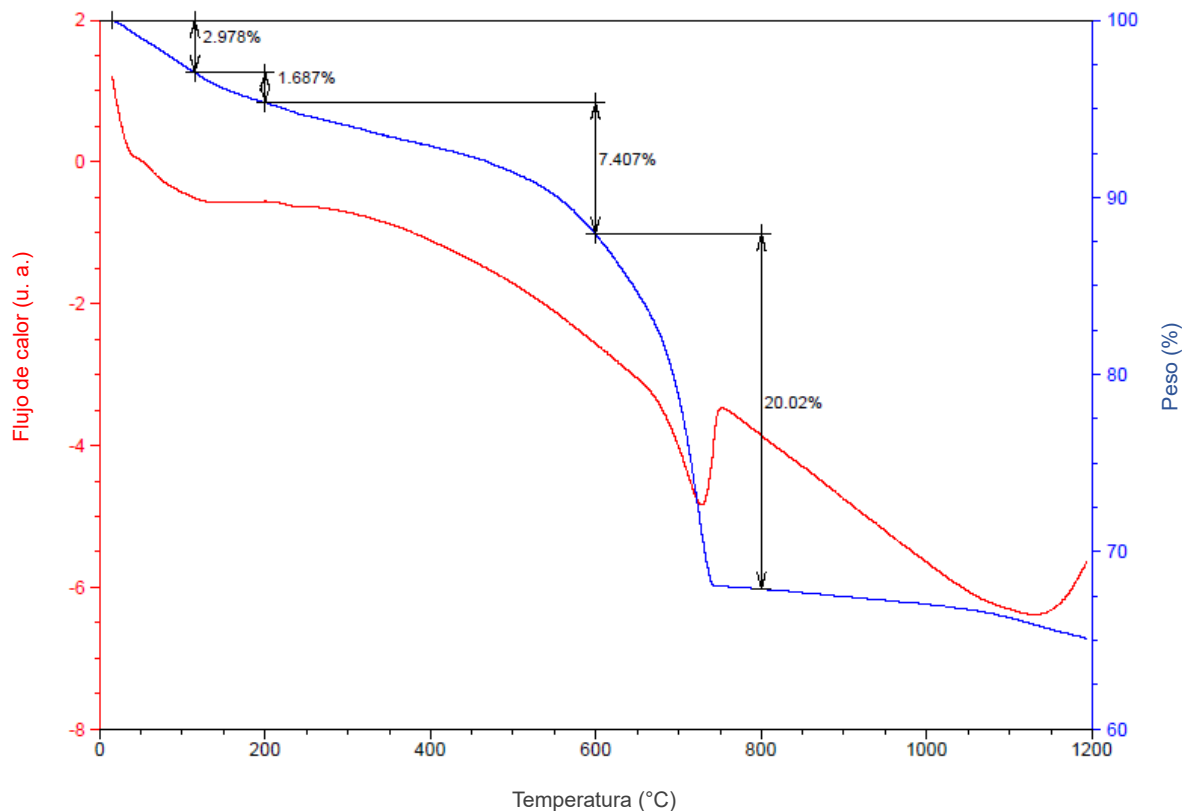


Figura 32. Curva TGA (roja) y DSC (azul) de la muestra Montejo. Elaborado por la autora.

Resultados de Espectroscopía infrarroja (FT-IR)

Los resultados de FT-IR de la muestra *montejo* se pueden ver en la figura 33, la cual se comparó con los resultados de los conglomerantes modernos. Presenta un pico intenso de la calcita (1403 cm^{-1}) en la banda de ion- $(\text{CO}_3)^{2-}$ así como bandas cercanas a la cal carbonatada ($712 - 873\text{ cm}^{-1}$) en el estiramiento $-\text{O}-\text{C}-\text{O}-$ (Šoptrajanov, 2015; Ravi, 2018; Yusuf, 2023). Se identificó el compuesto aragonito (1795 cm^{-1}) con un pico muy débil, y una banda muy poco definida que se aproxima a minerales arcillosos (3400 cm^{-1}), así también una banda de baja intensidad para los silicatos Si-O (Horgnies, Chen y Bouillon, 2013) que corresponde a un C-S-H (667 cm^{-1}) y a la presencia de K-feldespatos (1035

cm^{-1}) (Biscontin, et al., 2002) que corresponde a los silicatos del conglomerante o la muestra. Muestra ausencia de la Portlandita en la banda de intensidad de los O-H (3642 cm^{-1}). La banda de Fe-O que corresponde a C_4AF no fue posible detectarla debido a que esta es muy poco definida. Las bandas de absorbancia del clinker que se presentan muy definidas en los conglomerantes modernos, no lo son tanto para la muestra montejo.

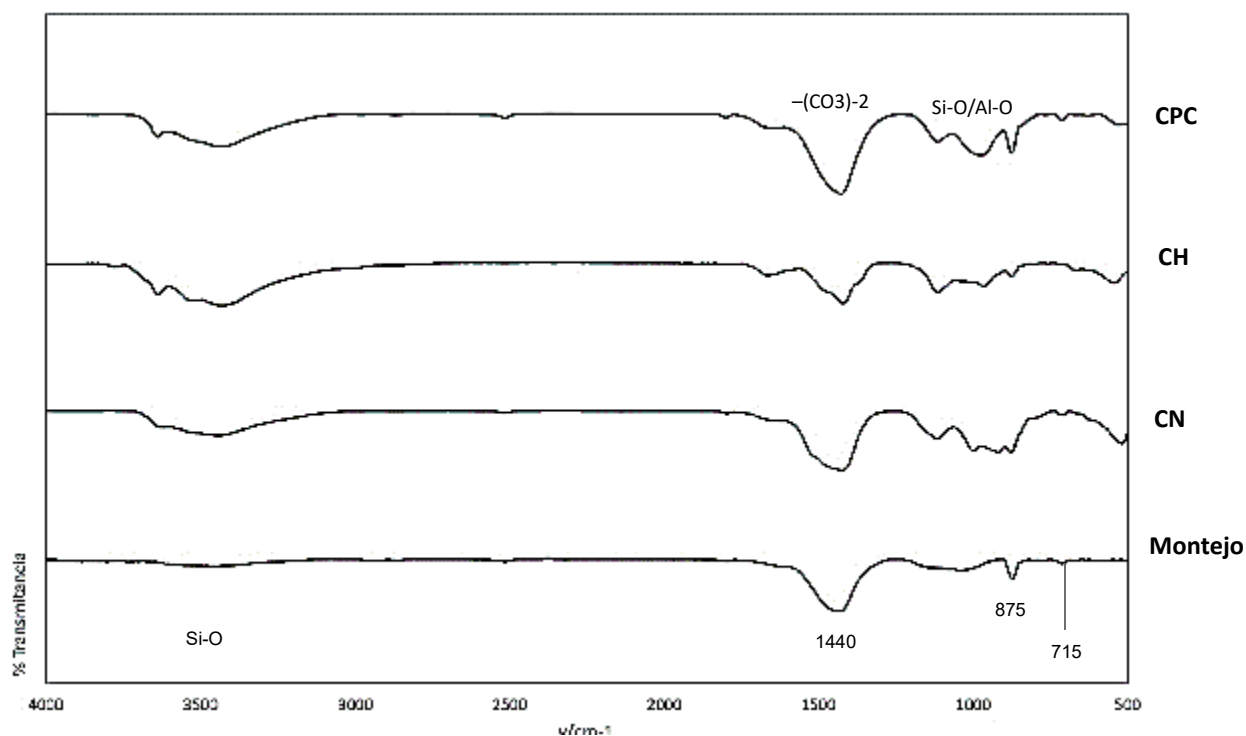


Figura 33. Espectros de FT-IR comparativos Montejo, CN, CH y CPC. Elaborado por autora en septiembre

Para conocer las proporciones se realizó una prueba de disolución, proceso en él se tritura la muestra y se da la separación dependiendo de las densidades. El resultado se presenta en la figura 34, en el cual se puede observar que la proporción de cargas es de 72% y de cemento 28%. Durante el análisis se detectaron trazas de arcillas que corresponden a fragmentos cerámicos identificados por su coloración y composición ricas en hierro.

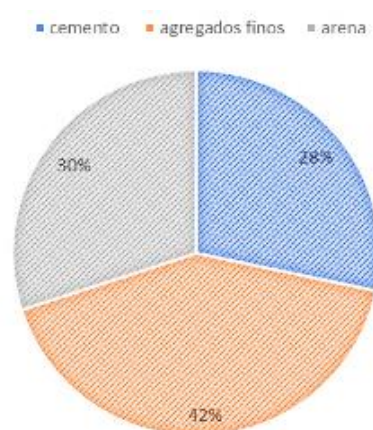


Fig. 34. Relación (en %) de las proporciones de la muestra Montejo. Elaborado por autora en junio 2023.

4.2.2. MORTEROS DE PRINCIPIOS DEL SIGLO XX, MONTEJO 495

Resultados de las observaciones macroscópicas y microestructurales

Las tres muestras (fig. 35) se observaron en el microscopio estereoscópico, presentando en general un color que va de una crema a un café claro. A simple vista cada muestra presenta diferentes características, en MCO4 es posible observar lo que parecen ser una matriz color crema con puntos negros que corresponden a agregados y granos de cemento sin hidratar, con una similitud con la muestra CN; en MCS2 no se observan esos granos, pero si los agregados y la matriz de cal, se puso énfasis en el perímetro exterior en donde se puede observar un grano de cemento sin hidratar similar a MCO4; y en MC2 es posible ver de forma clara los agregados y la matriz cementante en color café claro con puntos cremas que corresponden a los agregados, se asemeja a la muestra CPC.

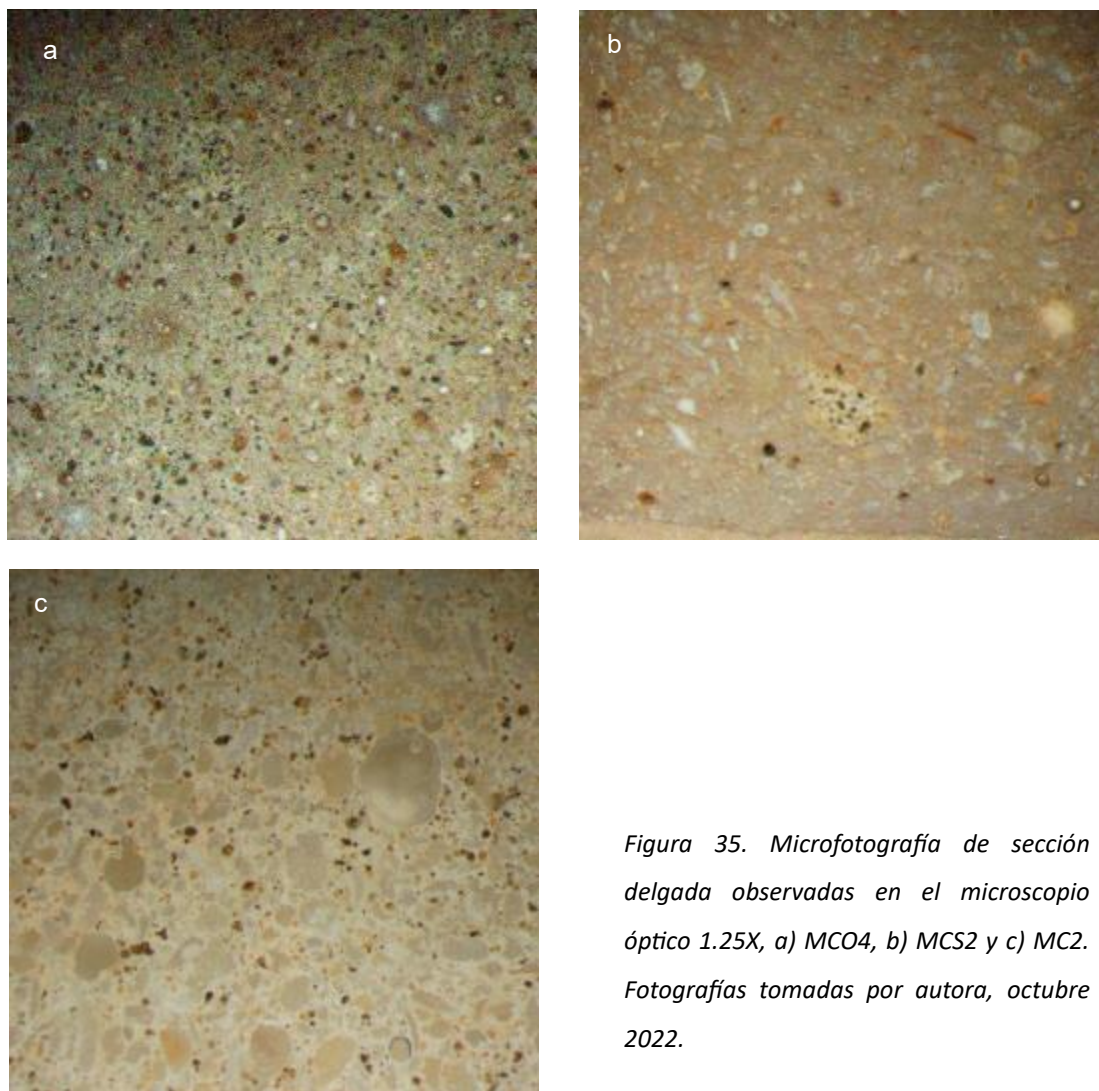


Figura 35. Microfotografía de sección delgada observadas en el microscopio óptico 1.25X, a) MCO4, b) MCS2 y c) MC2. Fotografías tomadas por autora, octubre 2022.

Solo la muestra denominada MCO4 presenta cristales de belita (Fig. 36) que es posible observar con pocos aumentos, así también en comparación con la muestra Montejo presenta una mayor cantidad. Se identifico por sus granos redondeados y agrupados como racimos de uvas.

