

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo
secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de
noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano
MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



CEMENTANTE DE TEPETATE: CONGLOMERANTE PUZOLANICO SUSTENTABLE

Investigación Aplicada que para obtener el grado de
Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables

Presenta: **ING. JUAN CARLOS SANTOS PRECIADO**

Tutor **DR. DAVID VARGAS DEL RÍO**

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco. 11 de septiembre de 2020.

RESUMEN

La industria del cemento es responsable del 5% del CO₂ emitido mundialmente. Una posibilidad de mitigar sus efectos es mediante la fabricación de cementantes con Puzolana que requieren menor consumo energético y son de bajo costo. Se determinó la viabilidad de implementarlos a partir de materiales volcánicos. El estudio consideró la acción de conglomerantes comunes (cal y cemento) en el endurecimiento hidráulico (resistencia a compresión), por medio de un diseño de experimento mixto formado por un diseño de mezcla y un diseño factorial 3^k. Con el primero, se explora la influencia de los componentes (cal hidratada, Puzolana y cemento portland); con el segundo las variables de proceso (tiempo de curado y tamaño de partícula de Puzolana). Con el entendimiento de cada componente junto con los resultados del experimento, se desarrollaron cementantes que presentan condiciones adecuadas para utilizarse en la construcción de casa habitación. Los resultados indican que es factible reemplazar porcentajes de entre 30-52% de cemento Portland por Tepetate, obteniendo resistencias muy similares, contribuyendo con ello a reducir costos de construcción y disminuyendo las emisiones de CO₂ que se generan en la calcinación de la materia prima.

Palabras clave: *Puzolana; Tepetate; Conglomerante Hidráulico; Reducción de CO₂.*

ABSTRACT

The cement industry generates around 5% of the world's CO₂. One way to mitigate its climatic effects is the manufacture of hydraulic binders with the use of Pozzolans with great availability in the country and low cost. This research evaluated the possibility of use volcanic materials in hydraulic binders. The study considered the action of common binders (lime and Portland cement) in hydraulic hardening (compression strength), by a mixture design and a 3^k factorial design. With the first, the influence of the components (hydrated lime, Pozzolana and Portland cement) are explored; with the second, the process variables (curing time and Pozzolana particle size). With the understanding of each component and the results of the experiment, hydraulic binders were developed to be used in construction industry. The results indicates that it is possible to replace percentages of between 30 and 52% of Portland cement by Tepetate, obtaining very similar strengths, thereby contributing to reduce construction costs and reducing CO₂ emissions that are generated in the calcination of clinker Portland.

Keywords: *Pozzolana; Tepetate; Hydraulic Binder; CO₂ reduction.*

Agradecimientos

A mi familia por su apoyo incondicional en todos los momentos importantes de mi vida.

Al Dr. Adolfo Preciado por compartir su conocimiento e impulsar mi interés por el desarrollo científico.

Al Dr. David Vargas por proporcionarme equipo, instalaciones adicionales y asesoría a lo largo de esta investigación.

Al Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano y los académicos del ITESO por su contribución en mi desarrollo académico.

A Rahan, Hugo y todo el equipo del Laboratorio de Geotecnia y Materiales del ITESO.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo brindado para cursar este posgrado.

Índice

Capítulo I. Introducción

1.1. Introducción.....	1
1.2. Justificación, hipótesis, objetivos y organización de la investigación.....	3

Capítulo II. Estado del arte sobre Puzolanas y cementantes

2.1. Historia de los cementantes	7
2.2. Definición, clasificación, Puzolanas naturales y artificiales.....	17
2.3. Composición química, reacción, actividad Puzolanica y endurecimiento..	22
2.4. Sustentabilidad en Puzolanas: propiedades, ventajas, inconvenientes y aplicaciones.....	27
2.5. Cementantes en México: cemento de albañilería, Mortero de albañilería, Mortero estructural y Cemento hidráulico	32
2.6. Experimentación con Puzolanas en cementantes.....	38

Capítulo III. Estudio preliminar para la selección de la Puzolana

3.1. Muestreo y diseño de experimento para la selección de la Puzolana de estudio	43
3.2. Elaboración de los especímenes	47
3.3. Curado de los especímenes.....	51
3.4. Ensayos de resistencia y análisis.....	52
3.5 Conclusiones de contexto y elección de Puzolana de investigación.....	54

Capítulo IV. Diseño experimental con Tepetate

4.1. El Tepetate.....	56
4.2. Análisis estadístico del Tepetate como material cementante	57
4.3. Análisis de regresión lineal múltiple	69
4.4. Discusión de análisis estadístico	77

Capítulo V. Calibración

5.1. Calibración de acuerdo a normativa.....	79
5.2. Análisis de evaluación de calibración por regresión lineal múltiple.....	85
5.3. Discusión y análisis de resultados	89
5.4. Productos de la investigación	90

Capítulo VI. Conclusiones generales y líneas de investigación futura

6.1. Conclusiones generales	94
6.2. Aportaciones de la investigación.....	95
6.3. Líneas de investigación futura	96

Referencias

Capítulo I

Introducción

1.1. Introducción

A lo largo del tiempo, el incremento de población y la necesidad del desarrollo de infraestructura ha presentado un crecimiento exponencial, lo que produce un aumento alarmante en la producción y consumo de materiales para la construcción. En este contexto, la industria cementera es responsable del 5% del dióxido de carbono (CO₂) emitido mundialmente. Esta consume el 9.66% de energía en el sector industrial en México, con una demanda de 162.35 Petajoules (PJ) en 2018 ([Andrew, 2018](#) y [SENER, 2019](#)). Esta cantidad es equivalente aproximadamente a 45 mil-millones de kilovatios por hora (kWh), que al extrapolarla en base a la tarifa asignada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) el mismo año, generaría un gasto de aproximadamente 95 mil-millones de pesos MXN ([CFE, 2020](#)). La creciente preocupación por el impacto ambiental generado por la fabricación de cementantes alrededor del mundo ha propiciado el desarrollo de materiales alternativos que buscan favorecer la edificación sustentable. Entre estos esfuerzos están las Puzolanas, que son compuestos orgánicos e inorgánicos que generan compuestos con propiedades hidráulicas al ser mezclados con cementantes convencionales (*i.e.* cal y cemento Portland). Las hay de origen natural, como las tobas volcánicas, arenas pumíticas o arcillas (*e.g.* [Türkmenoğlu and Tankut, 2002](#); [Vargas, 2002](#); [Çavdar and Yetgin, 2007](#) y [Chakchouk et al., 2006](#)). También las hay de origen artificial, que son principalmente residuos industriales, como el humo de sílice, la escoria de las siderúrgicas y las cenizas volantes (*e.g.* [Jamrozy, 1997](#); [Richardson and Groves, 1997](#) y [Nalbantoğlu, 2001](#)). Por su abundancia y disponibilidad, las de origen natural son muy relevantes para México ([Vargas, 2002](#)).

Químicamente, las Puzolanas son materiales silicios/sílico-aluminosos que al hidratarlos junto con hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) reaccionan creando compuestos cementantes con propiedades hidráulicas (*e.g.* [Belzard, 1998](#); [Vargas, 2002](#); [Oleson et al., 2004](#); [Brandon et al., 2010](#); [Cowper, 2015](#) y [ASTM-C125, 2019](#)). Los materiales Puzolánicos comúnmente se emplean como remplazo parcial en los procesos de fabricación de cemento para su uso como mortero, al igualar, y en ciertos casos mejorar, sus propiedades químicas,

físicas y mecánicas. Además, se incorpora al cemento Portland para reducir costos, incrementar la resistencia a compresión, la trabajabilidad y la plasticidad, aumentar la resistencia al ataque de sulfatos, así como reducir la segregación, aumentar la permeabilidad y disminuir el calor de hidratación (e.g. Ghric *et al.* 2007; Binici and Aksoğan, 2006 y Rodriguez and Uribe, 2002).

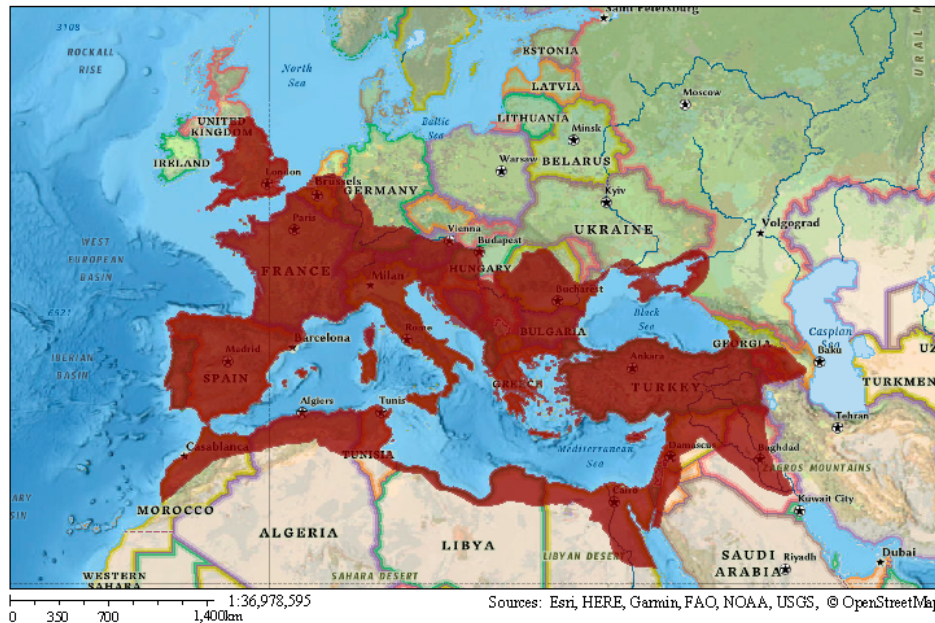


Figura 1.1. Máxima extensión del Imperio Romano en el año 117 d.C. en la época del emperador Trajano (ArcGISApp, 2020).

Estos materiales se han utilizado en la edificación desde los tiempos del Imperio Romano (Fig. 1.1). Algunas construcciones han prevalecido a lo largo de los años a pesar de los factores implicados en su deterioro (e.g. propiedades inadecuadas del suelo, materiales defectuosos, errores de diseño junto con agentes externos como incendios, terremotos y alteraciones humanas; Yüzer *et al.*, 2011). Dentro de los ejemplos más representativos se encuentran el *Pont du Gard* en Francia, el *Aqua Alexandrina*, el famoso *Coliseum* y el *Pantheon* en Roma (Fig. 1.2a-c). Es sorprendente la durabilidad que han presentado estas estructuras junto con el nivel de conservación de las mismas. Esto se atribuye a la implementación de materiales resistentes y duraderos adicionados con Puzolanas, a un diseño estructuralmente conservador, la calidad de mano de obra y a una reparación-renovación constante (e.g. Goldsworthy and Zhu, 2008).

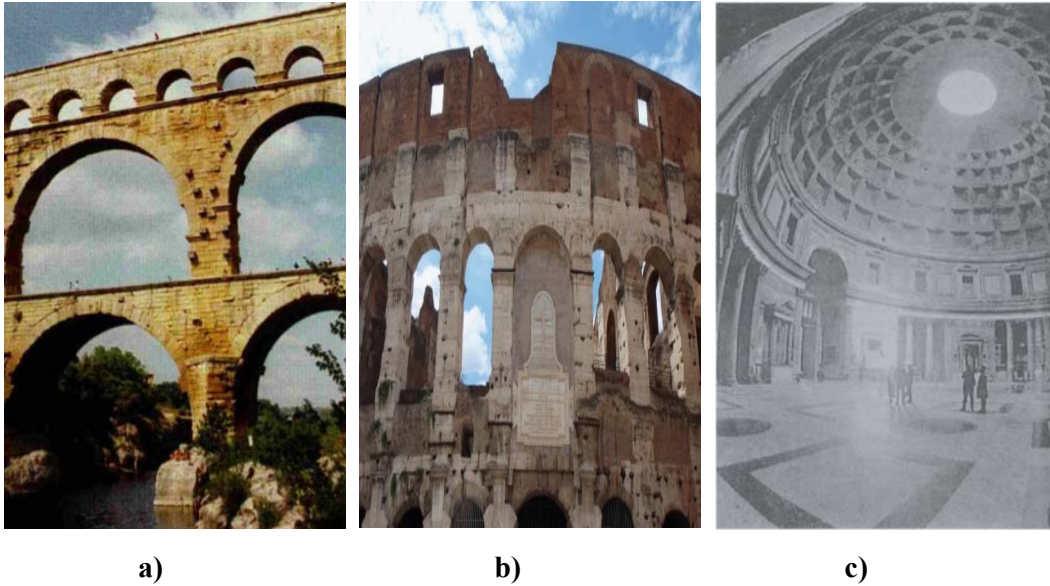


Figura 1.2. Monumentos históricos construidos con Puzolanas: a) *Pont du Gard* Francia (Woods, 2003); b) *Coliseum* Roma (Preciado *et al.*, 2017) y c) *Pantheon* Roma (Belzard, 1998).

Sin embargo, los usos potenciales de estos materiales no han logrado ser explotados adecuadamente en México. Esto se debe en gran medida a las prácticas monopólicas de las grandes cadenas cementeras del país, que han logrado limitar su uso, y controlar la producción y la distribución de materiales constructivos. Asimismo, al influenciar en las normativas nacionales, para lograr que solamente aquellos productos desarrollados en grandes plantas industriales y que son avalados por laboratorios certificados, puedan ser puestos en el mercado. Esto ha dado lugar a un conjunto de actores que dominan el mercado y establecen prácticas que van en contra de los consumidores y los pequeños productores, mientras limitan el desarrollo de productos que podrían traer beneficios ambientales, pero no prosperan porque no representan una ganancia económica. Por lo tanto, se trata de innovaciones tecnológicas poco accesibles para los pequeños productores, que carecen de información (*e.g.* especificaciones de materiales y dosificaciones) y quedan imposibilitados para replicar o en su defecto alcanzar la calidad que dichas cadenas garantizan en su línea de productos.

1.2. Justificación, hipótesis, objetivos y organización de la investigación

A diferencia del cemento Portland que requiere de un proceso de molienda y calcinación con temperaturas superiores a los 1500°C, o de la cal, que requiere molienda y temperaturas de alrededor de 1200°C, la Puzolana solo requiere de molienda.

Esto significa la posibilidad de mitigar la generación de emisiones de CO₂ en los procesos de fabricación de cementantes, así como un menor consumo energético y menores costos de fabricación. En esta investigación se busca conocer la viabilidad de la utilización de Materiales Puzolánicos Regionales (MPR) en la fabricación de cementantes para la industria de la construcción, incorporándolos en la elaboración de morteros y bloques de mampostería para edificación de casa habitación, los cuales se definirán como Productos de la Investigación (PI).

Se plantea la *hipótesis* de que se puede fabricar cemento hidráulico, mortero estructural mortero de albañilería y que cumplan con las normativas existentes con Puzolana de la Región Jalisco Colima (RJC). Al tratarse de un proceso industrial sencillo, favorecerá que lo produzcan pequeñas empresas y productores asociados, lo cual a su vez permitirá que se extienda y se apropie socialmente. Con esto, se presenta la posibilidad de mejorar las condiciones económicas regionales junto con la reducción considerable de las emisiones de CO₂ por la fabricación de materiales para la industria de la construcción. Lo anterior, genera la siguiente *pregunta de investigación*: ¿Es posible que la Puzolana Seleccionada (PS) pueda convertirse en materia prima para la elaboración de materiales constructivos que sean producidos a pequeña escala por pequeñas empresas y productores asociados?

Por lo tanto, con el desarrollo de esta investigación se espera crear las condiciones para que la PS se utilice en la fabricación de materiales de construcción. En primera instancia, se busca reducir los costos de fabricación y proveer dosificaciones adecuadas que permitan replicar la calidad de las edificaciones convencionales. Sin embargo, al presentar dosificaciones y recomendaciones que suponen procesos industriales sencillos, se busca favorecer al desarrollo de empresas basadas en productores asociados. Una forma de producir cementantes más amigables con el medioambiente y con mejor apropiación social, que podría extenderse por las regiones de México y otorgar a los pequeños productores la posibilidad de desarrollar pequeñas plantas de producción. Pequeñas empresas que generarían productos que suponen menores emisiones de CO₂, consumen menos energía y contribuirían en la reducción del impacto de las grandes explotaciones a los recursos para fabricación de cementantes propiciado por las grandes cadenas cementeras. Esta investigación se encuentra relacionada con el campo de la construcción, debido a que se realiza un estudio del comportamiento de las características físicas y mecánicas del material mejorado con la adición de Puzolana para la fabricación de morteros y block de mampostería. Además, se relaciona en el campo de la ingeniería ambiental al reducir las emisiones de CO₂ en la fabricación de los PI.

La investigación tiene como **objetivo general** evaluar la viabilidad técnica en la utilización de la PS como agregado en la fabricación de cemento hidráulico, mortero estructural y mortero de albañilería para emplearlos como materiales constructivos de acuerdo a las normativas actuales.

La **metodología** para conseguir el objetivo general de esta Investigación se compone por cuatro etapas principales con distintos **objetivos particulares** que se mencionan a continuación:

Etapa 1: Estado del arte sobre Puzolanas, cementantes en México y selección de Puzolana de estudio (PS):

- Estado del arte sobre la historia de los cementantes y su evolución al cemento Portland de la actualidad.
- Clasificación de Puzolanas naturales y artificiales.
- Composición química, reacción, actividad Puzolanica y endurecimiento.
- Sustentabilidad en Puzolanas, propiedades, ventajas, inconvenientes y aplicaciones.
- Cementantes en México, cemento de albañilería, mortero de albañilería, mortero estructural, cemento hidráulico.
- Experimentación con Puzolanas en cementantes.
- Obtención de los tres materiales Puzolánicos de la RJC, realizar el proceso de fabricación de especímenes, evaluar la resistencia a la compresión y seleccionar la Puzolana de estudio (PS).

Etapa 2: Evaluación inicial de la Puzolana de la investigación y análisis estadístico:

- Fabricación de dos niveles de finura para la PS (Puzolanas P1 y P2).
- Fabricación de especímenes de evaluación inicial (144 especímenes).
- Ensaye de especímenes para obtener resistencia a la compresión.
- Análisis estadístico por medio de regresión múltiple.
- Descripción de la variabilidad del comportamiento de los especímenes.
- Análisis profundo de resultados para encontrar tendencias y aspectos benéficos o perjudiciales en la incorporación de la PS.

Etapa 3: Evaluación de calibración de la Puzolana de la investigación, análisis estadístico, productos de la investigación y análisis de resultados:

- Fabricación de especímenes de evaluación de calibración (60 especímenes).
- Ensaye de especímenes para obtener resistencia a la compresión.
- Análisis estadístico por medio de regresión múltiple.
- Descripción de la variabilidad del comportamiento de los especímenes.
- Análisis profundo de resultados para encontrar tendencias y aspectos benéficos o perjudiciales en la incorporación de la PS.
- Obtención de proporciones optimizadas para los productos de la investigación.

Etapa 4: Conclusiones y propuestas de investigación futura:

- Aportación de propuesta de jerarquía ampliada para cementantes en México.
- Elaboración de conclusiones generales.
- Propuestas de investigación futura.

Capítulo II

Estado del arte sobre Puzolanas y cementantes

2.1. Historia de los cementantes

Desde los primeros asentamientos humanos, los materiales constructivos han representado un papel fundamental para su desarrollo. Los refugios permitieron soportar las amenazas naturales, garantizar seguridad y hasta considerar cuestiones de comodidad. Al principio, se protegieron en cuevas, pequeñas chozas con troncos de madera, materiales de la región y estructuras básicas de piedra. Con el paso del tiempo, aumentó la gama de materiales para la construcción, donde la cal y la piedra caliza se posicionaron como unos de los materiales fundamentales. Milenios antes de la invención del cemento Portland se utilizaban morteros de cal para edificaciones en grandes regiones del planeta.