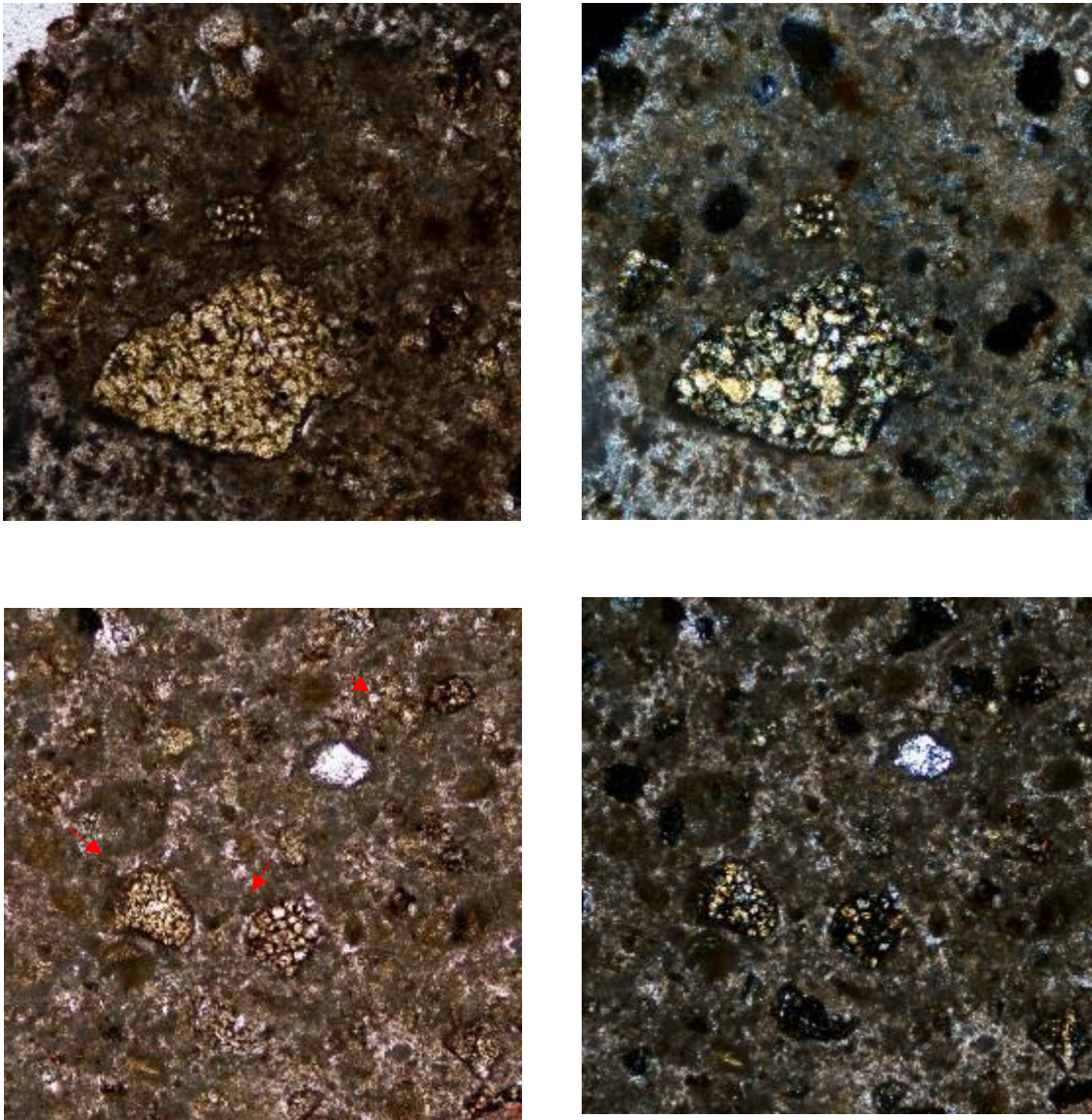


Figura 36. Microfotografía de sección delgada MCO4 a) Mayor presencia de belitas (PPL), señaladas con fecha roja y b) granos redondeados de belita.

En la muestra MCS2 hay ausencia de las fases del clinker, así como presenta algunos granos de cal que es posible observar a simple vista (fig. 37a, flechas rojas), al hacer el corte de la muestra para elaborar la lámina delgada se pudo observar que se aplicó una capa delgada de otro material (borde exterior, fig. 37a y 37b línea roja), en el que es posible observar características similares a la muestra MCO4, más compacto y ausencia de granos de cal, con la posible presencia de granos de cemento sin hidratar (37 c y d).

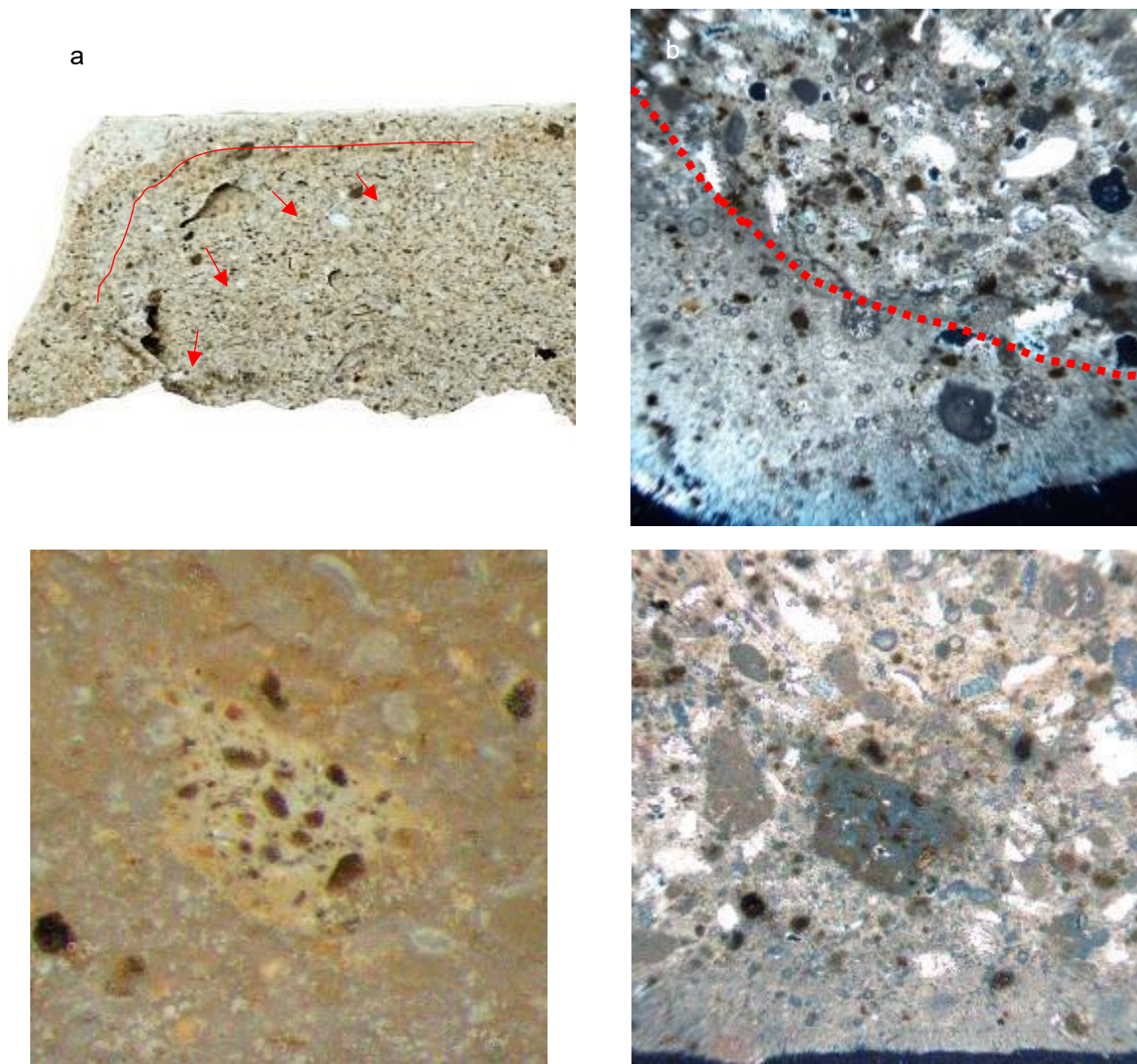


Fig. 37. Muestra MCS2. a) Corte transversal de la muestra, flechas rojas señalan los granos de cal sin hidratar, b) microfotografía del borde exterior y matriz de cal dividido por línea punteada roja, 4X (PPL), c) microfotografía microscopio óptico 4X, grano de cemento sin hidratar y d) microfotografía microscopio petrográfico 4X (XPL) del mismo grano de cemento sin hidratar. Fotografías tomadas por la autora, 2022.

En cuanto a la muestra MC2 el tamaño de las cargas es mucho mayor en comparación con el resto de las muestras (fig. 38). No sé entre mezclan las cargas con el material cementante, posibles restos de esqueletos calcáreos (bioclastos). En la matriz se observan puntos de oxido, no se observaron fases de belita/alita, pero tampoco granos de cal, aunque presenta mayor similitud con la muestra CPC. Por lo que de acuerdo con la metodología propuesta se deben realizar otros análisis para obtener más información.

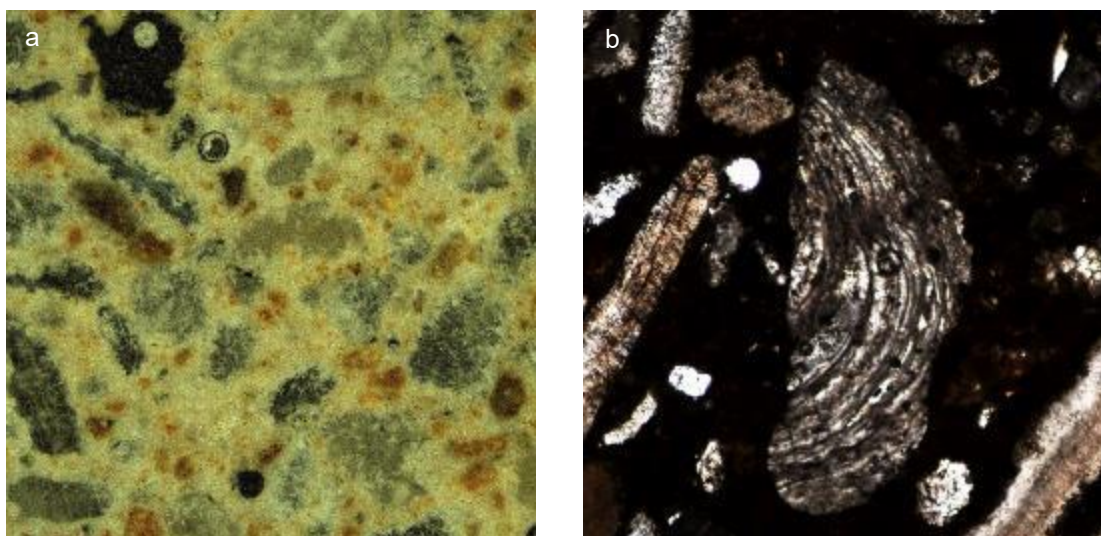


Figura 38. Microfotografía de sección delgada MC2. a) Se diferencian las cargas de la matriz cementante 5X (PPL) y b) posibles bioclastos 5X (PPL). Fuente: fotografías tomadas por la autora, 2022. Instituto de Geología de la UASLP.

Resultados SEM-EDS

Para confirmar lo observado en el microscopio petrográfico, se analizó la muestra pulida (fig. 39a) con recubrimiento de oro/paladio (Au/Pd), en el SEM-EDS, obteniendo un alto contenido de de Ca y Si, en menor cantidad Al, Fe, Mg y Na, tiene una similitud con la muestra CPC debido a la presencia de sodio. Presenta también una composición compacta (39b) con posibles cristales laminares; se analizó la lámina delgada de MCO4 (fig. 39c) con recubrimiento de carbón, por medio de imagen y por puntos de análisis en el que se confirma la presencia de belita (Ca, Si y Al).

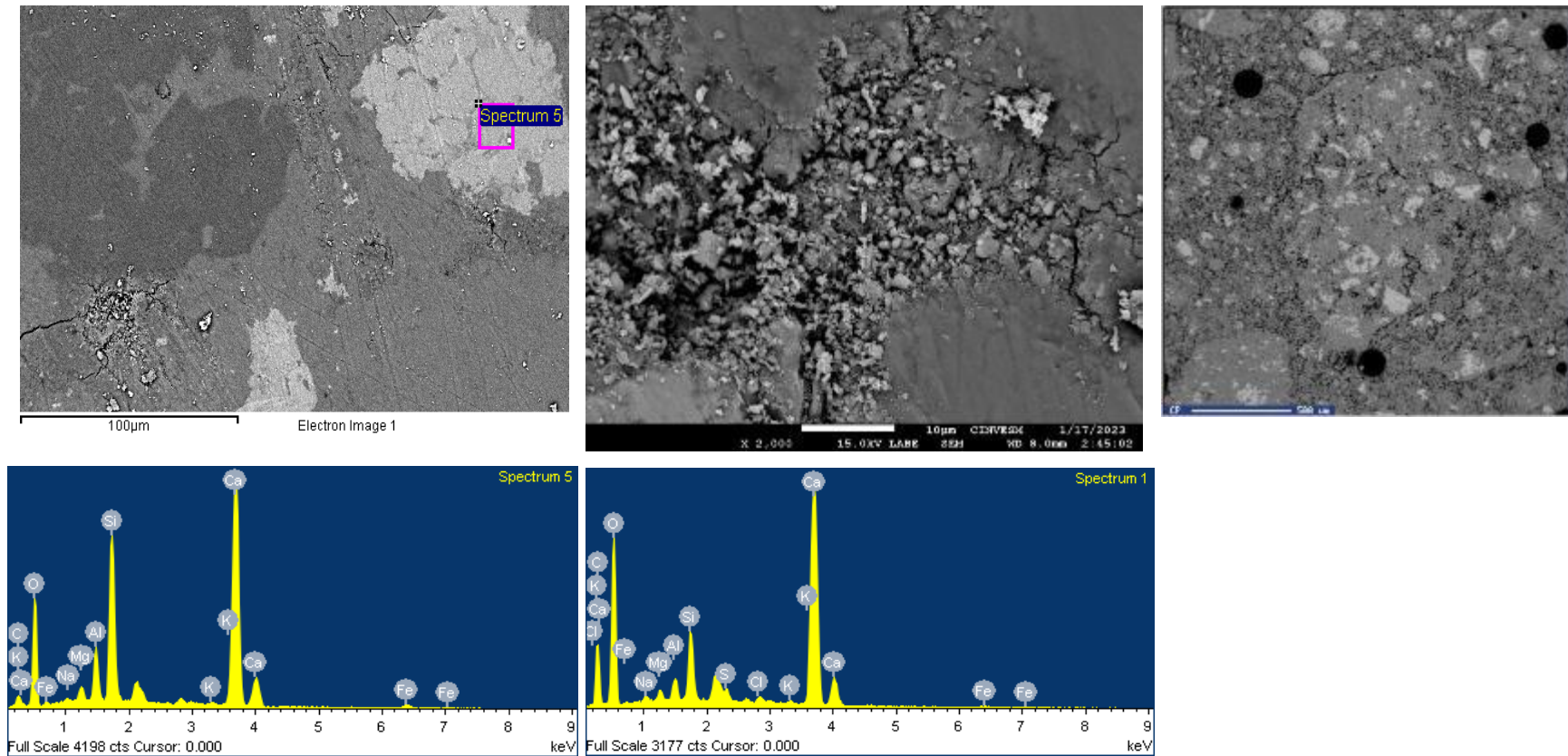
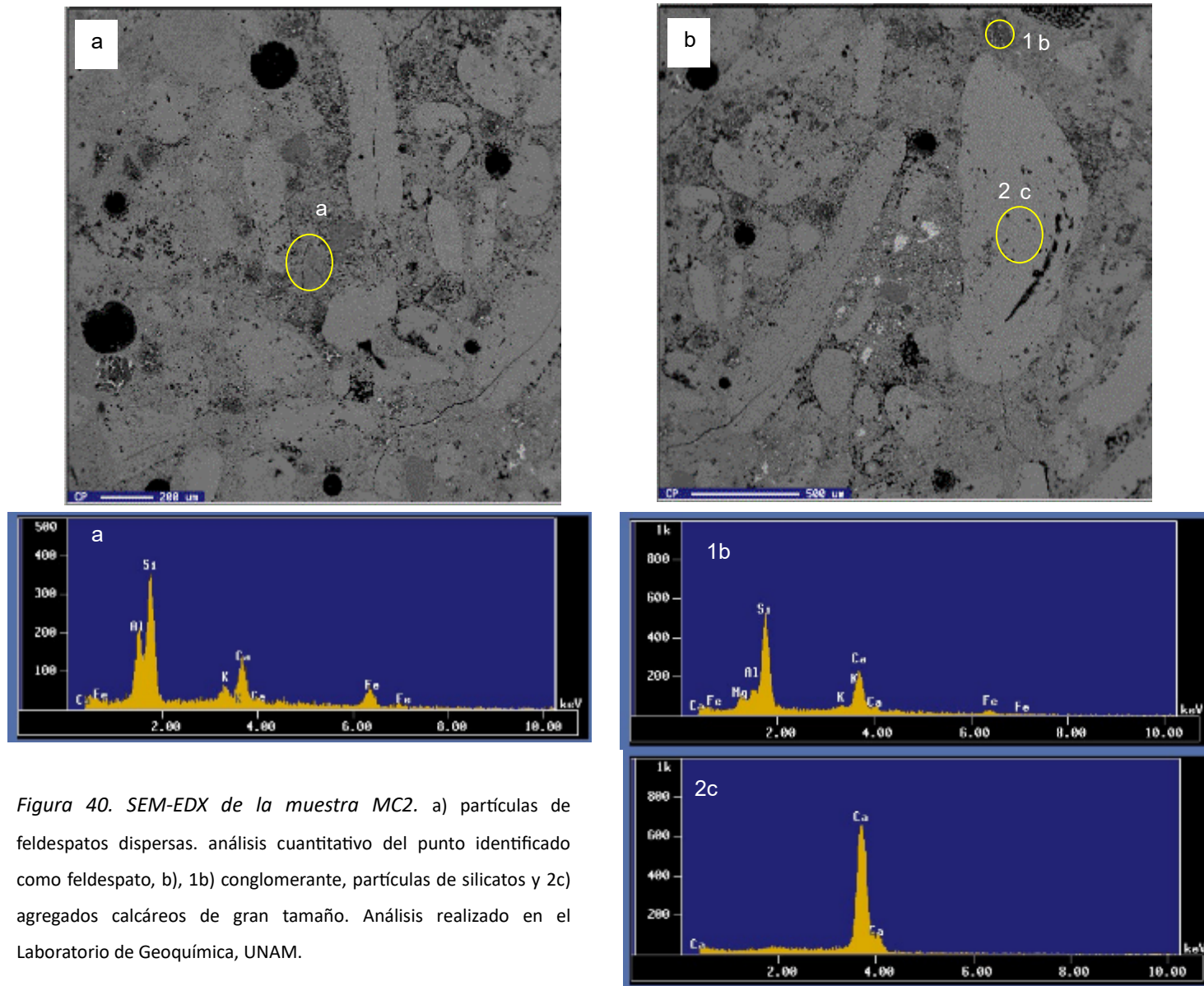


Figura 39. SEM-EDS de la muestra MCO4. a) grano residual de cemento, belita, b) estructura compacta y c) imagen de lámina delgada de un grano de cemento sin hidratar. Fuente: a y b, imagen y análisis realizado en el Laboratorio de Nacional de Nano y Biomateriales (LANNBIO) Cinvestav-Unidad Mérida y c) imagen y análisis realizado en el Laboratorio de Geoquímica, UNAM



En cuanto a la muestra MC2 se analizaron dos puntos importantes para conocer la composición de la matriz (fig. 40 a y 1b) obteniendo Si, Al en mayores cantidades y calcio en menores, con trazas de Fe, K y Na (feldespatos y partículas de aluminosilicatos de calcio); y las cargas (fig. 40 2c) el compuesto mayoritario es el calcio, siendo agregados calcáreos de mayor tamaño los que predominan.

Para la muestra MES2, se analizó solo el borde exterior que presenta diferente estructura y en el cual se observaron fragmentos de lo que puede ser un conglomerante hidráulico (fig. 41). Para comprobar si es el mismo conglomerante usado en MCO4 se analizó la muestra en el MEB (fig. 49) por medio de puntos de análisis, obteniendo los siguientes compuestos, Ca, Si, Al, Mg, S y P.

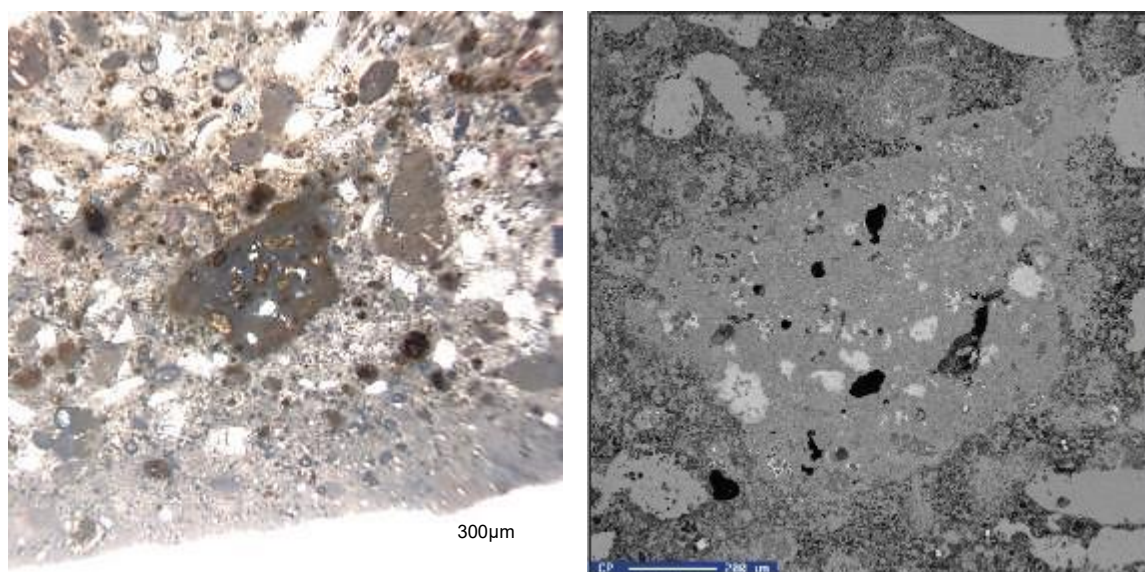


Figura 41. Microfotografía e imagen SEM del borde exterior de la muestra MES2. a) Microfotografía 5X (PPL) del borde exterior de la muestra y b) Imagen de SEM 10X. Fuente: a) Imagen tomada en el Instituto de geología, UASLP. B) imagen obtenida en el Laboratorio de Geoquímica, UNAM.

Resultados de Difractometría de Rayos X (DRX)

Los resultados de la composición mineralógica de DRX se presentan en la figura 42. Las tres muestras (MCO4, MCS2 y MC2) presenta un pico de gran intensidad de calcita, la cual corresponde al conglomerante y la carga; así como un pico de menor intensidad que corresponde al polimorfo del CaCO_3 , aragonita, presente en las cargas¹⁷ y como ya se menciono es raro encontrarlo en los cementos portland. Los siguientes elementos identificados corresponden a agregados hidráulicos.

En la muestra MCO4 presenta silicato bicalcico (material hidráulico) así como hematita el cual puede ser parte de las impurezas de la calcita o ser una fase mineral presente en las cenizas volantes (agregados puzolánicos).

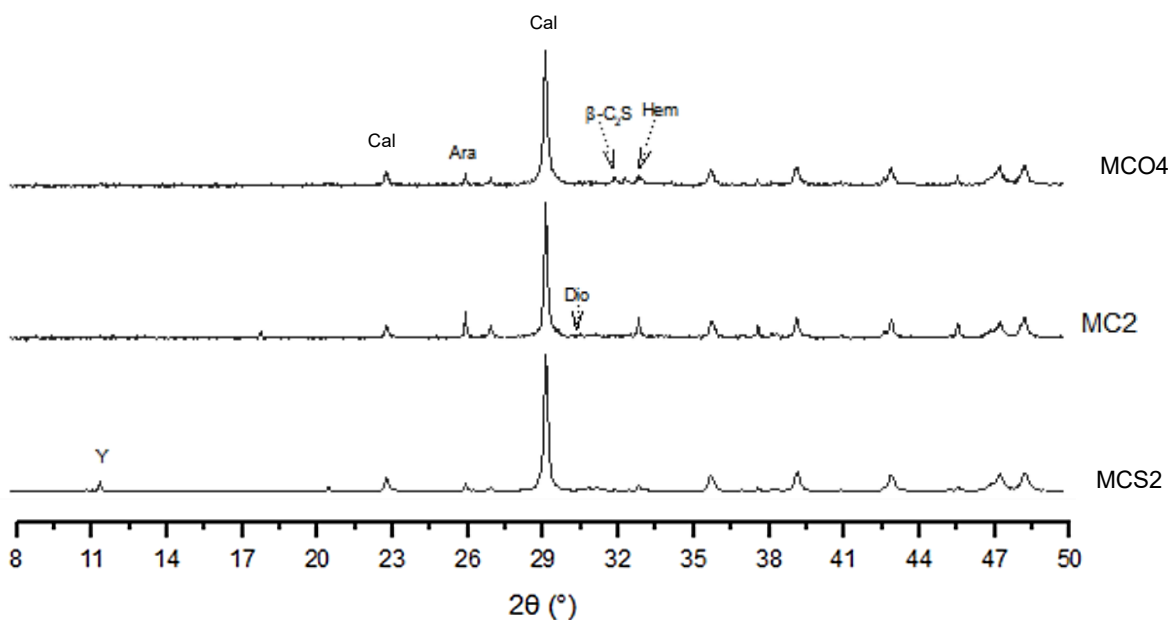


Figura 42. Difractograma comparativo de las muestras MCO4, MCS2, MC2

Nota: Cal (Calcita), Ara (Aragonito), Dio (Diopsido), Hem (Hematita) Cua (Cuarzo), $\beta\text{-C}_2\text{S}$ (silicato bicálcico), Etr (Etringita), CASH (hidratos de aluminosilicatos de calcio), Ca(OH)_2 (Portlandita). Elaborado por la autora.

¹⁷ “Las rocas calizas de Yucatán están compuestas principalmente de calcita, aunque los sedimentos que las conformaron originalmente también contenían dolomita y aragonita...” (Estrada Median, et al., 2019)

La muestra MC2 presenta picos de baja intensidad de diópsido, un mineral que pertenece a los piroxenos, un componente hidráulico, usado como puzolana natural (Van Balen, 1999) y como parte de los agregados, por lo tanto, se aproxima a una cal hidráulica.

Por último, está la muestra MCS2, la cual presenta un pico de menor intensidad de yeso, debido a que es muy bajo se deben de realizar otros análisis para comprobar su presencia en el mortero.

Resultados de la caracterización geoquímica con Fluorescencia de rayos X (LFRX)

En cuanto a los análisis químicos (tabla 8) las tres muestras se compararon con los conglomerantes modernos. Todas las muestras tienen una similitud en la cantidad de CaO. La muestra MCO4 se asemeja en concentraciones a CPC. En cuanto a la muestra MES2 las cantidades menores de SiO₂ y Al₂O₃ indican que es pobre en materiales hidráulicos, al igual que MC2. De acuerdo con los valores de hidraulicidad y cementación solo la muestra MCO4, entra en la clasificación de moderadamente hidráulica para el índice de hidraulicidad y eminentemente hidráulica para el índice de cementación; para la muestra MCS2, se clasifica como débilmente hidráulica; y la muestra MC2 como moderadamente hidráulica.

Tabla. 8. Resultados de FRX, % en peso de los óxidos

	Concentración de elementos mayores									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	LOI	HI	CI
MCO4¹⁸	14.645	3.659	1.63	46.309	1.429	0.545	0.516	28	0.383	0.95
MCS2	6.896	2.272	1.19	47.491	1.419	0.75	0.407	39.29	0.187	0.45
MC2	8.806	2.865	1.476	48.213	1.7	0.296	0.333	35.93	0.233	0.57

¹⁸ Análisis semicuantitativo

Resultados del Análisis térmico (TGA/DSC)

Los resultados de TGA/DSC se puede observar en la figura 43. Las tres muestras presentan una curva en los 734°C que corresponde a una cal dolomítica. Sin embargo, también se encuentra entre los grados que corresponden a la descarbonatación del calcio en el compuesto hidratado. Presenta una leve curva de reacción endotérmica entre los 50 y 200 °C corresponde a la liberación de agua evaporable que fue absorbida por el medio ambiente y deshidratación del yeso, en particular para la muestra MCS2, la cual presenta un pico endotérmico entre los 100 y 150 de la deshidratación del yeso identificado en DRX, por lo que se descarta el que sea un mortero hidráulico y si un mortero bastardo. El contenido de carbonato (expresado en CaCO_3 %) es de 59.97 MCO4, 75.25 MCS2 y 70.15 MC2. Y el contenido de Portlandita (expresado en $\%\text{Ca}(\text{OH})_2$) es de 30.25 MCO4, 32.27 MCS2 y 23.43 MC2. Los resultados del contenido de hidróxido de calcio están relacionados con la humedad ambiental y el tiempo que llevan expuestos a la intemperie.