[Felder-Casagrande et al. \(1997\)](#) afirma que el descubrimiento de morteros con cal utilizados hace 22600 años en *Nevali Core*, un asentamiento del Neolítico pre-cerámico localizado en Hilvan, Turkia. [Jahren and Sui \(2017\)](#) mencionan hallazgos de morteros antiguos que datan de 7000 a.C. en Yiftah El, Jerusalén, morteros que datan del año 5600 a.C. en Lepenski Vir, Bosnia, y morteros del 2500 a.C. en Shinar Plains, Mesopotamia. En todos estos casos se utilizó la cal como cementante para la construcción de firmes y la manufactura de bloques de mampostería respectivamente.

[Cowper \(2015\)](#) menciona descubrimientos de especímenes compuestos por mortero de cal con origen de 2000 a.C. que conservan su dureza y apariencia intacta junto con elementos de bloques de mampostería utilizando este material para la pega (*i.e.* junteado) de los mismos. También, entre los años 1500 y 1600 a.C. en Thera, Grecia, se utilizó la cal, que al mezclarla con materiales naturales de origen volcánico (*e.g.* residuos de erupciones volcánicas de la región) resultaba conveniente su uso como material cementante. Se han desarrollado diversas técnicas de implementación de dichos morteros en civilizaciones de la antigüedad ([Fig. 2.1a-c](#)).

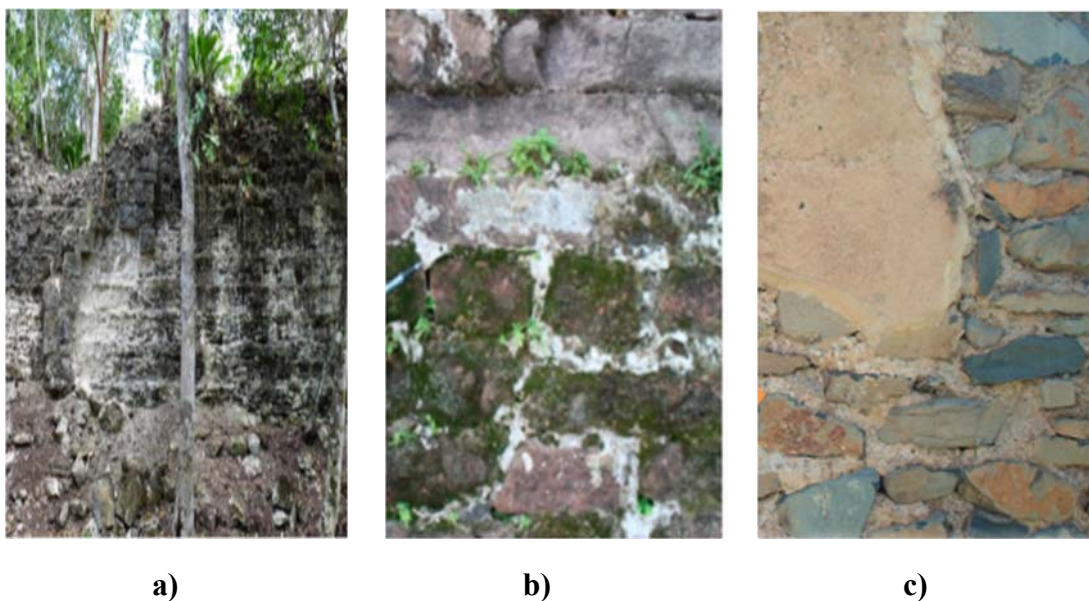


Figura 2.1. Técnicas de implementación de mortero de cal en la antigüedad: a) Sitio arqueológico en Río Bec, Yucatán, México (800-850 d.C.) (Gillot, 2014); b) muro antiguo en Quzhou, China (1821 d.C.) (Shao, 2018) y c) muro del *Fasil Ghibbi palace* en Gondar, Sudáfrica (1636 d.C.) (Shumuye and Dinku, 2018).

El mortero de cal fue utilizado por los egipcios, griegos, los mayas, (e.g. aplanados en muros; en plafones de casas, templos; recubrimientos en superficies y unión de piedras; Abd El Salam, 2001; Cowper, 2015 y Gillot, 2014), además de regiones como China, África, Europa entre otras (e.g. refuerzo para cimientos, juntas en muros estructurales y unión de bloques de granito; Shao, 2018; Shumuye and Dinku, 2018 y Tarassova *et al.*, 2012).

Una de estas técnicas se muestra en la arquitectura de Río Bec Yucatán, México (Figura 2.1a). En ella se aprecia la introducción de nuevas técnicas de construcción a mediados del siglo VI, donde los constructores de esta época desarrollaban una especie de núcleo sólido conformado por piedras junto con escombros y mortero. El núcleo presentaba una apariencia similar al estilo de un concreto ciclópeo y se encontraba encofrado por revestimientos exteriores compuestos por fragmentos de piedras regulares acomodadas minuciosamente para brindar un estilo de acabado aparente en ladrillos (Gillot, 2014). Un ejemplo de la resistencia y durabilidad de estos cementantes se contempla en la Figura 2.1b. En este muro antiguo de Quzhou, China se logra apreciar la implementación de mortero de cal por la coloración blanca característica de estos cementantes para el junteado de grandes bloques de piedra.

Por otro lado, en Gondar, Sudáfrica [Shumuye and Dinku \(2018\)](#) estudiaron la durabilidad de los muros del *Fasil Ghibbi palace* ([Fig. 2.1c](#)) donde identificaron la implementación de morteros de cal como material principal en el sistema constructivo de muros de mampostería. Con el paso del tiempo, la implementación de los morteros de cal sufrió alteraciones y modificaciones que buscaron mejorar su desempeño constructivo. Cabe destacar el desarrollo de morteros con la incorporación (*i.e.* mezcla) de distintos materiales que, al combinarlos presentaban características similares al mortero de cal. Estos materiales solían ser descubiertos por mera observación de fenómenos naturales (*e.g.* la reacción de endurecimiento de materiales calcáreos en contacto directo con agua). Entre los materiales implementados como agregados a los morteros de cal se destacan los de origen volcánico, por la compleja durabilidad resultante al ser mezclados. De acuerdo a [Malinowski et al. \(1993\)](#) el espécimen conformado por la incorporación de dichos materiales con mayor antigüedad data del 5000 al 4000 a.C. Para su construcción se utilizaron tierras silíceas de las cercanías del Golfo Pérsico.

Existe una gran variedad de registros de construcciones elaboradas con materiales volcánicos y cal. Sin embargo, se destacan dos episodios que marcaron la historia de la gestión de estos materiales: el primero, ocurrió entre 1600-1500 a.C. en Thera, Grecia (*n. Santorini*); el segundo, en el 79 d. C. en Nápoles, Italia. Ambos casos comprenden el uso de cenizas volcánicas formadas principalmente por vidrio volcánico (*i.e.* piedra pómez y obsidiana) que suelen conocerse como Puzolanas ([ACI 232.1R, 2012](#)).

El nombre de Puzolana se atribuye a los inicios de la obtención de estos materiales en la cercanía de Pouzzoli, en la bahía de Nápoles, los cuales fueron utilizados por las colonias griegas y después por los Romanos. En efecto, se sabe que los constructores griegos descubrieron las mezclas cal-Puzolana entre los años 700 y 600 a. C., para posteriormente brindar los conocimientos y avances a los Romanos cerca de 150 a. C. ([Belzard, 1998](#)). En la actualidad, estos cementantes se conocen como concretos o cementos “Romanos”; fueron los primeros conglomerantes con propiedades hidráulicas (*i.e.* capacidad de endurecimiento en contacto/sumergido por agua). Fueron empleados masivamente en tiempos del Imperio Romano ([Fig. 1.1](#)) en la construcción de acueductos, puentes, monumentos y todo tipo de edificación de la época. Algunas de ellas mantienen su integridad estructural a lo largo de las costas de Italia, Grecia, Francia, España y en los puertos del mar mediterráneo de Vitrubio.

El término “Romano” se le atribuyó a este tipo de cemento por primera vez en 1798 por *James Parker*, en su publicación *Roman cement, artificial terras and stucco*. En ella se mencionaban las grandes capacidades hidráulicas que presentaba la incorporación de Puzolanas en mezclas de concretos ([Belzard, 1998](#)). Algunos ejemplos de la impresionante durabilidad de los concretos Romanos son los acueductos en Roma, diques y estructuras marinas en islas del mar Egeo en Syros, Piraeus, Nauplion; los puertos de Alejandría en Egipto; Fiume, Pola, Spalato y Zara en el mar Adriático ([ACI 232.1R, 2012](#)).

Existen diversos estudios de edificaciones de la antigüedad cercanas a la costa ([Fig. 2.2a-c](#)) que atribuyen a las Puzolanas, que sirvieron como materia prima para la elaboración del cemento Romano, su capacidad de prevalecer con un buen nivel de conservación hasta la actualidad ([Oleson et al., 2004](#); [Brandon et al., 2010](#) y [Columbu et al., 2018](#)). Dentro de las estructuras edificadas con este tipo de cemento y que se han estudiado en años recientes se encuentra el muelle del puerto *Cosanus*. En la [Figura 2.2a](#) se aprecia una sección de este, construida a base de cemento Romano hace más de 2000 años; Puzolana, cal, agregados finos con granulometría diversa, junto con agregado grueso distribuido aleatoriamente, presentando una apariencia similar al estilo de un concreto ciclópeo.

Por otro lado, en la [Figura 2.2b](#) se observa la implementación de mortero de cemento Romano aplicado en el junteado de bloques de piedra de 1.60 x 0.60 x 0.60 m, en la edificación de uno de los muros del puerto de *Pompeopolis*. Este muro constaba de 320 m de longitud. Cabe destacar el ingenio de este sistema, al dejar pequeños espacios para el ensamble de los bloques junto con el aprovechamiento de la geometría de los mismos (*i.e.* elementos exteriores perpendiculares a los interiores), aumentando así, la capacidad de resistir las fuerzas aplicadas por el oleaje de la región. También, en la [Figura 2.2c](#) se utilizó un mortero formado por cemento Romano, fragmentos de obsidiana, arenas de cuarzo y rocas de origen volcánico, para pegar de bloques de piedra. Esta construcción con fines artísticos, recreativos y de entretenimiento, es un claro ejemplo de la variedad de infraestructura en la que se utilizaban estos materiales.

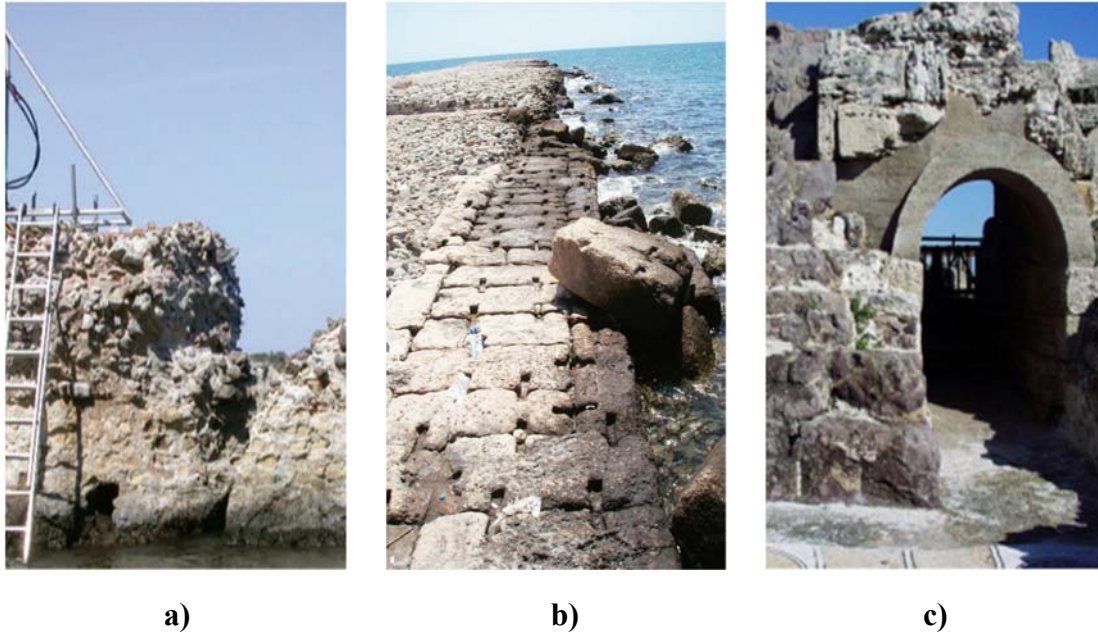


Figura 2.2. Ejemplos de durabilidad actual en estructuras del Imperio Romano expuestas al intemperismo en regiones marinas: a) muelle del puerto *Cosanus* en Orbetello, Italia (Oleson *et al.*, 2004); b) sección de muro del puerto de *Pompeiopolis* en Kastamonu, Turquía (Brandon *et al.*, 2010) y c) tribuna del *Nora theatre* en Sardinia, Italia (Columbu *et al.*, 2018).

Una de las edificaciones con cementantes Romanos de mayor reconocimiento internacional, por su complejidad en geometría, materiales y durabilidad, es el *Pantheon* en Roma (Fig. 1.2c), construido aproximadamente en 125 a. C. y con un uso continuo hasta nuestros días. Esta obra de ingeniería es la única conocida en Roma donde se utilizaron técnicas para modificar los pesos de la estructura, con la particularidad de que, con el aumento de la altura de la construcción, se empleaban materiales más ligeros con respecto a los inferiores (*e.g.* bloques de piedra, piedra pómez, ladrillo de arcilla, toba, basaltos, entre otros sucesivamente Jahren and Sui, 2017). Así, la parte más alta, donde se encuentra la cúpula (*i.e.* domo), está construida con un tipo de concreto aligerado fabricado con Puzolanas y piedra pómez como agregado. Posiblemente este sea el registro más antiguo de la implementación de esta técnica de disminución de cargas.

Además del desarrollo de un tipo de tecnología de concreto aligerado. Cabe mencionar que los Romanos también encontraron otras maneras de diseñar estructuras de menor peso, con la implementación de una gran cantidad de vasijas vacías de barro en muros y en arcos (Jahren and Sui, 2017).

Además de contemplar la sorprendente durabilidad de los cementantes Romanos (Fig. 1.2a-c y 2.2a-c), destacan sus propiedades mecánicas, sumamente avanzadas para su época, considerando el mínimo desarrollo de investigación y tecnología de esos tiempos. Se han realizado múltiples estudios (cf. Tabla 2.1) para determinar las propiedades mecánicas de agregados, morteros, bloques y concretos antiguos compuestos por estos materiales. Los especímenes de concreto presentan resistencias de 36.7 kg/cm² (3.6 MPa) en los cimientos del *Port of Trajan*, y 46.9 kg/cm² (4.6 MPa) en los muros de la *Basilica of Maxentius*. Resistencias de entre 52-95.9 kg/cm² (5.1-9.4 MPa) en los muros del muelle del puerto *Cosanus* (Fig. 2.2a) y resultados de 71.4-142.8 kg/cm² (7-14 MPa) en 80 estudios realizados por todo Europa (Brune *et al.*, 2010; Oleson *et al.*, 2004 y Jähren and Sui, 2017).

Mientras que en bloques conformados en su totalidad por estos cementantes o con proporción de los mismos, se obtienen resistencias de que van desde los 101 y llegan a alcanzar los 400 kg/cm² (10-40 MPa); estos rangos presentan variaciones drásticas dependiendo de las dimensiones de los ejemplares junto con la integridad de las muestras (ACI 232.1R, 2012 y Giavarini *et al.*, 2006). Brune *et al.* (2010) mencionan hallazgos de bloques compuestos por fragmentos de *caementa*; un tipo de concreto Puzolánico con agregado grueso de aproximadamente 10 cm de diámetro, presentando resistencia suficiente para soportar las cargas estáticas de los diseños arquitectónicos existentes en el “*Great Hall Vault of the Trajan Markets*”.

En el caso de morteros más antiguos se torna complicada la obtención de ciertas propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a la compresión, debido a la complejidad de obtener ejemplares íntegros. De los pocos estudios encontrados en la literatura se sabe que las resistencias van desde 8.2-170 kg/cm² (0.8-16.6 MPa) (e.g. De Casa *et al.*, 1999; Nappi *et al.*, 1979 y Giavarini *et al.*, 2006). Todo esto demuestra el buen comportamiento mecánico del cemento que fabricado a base de Puzolana y cal (cf. Tabla 2.1). Por un lado, considerando que el manejo de estos especímenes se encuentra restringido por el gran valor que representan para el patrimonio cultural, mientras que, por otro lado, la posible fragilidad elevada de las edificaciones que contengan dichos ejemplares (e.g. monumentos, muros, cimientos, entre otros) por lo que se convierte de carácter especial su gestión y manejo.

Tabla 2.1. Resumen de propiedades mecánicas de especímenes de agregados, morteros, bloques y concretos antiguos compuestos por cementantes Romanos (*i.e.* incorporando Puzolanas) reportados en la literatura.

Tipo	Puzolana (Tipo/clase/origen)	ρ (kg/m ³)	E (MPa)	σ (MPa)	τ (MPa)	Referencia
Af	Piedra pómez riolítica	840-870	2,400	N/D	1.1-2.1	Jackson <i>et al.</i> (2009)
Af	Rosse	1600–1800	N/D	0.15-0.25	0.09	Jackson <i>et al.</i> (2009) y Ventriglia (1971)
Af	Piroclásticos de Nápoles	990-1370	2,760	2.96	N/D	Jackson <i>et al.</i> (2009)
Ag	Travertino de Tivoli	2580	48,870-62,600	105	11-14	Jackson <i>et al.</i> (2005) y Giavarini <i>et al.</i> (2006)
Ag	Canteras de Carrara	2700	68,500	130	4.8	Logan (2006)
Ag	Lava lítica	2820	478,000	280	19	Ventriglia (1971)
Ag	Toba de cristal vítreo	1520	3,154	15	N/D	Jackson <i>et al.</i> (2005)
Ag	Toba lítica de cristal vítreo	1679	3,967	17	N/D	Jackson <i>et al.</i> (2005)
M	Toba de Lionato	1250-1850	N/D	3.7-16.6	0.82-1.60	De Casa <i>et al.</i> (1999)
M	Toba pómez	1270	N/D	6.5	0.78	Nappi <i>et al.</i> (1979)
M	N/D	N/D	N/D	0.8-7.1	N/D	Magalhães and Veiga (2009)
<i>m*</i>	Convencional	2,100	590-980	11-18	0.5	-
B	Piroclásticos de Santorini	N/D	N/D	12	N/D	ACI 232.1R (2012)
B	Fragmentos de <i>caementa</i> *	1,603	13,400	17	3.33	Brune <i>et al.</i> (2010)
B	Múltiple	1,635	13,400	10-40	3.33	Giavarini <i>et al.</i> (2006)
<i>b*</i>	Convencional	1,300-2,200	700-9,600	9-15	0.20	-
C	Toba de Tivoli	N/D	2,900	3.6	0.68	Brune <i>et al.</i> (2010)
C	<i>Caementa</i> *	1,376-1,805	800-9,170	5-6	0.77-0.88	Giavarini <i>et al.</i> (2006)
C	Múltiple	1,542-2,163	4,850-18,800	5.1-9.4	N/D	Oleson <i>et al.</i> , 2004
C	N/D	N/D	N/D	7-14	N/D	Jahren and Sui, 2017
<i>c*</i>	Convencional	2,400	24,820	20-40	2-5	-

Af= agregado fino; *Ag*= agregado grueso; *M*= mortero; *B*= bloque; *C*= concreto; *N/D*= no definido; ρ = densidad; E = módulo de elasticidad; σ = esfuerzo a compresión promedio; τ = esfuerzo cortante promedio; *=concreto Puzolánico con agregado grueso de aprox. 10 cm de diámetro (Brune *et al.*, 2010); *m**, *b** y *c**= propiedades típicas de morteros, bloques y concretos convencionales respectivamente.