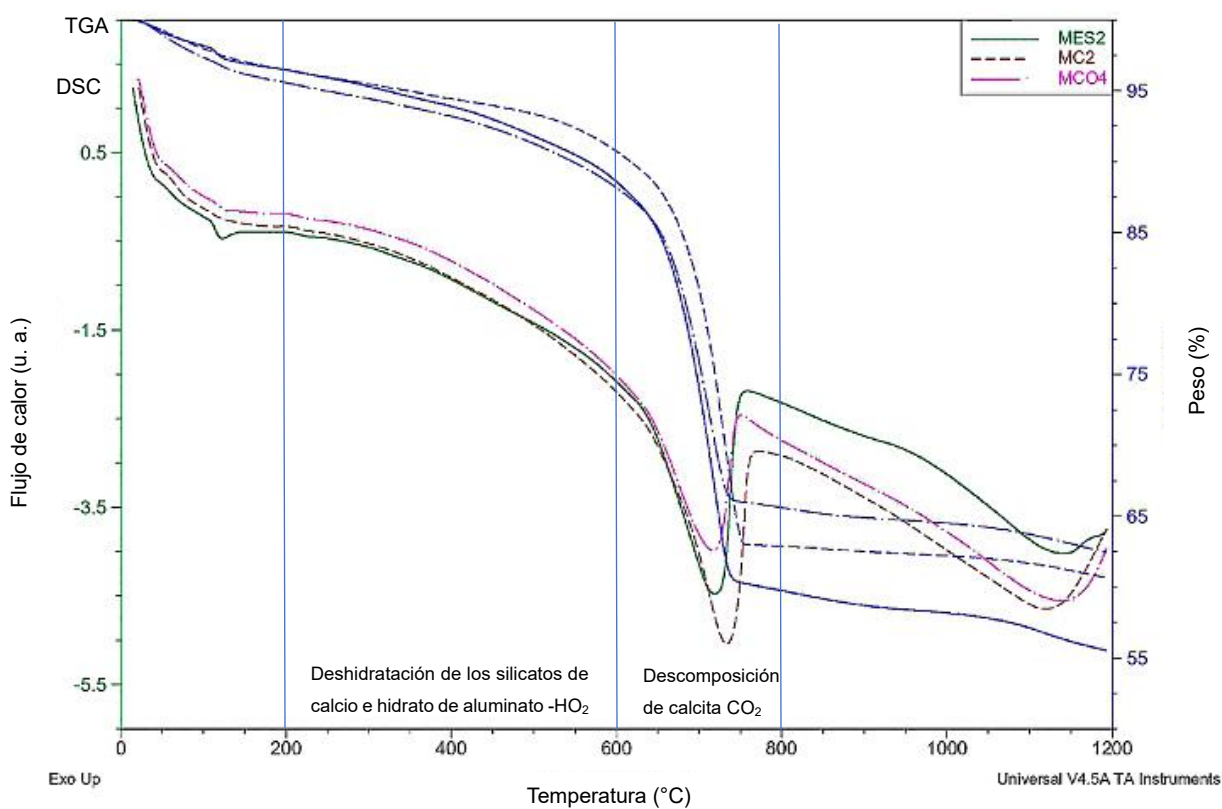
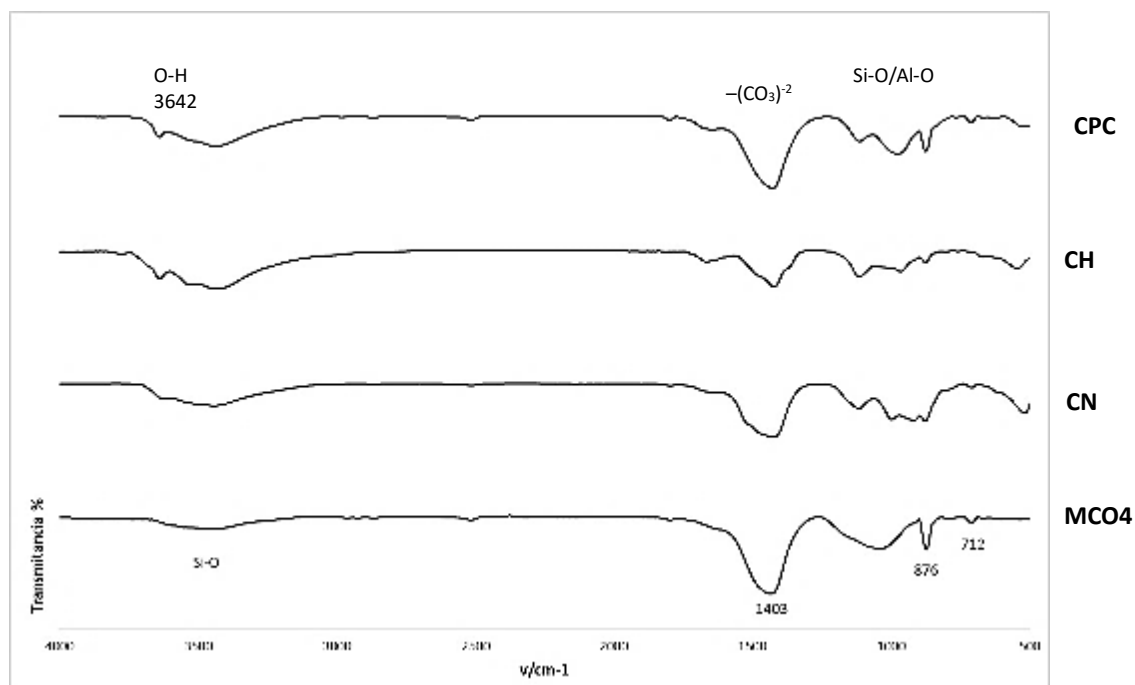


Figura 43. Curvas de TGA-DSC comparativas de las muestras MCO4, MCS2 y MC2. Elaborado por autora, 2023.

Resultados Espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FT-IR)

Como se puede observar en la figura 44, se obtuvieron patrones espectrales muy similares y se interpretaron de forma general de la siguiente manera. Las tres muestras presentan un pico intenso de la calita en la banda de ion $-(CO_3)^{2-}$ o en el estiramiento $-O-C-O-$ (1403 cm^{-1}), así como bandas cercanas a la cal carbonatada ($712 - 873$, $874 - 871\text{ cm}^{-1}$), se identificó el compuesto aragonito (1795 cm^{-1}). La muestra MCO4 presenta una banda muy poco definida que se aproxima a minerales arcillosos (3400 cm^{-1}) así también una banda de baja intensidad que corresponde a un C-S-H (667 cm^{-1}) las cuales cambian según el proceso de polimerización de la sílice (relación de calcio/silicio). (Horgnies, Chen y Bouillon, 2013) excepto en MES2. Aunque en las tres muestras se observan picos de variada intensidad en la región de $2010 - 500\text{ cm}^{-1}$ (fases clinker) no se identificaron debido a que predomina calcita.



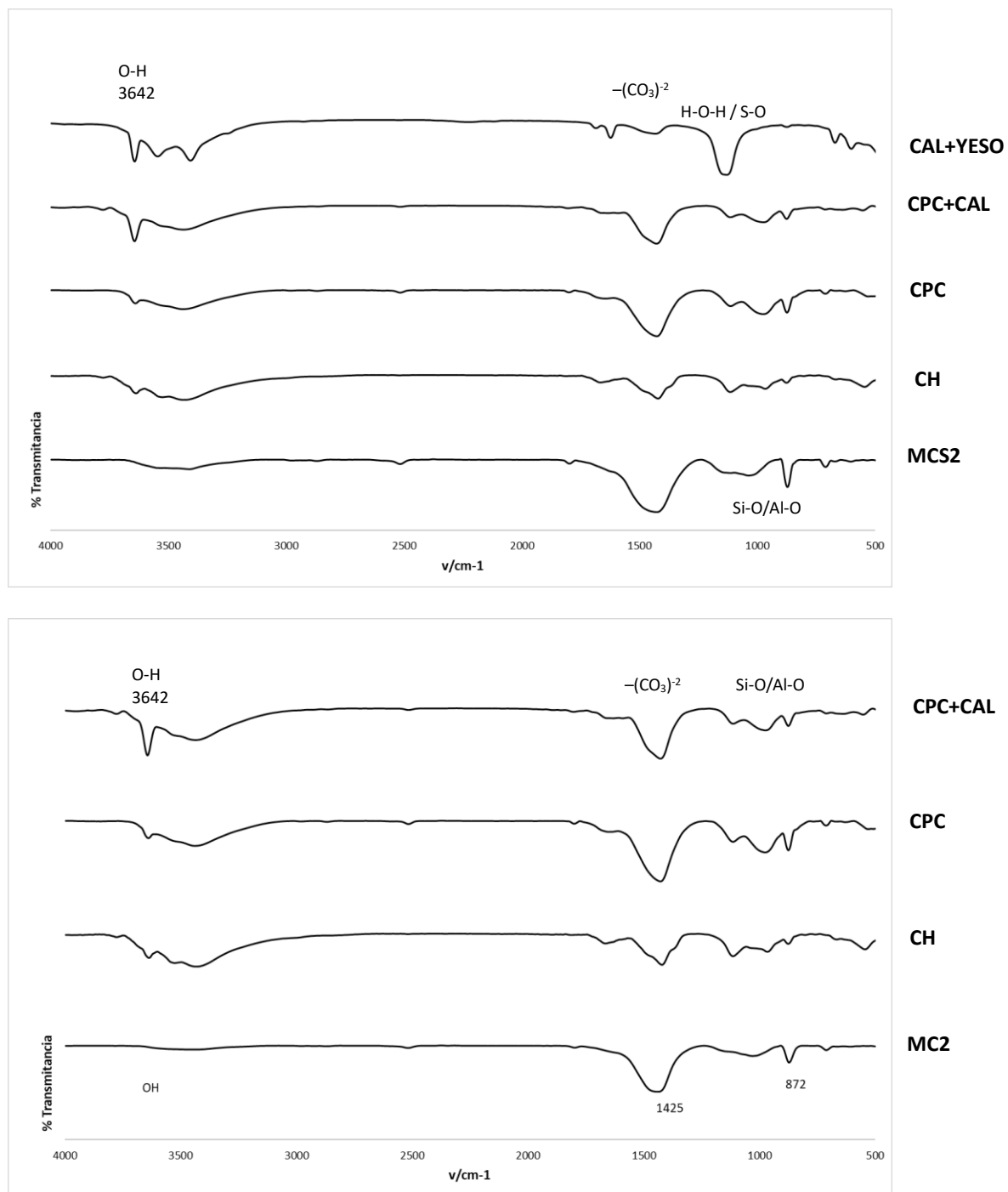


Figura 44. Espectros comparativos de FT-IR del MCO4, MCS2, MC2, con respecto a conglomerantes modernos. Elaborado por la autora, agosto 2023.

4.3. DISCUSIÓN SOBRE LOS MORTEROS HISTÓRICOS

Con base en los resultados de los análisis realizados se puede establecer que solo dos morteros, Montejo y MCO4, presentan las características de un material hidráulico, por los niveles altos de CaO y SiO₂ en FRX, la presencia de silicato dicálcico en DRX, en el microscopio petrográfico se observaron las belitas no hidratadas, así como posibles margas calcinadas características de los cementos naturales. Sin embargo, MCO4 presenta una mayor cantidad de belitas, en comparación con la muestra Montejo y CN, por lo que de acuerdo con Walsh (2007), una mayor cantidad de belitas corresponde a un cemento portland histórico. Son similares a las muestras de materiales modernos de CN, CH y CPC, en cuanto a sus propiedades hidráulicas. El material de referencia de la cal hidráulica presenta altos contenidos de CaO y SiO₂, pero también de Al₂O₃ por sus agregados puzolánicos, lo que la hace un conglomerante hidráulico artificial.

Una característica importante que se encontró en la muestra Montejo son los granos de color marrón a rojo en la lámina delgada, así como en la prueba de disolución, los cuales corresponden a un óxido de hierro (arcilla calcinada) que se agregó intencionalmente como un tipo de puzolana, aportando hierro en mayor cantidad al conglomerante y otorgando el color marrón rojizo al mortero. El agregado arcilloso es lo que diferencia y lo hace único, en comparación de los morteros de la casa Montejo 495, siendo evidente sus diferencias inherentes en la composición de la mezcla de la pasta y agregados. El uso de la arcilla cocida triturada, como aditivo mineral, se debe a sus propiedades físicas y fisicoquímicas al otorgar al mortero un menor peso a diferencia de solo usar arena. Además, gana elasticidad y tiene un mejor comportamiento ante las cargas mecánicas. Dependiendo del grado de calcinación es posible que sea creen enlaces químicos entre el hidróxido de calcio y la cerámica (Moropoulou, et al., 2009). Esta es una solución técnica para obtener una piedra artificial de gran formato resistente a los álcalis (Tokyay, 2016), y a la vez ligera, así como menor uso de conglomerante y agregados (Santos, Santos y Veiga, 2019) lo que le ha otorgado un buen estado de conservación.

Aunque en composición son similares Montejo y MCO4 la diferencia de la cantidad de belitas encontradas, indica que hubo un mayor grado de calcinación en el proceso de fabricación del cemento, pero sin llegar a la formación de alitas, ya que al realizar el ataque de la muestra con Nital no hubo coloraciones azules que indicaran la presencia

del silicato tricálcico. Aunque con la adición de arcilla calcinada es posible que difuminara y disminuyera la cantidad de belitas.

En cuanto a las características químicas y mineralógicas de MC2 y MCS2, al contener niveles bajos de silicio y aluminio, las deja fuera de los materiales hidráulicos, así como presentan una mayor carbonatación debido a la cantidad de cal pura para su elaboración. En particular la muestra MCS2 al observar en el microscopio grumos de cal y ausencia de fases hidráulicas como belita o alita, aunque como ya se mencionó, en el borde exterior presenta una matriz similar a MCO4, siendo confirmado con SEM-EDX. Colocar un recubrimiento o capa final de cemento sobre la cal, fue con el fin de otorgar mayor duración o como capa de protección.

La muestra MC2 presenta una mayor cantidad de agregados de calcita, compuesta de tamaño fino a fósiles medianos y plagioclasas, no se encontraron restos de fases hidráulicas residuales en la matriz más si un color marrón oscuro en la matriz propio de materiales hidráulicos. El agregado identificado como dióxido ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) corresponde a un material puzolánico. El cual difiere completamente en estructura con respecto a los otros morteros, al contener una mayor cantidad de agregados que no se homogeneizan con el conglomerante.

Los análisis compositivos de SEM-EDS de los morteros Montejo y MCO4 muestran un alto contenido de calcio y sílice, con trazas de aluminio, magnesio y hierro. Presentando minerales del tipo de las plagioclasas, feldespatos, cuarzo y silicatos de calcio (CaSiO_3) como la wollastonita, que corresponde a una caliza impura metamorfizada. La muestra *Montejo* presentó, además, una proporción menor de arcilla calcinada (fuente de Si, Al y Fe).

Los análisis térmicos de los morteros mostraron descomposiciones térmicas similares y consistentes indicando que, en composición, todos presentan una descarbonatación del calcio en el compuesto hidratado en un rango de 750 a 775°C, presentando un contenido de carbonato similar en las muestras Montejo y MCO4 (54 – 59%) y MC2 y MCS2 mucho mayor (70 – 75%); y una leve curva de compuestos hidráulicos. Excepto por MCS2 la cual presenta un pico indicativo del uso de sulfato de calcio hidratado. Los análisis térmicos suelen ser muy precisos para casi todos los materiales, pero en el caso de los morteros, que se analizaron sin separar los agregados, suelen ocurrir interferencias del

material predominante, en este caso la calcita, ocultando las fases hidráulicas que están en menor proporción.

Por lo que se determina que el mortero usado para la piedra artificial ornamental de la Casa Montejo, -elaborada a partir de molde, para después ser colocada en el sitio- corresponde a un mortero hidráulico de cemento natural con agregados puzolánicos de arcilla cocida. La información obtenida de los análisis coincide con la información documental en la que se señala el uso de cemento natural para elaborar piedra artificial. El mortero usado para la piedra artificial de Montejo 495 corresponde a un conglomerante hidráulico de cemento natural (bajo en dolomías) o cemento portland histórico. En cuanto al aplanado, MCS2, este es un mortero de cal con yeso y una capa delgada del mismo mortero aplicado en MCO4, caracterizada por los trozos de cal sin hidratar que no fue posible observar en las otras muestras. En cuanto a MC2, difiere en composición química y mineralógica con respecto a los otros morteros, ausencia de fases de Clinker y grumos de cal. Al comparar con una muestra conocida, en la que se utilizó cemento, cal y arena, suele ser muy similar en composición química y mineralógica. Sin embargo, con los análisis llevados a cabo no fue posible determinar con claridad si se trata o no de un mortero bastardo. Mas si de un conglomerante débilmente hidráulico (con algunas impurezas de sílice, alúmina y hierro) con agregados calcáreos. Este mortero coincide con la descripción encontrada en el archivo en el que utilizan una mezcla de cemento, cal y agregados calcáreos para elaborar ornamentos. Una práctica que actualmente se realiza, al mezclar conglomerantes para hacer un mortero más trabajable o para “reforzarlo”.

Recomendaciones

Evitar el uso de cemento portland, debido a que como se vio en las pruebas de porosidad y compresión, este es mucho más duro y menos poroso, por lo que solo a la larga ocasionara daños, además en composición no es compatible. Se recomienda para la Casa Montejo, el uso de un cemento natural pigmentado con óxido de hierro o polvo de ladrillo (previas pruebas) para lograr el color adecuado para los morteros de sustitución. En el caso de la Casa Montejo 495, para los elementos ornamentales se puede ocupar un cemento natural con cantidades menores en óxidos de hierro, para evitar el color café rojizo, o una cal hidráulica natural, realizando pruebas previas.

4.4. IDENTIFICACIÓN DEL SIGNIFICADO CULTURAL DE LA PIEDRA ARTIFICIAL

El significado cultural ha tenido interpretaciones que han cambiado a lo largo de los años, es en las Cartas Internacionales donde es posible encontrar estas transformaciones. Primero estuvo referido a la información que puede proporcionar un monumento (Carta de Atenas de 1931 y Carta de Ámsterdam 1975), gradualmente se incorporaron aspectos intangibles como cualidades de memoria o simbolismo (Carta de Burra 1979), después el significado recayó en la preservación material para comprender y conocer su historia y “enaltecer” su significado (Carta de Nara 1994), pero la conservación *per se* y las cualidades intangibles ya no son suficientes para la interpretación del significado cultural y es la carta de Ename (2008) la que hace una interpretación integral en la que señala que debe de transmitirse e interpretarse correctamente. Para ello se requiere su determinación en el campo de la ciencia de la conservación, “investigación aplicada dirigida a la preservación de los bienes culturales tomando en consideración sus significados documentales y culturales”, para que el significado que se transmita sea veraz, por lo tanto, los estudios llevados a cabo deben de ser multidisciplinarios.

El significado cultural de la piedra artificial se ha identificado en tres aspectos, el primero en su razón de ser desde el momento de elaboración hasta nuestros días, en el que se ha reconocido que, a pesar de tener una influencia francesa, en el diseño y materiales, se buscó innovar al no recurrir a las técnicas tradicionales de construcción, utilizando morteros modernos para su época en la ornamentación. Estas formas diferentes de utilizar los morteros demuestran que no solo era algo estético, si no también había técnica y diseño. El uso del cemento natural en la elaboración de los elementos ornamentales demuestra la innovación en el uso de técnicas constructivas decorativas usando los mejores materiales que ofrecía para esa época.

El segundo aspecto se fundamenta en los valores patrimoniales, ambas casas conllevan valores tangibles e intangibles. Los atributos tangibles abarcan la ubicación, diseño, colores, técnicas constructivas, materiales, estética y equipamiento técnico. Los valores intangibles están relacionados con lo científico, social, cultural, histórico y espiritual, pero también incluyen el genio creativo (ICOMOS Comité Científico Internacional para el Patrimonio del Siglo XX, 2011) en cuanto al uso de materiales modernos y el diseño de formas complejas. Reconocer estos valores y significados puede ayudar a equilibrar la

conservación a futuro de un bien cultural (Jokilehto, 2017). Es importante tener en cuenta que los bienes culturales son objetos de arte complejos y pueden contener más de un significado o valor y que estos a través del tiempo podrán ir cambiando, por factores como el lugar, las personas o nueva información obtenida del objeto. Por ejemplo, el valor de investigación puede ser encontrado en el valor histórico, debido a que contienen los antecedentes históricos y tecnológicos que otorga una fuente importante de información sobre los materiales empleados en un bien cultural.

El tercer aspecto se encuentra en las ciencias de la conservación sobre los materiales constitutivos de la piedra artificial y que ayudaran a dar sustento a las intervenciones. Los desafíos de la intervención de la piedra artificial patrimonial engloban una problemática que debe ser estudiada y analizada como caso particular y no general. Ya que cada edificio y su ubicación determinan condiciones específicas que deben de valorarse, analizarse y resolverse de forma particular. Los principios de conservación deben de ser una prioridad por considerar en el proyecto de conservación.

CONCLUSIONES

El estudio de la piedra artificial ornamental de la Casa Montejo y de Montejo 495 en Mérida, Yucatán fue realizado a partir de una propuesta metodológica de corte mixto, que involucro una investigación documental y de archivo, una revisión del estado del arte en cuanto a lo que se ha dicho y hecho en torno a la piedra artificial, morteros históricos y la identificación del conglomerante por medio de técnicas analíticas. Una vez determinadas las técnicas por emplear, se llevó a cabo la metodología en conglomerantes modernos y en los morteros de la piedra artificial. Con base a los estudios realizados fue posible obtener información sobre la composición del conglomerante, la cual es importante conocer para comprender el uso de materiales, sus propiedades y comportamiento. Estos aspectos contribuyen a la toma de decisiones para la conservación de este patrimonio que en México es poco conocido y valorado.

Los principales aspectos por destacar de esta investigación son,

a) de acuerdo con la información documental se favoreció el uso de materiales importados, en particular los cementos naturales y portland (históricos). Sin embargo, se le dio prioridad en los agregados a los materiales de la región, reconociendo su calidad y accesibilidad. El uso de materiales hidráulicos para elaborar la piedra artificial y el uso de materiales aéreos para los aplanados demuestra que había un conocimiento en los materiales, así como también se limitaba el uso de cementos hidráulicos para trabajos detallados y de piedra artificial, debido a su rápido fraguado y la resistencia material que alcanzaba a los pocos días.

b) se desarrolló una metodología a partir de lo propuesto por otros autores para la identificación del conglomerante, siendo la observación de láminas delgadas en el microscopio óptico y petrográfico la principal herramienta para la identificación del tipo de conglomerante, por ello la importancia de haber realizado la estancia de investigación en el Instituto de Geología de la UASLP. Sin embargo, fue necesario complementar con otras técnicas como SEM-EDX, DRX, FRX, TGA/DSC, FT-IR;

c) se aplicó la metodología, primero a los conglomerantes modernos para obtener información de referencia y después a los morteros históricos para su identificación individual, en las que se obtuvo información de la morfología de la superficie,

mineralógica, física y química. Las técnicas fueron útiles sobre todo para diferenciar los conglomerantes modernos, cemento natural, cal hidráulica y cemento portland compuesto, el problema al querer compararlos con los morteros históricos es la diferencia de años que han estado expuestos y los cambios químicos que han tenido por ello. Presentando en particular en los análisis de TGA/DSC un porcentaje de carbonatación mayor a diferencia de los conglomerantes modernos. Así también no fue posible identificar en la piedra artificial, por medio de FT-IR, las fases del Clinker que, si se identificaron en CN y CPC, o la Portlandita en CH. Aunque se reafirmó información obtenida de los otros análisis. Las técnicas que resultaron de mayor utilidad son, la microscopia óptica y petrográfica, SEM-EDX y DRX ya que se pudo determinar el tipo de conglomerante, las técnicas restantes fueron un complemento para confirmar los datos obtenidos.

d) La suma de la información dio como resultado la identificación del significado cultural de la piedra artificial, en su aspecto tecnológico y científico, y los valores tangibles e intangibles. Concluyendo que el estudio y conservación del patrimonio cultural, en particular la piedra artificial, debe de ser abordado de forma interdisciplinaria para obtener información integral y que sirva como medio para reconocer, conservar y sostener que es un material que tiene el potencial de otorgar una identidad, que proporciona información de un periodo de construcción y que además sirve como recurso turístico, al ser ambas casas un punto de referencia para locales y turistas.

En esta investigación se ha pretendido entablar una conversación con el pasado sobre el futuro, al identificar los materiales constitutivos, en particular el tipo de conglomerante empleado, para comprender y entender los materiales del siglo XIX y XX. Así conservar las características originales lo más cercanas posibles, dando pauta para el diseño de materiales de reparación, teniendo en cuenta el criterio de compatibilidad entre el material original y el nuevo.

La mayor limitante que se ha encontrado en este proyecto de investigación ha sido el poco tiempo que se tuvo para realizar los análisis de identificación de componentes. A pesar de que es un tema con varios estudios en Europa, en México la aplicación de técnicas para su conocimiento es poca o desconocida, por lo tanto, interpretar la información ha sido un reto. Por lo que se espera que esta investigación de pauta a otras.

REFERENCIAS



Elemento decorativo de piedra artificial, Montejo 495. Tomada y editada por autora, junio 2022.

ACI Concrete Terminology (2013). American Concrete Institute. Disponible en: https://www.concrete.org/portals/0/files/pdf/aci_concrete_terminology.pdf [Consultado 02-02-2023]

Adamski, G, Bratasz, L, Kozlowski, R, Mayr, N, Mucha, D, Stilhammerova, M y Weber, J. (2009). "Roman cemento – key historic material to cover the exteriors of buildings", RILEM Workshop Repair Mortars for Historic Masonry, pp. 1 – 15.

Aledo Tur, A (1995). "Estudio del casco histórico de Mérida (Yucatán): la formación de la sociedad colonial en Hispanoamérica". Sociedad Urbana, Revista de estudios urbanos n° 2, pp. 51 – 68. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/91841/1/Sociedad-Urbana_02_03.pdf [Consultado 06-01-2022]

Alejandro S, FJ, (2019). "Historia, caracterización y restauración de morteros", textos de doctorado, núm. 25, Universidad de Sevilla.

Arana López, GN (2011). La Vivienda de la buurguesia en Mérida. Al cambio de siglo (1886-1916) La vida cotidiana en el ámbito privado. Tesis de doctorado. Programa interinstitucional de doctorado en arquitectura.

Archivo General del Estado de Yucatán (1904), Fondo: Poder Ejecutivo, Sección: Fomento, c. 432

Arizzi, A y Cultrone, G (2021). "Mortars and plasters—how to characterise hydraulic mortars". *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13 (144). <https://doi.org/10.1007/s12520-021-01404-2>.

Ashurst, J (1997). "The Technology and Use of Hydraulic Lime". *The Building Conservation Directory*. Disponible en: <https://www.buildingconservation.com/articles/hydraulic/hydraulic.htm> [Consultado: 28-07-2023].

Ashurst, J (1983). *Mortars, Plasters and Renders in Conservation*. RIBA Publications Ltd

ASTM C-33-03 (2010). Especificación estándar para agregados para concreto. ASTM International.

ASTM C-128-22 (2023). Método de ensayo estándar para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados finos. ASTM International.

ASTM C219 (2020), Standard Terminology Relating to Hydraulic and Other Inorganic Cements. ASTM International.

ASTM C1364 (2019), Standard specification for architectural cast stone. ASTM International.

Barbero Barrera, MM (2022). 'Usos de la cal en la conservación del patrimonio cultural' ponencia presentada en la Coordinación Nacional de Conservación del Patrimonio Cultural. Disponible en: https://youtu.be/1_Xg1c7w1DI [Consultado: 30-03- 2022]

Barjot, D (2005). Lafarge: The Rise of a French Multinational (1833-2005). *Relations Internationales* 4 (124), pp. 51-67. <https://doi.org/10.3917/ri.124.0051>

Bartos, P, Groot, C y Hughes, JJ (1999). International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests, Escocia: RILEM, p. 406. Disponible en: <https://www.rilem.net/publication/publication/17> [Consultado: 13-04-2022]

Bayer, K, Gosselin, C, Hilbert, G y Weber, J (2011). "Microstructure of historic and modern Roman cements to understand their specific properties". 13th Euroseminar on Microscopy Applied to Building Materials. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/263300258_Microstructure_of_historic_and_modern_Roman_cements_to_understand_their_specific_properties [Consultado: 22-02-2023]

Bhatty, JI (1991). "A review of the application of thermal analysis to cement-admixture systems". *Thermochimica Acta*, 189 (2), pp. 313-350. [https://doi.org/10.1016/0040-6031\(91\)87128-J](https://doi.org/10.1016/0040-6031(91)87128-J)

Biscontin, G., Pellizon Birelli, M., & Zendri, E. (2002). Characterization of binders employed in the manufacture of Venetian historical mortars. *Journal of Cultural Heritage*, 3(1), 31–37. doi:10.1016/s1296-2074(02)01156-1

Bleazard, RG, 1998. The History of Calcareous Cements [En línea] DOI:10.1016/B978-075066256-7/50013-8 file:///C:/Users/nr_fr/Downloads/pb72.pdf

Brocklebank, I (2006). "The lime spectrum", Institute of Historical Building Conservation. Context 97, pp. 21-23. Disponible en: <http://www.ihbconline.co.uk/context/97/index.html#1> [Consultado: 28-01-2022]

Brosnan, DA, Sanders, JP y Hart, SA (2011) "Application of thermal analysis in preservation and restoration of historic masonry materials: Part A. Characterization of materials". Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 106(1), Disponible en: <https://link.gale.com/apps/doc/A358630883/AONE?u=anon~e52b8fe8&sid=googleScholar&xid=ccd7e54f> [Consultado: 22-04-2023].

Burgos A (2009). Los orígenes del hormigón armado en España. Tesis doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.40774>

Campbell, D (1999). 1. Microscopical examination and interpretation of portland cement and clinker (2ª ed.). USA: Portland Cement Association.

Canto Mayén, E (2011). Inmigración e influencia cultural de Francia en la región henequenera de Yucatán (1860-1914). Tesis de maestría. Instituto de Investigaciones Dr. José María Luis Mora.

Castañon, AM, García Granada, S, Guerrero, AM y Gomez-Fernández, F (2012). "Estudio de las fases mineralógicas del clínker en una cementera española, utilizando el método de rietveld". Dyna, 79 (173). Universidad Nacional de Colombia, pp. 41-47. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49623206006> [Consultado: 05-01-2023].