Sin embargo, se han desarrollado tecnologías para la determinación propiedades mecánicas por medio de pruebas de laboratorio destructivas y no destructivas junto con la posibilidad de realizar ensayos en especímenes irregulares (Magalhães and Veiga, 2009 y Válek and Veiga, 2005). Este tipo de ensayos consisten en la adaptación de especímenes de aproximadamente 4 x 4 x 4 cm realizando minuciosos cortes para lograr obtener un mínimo de dos caras paralelas donde la resistencia se determina dividiendo la carga máxima entre el área promedio de la sección transversal de la muestra.

En el caso de presentarse la complicación de obtener las caras paralelas, se opta por adicionar un mortero de mayor resistencia para brindar confinamiento, simulando caras de un espécimen de 4 x 4 cm para obtener de esta forma el área de contacto necesaria para efectuar el ensaye. A pesar de todos los conocimientos desarrollados por civilizaciones antiguas, el manejo de la cal junto con la implementación de Puzolanas presentó un declive considerable después del Imperio Romano y continuó perdiéndose a lo largo de la alta Edad Media, en los tiempos donde se comenzaba a utilizar el término de cemento para relacionar a los morteros en general. No solo se perdió el uso de las Puzolanas, sino que disminuyó la calidad de la cal, por su excesiva calcinación. Sin embargo, desde el siglo XII la calidad de los cementantes en general recobró fuerza en el campo de la construcción, reviviendo la correcta calcinación de la piedra caliza, la separación de materiales que se encontraban naturalmente en las arenas (*e.g.* tierras, arcillas, limos, entre otros) y la reincorporación de materiales Puzolánicos (Belzard, 1998).

También, se comenzaba con la producción en masa de materiales cementantes que impulsó la industria de la construcción en estos tiempos. De acuerdo a Cowper, 2015 en el siglo XIII se lograban conseguir costales de cal de buena calidad con peso de aproximadamente 100 lb, que se comercializaban como material para ser mezclado con arenas, Puzolanas y fragmentos de rocas de la región para realizar edificaciones. Los materiales, técnicas, edificaciones y propiedades mencionadas anteriormente, podrían ser considerados como las bases para el comienzo del desarrollo de tecnología con Puzolanas implementándolas en la construcción de múltiples obras ingenieriles. Sin embargo, este desarrollo se vio estancado durante un gran periodo de tiempo hasta llegar a uno de los avances de mayor importancia en el área de los cementos.

En el año 1756, las múltiples investigaciones de *John Smeaton*, uno de los precursores de todos los inventos y descubrimientos de la actualidad relacionados a la tecnología del cemento, marcaron la historia. Sus investigaciones se conocen como un parteaguas posterior a los periodos en que se construyeron las majestuosas edificaciones romanas (Fig. 1.2b-c) y anteriormente a la invención del cemento Portland. Las cuales concluyeron en la identificación de las primeras propiedades de un cementante hidráulico compuesto por Puzolanas, que en conjunto con edificaciones construidas con sus diseños de mezclas (Fig. 2.3a-c), lograron realzar la influencia de estos materiales en el marco de los cementantes hidráulicos.

En la [Figura 2.3a](#) se muestra una de las principales obras edificadas por este personaje de la historia: un faro construido con mortero compuesto por cal hidráulica y Puzolanas de *Civita Vecchia*, en 1759, sobre las rocas de *Eddystone* en la bahía del puerto de *Plymouth*, Inglaterra, sustituyendo a su antecesor que se vio afectado por la devastadora fuerza de un huracán en años posteriores.

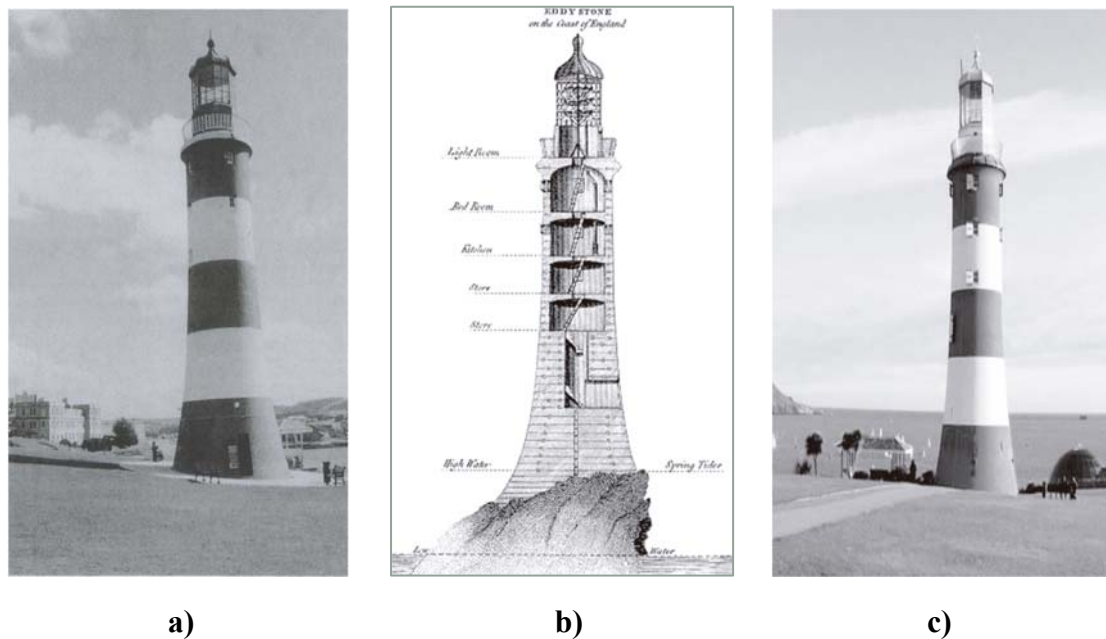


Figura 2.3. *Smeaton Tower* en el puerto de *Plymouth*, Inglaterra: a) construcción del faro en 1759 ([Belzard, 1998](#)); b) partes y sección trasversal ([Jahren and Sui, 2017](#)) y c) reubicación en 1882 a *Plymouth Hoe*, sur de la bahía del puerto de *Plymouth* ([Jahren and Sui, 2017](#)).

El faro se construyó con estos materiales por las investigaciones que *Smeaton* desarrolló en aquellos tiempos, donde buscaba aumentar las resistencias de la edificación por los agentes de intemperismo, junto con las acciones accidentales, tales como las que destruyeron el faro anterior y encontrar mezclas con un mejor desempeño bajo el agua.

Dentro de sus experimentos implementó una metodología para identificar las propiedades de distintos orígenes de materiales calcáreos, al realizar especímenes sencillos de morteros y sumergiéndolos inmediatamente después del fraguado. El diseño de 24 m de altura está conformado por ocho niveles, con 93 escalones, para llegar al cuarto de iluminación del faro ilustrado en la [Figura 2.3b](#).

Esta construcción tuvo un periodo de vida útil de 23 años hasta que fue reubicado en *Plymouth Hoe* al sur de la misma bahía del puerto de *Plymouth*, el cual permanece en buenas condiciones en la actualidad (Fig. 2.3c) y es considerado como una de las atracciones turísticas más icónicas de este puerto (Belzard, 1998 y Jähren and Sui, 2017).

Después, a mediados de 1798, se introducía el término “cemento Romano” por *James Parker* en su publicación “*Roman cement, artificial terras and stucco*” donde resaltaba la particularidad de las grandes capacidades hidráulicas que presentaban las Puzolanas en mezclas de concreto, asemejándose a las estructuras del antiguo Imperio Romano (Belzard, 1998). Más adelante, tomando como punto de partida las investigaciones de *Smeaton*, el desarrollo de los cementantes hidráulicos presentó una evolución gradual en varios países a principios del siglo XIX, con avances en Inglaterra, Francia, Londres, EUA, entre otros. Este avance culmina con el acontecimiento de mayor importancia en la historia de los cementantes en el año 1824: la patente del cemento Portland presentada por *Joseph Aspdin*. Fue nombrada de esta manera por la apariencia y propiedades similares a las de las piedras de la región de Portland, la cual era considerada como un material de calidad y durabilidad superior con alta aprobación por parte de los constructores de finales del siglo XVII.

A partir de este momento se desarrolló considerablemente la investigación para la obtención de cementantes con capacidades superiores a los que se encontraran en el mercado, a partir de la implementación de distintos procesos de fabricación, técnicas de molienda, diversos agregados seleccionados por las características químicas que se conocían de importancia para la generación de materiales de calidad, variaciones en temperaturas de calcinación y múltiples transiciones en la manufactura de cementos (Belzard, 1998). De la mano del incremento de las obras de infraestructura, los constructores comenzaron a exigir mejores características que se acercaran a un material perfecto para la edificación. Dando el comienzo al desarrollo de normatividad para asegurar la calidad de los materiales cementantes, surgieron especificaciones estándar en la mayoría de los países generadas por entidades oficiales y organizaciones de ingeniería; tanto como por consumidores y fabricantes de cemento. Se conocen especificaciones estándar para cementos desde 1877 en Alemania, desarrolladas por el *German Cement Works Association*. La primera normativa británica apareció en 1904 (*i.e.* BS 12); fue desarrollada el *Standards Committee* (*n. British Standards Institution*).

Esta, aparece el mismo año que la normativa americana emitida por la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) (Belzard, 1998). Junto con estos acontecimientos, fundamentales para el avance de los cementantes, se presentaron otros eventos que influyeron negativamente en la generación de los materiales que se conocen en la actualidad. El mayor problema fue que se favorecieron los materiales y procesos que representaban una ganancia económica y permitían concentrar la producción, como el cemento Portland de *Aspdin*, en detrimento de otros cementantes que eran más sencillos de fabricar.

Así, el cemento Portland fue perfeccionándose y fue la base para el desarrollo de materiales de alta resistencia y durabilidad. Su uso se fue volviendo obligatorio gracias a las normativas nacionales e internacionales, y su producción fue haciéndose dependiente de complicados hornos, metodologías de calcinación y dosificación de componentes. Mientras tanto, se abandonó casi por completo la investigación sobre los cementos basados en la Puzolana, que eran de buena calidad y menos dependientes de complicados procesos industriales.

2.2. Definición, clasificación, Puzolanas naturales y artificiales

El creciente interés por el entendimiento de la tecnología del cemento y la búsqueda de alternativas al cemento Portland ha dado lugar a múltiples simposios, congresos e investigaciones, que buscan aportar nuevos materiales más sustentables, con capacidades cementantes que se asemejen a los conglomerantes hidráulicos que se comercializan convencionalmente. Estos han presentado un fuerte desarrollo en las últimas décadas, generando una gran variedad de estudios junto con metodologías para la determinación de la viabilidad y potencialidad de aportar materiales alternativos que no dependan de procesos industriales complejos. Una línea importante en estos esfuerzos es el desarrollo de cementantes Puzolánicos. Anteriormente, las Puzolanas solo hacían referencia a los materiales de origen volcánico que se encontraban en la cercanía de *Pozzuoli*, en la bahía de Nápoles, Italia. Fueron conocidos por mucho tiempo como materiales silicios/sílico-aluminosos que al hidratarlos junto con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reaccionan creando compuestos cementantes (*i.e.* conglomerantes hidráulicos); (Belzard, 1998; Vargas, 2002; Oleson *et al.*, 2004; Brandon *et al.*, 2010; Cowper, 2015 y ASTM-C125, 2019).

Por otro lado, un concepto más acertado y apegado a la realidad que se presenta recientemente en el mundo de los materiales, es la propuesta por la ASTM que afirma que las Puzolanas son materiales silíceos o silíceo-aluminosos que presentan un cierto porcentaje de capacidades cementantes por sí mismos y/o al disminuir el tamaño de sus partículas mezclándolos con agua junto con hidróxido de calcio (Ca (OH)_2), a temperatura ambiente, reaccionan creando compuestos con propiedades cementantes (ASTM C593, 2019). En las últimas décadas se ha ampliado el concepto para abarcar una mayor cantidad de materiales que correspondan a esta clasificación.

Dentro de la literatura tradicional el término Puzolana engloba dos principales definiciones. La de mayor renombre, descrita en la sección anterior, refiriéndose a las rocas piroclásticas, vítreas o zeolíticas que se encontraban e implementaban en los alrededores de la bahía de *Pozzuoli* para múltiples propósitos constructivos. La segunda se refiere a todos los materiales de origen natural o artificial, que logran obtener la particularidad de endurecer con la presencia de agua mezclada con hidróxido de calcio o algún material que presente propiedades cementantes (*e.g.* cemento Portland). Sin embargo, en esta sección se discutirá la definición tradicional para abordar la complejidad de la clasificación de las Puzolanas. Dicha complejidad, se debe a que la terminología actual comprende diferencias en las propiedades y aplicaciones estudiadas en múltiples investigaciones donde se contempla la composición química, naturaleza mineralógica junto con el origen geológico y no solamente atribuyéndose esta terminología por la propiedad principal anteriormente mencionada (*i.e.* endurecimiento). En la actualidad, las Puzolanas son clasificadas por su origen comprendiéndose en dos grandes grupos con la posibilidad de una subdivisión que se encuentra entre ambas clasificaciones (Fig. 2.4). Por un lado, las Puzolanas naturales encontradas de manera natural sin necesidad de utilizar algún proceso químico o industrial para su obtención.

Por otro lado, las artificiales, comprendidas principalmente por residuos de productos de manufactura o de la modificación química de componentes para atribuir la propiedad principal de las Puzolanas. Dentro de estos grupos se encuentra la subdivisión correspondiente a la obtención de materiales que pudieran cumplir con ambas clasificaciones, tales como materiales activados térmicamente, mezclas de distintos materiales orgánicos y la calcinación de arcillas (McCarthy and Dyer, 2019).

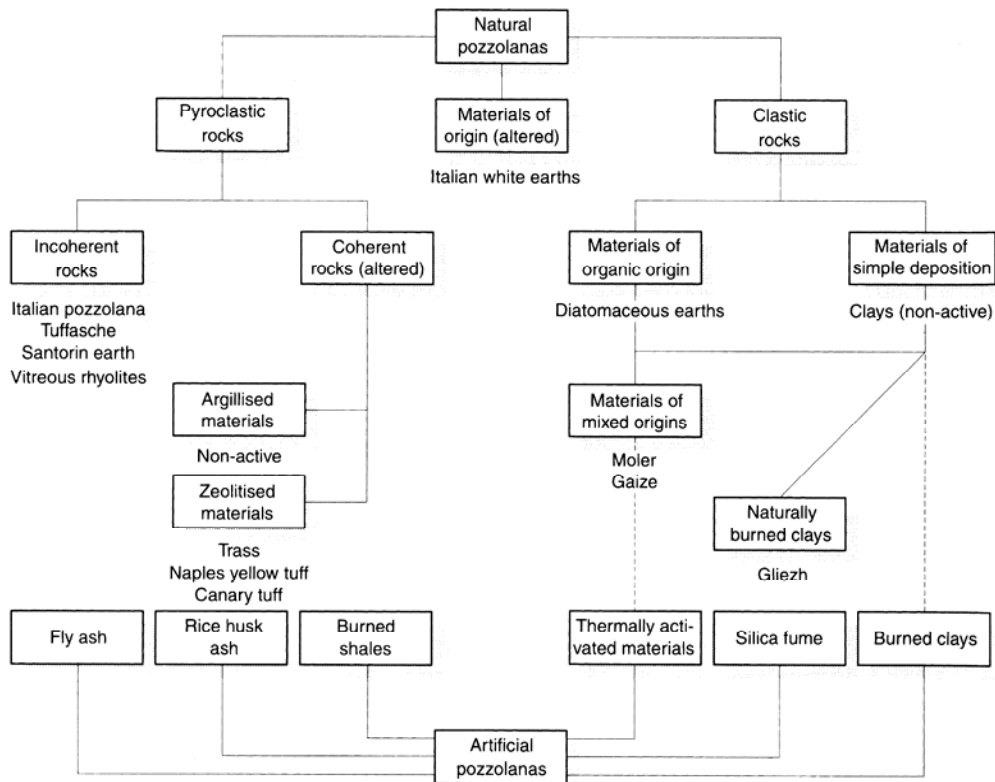


Figura 2.4. Clasificación de materiales Puzolánicos (McCarthy and Dyer, 2019).

En la [Figura 2.4](#) se aprecia una clasificación de materiales Puzolánicos propuesta originalmente por [Massazza \(1976\)](#), la cual comprende los dos grupos de materiales. Considerando a las Puzolanas naturales de origen mineral conformadas por rocas piroclásticas, las cuales se forman producto de erupciones volcánicas cuando el magma estalla en el aire, donde sus altas presiones disminuyen desprendiendo gases que se impregnan en el mismo para enfriarse rápidamente creando materiales piroclásticos, presentándose en dos tipos estructurales, vítreos o cristalinos. Posteriormente estos materiales se depositan en las partes bajas de las formaciones volcánicas en forma de ceniza (*incoherent rocks*). Cabe destacar que las rocas cristalinas, carecen de aptitudes Puzolánicas por sí mismas. Los depósitos geológicos aumentan con el paso del tiempo, formándose capas que aumentan la presión y, junto con la consideración de los factores del intemperismo (*coherent rocks*), modifican las propiedades Puzolánicas de los materiales por zeolitización (*i.e.* transformación de minerales por aplicación de presión a altas temperaturas en presencia de agua) que las aumenta, y la argilización (*i.e.* transformación en

minerales arcillosos) que las disminuye. Estos se encuentran a manera de estratos en grandes depósitos más o menos coherentes. Algunos ejemplos de materiales con poca coherencia son la piedra pómez de Ciudad Real, Gerona y Almería, cenizas de tobas, los materiales piroclásticos de *Santorini*, o las riolitas vítreas de EUA y la India. Algunos ejemplos de materiales coherentes son las tobas de Nápoles, las tobas de Islas Canarias, o las tobas de *Eifel* (*i.e. trass*) (McCarthy and Dyer, 2019). Los materiales clásticos se refieren a las Puzolanas naturales de origen orgánico, conformadas por sedimentos de origen lacustre o marino, predominantes en ópalo, constituido por esqueletos de especies marinas abundantes en silicio (tierra de diatomeas).

Sin embargo, esta clase de Puzolanas, al igual que las de composición cristalina, no son recomendables para la sustitución de grandes porcentajes de cementante convencional debido a que presentan una gran área de superficie específica, lo que requiere mayores cantidades de agua para reaccionar correctamente, presentando resultados negativos en la resistencia del cementante. Otros ejemplos son el Gliezh, que es un material arcilloso encontrado en Asia conformado por lutitas calcinadas por incendios de carbón subterráneos naturales (McCarthy and Dyer, 2019). Dentro de las artificiales se encuentran dos clasificaciones correspondientes a la calcinación de rocas arcillosas o esquistosas, y el material que se obtiene como residuo al realizar procesos industriales, tales como cenizas volantes producto de la quema de carbón, humo de sílice, ceniza de arroz, entre otros (Fig. 2.5a-c).

En la Figura 2.5 se muestran partículas de Puzolanas artificiales comúnmente utilizadas en el desarrollo de conglomerantes hidráulicos alternativos al cemento Portland. Estos tamaños de partículas presentan diámetros promedio desde menos 1 μm (micrómetro) hasta más de 100 μm y una superficie específica de entre 300-20,000 m^2/kg^1 . La ceniza volante (Fig. 2.5a) se ha implementado en mezclas de morteros desde 1930 como material cementante suplementario en diversas partes del mundo, resultado de la pulverización del carbón empleado en las plantas de generación de energía eléctrica. Donde mediante un proceso de combustión las impurezas minerales del carbón (*e.g.* arcilla, feldespatos, cuarzo, esquito, entre otros) se funden para posteriormente solidificarse en partículas vítreas esféricas conocidas con este nombre.

¹ Esta superficie generalmente es obtenida por el método de permeabilidad al aire *Blaine* que determina el área superficial que presenta un kilogramo del material. Los cementos convencionales y los de alta resistencia tienen superficies de aproximadamente 300-400 m^2/kg y 500-600 m^2/kg , respectivamente (Kosmatka *et al.*, 2003).



Figura 2.5. Partículas de Pozzolanas artificiales comúnmente utilizadas en el desarrollo de conglomerantes hidráulicos alternativos al cemento Portland: a) ceniza volante; b) humo de sílice y c) metacaolín (Kosmatka *et al.*, 2003).

Presentan tamaños de partícula variando de menos de 1 μm a más de 100 μm con un tamaño de partícula promedio que mide menos de 20 μm . Solo del 10% al 30% de las partículas en masa son mayores de 45 μm con superficie específica típicamente de 300-500 m^2/kg . De manera similar se obtienen las partículas de humo de sílice (Fig. 2.5b) tratándose de un residuo generado a partir de la generación de aleaciones de silicio o ferro-silicio, por medio de hornos eléctricos con temperaturas de alrededor de los 2000 $^{\circ}\text{C}$. Con partículas de diámetro de 1 μm (aproximadamente 100 veces más pequeño que las partículas de cemento) y una superficie específica de aproximadamente 20,000 m^2/kg . Se mezcla en cantidades entre 5-10% de la masa total del cementante y se utiliza en aplicaciones donde es necesario un grado de impermeabilidad considerable, junto con altas resistencias a la compresión (Kosmatka *et al.*, 2003).

Por otro lado, el metacaolín (Fig. 2.5c) es el resultado de la calcinación de arcillas de caolín. Este último, es un silicato de aluminio hidratado producto de la descomposición de rocas feldespáticas nombrado con este término por la predominancia del mineral caolinita. Presenta un tamaño promedio de partícula de 1-2 μm con una superficie específica de 650-1350 m^2/kg . Tiene aplicaciones especiales cuando se requiere permeabilidad baja con resistencias altas en una proporción del 10% de la masa total del cementante (Kosmatka *et al.*, 2003). Vargas, 2002 menciona que las Pozzolanas tienen la particularidad de reaccionar con otras sales cálcicas, así como con compuestos formados por óxidos alcalino-térreos, de igual forma que las mencionadas

anteriormente (*i.e.* en presencia de agua y temperatura ambiente) para reaccionar en conjunto obteniendo silicatos y aluminatos hidratados asemejándose a los productos de reacción que conforman el cemento Portland. Es posible definir si el tipo de material que se está implementando se trata de una Puzolana al seguir las recomendaciones de la literatura hasta este punto, conociendo que cualquier material que cumpla con las definiciones mencionadas puede ser denominado de esta forma. Sin embargo, además de cumplir con las definiciones aceptadas por la comunidad científica, deben de contar con características y comportamientos específicos para considerarse materiales de esta índole. Por lo tanto, en la siguiente sección se abordarán las propiedades químicas de las Puzolanas.

2.3. Composición química, reacción, actividad Puzolanica y endurecimiento

Las Puzolanas en general presentan una amplia variación de componentes que se encuentran relacionados directamente con el origen de las mismas. En secciones anteriores, se mencionan algunos de los componentes de estas, principalmente la sílice (SiO_2). Sin embargo, cuentan con una gran variedad de compuestos que intervienen en la reacción con el hidróxido de calcio y/o cemento conformados por óxidos de aluminio (Al_2O_3), de hierro (Fe_2O_3), de calcio (CaO), magnesio (MgO), sodio (Na_2O), potasio (K_2O), titanio (TiO_2) y azufre (SO_3) para complementarse y formar compuestos cementantes. La [Tabla 2.2](#) muestra rangos de componentes químicos de Puzolanas naturales de origen mineral encontrados en la literatura en donde se aprecia una variación considerable en los límites de estos (max-min). La sílice y la alúmina (Al_2O_3) resaltan como los de mayor presencia, conformando hasta el 90% y el 32% de la masa respectivamente, lo cual indica un carácter ácido del material Puzolánico. La importancia del contenido de ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) se destaca por el hecho de que las fases vítreas activas de las Puzolanas son generalmente más ricas en contenido de sílice y alúmina. Cabe mencionar que los contenidos de álcali (Na y K) pueden ser potencialmente altos, cercanos al 13% en masa.

También, se puede observar que las pérdidas por fusión (PF) varían significativamente desde valores muy bajos hasta un 19.60%. Este fenómeno puede deberse a la pérdida de agua en la cristalización de los minerales de arcilla, así como la descomposición de los minerales de carbonato en Puzolanas incoherentes.

Por lo tanto, en las Puzolanas coherentes, las PF tienden a ser más altas, pues los procesos de zeolitización y argilización incorporan agua a los cristales (McCarthy and Dyer, 2019). Los contenidos de álcali Na₂O y K₂O se relacionan en cierta forma con la reacción Puzolánica al momento de efectuarse el equilibrio de la reacción con hidróxido (Luxán and Sánchez, 1985).

Tabla 2.2- Composición química de Puzolanas naturales de origen mineral con rangos de componentes químicos encontrados en la literatura (%).

<i>País / Parámetro</i>	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>MgO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>TiO₂</i>	<i>SO₃</i>	<i>P.F.</i>	<i>Referencia</i>
Italia / España	42-72	11-22	1-14	1-12	0.2-11	1-11	2-12.3	-	0.1-1	0.9-15	Callejas (1969)
México* ^a	67-78	12-16	0.6-3	3-5	0.4-3	4-6	1-2	-	-	-	Quantin <i>et al.</i> (1993)
México* ^b	52-72	13-21	1-7	0-7	0-5	0-4	1-5	-	0-1	0-14	Uribe (1995)
México* ^c	59-60	16-18	2-3	6-7	3-5	4-5	0-1	0-1	-	0-0.1	Savov <i>et al.</i> (2008)
Arabia Saudita	41-43	16-17	14-17	9-11	1-4	0-0.2	0-1	-	0-0.4	2-3	Khan and Alhozaimy (2011)
CL, DM, IT, FR, US, DE	32-90	3-24	0-16	0-16	0-8	0-13	0-8	-	0-1	0-20	ACI 232.1R (2012)
China	53-77	9-16	1-5	0-7	0-3	0-4	2-8	-	-	1-7	Yu <i>et al.</i> (2015)
ZA, TR, JO, SA	43-57	13-32	3-13	3-11	1-11	0-1	0-1	0-3	0-1	1-3	Husein Malkawi (2017)
Italia	44-53	17-19	4-12	5-12	1-7	1-3	0-8	0-1	0-1	3-10	McCarthy and Dyer (2019)
<i>Media</i> * ^Σ	<i>60.33</i>	<i>15.91</i>	<i>5.10</i>	<i>4.89</i>	<i>2.47</i>	<i>2.78</i>	<i>3.24</i>	<i>0.78</i>	<i>0.23</i>	<i>4.21</i>	
<i>Desviación estándar</i> * ^Σ	<i>11.05</i>	<i>3.92</i>	<i>4.28</i>	<i>3.85</i>	<i>2.48</i>	<i>2.20</i>	<i>2.46</i>	<i>0.64</i>	<i>0.19</i>	<i>3.92</i>	
<i>Mínimo</i> * ^Σ	<i>31.60</i>	<i>3.20</i>	<i>0.00</i>	<i>0.08</i>	<i>0.00</i>	<i>0.10</i>	<i>0.10</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	
<i>Máximo</i> * ^Σ	<i>89.70</i>	<i>32.23</i>	<i>17.25</i>	<i>16.00</i>	<i>11.15</i>	<i>13.05</i>	<i>12.30</i>	<i>2.54</i>	<i>0.82</i>	<i>19.60</i>	

P.F. = Pérdidas por fusión; CL= Chile; DM= Dominica; IT= Italia; FR= Francia; US= Estados Unidos de América; DE= Alemania; ZA= Sudáfrica; TR= Turquía; JO= Jordania; SA= Arabia Saudita; *a, *b, *c= química relacionada con materiales de contexto: tepetate, jal y ceniza volcánica colima respectivamente; *Σ= parámetros determinados con todos los valores de los rangos de la literatura.

La reacción Puzolánica es efectuada por la combinación de un material Puzolánico con hidróxido de calcio en presencia de agua. El hidróxido de calcio se encuentra en gran cantidad en la cal hidratada y también en el cemento Portland. La reacción que se genera es similar a una reacción ácido-base entre el hidróxido de calcio y los álcalis con los óxidos (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) de la Puzolana.

En esta se presentan dos procesos: un decremento gradual de la cantidad de hidróxido de calcio, junto con una considerable formación de hidrosilicatos de calcio, hidro-aluminatos e hidro-aluminosilicatos de calcio tratándose de productos muy similares a los de la hidratación del cemento Portland (ACI 232.1R, 2012). La “actividad Puzolánica” es una de las principales variables para obtener la calidad de un material de este tipo. Consiste en todas las reacciones efectuadas en la conformación de un material Puzolánico (*i.e.* mezclado de Puzolana, cal, cemento y agua) con la finalidad de obtener dos parámetros indicadores: conocer la cantidad de hidróxido de calcio y/o cemento con la que es posible combinar un material Puzolánico y la velocidad en que se produce la combinación de estos. Existen múltiples estudios en donde se reportan dos factores principales involucrados en la actividad Puzolánica: el contenido de sílice amorfa y el tamaño de sus partículas (Benezet and Benhassaine, 1999; Wang *et al.*, 2001; Vargas, 2002; Binici and Aksoğan, 2006; Cordeiro *et al.*, 2011). Al determinar la calidad de un material Puzolánico, partiendo solamente de la composición química que lo conforma, se obtiene un parámetro incierto, debido a que se presentan variaciones considerables en los porcentajes de compuestos que conforman estos materiales. Además, se conoce que esta composición no representa una relación directa a la obtención de esta actividad (Vargas, 2002; ACI 232.1R, 2012 y McCarthy and Dyer, 2019).

Sin embargo, hay diversos factores que presentan una relación más directa con el rendimiento de una Puzolana natural, como la composición mineralógica, la temperatura de procesamiento de los materiales calcinados, el área superficial específica, finura, temperatura de curado, activación química, entre otros. Los componentes mineralógicos de las Puzolanas naturales también pueden variar sustancialmente, desde materiales amorfos hasta compuestos cristalinos, donde la presencia y composición de estos compuestos amorfos favorecen la actividad Puzolánica del material. La calcinación, por lo general es fundamental para la activación de propiedades Puzolánicas en materiales arcillosos y esquistosos, donde la temperatura difiere dependiendo de la composición mineral del material; presentándose en cenizas volcánicas, un aumento en la densidad a medida que aumentaba la temperatura de calcinación (ACI 232.1R, 2012). El tamaño de las partículas, conocido como finura, puede medirse por medio de la distribución del tamaño de las mismas, la finura de Blaine y mediante un análisis del área de superficie de absorción BET.

El incremento de la finura contribuye sustancialmente a la actividad Puzolánica y, dependiendo del origen del material, la resistencia de las mezclas de cal y Puzolana aumentan de manera lineal con la finura de Blaine hasta ciertos tamaños (Benezet and Benhassaine, 1999). Por su parte, la modificación de la temperatura de curado, contemplando el caso de la mayoría de las reacciones químicas, representa una función de catalizador en la reacción cemento y cemento-Puzolana, con mayor escala en las mezclas con Puzolanas naturales, debido a que presentan mayor energía de activación aparente (ACI 232.1R, 2012). Por otro lado, la activación química cambia los productos de hidratación y puede representar incrementos considerables en la actividad Puzolánica, tales como: las adiciones de Na_2SO_4 o CaCl_2 (*i.e.* sulfato de sodio y cloruro de calcio respectivamente) aumentan significativamente la resistencia de las pastas de cal y Puzolana; la adición de $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ (*i.e.* bassanita) mejora la resistencia del cemento de cal-Puzolana a los 28 días; la adición de 4% de Na_2SO_4 amplifica significativamente la resistencia inicial de las pastas de lima-Puzolana natural, entre otras (ACI 232.1R, 2012).

En las últimas décadas se han desarrollado estudios para la determinación de la actividad Puzolánica con diferentes parámetros y metodologías dependiendo de la naturaleza y complejidad del material a caracterizar. En la [Tabla 2.3](#) se aprecian algunos métodos de evaluación de actividad Puzolánica reportados en la literatura que pueden correlacionarse de manera satisfactoria. La absorción de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ consiste en el estudio de las velocidades de las reacciones químicas y de los mecanismos que realizan los reactivos para generar productos (*i.e.* cinética química). La obtención del tiempo de fraguado se determina comúnmente por el método de Vicat, al determinar la resistencia que ejerce una pasta formada únicamente con agua mezclada con el material cementante en un intervalo de tiempo, por medio de la penetración de una aguja metálica de forma cilíndrica que tiene una sección de 1 mm^2 y una masa de $300 \pm 1 \text{ g}$ empleando un aparato Vicat manual o automático (NMX-059, 2017).

Los distintos métodos de solubilidad se basan en el mismo principio: el obtener la máxima cantidad de una sustancia que se puede disolver en una cantidad determinada de disolvente a una temperatura específica expresada como la máxima cantidad de gramos de soluto disueltos por cada 100 ml de disolvente o la máxima cantidad de gramos de soluto disueltos por cada 100 g de disolvente.

La conductividad eléctrica es la inversa de la medida de resistencia en *ohms*, determinada comúnmente entre las caras opuestas de un cubo de 1.0 cm en una solución acuosa a una temperatura especificada, donde esta solución se comporta como un conductor eléctrico con la posibilidad de aplicar las leyes físicas de la resistencia eléctrica. Por otro lado, las resistencias mecánicas se evalúan en mezclas de Puzolanas elaboradas tanto con hidróxido de calcio como en proporciones de cemento Portland, con la finalidad de obtener el esfuerzo admisible que puede soportar un espécimen realizado con dichas mezclas bajo estándares determinados (e.g. [NMX-061](#)) bajo una carga de aplastamiento.

Tabla 2.3. Resumen de métodos de evaluación de actividad Puzolánica reportados en la literatura.

<i>ID</i>	<i>Método</i>	<i>Criterio de Evaluación</i>	<i>Referencia*</i>
<i>A</i>	Absorción de Ca (OH) ₂	Cantidad de cal absorbida en una solución de Puzolana /Ca (OH) ₂ saturada a diferentes edades	Shi (2001) y Valdez (2002)
<i>B</i>	Tiempo de fraguado	Tiempo de fraguado en pastas con relación 1:4 de Ca (OH) ₂ – Puzolana por el método de Vicat	Shi (2001)
<i>C</i>	Solubilidad en solución de Ca (OH) ₂ saturado	Disminución de Ca ²⁺ en solución de Ca (OH) ₂ en la adición de una Puzolana	Shi (2001)
<i>D</i>	Solubilidad alcalina	Disolución de SiO ₂ o SiO ₂ + R ₂ O ₃	Shi (2001)
<i>E</i>	Solubilidad en ácido	Disolución de SiO ₂ + R ₂ O ₃	Shi (2001)
<i>F</i>	Solubilidad alcalina + tratamiento ácido	Disolución de SiO ₂ + R ₂ O ₃	Shi (2001)
<i>G</i>	Conductividad eléctrica	Cambio de conductividad eléctrica en solución saturada de Ca (OH) ₂	Tashima et al. (2014)
<i>H</i>	Resistencia mecánica Puzolana + CPO	Resistencia en mezclas de cemento Portland + Puzolana en condiciones controladas a una edad específica.	Uribe (1995) ; Fragoulis et al. (1997) y Vargas (2002)
<i>I</i>	Resistencia mecánica Puzolana + Ca (OH) ₂	Resistencia en mezclas de Ca (OH) ₂ + Puzolana en condiciones controladas a una edad específica.	Uribe (1995) y Vargas (2002)

Comúnmente se le conoce a este procedimiento como evaluación de la resistencia a compresión simple y es uno de los parámetros de mayor importancia en el mundo de los materiales cementantes. Esta resistencia se calcula matemáticamente dividiendo la carga máxima entre el área transversal original de un espécimen en un ensayo de compresión con ayuda de una maquina especialmente calibrada para la determinación de valores precisos y significativos.

2.4. Sustentabilidad en Puzolanas: propiedades, ventajas, inconvenientes y aplicaciones

Se conoce que la industria cementera es responsable del 5% del CO₂ emitido mundialmente, generando por cada tonelada de cemento Portland, una producción de aproximadamente 0.87 toneladas de dióxido de carbono; además de requerir alrededor de 4 a 7 GJ de energía para producir una tonelada de cemento ([Damtoft et al., 2008](#), [Ramezaniapour, 2014](#) y [Andrew, 2018](#)). Su industria consume el 9.66% de energía en el sector industrial en México, con una demanda de 162.35 PJ en 2018 ([SENER, 2019](#)). Esta cantidad es equivalente aproximadamente a 45 mil-millones de kw/h, que al extrapolarla en base a la tarifa asignada por la CFE el mismo año, se generaría un gasto de 95 mil-millones de pesos MXN ([CFE, 2020](#)).

La creciente preocupación por el gran impacto ambiental generado por la elevada fabricación de cementantes alrededor del mundo, ha logrado un interés particular en el desarrollo de investigación en materiales alternativos para lograr edificación sustentable. Esto ha fomentado el interés en la búsqueda de cementantes con bajo consumo de energía y con la menor generación de CO₂ posible, generando líneas de investigación para la reutilización de residuos industriales, como se abordó en secciones anteriores. En base a lo anterior, en las próximas décadas uno de los principales desafíos para las industrias de cemento, concreto y construcción en general, será reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, particularmente el dióxido de carbono. Con esto en mente, desde hace algunos años se ha manifestado la creciente preocupación de este problema en múltiples organismos mundiales. En 2009, la Agencia Internacional de Energía (IEA) y el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sustentable (WBCSD) emitieron un documento en donde se detallaban las posibles soluciones a estos problemas medioambientales llamado "Ruta de tecnología de cemento" ([IEA and WBCSD, 2009](#)).

En este documento se presentan estrategias para lograr la disminución de las emisiones de CO₂ para el año 2050, dentro de las cuales resaltan: desarrollo superior en eficiencia térmica y eléctrica, utilización de combustibles alternativos para todos los procesos implicados en la generación de cementantes y sus derivados; sustitución de Clinker, captura y almacenamiento de carbono, entre otros. La eficiencia térmica y eléctrica junto con la utilización de nuevos combustibles y la captación de CO₂ por el mismo material, se encuentran en constante desarrollo, sin aun presentar una adopción como tecnología generalizada mundialmente. Por otro lado, la tecnología que se encuentra más desarrollada y estudiada hasta estos días, es la sustitución parcial del Clinker, como se abordó en secciones anteriores, con porcentajes que cumplan con las normativas correspondientes.

Algunas empresas como Holcim[®] han logrado reducir las emisiones de CO₂ hasta en 30%, con el objetivo de que para 2030 sea la generación de 520 kg de CO₂ por tonelada de cementantes comparado con los 800 kg de 1990 (Holcim, 2020). A manera de contraste a esta información, de acuerdo a Jähren and Sui (2017) en la actualidad el 35% de la producción de cemento en México utiliza Puzolanas naturales. Contrariamente a la creencia común, el concreto realizado con cementantes convencionales no se encuentra exento de graves problemas de degradación. Los costos reales de las reparaciones inducidas por la corrosión en los puentes de autopistas de Estados Unidos de América superan los miles de millones de dólares anuales, estimándose que los costos indirectos de reparación, debido a demoras en el tráfico y la pérdida de productividad resultante, se multiplican en diez veces por estas cuestiones.