Cementos Fortaleza, ficha técnica. Disponible en: <https://www.cementosfortaleza.com/documents/58826/12859806/Ficha+-Tecnica-Cemento-Portland-Ordinadrio-30RB.pdf/bef34b2f-41d2-4104-bbc0-ac312e12c359> [Consultado: 13-09-2022].

Chiari, G, Torraca, G y Santarelli, ML, (1996). "Recommendations for systematic instrumental analysis of ancient mortars: The Italian experience". En: S. J. Kelley, (Coord.) Standar for preservation and rehabilitation, ASTM STP 1258. West Conshohock: American Society for Testing and Materials, pp. 275 - 284.

Cuaderno técnico Prompt, (2003). Aglomerantes especiales, VICAT. Disponible en: <https://www.cementonatural.com/documentacion> [Consultado: 08-07-2022].

Curl, JS (2006). *A Dictionary of Architecture and Landscape Architecture* (2 ed.), Oxford University Press. Disponible en: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/acref/9780198606789.001.0001/acref-9780198606789-e-1072> [Consultado 05-03-2023]

Cowden, AB. y Wessel, DP (2014). "Cast Stone" en Thomas C., Jester (ed). *Twentieth-Century Building Materials: History and Conservation*. Los Angeles: Getty Conservation Institute, pp. 1 – 320. Disponible en: <https://www.getty.edu/publications/resources/virtuallibrary/9781606063255.pdf> [Consultado 05-03-2023]

Deglookar, N. K. y Pancharathi, R. K. (2020). Investigation of microstructure characterization of mortars from 800 years old heritage structures in Southern part of India. *Journal of Archaeological Science: Reports* (34). <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2020.102634>.

El eco del comercio, 7 de enero de 1882

El eco del comercio, 25 de octubre de 1892

El eco del comercio, 26 de enero de 1892

El Eco del Comercio, 22 de febrero de 1898

Elsen, J (2006). "Microscopy of historic mortars—a review". *Cement and Concrete Research* (36), pp. 1416–1424. DOI:10.1016/j.cemconres.2005.12.006.

Ersen, A, Gürdal, E, Güleç, A, Yöney, NB, Pekmezci, IP y Verdön, İ (2010). "An Evaluation of the Binders and Aggregates Used in Artificial Stone Architectural Claddings and Elements in Late 19th-Early 20th Centuries". *Metu Journal of The Faculty of Architecture*, 27, pp. 207-221. <https://doi.org/10.4305/METU.JFA.2010.2.11>.

Espadas Medina, A (2014). *La casa de Montejo y su sucesora casa Peón-Arrigunaga*. México: Universidad Autónoma de Yucatán. Disponible en: <https://isbn.cloud/9786079405335/la-casa-de-montejo-y-su-sucesora-casa-peon-arrigunaga/> [Consultado 22-12-2021].

Fierro Gossman, R (2018). Casa Cámara / Barbachano, en Paseo Montejo N°495. Disponible en: https://biblioteca.unizar.es/sites/biblioteca.unizar.es/files/documentos/estilo_harvard_resumen_buz_con_rrss.pdf (Consultado: 05-05-2023).

Földvári, M (2011). Handbook of thermogravimetric system of minerals and its use in geological practice. Hungría: Geological Institute of Hungary.

Frías, M, Villar-Cocina, E, Sánchez de rojas, MI y Valencia-Morales, E (2005). "The effect that different pozzolanic activity methods has on the kinetic constants of the pozzolanic reaction in sugar cane straw-clay ash/lime systems: Application of a kineticdiffusive model", Cement and Concrete Research, Vol 35 (11), pp. 2137-2142. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.005>.

Gadermayr, N, Pintér, F y Weber, J (2012). "Identification of 19 th century roman cements by the phase composition of clinker residues in historic mortars". 12th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Columbia University. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/313724035_IDENTIFICATION_OF_19_th_CENTURY_ROMAN_CEMENTS_BY_THE_PHASE_COMPOSITION_OF_CLINKER_RESIDUES_IN_HISTORIC_MORTARS [Consultado: 09-08-2022].

Ger y Lóbez, F (1915). Manual de Construcción Civil. Badajoz. Disponible en: <https://issuu.com/anarchitect/docs/1915---construccion-civil--fl.-ger-y-lobez-> [consultado 22-01-2022]

Giraldo, MA y Tobón, JI, (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. Dyna 73, pp. 69 – 81. Disponible en: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532006000100007 [Consultado: 29-03-2022].

Goins, ES, 2004. Standard practice for determining the components of historic cementitious materials. Material research series. Disponible en: <https://www.uvm.edu/~tvisser/HP306/HistoricMortarTestsNCPTT.pdf>

Goins, E (1999). 'A new protocol for the analysis of historic cementitious materials: interim report', en P. Bartos, C. Groot and J. J. Hughes, International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests, pp. 77 – 79. Disponible en: <https://www.rilem.net/images/publis/pro012-008.pdf> [Consultado: 13-04-2022].

Gonzales, OR “Del Porfiriato a la Revolución y los orígenes de la industria cementera”, en *Relatos e Historias*, año X, número 116

Gurtner, C, Hilbert, G, Hughes, D, Kozłowski, R y Weber, J (2012). Manual on best practice in the application of roman cements. Roman cement, past and present Conservation theory and practice. Disponible en: [http://www.rocare.eu/page/imgt/file/rocare-manual_low-res%20\(2b\).pdf](http://www.rocare.eu/page/imgt/file/rocare-manual_low-res%20(2b).pdf) [Consultado 21-12-2021]

Horgnies, M, Chen, JJ y Bouillon, C (2013). “Overview about the use of Fourier Transform infrared spectroscopy to study cementitious materials”. *WIT transactions on engineering sciences* (77), pp. 251 - 262. DOI:10.2495/MC130221

Hughes, TL, Methven, CM, Jones, TGJ, Pelham, SE, Fletcher, P y Hall, C (1995). “Determining Cement Composition by Fourier Transform Infrared Spectroscopy”. *Advanced Cement Based Materials* 2 (3), pp. 91-104. [https://doi.org/10.1016/1065-7355\(94\)00031-X](https://doi.org/10.1016/1065-7355(94)00031-X)

Hughes, JJ y Callebaut, K (2002), “In-situ visual analysis and practical sampling of historic mortars”, *Mat. Struct.* 35, pp. 70 – 75. <https://doi.org/10.1007/BF02482103>

Hughes, DC, Jaglin, D, Kozłowski, R y Mucha, D (2009). “Roman Cements—Belite Cements Calcined at Low Temperature”, *Cement and Concrete Research* 39. DOI:10.1016/j.cemconres.2008.11.010

Hughes, D, Swann, S y Gardner, A 2014. “Roman Cement, Part One: Its Origins and Properties”, *Journal of Architectural Conservation*, 13 (1), pp 21-36, DOI: 10.1080/13556207.2007.10784986

Jana, D (2018). *Laboratory Analyses of Historic Mortars from Fort Washington, Maryland*. Plainville: Construction Materials Consultants, Inc.

Jokilehto, J (2017). *A history of architectural conservation* (2a ed.). Londres: Routledge.

Kozłowski R, Hughes D y Weber J (2010). “Roman cements: key material of the built heritage of the 19th century”. En: Bostenaru Dan M, Poikryl R, Torok A (Coord.), *Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures*. Países Bajos: Springer, pp. 259 – 277. Disponible en: https://home.cyf-kr.edu.pl/~ncbratas/aboutus/Kozłowski_book_2010.pdf [Consultado: 18-02-2022]

Krumnacher, PJ (2001). *Lime and Cement Technology: Transition from Traditional to Standardized Treatment Methods*. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10919/31259> [Consultado: 13-06-2022]

La Construction Moderne, (1907). “Hôtels particuliers à Mérida del Yucatán”. *La Construction Moderne*, 31, pp. 365 – 368. Disponible en: https://portaildocumentaire.citedelarchitecture.fr/pdfs/web/viewer.html?file=/Infodoc/ged/viewPortalPublished.ashx?eid%3DIFD_FICJOINT_FRAPN02_COM_1907_18_PDF_1 [Consultado 06-02-2023].

La Construcción Moderna, N°3 (1903), “Cementos y baldosas hidráulicas en las naciones hispanoamericanas”, p. 16. Disponible en: <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/viewer?id=0c74bfb1-5039-42d3-b54f-5e92ef155343> [Consultado: 22-12-2021]

Lanas, J, Pérez Bernal, JL, Bello, MA y Alvarez Galindo, JI, (2004). “Chemical properties of natural hydraulic lime-based mortars”. *Cement and Concrete Research* 34, pp 2191–2201. Disponible en: <https://dadun.unav.edu/bitstream/10171/27721/1/2004-12-CEMCONRES.pdf> [Consultado: 15-06-21]

Lawrence, CD (2003). “The Constitution and Specification of Portland Cements”. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, pp.131-193. DOI:10.1016/B978-075066256-7/50016-3

Linares-Fernández, L (2007). *Aplicación de tinciones selectivas en la caracterización y cuantificación de cemento*. Tesis doctoral. Universidad de Alicante. Disponible en: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/7755/1/tesis_doctoral_lucia_fernandez.pdf [Consultado: 02-03-2022].

Lira Vásquez, C (1990). Para una historia de la arquitectura mexicana. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

Loos, A (1972). Ornamento y delito y otros escritos, Barcelona: Gustavo Gili.

Marie-Victoire, E y Bouichou, M (2019). “When Portland cement meets natural cement”. En: Álvarez, J. I., Fernández, J. M., Navarro, I., Durán, A. y Sirera, R. (Coord.). Proceedings of the 5th Historic Mortars Conference. RILEM Publications SARL. Disponible en: https://www.rilem.net/publication/publication/527?id_papier=13093 [Consultado: 16-05-2023].

Martín Gil, M, Menéndez, JM y Bueso Manzananas, M (2017). “Ciencia y patrimonio. Desafíos y oportunidades”. La Ciencia y el arte VI. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, España: Ministerio de Educación Cultura y Deporte, Subdirección General de Documentación y Publicaciones, pp. 22 – 36. Disponible en: <https://es.calameo.com/read/000075335f9a7c19fd6c7> [Consultado: 22-10-2021]

McDonald, S y Arato, AP (2021). Principios de conservación del hormigón de relevancia cultural. Los Angeles: Getty Conservation Institute. Disponible en: http://hdl.handle.net/10020/gci_pubs/conservation_principles_concrete [consultado: 15-06-2021]

Mckee, HJ (1973). Introduction to Early American Masonry, Stone, Brick, Mortar, and Plaster, Universidad de Indiana: National Trust for Historic Preservation.

Martín, M, Menéndez, JM y Bueso, M (2017). “Ciencia y patrimonio. Desafíos y oportunidades” (en línea), La Ciencia y el arte VI. Ciencias experimentales y conservación del patrimonio, pp. 22 – 36. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6258162> [Consultado 08-01-2022]

Mayo Corrochano, C (2023). Identificación. Cales hidráulicas – cemento natural – cemento portland. Morteros históricos para intervención del patrimonio. Curso Mooc, Universidad Politécnica de Madrid.

Mayo Corrochano, C (2015). El cemento natural en el Madrid del siglo XIX y XX. Identificación de sus aplicaciones, estado de conservación y compatibilidad con los

cementos actuales. Tesis de doctorado. España: Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: <http://oa.upm.es/42848/> [Consultado: 13-06-2021]

Mayo Corrochano, C, Sainz Arauz, D y Pineda Enebra, JI (2018). “Metodología simplificada de identificación mediante MOP de las cales hidráulicas y los cementos naturales”. Tradición, versatilidad e innovación en la cal: un material de excelencia VI Jornadas FICAL,20 – 30 mayo 2018. Pamplona: Universidad de Navarra, pp. 188 – 199.

Middendorf, B, Hughes, J, Callebaut, K, Baronio, G y Papayianni, I (2005). “Investigative methods for the characterization of historic mortars – Part 1: Mineralogical characterization”. *Materials and Structures* 38(8), pp. 761-769 DOI:10.1007/BF02479289

Moropoulou, A, Bakolas, A, Moundoulas, P y Aggelakopoulou, E, (2009). Reverse engineering: a proper methodology for compatible restoration mortars. In: C. Groot, ed. *Workshop Repair Mortars for Historic Masonry*. s.l.:RILEM Publications SARL, pp. 278 - 291.

Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE, (2001). Industria de la construcción - cemento - determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

Norma Mexicana NMX-C-077-ONNCCE, (1988). Industria de la construcción – agregados para concreto – análisis granulométrico – método de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

Norma Mexicana NMX-C-085-ONNCCE, (2002). Industria de la construcción - cementos hidráulicos - método estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

Norma Mexicana NMX-C414-ONNCCE, (2004). Industria de la construcción – cementos hidráulicos – especificaciones y métodos de prueba. Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

Oxical. Pasta gran reserva, cal en pasta microcernida restauracal®. (13 de septiembre de 2022). <https://oxical.mx/producto/22-pasta-gran-reserva,-cal-en-pasta-microcernida-restauracal%c2%ae>

Pecchioni, E, Malesani, P, Bellucci, B y Fratini, F (2005). "Artificial stones utilised in Florence historical palaces between the XIX and XX centuries". *Journal of Cultural Heritage* 6, pp. 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2005.06.001>

Pérez, PP (2022). Componentes y propiedades de morteros. Estudios microscópicos. Conservación de morteros históricos [YouTube]. Disponible en: https://youtu.be/_xoDG0YABqA?si=4BQNnlxbQ42Nt4XW [Consultado: 19-12-2022]

Philokyprou, M (2012). "The earliest use of lime and gypsum mortars in Cyprus". En: Válek, J., Hughes, JJ., Groot, C.J.W.P. (Coord). *Historic Mortars. Characterisation, assessment and repair. RILEM Bookseries*, 7, pp 25-35. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4635-0>

Pieper, R (2001). "The Maintenance, Repair and Replacement of Historic Cast Stone", *Preservation briefs*, 42, pp. 1 – 16. Disponible en: <https://www.nps.gov/orgs/1739/upload/preservation-brief-42-cast-stone.pdf> [Consultado 15-11-2022]

Piña Dreinhofer, A (2013). "Siglo XIX: arquitectura porfirista". En: Gonzales de León, G. y Maqueo, F., *Serie Las Artes en México*, núm. 6. México: Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://www.materialdelectura.unam.mx/images/stories/pdf4/artes-6-dreinhofer.pdf> [Consultado: 21-01-2022]

Pitarch Roig, AM, Valiente Soler, JM y Aznar Molla, J (2003). *Materiales de construcción: Conglomerados: pastas, morteros y preliminares de hormigón*. Universidad Politécnica de Valencia.