Estos problemas no solamente se limitan a los puentes de concreto, sino que también, en elementos estructurales (*i.e.* muros, columnas, travesaños, entre otros) se observan distintos problemas mostrando signos variables de deterioro debido a la edad, el ambiente hostil (*i.e.* intemperismo), la carga excesiva, entre otros (ACI 222R, 2019). Por lo tanto, la generación de investigación en materiales que presenten una durabilidad significativa sobre el cemento Portland, es una de las propuestas potenciales en la industria de la construcción y representa una postura deseable para el desarrollo sustentable. La creación de cementantes duraderos para proyectos de infraestructura minimizaría el impacto negativo a largo plazo en las estructuras de construcción, preservando al mismo tiempo estas estructuras durante generaciones.

Como se abordó en las secciones iniciales, la implementación de Puzolanas en mezclas con materiales cementantes ha manifestado un desempeño extraordinario en cuestiones de durabilidad, donde estos materiales se han utilizado para realizar construcciones desde los tiempos del Imperio Romano. Algunas de estas construcciones han prevalecido a lo largo de los años a pesar de los factores implicados en el deterioro de edificaciones (*e.g.* propiedades inadecuadas del suelo, materiales defectuosos, errores de diseño junto con agentes externos como incendios, terremotos y alteraciones humanas; [Yüzer et al., 2011](#)). Es considerable la durabilidad que han presentado estas estructuras junto con el nivel de conservación de las mismas. Esto se atribuye a la implementación de materiales resistentes y duraderos adicionados con Puzolanas, a un diseño estructuralmente conservador, la calidad de mano de obra y a una reparación-renovación constante ([Goldsworthy and Zhu, 2008](#)). Además de la durabilidad que las estructuras desarrollan con la incorporación de Puzolanas, desde hace décadas se conocen múltiples ventajas que resultan de esta incorporación.

En general, estas ventajas son: en estado fresco, disminuye la relación agua/cemento, reduce la segregación y evita la exudación. En resistencias mecánicas a largo plazo (*i.e.* al prolongarse el período de endurecimiento) aumenta la resistencia tanto a tensión como a compresión. En la impermeabilidad, se produce mayor cantidad de tobermorita (silicatos hidratados), se reduce la porosidad, aumenta la compacidad y se evita la formación de eflorescencias por sales. En la estabilidad de volumen, se generan mejores propiedades ante la expansión por cal libre, incrementando significativamente cuando se cuenta con tratamiento térmico. También, se presentan mejoras en la expansión por sulfatos, la expansión por áridos reactivos, la retracción hidráulica por secado y en la retracción térmica. En la durabilidad química, se generan comportamientos más eficientes ante ataques de aguas puras y ácidas, por aguas y suelos selenitosos, a gases de descomposición y a la fermentación de materias orgánicas. En la parte ambiental, se genera una reducción considerable de las emisiones de CO₂ junto con la posible reducción en el costo en la producción de cementantes hidráulicos ([Callejas 1969](#); [Vargas, 2002](#); [Binici and Aksoğan, 2006](#); [Ghric et al. 2007](#); [ACI 232.1R, 2012](#) y [McCarthy and Dyer, 2019](#)).

La influencia en la demanda de agua depende directamente de las características y el origen de la Puzolana, relacionándose con factores como la finura, la forma de las partículas, la estructura de las partículas (celular o no celular) y la composición. El calor que se desarrolla en la hidratación de un cementante mezclado con Puzolana disminuirá en una cantidad proporcional al porcentaje de esta, provocando una reducción a la tendencia de fisuración de origen térmico. La mayoría de las Puzolanas naturales producen una mezcla de material cohesivo que mantiene una consistencia plástica, mejorando la trabajabilidad, permitiendo que, en la elaboración de concretos, estos se consoliden fácilmente, fluyendo libremente bajo vibración junto con la reducción del sangrado y segregación.

El efecto de una Puzolana natural sobre la resistencia a la compresión depende directamente de las propiedades de la Puzolana y de las características de la mezcla en la que se utiliza. El desarrollo de la resistencia a la compresión es una función de la interacción química entre la Puzolana natural y el hidróxido de calcio, ya sea el que existe en la cal hidratada o la que se genera durante el proceso de hidratación del cemento Portland presentando bajas resistencias a edades tempranas de endurecimiento.

Sin embargo, se conoce que la actividad Puzolánica está directamente relacionada con el tiempo de curado, manifestando resistencias considerablemente superiores al del cemento Portland a edades avanzadas de endurecimiento (*i.e.* 90 días). La resistencia en ambientes con agresiva actividad química, es representada por la particularidad del cemento Portland de ser altamente básico junto con la gran cantidad de cal liberada que presenta al momento de hidratarse, donde la incorporación de un material Puzolana dentro de su reacción cal-Puzolana genera “geles” que tienden a rellenar los espacios vacíos, aumentando la impermeabilidad. Esta impermeabilidad resulta conveniente para soportar el continuo contacto con el agua, provocando menor tendencia al deslavado de la cal por aguas puras o acidas junto con a la formación de eflorescencias. La reducción en los costos de producción en cementantes hidráulicos se genera al momento de la sustitución de cemento Portland por Puzolanas, donde los rangos pueden alcanzar hasta el 50% de sustitución de acuerdo a la normatividad correspondiente (Callejas 1969; Vargas, 2002; Binici and Aksoğan, 2006; Ghric *et al.* 2007; ACI 232.1R, 2012 y McCarthy and Dyer, 2019).

Por otro lado, se conocen ciertos inconvenientes que resultan de la incorporación de Puzolanas en mezclas cementantes. Algunos de estos son: mayor cantidad de agua necesaria para lograr consistencia especificada, menor resistencia a la compresión en edades tempranas de endurecimiento, una expansión de hidratación mayor en condiciones sumergidas, menor resistencia a ciclos alternativos de hielo y deshielo, un aumento en la contracción por secado, a excepción que la Puzolana sea totalmente vítrea, entre otros (Vargas, 2002). También, en un entorno fisicoquímico, por su gran saturación de cal, al incorporar Puzolanas en cementos, se genera una mayor cantidad de energía en la hidratación, presentándose los siguientes inconvenientes: gran cantidad de generación de hidróxido cálcico, reacciones de tipo exotérmicas en la hidratación, posibilidad de que los aluminatos cálcicos junto con los sulfatos generen una reacción de carácter expansivo, entre otros.

Como se puede apreciar, existen mayores ventajas comparadas contra los inconvenientes en la incorporación de materiales Puzolánicos. El conjunto de éstas, desarrollan la posibilidad de aplicar estos materiales en un amplio campo en la industria de la construcción, dependiendo de las características que se requieran, puedan ser cubiertas por el uso de Puzolanas.

Dentro de las principales aplicaciones se encuentran en estado natural o con un cierto grado de molienda: en vías de comunicación como anti-derrapante, como elementos filtrantes en caminos, estabilización mecánica o química de suelos, en suelo-cemento, en la producción de áridos ligeros y fabricación de cerámicas porosas. En conjunto con hidróxido de calcio o Cemento Portland (*e.g.* cemento de Puzolana, Cemento Portland Puzolanico/compuesto) con finalidades de utilización como concretos y morteros que tienen usos en cimentaciones en cualquier tipo de terreno. También, concretos en obras hidráulicas, sumergidos o en contacto con aguas ácidas, salenitosas, con terrenos yesíferos, expuestos a ambientes marinos, morteros para producción de ladrillos de mampostería, para enfoscados, enlucidos, uso en general, entre otros (Callejas 1969; Vargas, 2002; ACI 232.1R, 2012 y McCarthy and Dyer, 2019).

2.5. Cementantes en México: cemento de albañilería, mortero de albañilería, mortero estructural, cemento hidráulico.

La clasificación, componentes químicos y la actividad Puzolánica determinan la calidad de un material Puzolánico para posteriormente desarrollar productos cementantes. De acuerdo a la [NMX-486 \(2014\)](#) un material cementante es aquel material inorgánico finamente pulverizado que en presencia de agua tiene la propiedad principal de fraguar y endurecer; mientras que un cemento de albañilería es la combinación de un material inorgánico finamente pulverizado que contenga Clinker Portland en conjunto de algún material cementante.

Como se abordó en secciones anteriores, las Puzolanas son materiales silíceos o silíceo-aluminosos que presentan un cierto porcentaje de capacidades cementantes y/o al disminuir el tamaño de sus partículas mezclándolos con agua junto con hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) o Cemento Portland a temperatura ambiente, reacciona creando compuestos con propiedades cementantes ([ASTM C593, 2019](#)). Por lo tanto, se tendría la idea de que un material compuesto por Puzolana con cal y/o cemento se denominaría como un cementante con/de Puzolana. Entonces, se podría generar dos definiciones para designar la complejidad del cementante. Por un lado, el cemento de Puzolana, tratándose de la combinación de un material Puzolánico correspondiente a la clasificación abordada en la sección anterior, incorporado a un cierto porcentaje de cal (*i.e.* Puzolana + cal). Por otro lado, el Cemento Portland Puzolánico, que se refiere a la implementación similar a la anterior, con la diferencia de que el cementante a adicionar es Cemento Portland (*i.e.* Puzolana + Cemento Portland).

Estas definiciones se atribuyen para nombrar el tipo de cementante con el que se está trabajando y así conocer la naturaleza de las reacciones implicadas para la determinación de la actividad Puzolánica junto con la obtención de su calidad. Sin embargo, solamente la segunda corresponde a una de las clasificaciones del material conocido en México como cemento hidráulico. De acuerdo a la [NMX-414 \(2017\)](#), un cemento hidráulico está conformado por un material inorgánico finamente pulverizado en conjunto con Clinker Portland, que, al mezclarse solo con agua, o junto con arena, grava, entre otros, presenta la propiedad de fraguar desarrollando endurecimiento conforme avanza la edad.

Esto, independientemente si se encuentra sumergido bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación, donde alcanzada una cierta edad de endurecimiento, conserva su estabilidad y desarrolla resistencia a la compresión simple. Conocido comúnmente en el país como “cemento”, comercializado convencionalmente como Cemento Portland, presentando ciertas clasificaciones dependiendo de los componentes que lo conformen. Por otro lado, como se abordó en las [Secciones 2.1-3](#) y al inicio de esta sección, los cementantes con mezclas cal-Puzolana, presentan propiedades hidráulicas con características y resistencias similares a los cementos convencionales. Sin embargo, no pueden llamarse cementos hidráulicos por la limitante de incluir Cemento Portland para todas las clasificaciones de estos materiales. En la [Tabla 2.4](#) se muestra la clasificación y componentes de los cementos hidráulicos en México en porcentaje de total de masa.

Tabla 2.4. Clasificación y componentes de los cementos hidráulicos en México (%).

<i>Tipo</i>	<i>Denominación</i>	<i>Clinker Portland</i>	<i>P</i>	<i>EG</i>	<i>HS</i>	<i>C</i>	<i>M</i>
CPO	Cemento Portland Ordinario	95-100	-	-	-	-	0-5
CPP*	Cemento Portland Puzolánico	50-94	6-50	-	-	-	0-5
CPEG	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	40-94	-	6-60	-	-	0-5
CPC	Cemento Portland Compuesto	50-94	6-35	6-35	1-10	6-35	0-5
CPS	Cemento Portland con Humo de Sílice	90-99	-	-	1-10	-	0-5

P= Puzolana; EG= escoria granulada de alto horno; HS= humo de sílice; C= cal; M= minoritarios (i.e. materiales con un índice de actividad hidráulica mayor a 70% o materiales con carbonatos mayores al 75%;=los materiales Puzolánicos incluyen Puzolanas: naturales y artificiales (NMX-414, 2017).*

Estas clasificaciones corresponden a la implementación en porcentaje de compuestos como: Clinker Portland, Puzolanas, escoria granulada de alto horno y humo de sílice. El Clinker Portland es aquel producto artificial que se obtiene por la sinterización (*i.e.* proceso de fabricación de productos compactando polvos metálicos o cerámicos). Este se adiciona junto con la calcinación de mezclas suficientemente finas, homogéneas y adecuadamente dosificadas a partir de materias primas que contienen cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3), óxido férrico (Fe_2O_3) y pequeñas cantidades de otros compuestos minoritarios que se Clinker-izan junto con el resto.

La escoria granulada de alto horno es un subproducto no metálico que se constituye por silicatos y aluminosilicatos cálcicos, obtenidos a partir del enfriamiento brusco con agua o vapor y aire, del residuo producido por la fusión de minerales de hierro en alto horno (NMX-414, 2017). El humo de sílice, descrito en secciones anteriores, es considerado como un tipo Puzolana artificial, mientras que los materiales Puzolánicos de la clasificación incluyen Puzolanas naturales y artificiales.

Tabla 2.5. Clases resistentes y características especiales de cementos hidráulicos en México.

<i>Clase</i>	<i>Resistencia / Denominación</i>	<i>σ-3 Min (MPa)</i>	<i>σ-28 Min (MPa)</i>	<i>σ Max (MPa)</i>	<i>t_0 Min (min)</i>	<i>t_f Max (min)</i>	<i>E Min (%)</i>	<i>C Max (%)</i>
20	28 días	-	20	40	45	600	0.8	0.2
30	28 días	-	30	50	45	600	0.8	0.2
30 R	3 días	20	30	50	45	600	0.8	0.2
40	28 días	-	40	-	45	600	0.8	0.2
40 R	3 días	30	40	-	45	600	0.8	0.2
RS	Resistente a Sulfatos	20-30	20-40	40-50	45	600	0.8	0.2
BRA	Baja Reactividad Alcali	20-30	20-40	40-50	45	600	0.8	0.2
BCH	Bajo Calor de Hidratación	20-30	20-40	40-50	45	600	0.8	0.2
B	Blanco	20-30	20-40	40-50	45	600	0.8	0.2

σ -3, σ -28 y σ Max= resistencia a la compresión simple a 3 días de endurecimiento, 28 días y máxima respectivamente obtenidas de acuerdo a NMX-061 2015; t_0 y t_f = tiempo de fraguado inicial y final respectivamente; E y C=expansión y contracción por estabilidad de volumen en autoclave (NMX-414, 2017).

Además, existen diferentes clases resistentes y características especiales que pueden atribuirse a los cementos hidráulicos (Tabla 2.5), las cuales dependen directamente de las proporciones de componentes junto con el origen de los mismos como se abordó en la sección anterior. La clasificación, la clase junto con la característica especial, establece la designación normalizada, siguiendo este mismo orden y al requerir dos o más características especiales, la designación se hace siguiendo el orden descendente de la Tabla 2.5, separándolas con una diagonal (NMX-414, 2017). Por ejemplo, la designación normalizada de un Cemento Portland Puzolánico de clase 30 con resistencia especificada a 3 días color blanco es: CPP 30 R B, mientras que un cemento de Puzolana de clase 40 con resistencia especificada a 3 días de baja reactividad alcali y bajo calor de hidratación se designa como: CPC 40 R BRA/BCH.

Otro de los materiales implementados en la industria de la construcción en México, es el mortero. Comúnmente, al mortero se le denomina de la misma manera sin contemplar el uso que se requiera dentro de la construcción y se comercializa de manera convencional con este nombre a lo largo del país. Sin embargo, dentro de la comunidad científica se conocen dos tipologías con sus respectivas clasificaciones, el mortero para uso estructural y el mortero de albañilería. De acuerdo a la [NMX-486 \(2014\)](#), el mortero estructural es el material conformado por la revoltura/mezcla de uno o más cementantes en conjunto con Clinker Portland, arenas, agua, y eventualmente aditivos. Estos últimos pueden ser materiales aparte del agua, de los agregados y del cementante, que se pueden emplear como componente del mortero y se agregan en pequeñas cantidades a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado). También, se suelen hacer adiciones de materiales finamente pulverizados (*e.g.* piedra caliza, arcilla, Puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante) que tienen la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo ([Tabla 2.6](#)). Su principal uso es en la unión/pega de piezas de mampostería (*i.e.* arreglo ordenado de piezas sólidas o huecas, prismáticas o naturales, mampuestas/unidas por un cementante) creando unidades compactas a partir de la unión de cinco o más piezas.

Tabla 2.6. Especificaciones físicas del mortero estructural en México.

<i>Tipo</i>	σ_{0-28} (MPa)	σ_{i-28} Min (MPa)
I	18.00	12.5
II	11.00	7.50
III	6.00	4.00

σ_{0-28} y σ_{i-28} Min = resistencia promedio y resistencia mínima individual a la compresión simple a una edad de endurecimiento de 28 días obtenida de acuerdo a [NMX-061 2015 \(NMX-486, 2014\)](#).

Por otro lado, de acuerdo a la [NMX-021 \(2015\)](#) el mortero de albañilería es aquel material conformado por un cemento de albañilería, que, al mezclarse con agua y arena, adquiere resistencia mecánica en un lapso de tiempo determinado clasificado en un solo tipo, con un solo grado de calidad y cumpliendo con las especificaciones físicas de la [Tabla 2.7](#). Este mortero se utiliza en general dentro de la construcción con aplicaciones como revestimientos/enjarres, firmes simples de revoltura, emboquillados, revoques, plantillas para cimentaciones, entre otros.

Tabla 2.7. Especificaciones físicas del mortero de albañilería en México.

<i>Determinación</i>	<i>Unidad</i>	<i>Condición</i>	<i>Especificación</i>
Sanidad (expansión en autoclave)	%	MAX	1.0
Tiempo de fraguado inicial	min	MIN	90
Tiempo de fraguado fina	min	MAX	1 080
Resistencia a la compresión a 7 días	MPa	MIN	4.40
Resistencia a la compresión a 28 días	MPa	MIN	7.80
Contenido de aire	%	MAX	22
Retención de agua	%	MIN	6

La resistencia a la compresión simple es obtenida de acuerdo a [NMX-061 2015 \(NMX-021, 2015\)](#).

Tabla 2.8. Propuesta de clasificación de productos cementantes comercializados en México a partir de la [NMX-414 \(2017\)](#).

<i>Clasificación</i>	<i>Tipos</i>	<i>Clase</i>	<i>Crt</i>	$\sigma-7$ (MPa)	$\sigma-28$ (MPa)	<i>Usos</i>	<i>Referencia</i>
Cementante	-	-	-	-	-	Materia prima para el desarrollo de cemento de albañilería (cementante + CPO)	NMX-486 (2014)
Cemento de albañilería γ	CA	-	-	-	-	Materia prima para el desarrollo de morteros de albañilería, morteros estructurales y cementantes hidráulicos.	NMX-486 (2014)
Mortero de albañilería β	MPO MPP MPEG MPC MPS	-	-	4.4	7.8	Pega de mampostería no estructural, enjarres, repellados, aplanados, trabajos decorativos, entre otros.	NMX-021 (2015)
Mortero estructural α	MEPO MEPP MEPEG MEPC MEPS	I II III	-	-	18* 11* 6*	Pega de mampostería estructural.	NMX-486 (2014)
Cemento hidráulico	CPO CPP CPEG CPC CPS	20 30 30 R 40 40 R	RS BRA BCH B	-	20-50	Uso general en la construcción con resistencia específica a edad correspondiente junto con características especiales de acuerdo a su designación normalizada.	NMX-414 (2017)

Crt= características especiales; $\sigma-7$ y $\sigma-28$ = resistencia a la compresión simple a una edad de endurecimiento de 7 y 28 días obtenidas de acuerdo a la [NMX-061 \(2015\)](#); α , β y γ = clasificaciones propuestas en esta investigación; M= mortero; ME= mortero estructural; *= resistencia promedio.

Hasta este punto, se exponen las clasificaciones de productos cementantes convencionales que se utilizan en la industria de la construcción en México. Sin embargo, pudiera ser confusa su interpretación debido a que las definiciones obtenidas en concordancia con las normas correspondientes presentan una terminología bastante similar. Por lo tanto, para definir de una manera conservadora y aplicando la terminología correspondiente se propone la [Tabla 2.8](#), donde se aprecian las similitudes de las clasificaciones, exponiendo las diferencias entre cada una de ellas haciendo énfasis en la resistencia a la compresión simple y los usos de cada uno de estos productos.

Los tres productos convencionales son cementantes de albañilería, de acuerdo al significado general que se aplica a esta terminología, tratándose como materias primas para el desarrollo de cementantes hidráulicos, morteros estructurales y morteros de albañilería. Las clasificaciones α , β y γ se proponen para generar un mejor entendimiento de los morteros de acuerdo a la clasificación de los cementantes hidráulicos de la [NMX-414 \(2017\)](#) con la adición de las siglas M y ME; para designar mortero y mortero estructural respectivamente. Estas clasificaciones, serán las utilizadas para nombrar los PI. Así como cualquier cementante, todos pueden ser utilizados para la construcción en general. Sin embargo, se tienen características especiales que se desarrollan dependiendo de la finalidad y entorno constructivo junto con la particularidad de las distintas resistencias a la compresión simple que se encuentran directamente relacionadas con el uso específico de cada producto.

Estas clasificaciones, especificaciones y designaciones de los cementantes en general son en carácter de rendimiento aplicables exclusivamente para México. Por otro lado, existen diversas normas y especificaciones para cementantes alternativos en todo el mundo que se basan en clasificaciones prescriptivas o basadas en rendimiento. En Estados Unidos la ASTM presenta ambos casos de estándares, prescriptivos como la [ASTM C150](#) y la [ASTM C1157](#) basada en desempeño junto con la [ASTM C1600](#), donde esta última ha sido recientemente adoptada por la amplia categoría de cementantes hidráulicos de rápido endurecimiento con un enfoque basado en rendimiento. En la Unión Europea, se emplea la EN 197-1, un estándar que está ligado directamente con la EN 206-1, impartiendo restricciones en uso de cementantes alternativos con el desarrollo de aprobaciones técnicas específicas del producto.

Otros países como Canadá y Australia presentan una amplia posibilidad y aceptación para materiales en función de rendimiento aplicables en los marcos normativos existentes. También en Ucrania existe un marco altamente desarrollado de normas prescriptivas que rigen clases y formulaciones específicas de cementos alternativos, que se han generado a través de 50 años de desarrollo de tecnología de activación alcalina (Juenger *et al.*, 2011). Sin embargo, estos mismos códigos y normativas son la limitante principal de la implementación de cementantes alternativos especialmente al momento de enfrentar a los desarrolladores de estándares basados en el rendimiento. Esto se debe a la definición de qué régimen de prueba puede diseñarse, que sea lo suficientemente inclusivo como para permitir su uso para probar y validar una amplia gama de sistemas aglutinantes. Adicional a esto, que sea lo suficientemente restrictivo como para garantizar un buen rendimiento de los materiales mezclados bajo condiciones del mundo real, menos controladas que las situaciones de un laboratorio (Juenger *et al.*, 2011). Además, la terminología que contemplan las normativas ha sufrido modificaciones en sus distintas versiones, por lo que resulta confuso su entendimiento sin el acceso a las últimas ediciones de las mismas, tal como se abordó en la explicación de la [Tabla 2.8](#). Por otro lado, estos estándares obligan el uso de Cemento Portland para todas sus clasificaciones, limitando el desarrollo de cementantes alternativos sin la necesidad de recurrir al cemento convencional.

2.6. Experimentación con Puzolanas en cementantes

En las últimas décadas se han realizado múltiples investigaciones a nivel internacional para desarrollar nuevos productos cementantes que puedan estar a la altura de los convencionales. Con estudios de diversos compuestos con Puzolanas tanto naturales, como artificiales, residuos industriales y materiales que presenten indicios de ser Puzolanas, considerando las diferentes técnicas de modificación del rendimiento de estos materiales (*i.e.* actividad Puzolanica) evaluadas con las distintas metodologías abordadas en secciones anteriores (*cf.* [Tabla 2.3](#)). Dentro de las principales investigaciones se encuentran:

[Uribe and Rodríguez \(1995\)](#) exploraron que las características geológicas de México permiten que se considere una gran variedad de materiales para uso como Puzolanas en la industria de la construcción, desarrollando el estudio de caracterizaciones de algunos de estos materiales que se utilizan en el país, al generar su evaluación para su uso como aditivo en

concreto, utilizando para este fin las normas [ASTM C 311](#) y la [ASTM C 618](#). Dentro los yacimientos utilizados en dicho estudio, se encuentran localizaciones de Sonora, Sinaloa, Hidalgo, Oaxaca, Veracruz, resaltando principalmente dos depósitos comprendidos en la región a estudiar en esta investigación (*i.e.* RCG), los cuales presentaron resultados satisfactorios afines a los objetivos de la investigación.

[Fragoulis et al. \(1997\)](#) estudiaron rendimientos en mezclas de Puzolanas coherentes junto con tobas transformadas en mordenita y clinoptilolita de la Isla de *Kimolos*, Grecia en adiciones con diversos porcentajes de cemento Portland. Determinaron que la resistencia a la compresión del cemento de mordenita es mayor que el cemento de clinoptilolita (*i.e.* ambos pertenecientes al grupo de las zeolitas) y el de Puzolana coherente. Observaron que las tobas ricas en zeolita necesitan más agua para producir pastas de cemento con la misma consistencia que el mortero convencional, llegando a la conclusión de que el cemento mezclado con tobas ricas en mordenita y clinoptilolita es satisfactorio junto con la implementación de súper-plastificantes en tobas zeolíticas para controlar la trabajabilidad de la mezcla.

[Poon et al. \(1999\)](#) realizaron investigación en los porcentajes de contenido de agua para la realización de morteros mezclados con zeolitas naturales que se comercializan convencionalmente en China, para evaluar su desempeño en comparación con cenizas volantes y humo de sílice, encontrando que la zeolita presentaba menor actividad Puzolánica que el humo de sílice, pero mayor que las cenizas volantes. También, afirman que la sustitución del 15% de zeolita generó una menor porosidad, mientras que en niveles superiores del 25% se genera un aumento considerable en esta en todas las edades estudiadas (*i.e.* 3-180 días).

[Ortega et al. \(2000\)](#) investigaron en depósitos naturales en Grecia, las propiedades Puzolánicas de la clinoptilolita hidratada con hidróxido de calcio, junto con otras Puzolanas derivadas de desechos alcalinos y de origen natural, concluyendo que cuando el tamaño de partículas, las condiciones de curado y el porcentaje de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es optimizado a un 20%, los especímenes presentaban en promedio resistencias de 38.7 Mpa.

[Kumar \(2002\)](#) estudió el comportamiento de cenizas volantes en mezclas de cal-Puzolana para el desarrollo de bloques ligeros de mampostería resistentes en ambientes con alto contenido de sulfatos, determinando que la resistencia y la durabilidad de estos materiales presentaban

propiedades significativas en comparación con los productos convencionales, logrando una viabilidad de convertirse en un material de construcción de bajo costo.

[Valdez \(2002\)](#) desarrolló una metodología con la finalidad de evaluar Puzolanas para utilizarlas como cementantes, donde el estudio consistió en investigar la relación existente entre las propiedades físico-químicas de materiales Puzolánicos naturales al adicionarlas en mezclas de hidróxido de calcio junto con Clinker, para determinar la viabilidad de utilizar dichos materiales en un corto periodo de tiempo (siete días), utilizando como indicador sus propiedades estructurales y físicas, en vez de evaluarlos con su finura y reactividad Puzolánica a los 28 días como indica la norma [ASTM C 618](#).

[Vargas \(2002\)](#) Realizó una caracterización detallada de las tobas pumíticas de Guadalajara para implementarlas como materiales para la fabricación de conglomerantes hidráulicos de bajo costo. El estudio consideró desde la mineralogía, petrografía y composición química de los compuestos que se forman durante la reacción Puzolánica mediante técnicas de microscopía óptica, difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido. Se encontraron resultados significativos con una gran variedad de posibilidades de realizar productos económicos y de buena calidad con características similares a los productos convencionales. Sin embargo, su estudio se limitó a los *lapillis*, conocidos localmente como Jal, y no se estudiaron las cenizas volcánicas de origen pumítico, conocidas como Tepetate, que se abordan en este estudio. Además, no se profundizó en normativas que permitan dar lugar a productos comercializables.

[Canpolat et al. \(2004\)](#) estudiaron el uso de zeolita natural, cenizas volantes y cenizas de carbón en Manisa, Turquía, como reemplazo de la Puzolana en la producción de cementos Puzolánicos, determinando la expansión del volumen, el tiempo de fraguado, la resistencia a la compresión, entre otras. Concluyeron que el reemplazo de zeolita hasta en un 15% produce un aumento de la resistencia en edades tempranas de endurecimiento, pero, la combinación de zeolita y cenizas volantes resultó en una disminución considerable de esta.

[Hossain and Lachemi \(2007\)](#) estudiaron la aptitud de cenizas volcánicas de *Mount Tavurvur* en Rabaul, al este de Nueva Bretaña, sustituyendo de un 5% hasta en un 20% de cemento Portland, obteniendo como resultado a pequeños porcentajes de sustitución, aumento

significativo en la resistencia del concreto, pero una disminución de esta en sustituciones del 10-20%. Sin embargo, con el remplazo máximo del 20%, desarrollaron resistencias del 75% (60 MPa en 28 días) del espécimen testigo (*i.e.* realizado totalmente con cemento Portland) y un aumento considerable en la durabilidad de las mezclas con Puzolanas.

[Yilmaz et al. \(2007\)](#) estudiaron las propiedades químicas, mecánicas y micro-estructurales de cementos mezclados con clinoptilolita de *Balikesir*, Turquía, determinando la capacidad de intercambio iónico de la zeolita dependiendo del nivel de la solubilidad del Ca (OH)₂ disuelto en la solución. Obtuvieron como resultados que la clinoptilolita puede implementarse como cemento Puzolánico debido al intercambio iónico y contenido reactivo del SiO₂. Además, definieron que la estructura natural de la zeolita contiene microporos, lo que produce un aumento en la cantidad de agua requerida para los cementantes.

[Oti et al. \(2009\)](#) contribuyeron al desarrollo de bloques de mampostería compuestos por escoria de alto horno en *Newport*, UK, en mezclas de cal-cemento Portland. Los resultados de laboratorio demostraron que la resistencia a la compresión, el contenido de agua, la relación de absorción de agua, el porcentaje de vacíos, la densidad y la evaluación de la durabilidad (*i.e.* ciclos repetidos de congelación/descongelación de 24 horas) se encontraban dentro de los estándares de ingeniería aceptables para las unidades de mampostería.

[Chindraprasirt and Pimraksa \(2008\)](#) demostraron que con la implementación de ceniza volante de una planta eléctrica en Tailandia mezclada con Ca (OH)₂ se pueden generar bloques de mampostería de bajo costo para la construcción, estudiando las propiedades químicas, mecánicas, micro-estructurales y ambientales; para la directa contribución en la sustentabilidad. Concluyeron que la resistencia de los bloques está directamente relacionada con la finura de la ceniza volante, obteniendo resistencias de entre 47.0-62.5 MPa en conjunto con la particularidad de que los bloques, presentaron capacidades de retener metales pesados como Cd, Ni, Pb y Zn.

[Burgos et al. \(2012\)](#) estudió las propiedades de morteros con Puzolanas de alto contenido de carbón como reemplazo parcial del cemento Portland, comparando sus resultados contra morteros convencionales donde evaluó la resistencia a compresión, absorción y porosidad, absorptividad, permeabilidad a cloruros y susceptibilidad a la carbonatación con la finalidad de obtener morteros con mejor durabilidad y resistencia a la corrosión.

Tashima *et al.* (2014) desarrollaron una metodología para evaluar la reactividad Puzolánica de adiciones minerales por medio de medidas de pH y conductividad eléctrica en suspensiones de Hidróxido de Calcio junto con Puzolana, empleando como valores indicadores la pérdida de conductividad eléctrica y la variación de pH para caracterizar la reactividad de las Puzolanas, clasificando los materiales en tres niveles de reactividad diferentes.

Diaz-Loya *et al.* (2017) generaron un gran estudio en donde se proponen diversos materiales no convencionalmente usados en la sustitución del Clinker, que se encuentran a lo largo de US y presentan aptitudes de convertirse en cementantes Puzolánicos, así como también la normatividad correspondiente para cada uno.

Sleep and Masley (2019) estudiaron la aptitud de las cenizas volcánicas de *Mount Mazama* al norte de Oregon, US para su implementación en pavimentos de caminos aledaños a la región, definiendo la máxima cantidad de material Puzolánico en mezclas de cemento Portland de acuerdo a la [ASTM C618](#) junto con el estudio de reducción de material volante en caminos sin pavimentar. Obtuvieron como resultado una Puzolana de clase N que, con su implementación evita significativamente la formación de polvo y puede usarse como aglutinante aplicado tópicamente en carreteras sueltas y sin pavimentar.

De todos estos estudios se obtuvieron resultados significativos, generando una amplia gama de productos que pueden ser utilizados como materia prima en la producción de materiales constructivos en la industria de la construcción. Algunos de ellos, poseen el potencial de contribuir en la apropiación social de la producción de cemento, a partir de una producción en pequeña escala asentada en las regiones en las que estén ubicados los materiales Puzolánicos. Sin embargo, debido a que la actividad Puzolánica varía regionalmente y su uso debe cumplir con ciertos requerimientos de calidad, resulta necesario caracterizar los materiales y evaluarlos conforme a los marcos normativos de su contexto.

Capítulo III

Estudio preliminar para selección de la Puzolana

3.1. Muestreo y diseño de experimento para la selección de Puzolana de estudio

Para cumplir con el objetivo general de esta investigación es necesario determinar la viabilidad de utilizar Materiales Puzolánicos Regionales (MPR) como materia prima para la fabricación de cementantes en la industria de la construcción. En la región de la [Figura 3.1](#), correspondiente a la zona Jalisco-Colima (RJC), se realizó un muestreo conveniente, basado en la disponibilidad de los materiales y sobre estos se realizaron pruebas mecánicas preliminares. Se seleccionó un material y se le llamó Puzolana Seleccionada (PS). La PS fue triturada e incorporada para conformar un cemento de albañilería y emplearlo en la elaboración de un cemento hidráulico, un mortero estructural y un mortero de albañilería de acuerdo a los requerimientos de calidad que se detallaron en la [Tabla 2.8](#). Estos fueron los Productos de la Investigación (PI).

Primeramente, se realizaron ensayos con el fin de determinar qué material Puzolánico presentaba la mejor resistencia a la compresión simple para seleccionar el material que fue estudiado en la investigación. Posteriormente, se llevó a cabo un experimento mixto formado por un diseño de mezcla de tres componentes y un diseño factorial, con el cual se buscó identificar la influencia de los componentes (*i.e.* hidróxido de calcio, Puzolana y cemento Portland), junto con las variables de proceso consideradas (*i.e.* tiempo de curado, cantidad y tamaño de partícula de Puzolana). Este tipo de diseño permite construir una superficie de respuesta, y optimizar las variables y proporciones que se acercan a los requerimientos de las normas que regulan la elaboración de los PI. Cabe destacar que, en esta evaluación inicial se realizaron mezclas de pasta pura, es decir, mezclas con los tres componentes sin adicionar arena en la elaboración de los especímenes como se indica en la [NMX-061 \(2015\)](#). Más adelante, se realizó una evaluación de calibración cumpliendo todas las especificaciones de la norma [NMX-061 \(2015\)](#) para lograr cumplir los requerimientos de resistencia a la compresión de los PI enlistados en las [Tablas 2.5-2.8](#). Por último, se realizó un segundo estudio estadístico con los resultados de la evaluación de calibración para generar dosificaciones óptimas para que los PI cumplan con la calidad de las normativas y puedan convertirse en productos comercializables.

Como se abordó en el [Capítulo 2](#) (cf. [Tabla 2.3](#)), una de las metodologías para la evaluación de la calidad de un material Puzolánico con mayor aceptación por la comunidad científica, es la determinación de la resistencia a la compresión. Por lo tanto, se considerará como variable indicadora para obtener la PS.

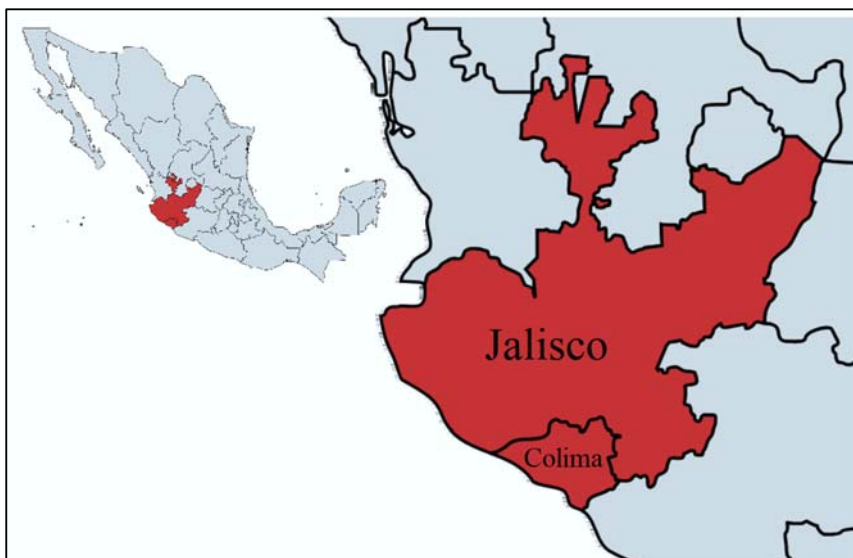


Figura 3.1. Región de estudio, Región Jalisco-Colima (RJC).

Los tres materiales de contexto se incluyeron en la [Tabla 2.2](#), en donde el Jal (lapillis de origen pumítico), se ha estudiado anteriormente por [Vargas \(2002\)](#), concluyendo de manera satisfactoria la implementación de esta Puzolana para la elaboración de cementantes. Por lo tanto, se esperaría que las cenizas de origen pumítico (Tepetate) presenten un comportamiento similar, dado que son del mismo origen geológico: el Complejo Volcánico de la Primavera. Adicionalmente, se incorporó cenizas del volcán de Colima, debido a su alta disponibilidad, su origen volcánico y a que se sabe que los materiales poseen un alto contenido de sílice. Como se mencionó en el [Capítulo 2](#), otra variable fundamental en la actividad Puzolánica es la superficie específica, que se encuentra directamente relacionada con el tamaño de las partículas. Con el fin de poder realizar una comparación, esta variable se estandarizó de acuerdo al tiempo de molienda ([Benezet and Benhassaine, 1999](#); [Wang et al., 2001](#); [Vargas, 2002](#); [Binici and Aksoğan, 2006](#) y [Cordeiro et al., 2011](#)).