Ponce-Antón, G, Cruz Zuluaga, M, Ortega, LA y Agirre Mauleon, J, (2020). "Petrographic and Chemical–Mineralogical Characterization of Mortars from the Cistern at Amaiur Castle (Navarre, Spain)". *Minerals*, 10(4), p. 311. <https://doi.org/10.3390/min10040311>

Pozzolime, Ficha técnica. Disponible en: <http://www.pozzolime.com/pdf/POZZOLIME-RESTAURA-TDS-esp.pdf> [Consultado: 13-09-2022].

Poole, BA y Sims, I (2016). *Concrete petrography a handbook of investigative techniques* (2ª ed.), Florida: CRC Press.

Prudon, T (1989). "Simulating Stone, 1860–1940: Artificial Marble, Artificial Stone, and Cast Stone," *Association for Preservation Technology International*, 21 (3/4), pp. 79 - 91. <https://doi.org/10.2307/1504299>.

Quezada, S (2016). *Yucatán historia breve*. México: Fondo de Cultura Económica.

Ramirez-Casas, J, Mayo, C, Navarro Ezquerro, A, Sanz, D, Rosell, J (2019). "Methodology of identification of natural and historic Portland cements. Application and study in mortars of Madrid and Barcelona". *Historic Mortars Conference. Proceedings of the 5th Historic Mortars Conference. International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures (RILEM)*, pp. 886-900. Disponible en: <http://hdl.handle.net/2117/166749> [Consultado: 25-02-2022].

Ravi, R, Thirumalini, S, Taher, N, 2018. "Analysis of ancient lime plasters—Reason behind longevity of the Monument Charminar, India a study. *J. Build*". *Journal of Building Engineering*, 20, pp. 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.04.010>

Carril, J. 1905. "Piedra artificial", en la revista *La Construcción moderna*, N° 5 [En línea] <https://hemerotecadigital.bne.es/hd/es/viewer?id=bf9e1a95-84f5-42b6-a8b5-34b300680365&page=2>.

Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española*, 23.^a ed. Disponible en: <https://dle.rae.es> [07-07-2022].

Reglamento de comercio para el departamento de Yucatán, 1845 [En línea] https://books.google.com.mx/books?id=v25m85Wgq2kC&pg=PR57&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=4#v=onepage&q&f=false pág. XLIX

Rubio Mañe, JI (2000). *La casa de Montejo en Mérida Yucatán. Con un estudio de Manuel Toussaint. Homenaje a Mérida en el IV Centenario de su fundación*, México: Imprenta Universitaria.

Santos, M, Santos Silva, A, y Veiga, R (2019). *Algarve vernacular architecture facade ornaments: chemical and mineralogical characterization*. Pamplona: RILEM. Disponible en: https://www.rilem.net/publication/publication/527?id_papier=12815 [Consultado: 02-06-2023].

Scrivener, K. L. (1984). The development of microstructure during the hydration of Portland cement. Tesis doctoral, Universidad de Londres. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10044/1/8567> [Consultado: 28-03-2023].

Sepulcre Aguilar, A (2005). Influencia de las adiciones puzolánicas en los morteros de restauración de fábricas de interés histórico-artístico. Tesis doctoral. E.T.S. Arquitectura (UPM). <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.264>.

Silva Contreras, M, 2010. “Los catálogos de piezas constructivas y ornamentadas en arquitectura: artefactos modernos del siglo XIX y patrimonio del siglo XXI”. Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas, 97, pp. 1 – 30. <http://dx.doi.org/10.22201/iiie.18703062e.2010.97.2321>.

Siller, JA y Abundis Canales, J (1985). “La casa del adelantado Francisco Montejo en Mérida”. Cuadernos de arquitectura virreinal, 1, pp. 25 – 45.

Šoptrajanov, B (2015). Minerals from Macedonia. XXVIII. A tribute to academician Gligor Jovanovski. Disponible en: DOI:10.20450/mjcce.2015.683

Suárez, M (1977). La evolución económica en Yucatán a través del siglo XIX. Ediciones de la Universidad de Yucatán.

Stuart, BH (2004). Infrared Spectroscopy: Fundamentals and Applications. John Wiley & Sons Ltd., pp. 95–111. <https://doi.org/10.1002/0470011149.ch3>.

Stuart, J y Moore, J (1982). “Chemical Techniques of Historic Mortar Analysis”. Bulletin of the Association for Preservation Technology 14 (1), pp. 11-16. <https://doi.org/10.2307/1494020>.

Tokyay, M (2016). Cement and concrete mineral admixtures. Ankara: Taylor & Francis Group, LLC. DOI<https://doi.org/10.1201/b20093>.

The Scottish lime center (2003). “Materials for lime mortars”. En: Preparation and Use of lime Mortar. Historic Scotland, pp. 9 – 24. Disponible en: <https://www.historicenvironment.scot/archives-and-research/publications/publication/?publicationId=3d5fbef1-8a1e-4945-a41e-a5c201034e56> [Consultado: 16-07-2022].

Umbdenstock, M., (1907). *Hotels particuliers a mérida del yucatan (mexique)*. Disponible en: https://portaildocumentaire.citedelarchitecture.fr/pdfjs/web/viewer.html?file=/Infodoc/ged/viewPortalPublished.ashx?eid=IFD_FICJOINT_FRAPN02_COM_1907_18_PDF_1 [Consultado 6-02-2023].

UNE-EN 17187 (2020). *Conservación del patrimonio cultural. Caracterización de morteros utilizados en el patrimonio cultural*.

Valageas, C, Bouichou, M, Marie-Victoire, E, y Bromblet, P (2012). *Histoire de l'industrie du ciment naturel dans la région de Marseille*. RILEM. Disponible en: https://www.cimentetarchitecture.com/content/download/55662/511705/file/Histoire_de_l [Consultado: 09-07-2023]

Valente Banta, J. (1995). *The Characterization and Analysis of Ornamental Cast Stone and Stucco from the Palacio Errazuriz, Buenos Aires, Argentina*. Tesis de maestría. Universidad de Pensilvania.

Van Balen, K, Toumbakari, EE, Blanco, MT, Aguilera, J, Puertas, F, Sabbioni, C, Zappia, G, Riontino, C y Gobbi, G (1999). "Procedure for a mortar type identification: a proposal". En: P. Bartos, C. Groot and J. J. Hughes (Coord.) *International RILEM Workshop on Historic Mortars: Characteristics and Tests*, pp. 61 – 70. Disponible en: <https://www.rilem.net/images/publis/pro012-007.pdf> [20-04-2022].

Varas, MJ, Álvarez de Buergo, M y Fort, R (2007). "Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción". *Ciencia Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo*, pp. 179-189. Disponible en: https://digital.csic.es/bitstream/10261/8631/1/Varas_M%C2%AAJose,cap%C3%ADtulo%20de%20libro%20CTS.pdf [Consultado 08-01-2022]

Varas, MJ, Álvarez de Buergo, M y Fort, R (2005). "Natural cement as the precursor of Portland cement: Methodology for its identification". *Cement and Concrete Research*, 35 (11), pp. 2055 – 2065. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.10.045>

Vega, RA (2012). *La industria de la construcción en Yucatán. Su origen y su repercusión en la arquitectura de las haciendas*. México: Universidad Autónoma de Yucatán.

Villaseñor, I y Schneider, R (2013). “Principios generales para la elaboración de argamasas”. En: Barba Pingarrón, L. y Villaseñor Alonso, I. (Coord.). La cal historia, propiedades y usos. México: Universidad Nacional Autónoma de México, pp. 95-112 (103).

Walsh, J (2007). Petrography: Distinguishing Natural Cement from Other Binders in Historical Masonry Construction Using Forensic Microscopy Techniques. *Journal of ASTM International*, Vol. 4, No. 1, pp. 1 – 12. Disponible en: <http://www.highbridgematerials.com/wp-content/uploads/2011/03/Walsh-ASTM-Petrography-Natural-Cement.pdf> [Consultado: 26-02-2022].

Webb, P (2016). “Natural cement cycle”, en *Natural Cement: An Oldie but a Goodie*. Disponible en: <https://www.traditionalbuilding.com/opinions/natural-cement-oldie-goodie> [Consultado: 28-03-2022].

Weber, J, Bayer, K, y Pintér, F (2010). “19th century “novel” building materials: examples of various historic mortars under the microscope”, 2nd Conference on Historic Mortars - HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop, RILEM Publications SARL, pp. 397 – 404. Disponible en: https://www.rilem.net/publication/publication/82?id_papier=3322 [Consultado 08-01-2022].

Weber, J, Köberle, T y Pintér, F. (2013). “Methods of microscopy to identify and characterise hydraulic binders in historic mortars – a methodological approach”, *Historic Mortars*, pp.21-31. DOI:10.1007/978-3-319-91606-4_2.

Ybarra O F, (1887). Proyecto de sociedad por acciones de la negociación de piedra artificial. Mérida de Yucatán. Imp. De La revista de Mérida.

Yusuf MO (2023). “Bond Characterization in Cementitious Material Binders Using Fourier-Transform Infrared Spectroscopy”. *Construction Materials: Characterization, Structure and Durability* 13(5). <https://doi.org/10.3390/app13053353>.

Young, D (2021). *Mortars: materials, mixes and methods. A guide to repointing mortar joints in older buildings*, Melbourne: Heritage Council of Victoria. Disponible en: <https://heritagecouncil.vic.gov.au/wp-content/uploads/2021/11/MortarsTechnicalGuide-online.pdf> [Consultado: 25-07-2022].

ANEXOS



Copa o urna de piedra artificial, Montejo 495. Tomada y editada por autora, junio 2022.

ANEXO 1. GLOSARIO DE TÉRMINOS

Abreviaturas del cemento químico

Es posible simplificar la escritura de fórmulas para los compuestos del cemento, ya que pueden obtenerse por la simple adición de fórmulas de óxido. Por ejemplo, la formación de silicato tricálcico puede estar representada por:



Oxido de calcio/ CaO / C

Oxido de hierro/ Fe_2O_3 / F

Oxido de azufre/ SO_3 / S

Silicio/ SiO_2 / S

Aluminio/ Al_2O_3 / A

Silicato dicálcico/ $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ / C_2S

Silicato tricálcico/ $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ / C_3S

Aluminato tricálcico/ $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ / C_3A

Silicato de calcio hidratado / $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$ / C-S-H

Aluminato de calcio hidratado / $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot n\text{H}_2\text{O}$ / C-A-H

(1000–1100C). En este rango de temperatura temperatura, la formación de C_4AF y C_3A depende de la cantidad suficiente de Al_2O_3 y Fe_2O_3 en las margas antes de su calcinación.

Clinker portland

Es el producto artificial obtenido por sinterización de los crudos correspondientes, es decir, por la calcinación y sinterización de estos a la temperatura y durante el tiempo necesario... los crudos de clinker portland son mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen cal

(CaO, sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃), óxido férrico (Fe₂O₃) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios, los cuales se clinkerizan.

Escoria de alto horno

Es el subproducto no metálico constituido esencialmente por silicatos y aluminosilicatos cálcicos, que se obtienen por el enfriamiento brusco con agua o vapor y aire, del residuo que se produce simultáneamente con la fusión de minerales de hierro en el alto horno.

Etringita

Es por lo tanto, un producto de reacción entre el yeso y granos de cemento anhidro (como C₃A y C₄AF) o fases de aluminatos de calcio hidratados (C₄AH₁₃). Fórmula química, C₃A.3CS.32H = 3CaO.Al₂O₃.3CaSO₄.32H₂O

Ligante hidráulico

Sustancia finalmente molida que fragua y se endurece gradualmente cuando se forma en una pasta con una cantidad limitada de agua, debido a reacciones químicas entre el cemento y el agua para formar un material similar a la piedra.

Alita y Belita

Son nombres originados en los primeros exámenes de secciones pulidas de Clinker al microscopio óptico. La alita es un silicato tricálcico representado por su fórmula química 3CaO.SiO₂ o su abreviatura C₃S; la belita es un silicato dicálcico representado por su fórmula química 2CaO.SiO₂ o su abreviatura C₂S.

C-S-H

Silicato de calcio hidratado, es un gel coloidal principalmente amorfo con una composición variable, es el principal producto de hidratación del cemento Portland.

Cemento

En general es un material que sirve para unir otros materiales. Es generalmente plástico en el momento de la aplicación, pero endurece una vez colocado. Incluye todos los morteros de cal y cementos portland. Representa la porción de matriz de cualquier material cementoso o pasta de cemento "pura".

Clinker cemento

Producto nodular de un horno de fabricación de cemento

Pasta de cemento

Mezcla de polvo de cemento con agua

Concreto

Mezcla de cemento, agregados de arena, grava o gravilla con agua en proporciones variables según el uso que se le vaya a dar. El concreto y el mortero se suelen utilizar indistintamente. Sin embargo, la diferencia de uno y otro son el tamaño de los agregados y el componente del cemento.

Mortero

Es una sustancia plástica formada normalmente por la mezcla de cemento, agregados pétreos y agua, o cemento, cal, agregados pétreos y agua en proporciones variadas.

Mortero hidráulico

Una mezcla de cal y puzolanas, ya sean naturales (tobas volcánicas) o artificiales (cerámica triturada).

OPC

Cemento Portland Ordinario o tipo 1

CPC

Cemento portland Compuesto

CN

Cemento natural, fabricado por la calcinación natural de mezclas de materiales calcáreos y arcillosos.

Cal

Piedra caliza calentada al menos a 825°C para obtener CaO (cal viva o cal sin apagar)

ANEXO 2. FICHA DE REGISTRO

La información para la elaboración de la ficha de registro se tomó del documento titulado *In-situ visual analysis and practical sampling of historic mortars* de Hughes y Callebaut (2002: 10,11).