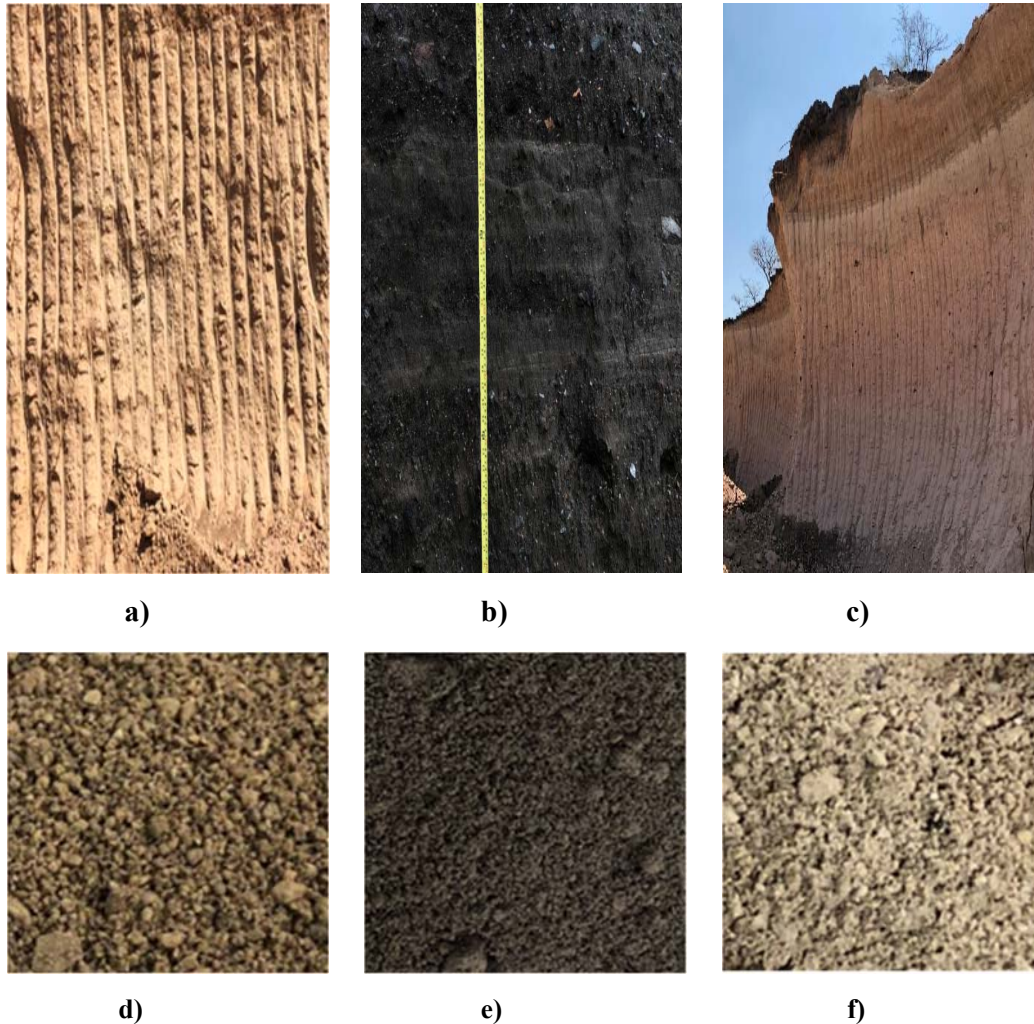


Figura 3.2. Materiales Pozzolánicos en estado natural (banco de material) y estado seco previo a molienda: a) Jal de Guadalajara; b) Ceniza Volcán de Colima; c) Tepetate de Guadalajara; d), e) y f) respectivamente, previos a proceso de molienda.

Otra variable que se estandarizó en el presente estudio fue el tiempo de curado. En efecto se sabe que la aplicación de presión constante de aproximadamente 1 MPa (10 kg/cm^2) se incrementa la resistencia a la compresión a tempranas edades de endurecimiento (*i.e.* 7 días) (Yang *et al.*, 2000). Este principio, implementado mediante curado por Autoclave (*i.e.* dispositivo empleado para esterilizar mediante calor húmedo con una presión constante), permitió realizar una evaluación rápida de la actividad Pozzolánica de los materiales. Por lo tanto, el proceso de elección de la PS se basó en la evaluación de la resistencia a la compresión simple, al simular una edad avanzada de endurecimiento por medio de la implementación de un sistema de Autoclave.

Se establecieron tres Puzolanas naturales de origen mineral, obteniéndose de diferentes bancos de material (Figs. 3.2a-c), haciendo énfasis en la RCJ. Se estableció la siguiente nomenclatura: C-COL, Ceniza del Volcán de Colima (19°26'10.3"N 103°36'48.7"W); T-GDL, Tepetate de Guadalajara (20°30'19.8"N 103°28'19.3"W); J-GDL, Jal de Guadalajara (20°37'05.9"N 103°28'53.8"W). Este último, sirvió también como material indicador, pues Rodríguez and Uribe (2002) y Vargas (2002) los han estudiado como material Puzolánico. Al tratarse de materiales naturales, se encontraban con cierta cantidad de humedad, por lo que se realizó un proceso de secado por horno a una temperatura de 100° C en un lapso de 24 horas (Figs. 3.2d-f).

Posteriormente, los materiales se trituraron por medio de una revolvedora modificada que simula el comportamiento de un “Molino de Bolas” (Fig. 3.3a), como los que se utilizan en la fabricación de cales y cementos. Para lograr tener un nivel de finura estandarizado que permita realizar un estudio comparativo se estableció un parámetro de cuatro horas continuas de molienda por cada material (Figs. 3.3a-c), realizando un proceso de limpieza de las paredes de la máquina a cada hora de molienda (*i.e.* tres veces en el lapso de cuatro horas). Después de la trituración de cada material, se realizó un cribado por la malla #10 (Figs. 3.3d-f).

De manera similar, se fijó la variable correspondiente a la cantidad de agua de acuerdo a la consistencia que recomienda la norma NMX-061 (2015). Para hacer esto, se debe incorporar a las mezclas de cementante la cantidad de agua necesaria para asegurar que el aumento en el diámetro aumente en $110\% \pm 5$ después de dar 25 golpes en 25 segundos, desde una altura de caída de 12.7 mm en una mesa de fluidez (Figura 3.4). De esta forma, las variables de entrada que intervienen en el proceso de selección son las siguientes: Puzolana (P_{1-3}), Contenido de Cal (C), Tamaño de Partículas (T_0).

En concordancia con la misma norma que sirvió para fijar la variable del agua, se siguió la recomendación de la realizar seis especímenes por mezcla, utilizando 1,875g de cementante. Los moldes, la mesa de fluidez, la balanza y el mezclador mecánico, concuerdan con la normatividad NMX-061 (2015), NMX-144 (2015), NMX-057 (2015), NMX-085 (2015) respectivamente. El porcentaje de cal utilizado fue de 25% de Ca (OH)₂. Este valor coincide con los óptimos obtenidos en mezclas de Puzolana cal por Vargas 2002. El hidróxido de calcio utilizado para la elaboración de los especímenes fue CAL-QUIMEX95, con un 95% de pureza.



Figura 3.3. Procedimiento para molienda y materiales Puzolanicos después del proceso de cuatro horas: a) revolvedora modificada con 88 bolas de acero; b) revolvedora con material Puzolanico; c) material Puzolánico molido por dos horas; d) Jal de GDL; e) Tepetate de GDL y f) Ceniza Volcán de COL.

3.2. Elaboración de los especímenes

El procedimiento de mezclado se realizó de acuerdo a la [NMX-085 \(2015\)](#), vertiendo en la olla la cantidad inicial de agua para la estimación de la fluidez y los componentes de la mezcla; dejando reposar por 30 s para que el material absorbiera el agua correctamente.

Después, se acciona la mezcladora en velocidad baja (140 ± 5 revoluciones por minuto) durante 30 s, para detenerla por no más de 15 s y desprender hacia abajo con la espátula todo el mortero que se haya adherido a las paredes y el fondo de la olla. Posteriormente, se acciona la mezcladora durante un minuto más a velocidad alta (285 ± 10 rpm). Este procedimiento

(Fig.3.4a) se realizó las veces que fueron necesarias para determinar la fluidez correspondiente, obteniéndose de acuerdo a la [NMX-144 \(2015\)](#) y repitiéndose desde un inicio por cada variación de agua que se adicione.

El platillo de la mesa de fluidez se mantuvo limpio y seco en todo momento, cada vez que se requirió obtener la fluidez de una pasta. Se comenzó por limpiar y secar el molde cónico, y colocarlo al centro de la mesa. Después se llenó con una capa de 25 mm de espesor de la pasta preparada por el procedimiento de mezclado, y se compacta 20 veces con el pisón. En este proceso, las apisonadas deben distribuirse con la presión necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde, preferentemente siguiendo un apisonado en círculos y cuidando que la capa se compacte lo más uniforme posible.

El apisonado se efectúa para eliminar los vacíos que pudieran presentarse en la mezcla y que resultarían un efecto negativo para las mezclas de cementantes. Después, el molde se llena completamente (Fig. 3.4b), compactándose nuevamente de la misma manera y enrasándose la parte superior del molde para eliminar el exceso de pasta que sobresalga de este (Fig.3.4c). Al transcurrir un minuto a partir del momento de haber terminado el mezclado, se levanta el molde (Fig.3.4d), el platillo se deja caer 25 veces en 15 segundos, de una altura de 12.7 mm (1.27 cm) (Fig.3.4e). La fluidez resulta del incremento en el diámetro de la base de la masa del mortero, expresado como porcentaje del diámetro de la base original (Fig.3.4f). El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de por lo menos cuatro mediciones a cada 45° aproximadamente.

El procedimiento de mezclado junto con el de la obtención de la fluidez debe realizarse hasta que se obtenga una fluidez de $110\% \pm 5$, para posteriormente proceder al moldeado de los especímenes. Después de terminar la prueba de fluidez y cumplirla correctamente, el mortero que se empleó en la misma se regresa al recipiente de mezclado, se acomoda el mortero adherido a las paredes de la olla y se incorpora al resto del mortero para mezclarse por 15 s a la velocidad media (285 rpm.).

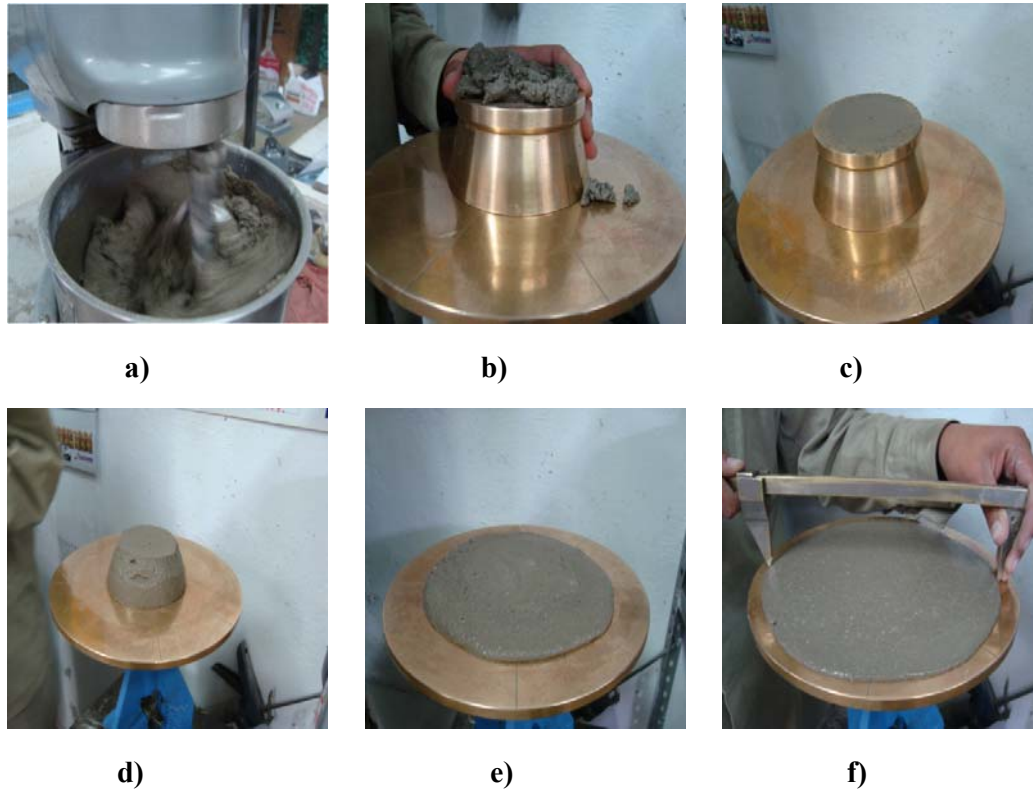


Figura 3.4. Procedimiento para determinación de la fluidez de cementantes hidráulicos de acuerdo a la [NMX-144 \(2015\)](#): a) mezclado de componentes; b) llenado de molde cónico; c) enrase de molde; d) desmolde de muestra (diámetro original); e) estado posterior a 25 golpes y f) medición del diámetro final ([Pérez, 2015](#)).

Para continuar con el llenado de la elaboración de los especímenes, los moldes fueron cubiertos por una capa delgada de vaselina para un desmolde uniforme, asegurando la integridad de los especímenes. Después, se colocó la pasta en los compartimientos de los moldes: una capa de 25 mm de espesor aproximadamente compactados con el pisón, 32 veces en diez s, por ciclos de cuatro vueltas en cada uno de los especímenes y completando las vueltas antes de empezar con el siguiente.

La presión para compactar el espécimen debe ser la necesaria para asegurar un llenado uniforme del molde. Cada vuelta se inicia a 90° con respecto a la siguiente y viceversa; completando 8 golpes adyacentes repartidos sobre la superficie, siguiendo el orden de cada vuelta tal como se muestra en las [Figuras 3.5a-b](#).

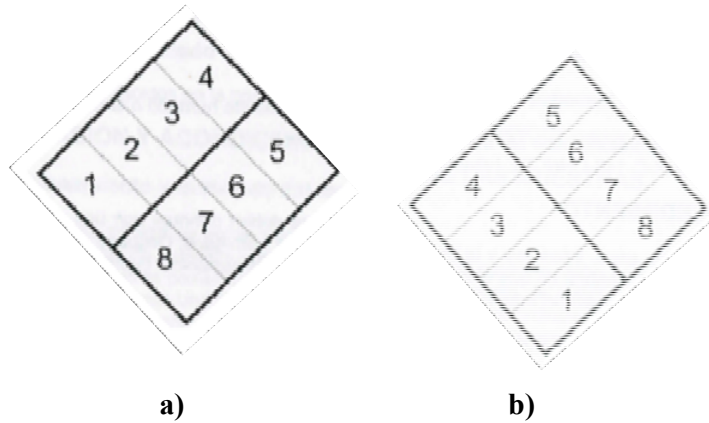


Figura 3.5. Procedimiento de apisonamiento en moldes de cementantes hidráulicos: a) primera y tercer vuelta y b) segunda y cuarta vuelta (NMX-061, 2015).

La segunda capa se realiza de la misma manera, eliminando el exceso de cada vuelta a excepción de la última, donde este, se extiende suavemente para nivelar el mortero de los moldes (Fig. 3.6b) y se enrasa la superficie al borde superior del molde, usando la cuchara en posición ligeramente inclinada para que tengan un espesor uniforme.

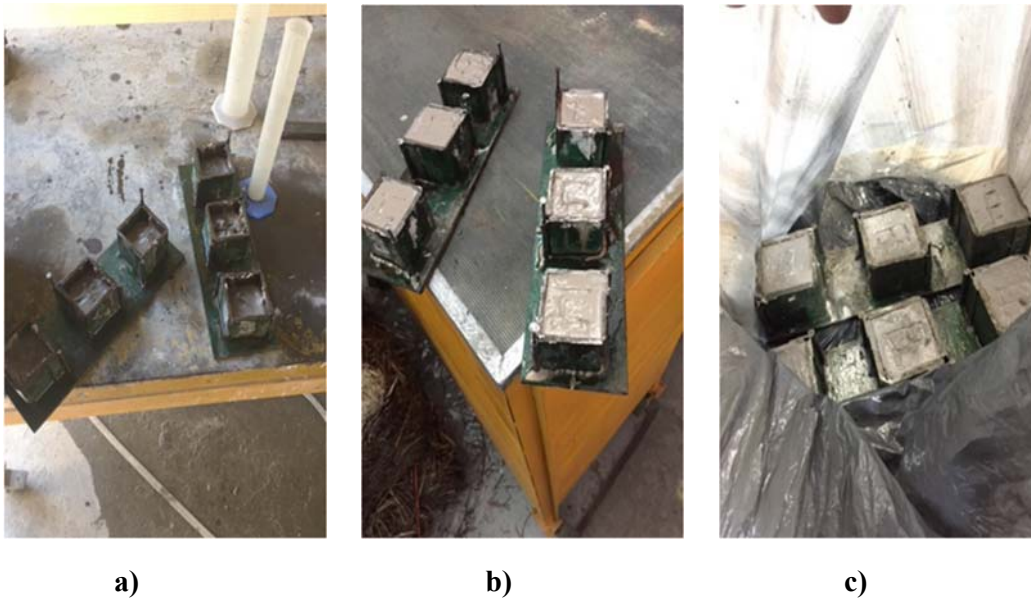


Figura 3.6. Elaboración de especímenes de contexto: a) comienzo del llenado; b) proceso completo previo al almacenado y c) almacenamiento.

3.3. Curado de los especímenes

Al terminar el llenado de los especímenes se procede al curado. Para ello, se colocaron en bolsas plásticas para tener controlada la humedad (Fig. 3.6c), como recomienda Vargas (2002). Se fabricaron 18 especímenes (Figs. 3.8a-c), seis con cada material, para realizar la evaluación temprana que permitiera seleccionar la Puzolana. Adicionalmente, se realizó un lote experimental de seis especímenes con la C-COL, para su posterior evaluación a edades avanzadas (*i.e.* 190 días).

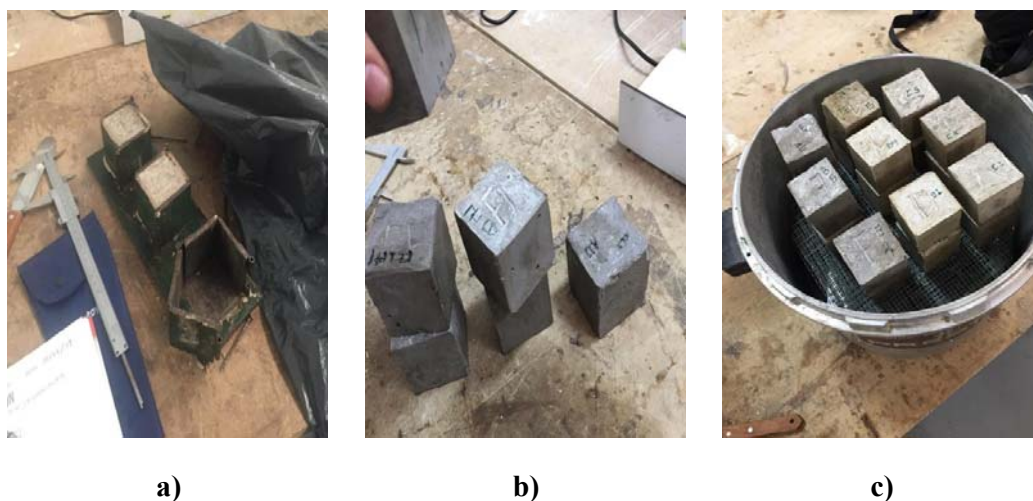


Figura 3.7. Etapas previas al ensaye de resistencias a compresión: a) desmolde de especímenes; b) especímenes previos al proceso de Autoclave y c) especímenes después del proceso de Autoclave.

Debido a que se trata de materiales experimentales y se desconocía en parte los comportamientos de estos, el tiempo de fraguado inicial para el desmolde posterior (Figs. 3.7a-b), se propuso de forma conservadora en siete días después de permanecer dentro de las bolsas plásticas. Después, fueron sometidos a un curado acelerado con ayuda de un sistema de Autoclave (Fig. 3.7c), siguiendo las recomendaciones de Yang *et al.* (2000), por un período de seis horas continuas a una presión de 1 MPa (10 kg/cm²).

Después se ensayaron los especímenes (Figs. 3.8a-c) a compresión simple en una Prensa Universal, de acuerdo a lo establecido en la NMX-061 (2015), en modalidad de deformación controlada a una velocidad de 0.05 mm/s. Las pruebas se realizaron en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales del ITESO, Tlaquepaque, Jal.