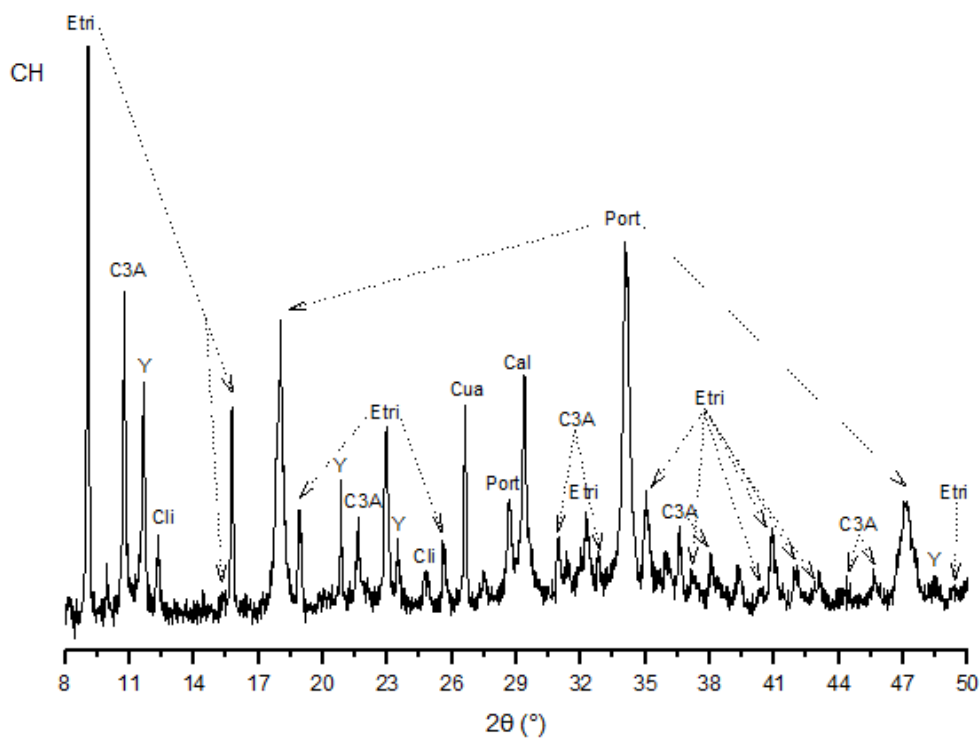
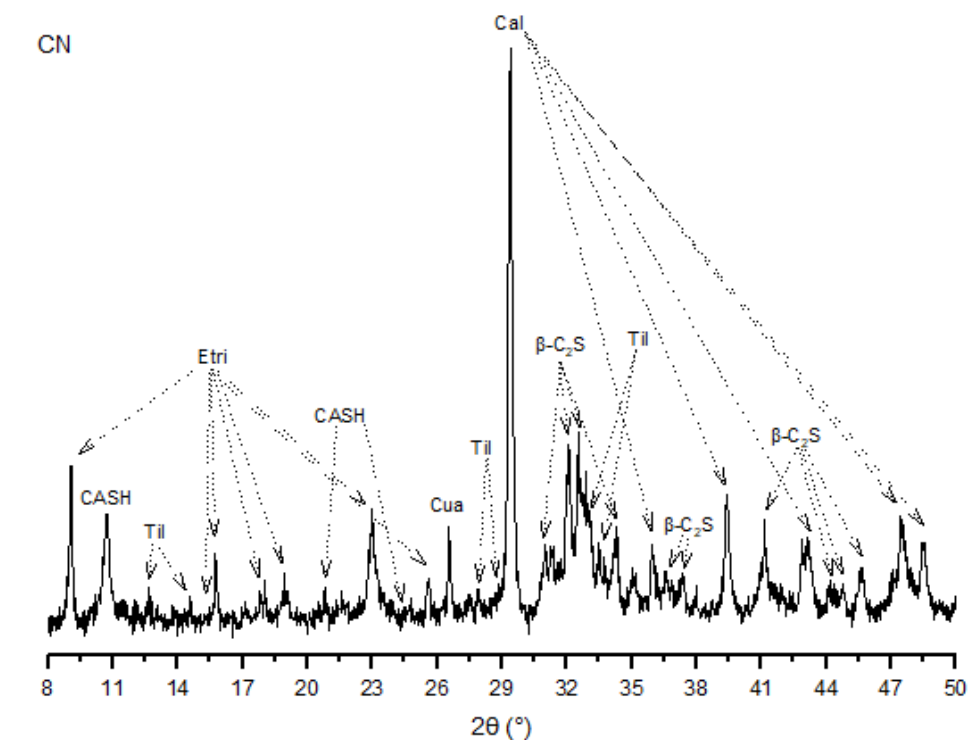
FICHA DE REGISTRO DE INFORMACIÓN PARA SER UTILIZADA DURANTE EL MUESTREO EN SITIO	
Edificio: Dirección:	No. muestra: Tomado por: Fecha: Objetivo del muestreo:
LOCALIZACIÓN DEL EDIFICIO	
Fachada <input type="checkbox"/>	Interior <input type="checkbox"/>
Descripción de la localización	
Fase:	Características:
Profundidad de la pared:	Georreferencia:
Fotografía:	
DESCRIPCIÓN DEL MORTERO	
Color:	
Función:	
<input type="checkbox"/> Mortero de lecho ¹⁹	<input type="checkbox"/> Acabado de juntas
<input type="checkbox"/> Lechada	<input type="checkbox"/> Revoco
<input type="checkbox"/> Enlucido	<input type="checkbox"/> Reparación
Aglutinante:	
<input type="checkbox"/> Cal	<input type="checkbox"/> Arena
<input type="checkbox"/> Cal y puzolana	<input type="checkbox"/> Concha
<input type="checkbox"/> Cemento	<input type="checkbox"/> Piedra triturada
<input type="checkbox"/> Yeso	<input type="checkbox"/> Otro
Estado de conservación (deterioros, sales, etc.):	

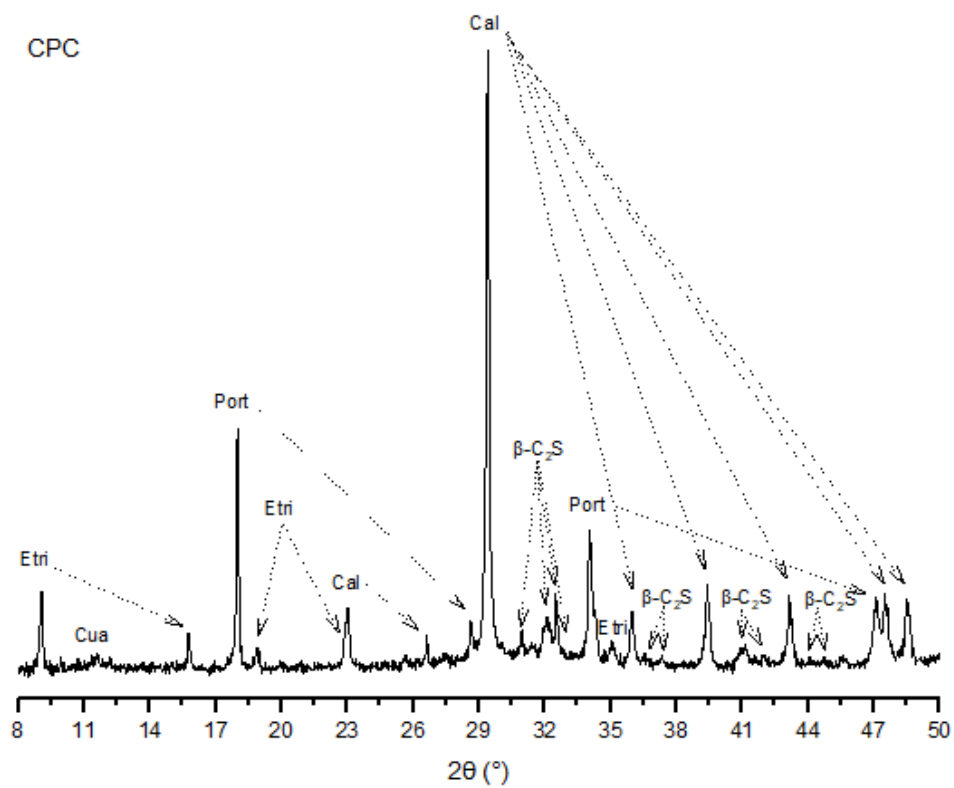
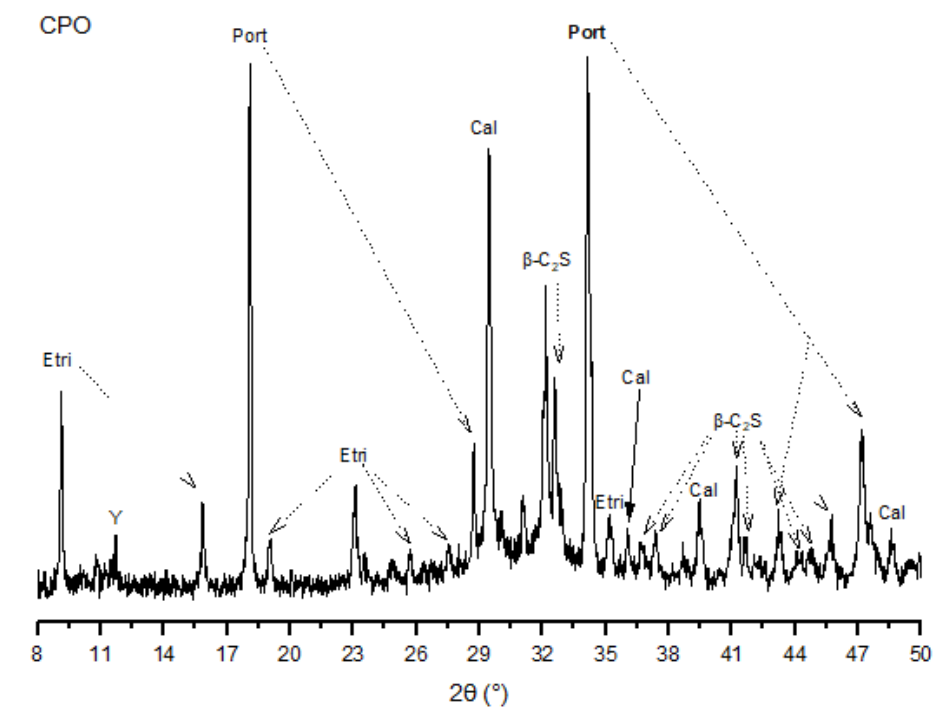
¹⁹ Todo material extendido (hormigón, mortero, arenas, tierras compactadas o gravas) que forme una capa uniforme. Es utilizado como base para el posterior asiento de otro material o pieza.

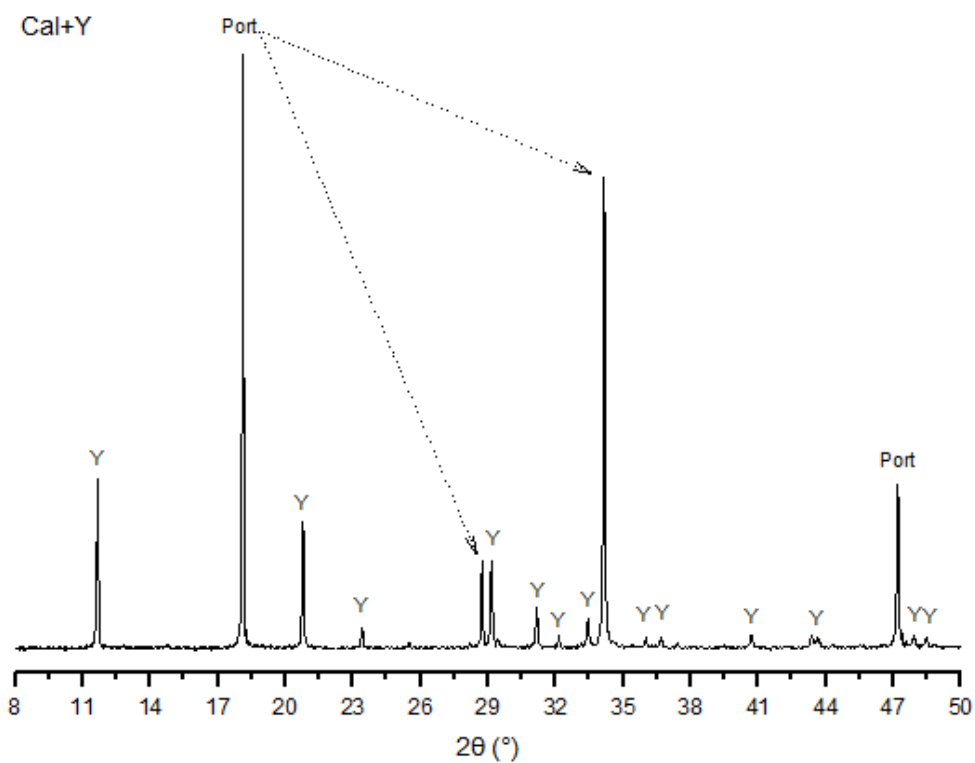
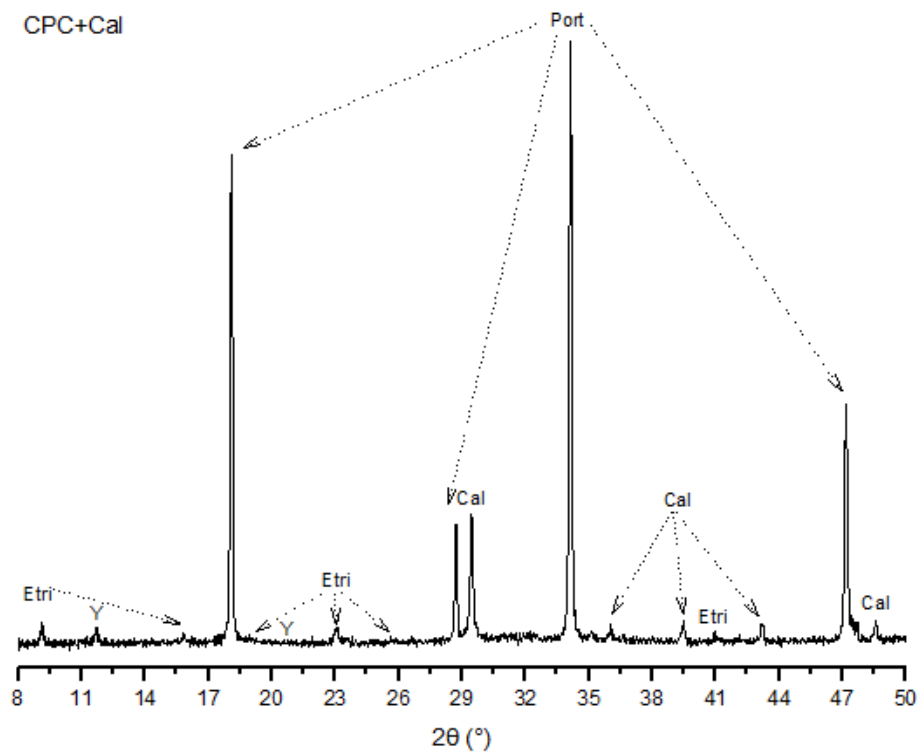
Material asociado al edificio:		
OBJETIVO DEL ESTUDIO		
Conservación <input type="checkbox"/>	Restauración <input type="checkbox"/>	Arqueología <input type="checkbox"/>
Reparación <input type="checkbox"/>	Investigación material <input type="checkbox"/>	Otro, especifique:
Método de muestreo		
Martillo y cincel <input type="checkbox"/>	Núcleo o testigo de perforación <input type="checkbox"/>	Otro, especifique:
Propuesta de análisis		
<input type="checkbox"/> Aglutinantes / disolución de agregados	<input type="checkbox"/> XRD	
<input type="checkbox"/> Test físicos	<input type="checkbox"/> Sección delgada	
<input type="checkbox"/> Químico	<input type="checkbox"/> Otro, especifique:	

ANEXO 3. DRX. Difractogramas individuales.

Elaborados por la autora, noviembre 2022.







La piedra artificial ornamental en Mérida, Yucatán. Finales del siglo XIX y principios del siglo XX