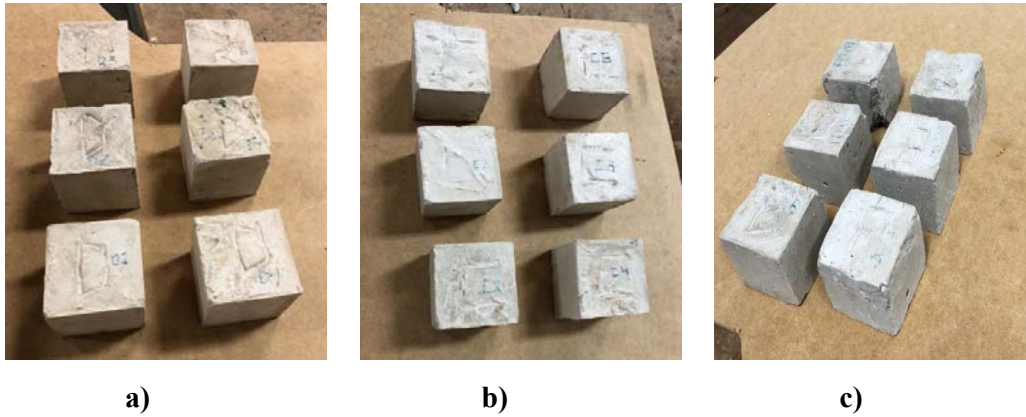


Figura 3.8. Especímenes previos a ensayo de resistencias a compresión: a) J-GDL; b) T-GDL y c) C-COL.

3.4. Ensayos de resistencia y análisis

En la [Figura 3.9](#) se muestra la gráfica esfuerzo-deformación resultante de los ensayos de resistencia a la compresión simple obtenidos por la experimentación de este estudio. Las líneas de color rojo representan las resistencias a la compresión de los seis especímenes elaborados con J-GDL, las azules de T-GDL y las líneas negras discontinuas la C-COL. Las variaciones en la continuidad de las líneas que se observan a los 10-12 kg/cm² (1-1.2 MPa) de resistencia, se generaron debido a un reacomodo de las placas de soporte utilizadas en la Prensa Universal.

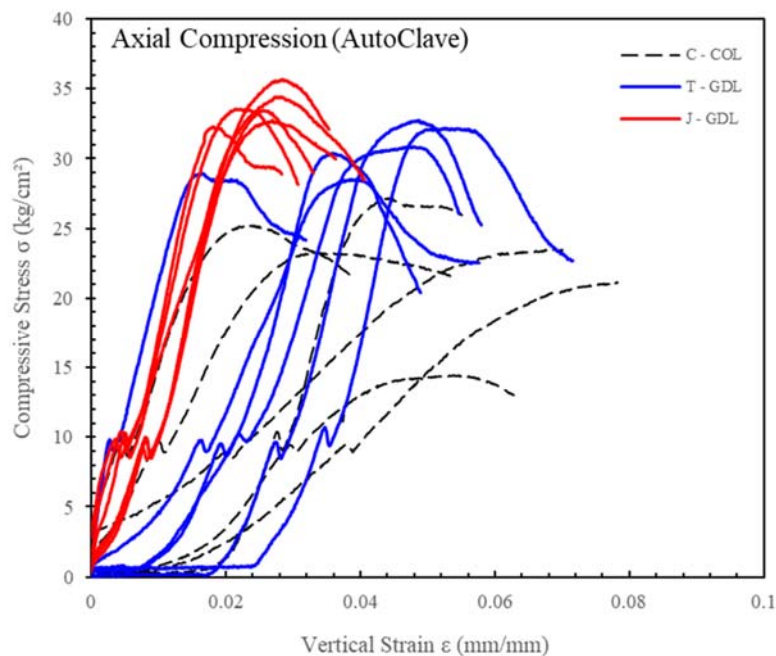


Figura 3.9. Relación Esfuerzo-deformación a compresión por carga axial.

Se aprecia que el material con mayor resistencia es el J-GDL (línea roja), con un valor máximo de 35.66 kg/cm² (3.5 MPa) y una resistencia promedio de 33.69 kg/cm² (3.3 MPa), además de presentar un comportamiento similar con poca variación de resultados. En la misma figura se observa que la C-COL (línea negra) presentó amplias variaciones con respecto al material de referencia (*i.e.* J-GDL), con una resistencia máxima de 27.15 kg/cm² (2.6 MPa) y con un promedio de 22.47 kg/cm² (2.2 MPa). También en la misma figura se aprecia que el T-GDL (línea azul) presenta una resistencia máxima de 32.77 kg/cm² (3.21 MPa) y con un promedio de 30.61 kg/cm² (3 MPa). En promedio, los materiales desarrollaron resistencias entre 22-33 kg/cm² (2.15–3.25 MPa). Como se mostró en la gráfica esfuerzo-deformación (Fig. 3.9), el T-GDL presenta un aumento del 26.6% con respecto a la C-COL y comportamientos similares a los del Jal. Al ser un material abundante, más barato que el J-GDL y que no ha sido estudiado, se consideró interesante utilizarlo como la Puzolana principal (PS). Como se mostró en la gráfica esfuerzo-deformación (Fig. 3.9), el Tepetate presenta un aumento del 26.6% con respecto a la C-COL y comportamientos similares a los del J-GDL. Al ser un material abundante, más barato que el Jal y que no ha sido estudiado, se consideró interesante utilizarlo como la Puzolana Seleccionada (PS). En las Figuras 3.10a-c se aprecian algunas de las fallas típicas que se presentaron al momento de ensayar los especímenes de este estudio. En dichas fallas, se presentó el comportamiento típico de aplastamiento y una propagación de la distribución columnar vertical y semi-diagonal de las grietas, a excepción de los ejemplares elaborados con C-COL, donde se presentaron desmoronamientos y desprendimientos considerables (Figs. 3.10b-c).

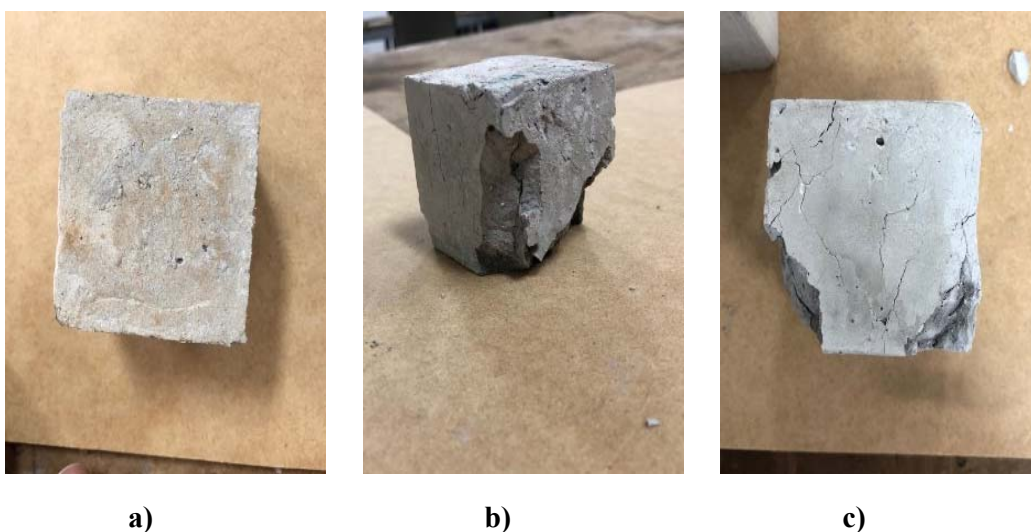


Figura 3.10. Integridad de especímenes posterior a ensaye de resistencias en evaluación de contexto: a) vista en planta y b)-c) vista en planta, T-GDL y C-Col respectivamente.

Los resultados se analizaron con *Statgraphics 18*[®]. Se implementó un diseño experimental ANOVA multifactorial para la determinación de factores que presentan un efecto estadísticamente significativo en la resistencia a la compresión. Como puede observarse, el tipo de material Puzolánico influye significativamente en la resistencia a la compresión, como era de esperarse (Tabla 3.1 y Fig. 3.11).

Tabla 3.1. Tabla ANOVA de la resistencia a la compresión por cada Puzolana.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Between groups	403.385	2	201.692	25.31	0.0000
Within groups	119.522	15	7.96814		
Total (Corr.)	522.907	17			

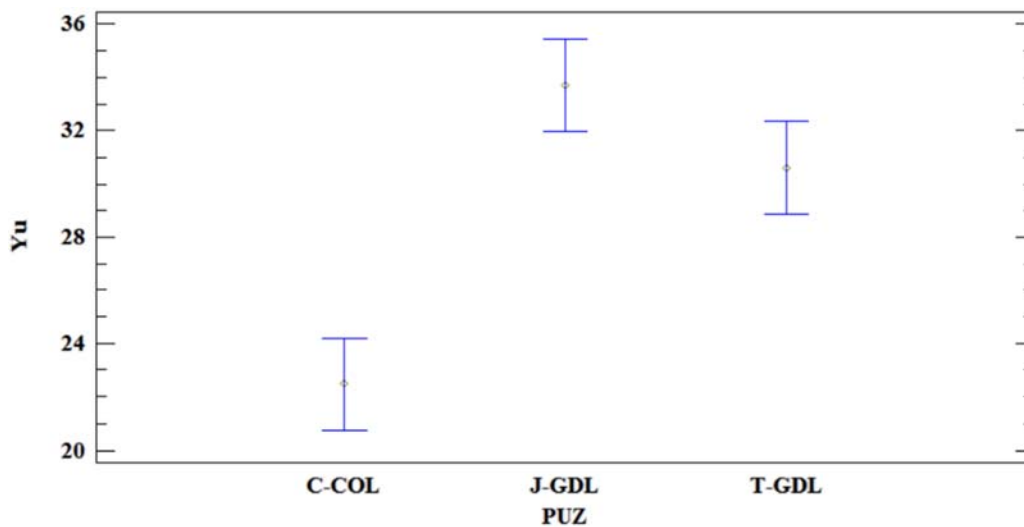


Figura 3.11. Análisis de varianza de resistencia a la compresión y_u para cada Puzolana: medias con intervalos 95% LSD.

3.5 Conclusiones de contexto y elección de Puzolana de investigación

En esta evaluación de contexto se comparó la resistencia a la compresión simple de tres materiales Puzolánicos (*i.e.* J-GDL, T-GDL y C-COL), bajo un proceso de molienda estandarizado en cuatro horas continuas y un proceso de curado acelerado. Debido a que el Jal se consideró como material indicador, la selección de la Puzolana para la investigación se limita al Tepetate o la Ceniza de Colima. Las siguientes conclusiones se obtuvieron:

Conclusión principal:

- La Puzolana principal que se utilizará en esta investigación será el Tepetate, debido a que no presenta diferencia significativa respecto a al material indicador (Fig. 3.9; líneas azules), presenta una buena integridad en la geometría de las caras de los especímenes (Fig. 3.10a) y porque es un material barato y abundante.

Conclusiones secundarias:

- El lote experimental de seis especímenes para el estudio en edades avanzadas en la C-COL desarrolló resistencias interesantes a 190 días de endurecimiento. Con valores de entre 85-122 kg/cm² (8.3-12 MPa) y un promedio de 95 kg/cm² (9.3 MPa). Presenta un aumento del 81.6% con respecto a la resistencia obtenida con el procedimiento del Autoclave. No se realizaron pruebas a edades avanzadas con los otros materiales, pero se conoce que los materiales Puzolánicos alcanzan estas altas resistencias con el tiempo (Vargas, 2002).

Capítulo IV

Diseño experimental con Tepetate

4.1. El Tepetate

En el Capítulo anterior se evaluó la resistencia a la compresión de tres materiales Puzolánicos y se concluyó que el Tepetate era la opción más interesante debido a su comportamiento similar al material indicador (*i.e.* Jal), por la integridad de los especímenes ensayados y por ser económico y abundante en la región de estudio. La palabra Tepetate se deriva del Náhuatl *tepétlatl*, significando *tetl*, piedra y *pétlatl*, petate, haciendo referencia a un material con características como piedra, mientras que para los Aztecas incluían esta palabra para aquellos materiales clasificados como suelos no recomendables para la agricultura (Gibson, 1996).

Es un material, normalmente de origen pumítico, implementado en diversas partes del mundo y generalmente usado para propósitos constructivos, encontrándose en depósitos de finas cenizas (*e.g.* cineritas riolíticas) parcialmente alteradas, arcillas y limo muy fino; producidas por violentas erupciones volcánicas a lo largo del tiempo. Presentan una gran variedad de denominaciones dependiendo la región en la que se utilice, nombrado como *silcrete* en E.U.A.; *talpetate* en Nicaragua; *hadpan*, *duripan*, *cangahua* en Colombia y Ecuador; *cancagua*, *moromoro*, *tosca* y *ñadis* en Chile; *harpan* en Perú; *kora* y *masa* en Japón; entre otros (Zebrowski, 1992).

En México existe una gran variedad de materiales que se denominan de esta manera, representando aproximadamente un 30% de la superficie del País, en estado superficial o conformado por los primeros metros de profundidad del estrato (López-Lara *et al.*, 2013). Como se deduce de lo mencionado en el párrafo anterior, la palabra Tepetate no hace referencia a un origen geológico o mineralógico que permita extrapolar un comportamiento mecánico. Sin embargo, por razones prácticas es interesante mencionar que diversos estudios sugieren que los tepetates muestran propiedades físicas, mecánicas y químicas comunes entre ellos (*e.g.* Zebrowski, 1992; Quantin *et al.* 1993; Gibson, 1996 y López-Lara *et al.*, 2013).

Dentro de la literatura, el estudio del Tepetate se encuentra limitado a las composiciones químicas, mineralógicas y petrográficas de la erupción volcánica del Complejo la Primavera. Los escasos estudios realizados sobre la actividad Puzolánica de los Tepetates han determinado bajas resistencias a la compresión 0.29-15.7 MPa (2.96-160.10 kg/cm²), con un valor promedio de 2.42 MPa (24.70 kg/cm²) (e.g. López-Lara *et al.*, 2013a-b y Flores, 2017). Debido a la abundancia de estos materiales en México, en caso de que se obtengan resultados satisfactorios, podría abrirse una amplia gama de posibilidades. Su análisis da continuidad a las investigaciones realizadas en la década de los noventa y busca darle un valor agregado a un material, cuyo uso actual está limitado a la construcción de terraplenes.

4.2. Análisis estadístico del Tepetate como material cementante

Como se mencionó en la Sección 3.1, la evaluación inicial consistió en el desarrollo de un experimento que considera la acción de conglomerantes comunes (e.g. cal y cemento) en el endurecimiento hidráulico (i.e. resistencia a compresión), por medio de un diseño de experimento mixto formado por un diseño de mezcla de tres componentes y un diseño factorial 3^k. Con el primero, se explora la influencia de los componentes (i.e. cal hidratada, Puzolana y cemento Portland) y con el segundo las variables de proceso (i.e. tiempo de curado y tamaño de partícula de Puzolana).

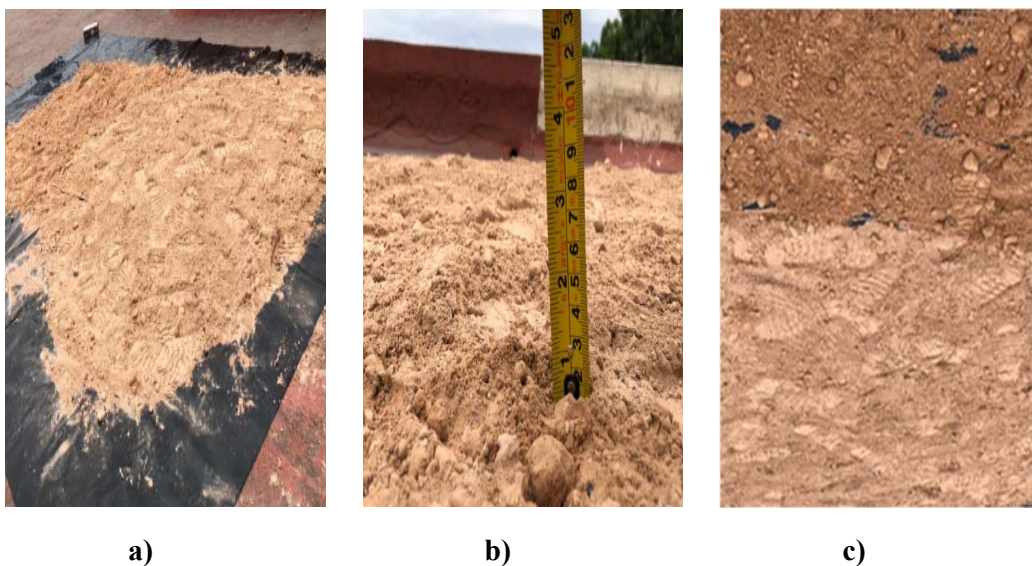


Figura 4.1. Secado del material seleccionado: a) tendido de material sobre lona plástica; b) espesor de la capa de material y c) cambio de humedad del material.

En primer lugar, se realizó un secado al sol sobre una lona plástica (Figs. 4.1a-c) en dos sesiones de 12 horas, efectuando el volteo de todo el material cada seis horas. Una vez seco el material, se se fabricaron dos Puzolanas (P1 y P2) con el mismo material, utilizando el mismo procedimiento descrito en el Capítulo anterior excepto que los tiempos se establecieron en cuatro y seis horas Figuras 4.2a-b. La granulometría de las Puzolanas se obtuvo por medio de vía seca y se completó utilizando el método del hidrómetro para las partículas menores a 75 μm (retenidas en el tamiz No 200). En la Figura 4.3. se aprecia la curva de distribución granulométrica para las Puzolanas P1 y P2.



Figura 4.2. Molienda de material seleccionado: a) material adherido en las paredes de la revoladora por un lapso de una hora y b) limpieza del mismo para asegurar una trituración adecuada.

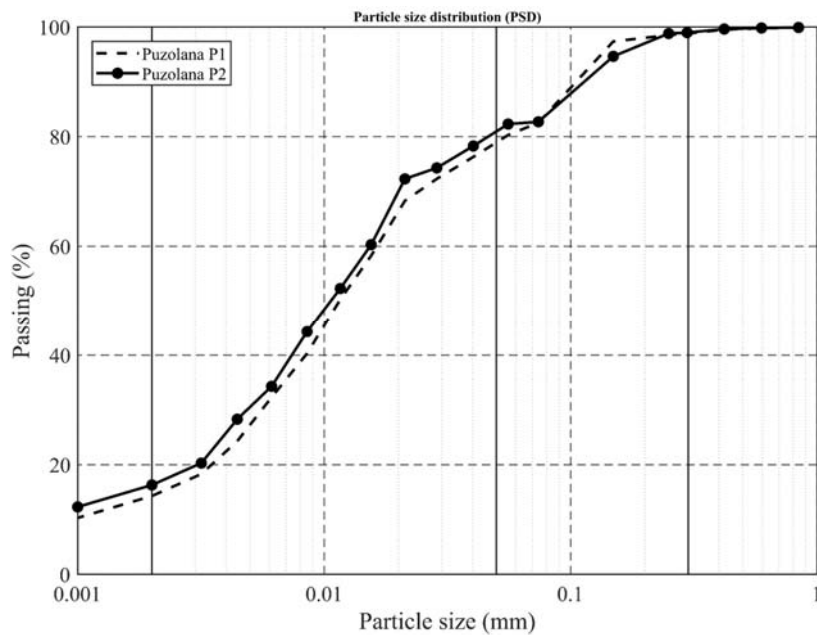


Figura 4.3. Curvas de distribución granulométrica para las Puzolanas P1 y P2.

Para el diseño de mezclas, se delimitó una región que presentó diversas aplicaciones en los resultados obtenidos por Vargas (2002) en el estudio del Jal. La posibilidad de extrapolar aquellos resultados se infirió a partir del origen geológico similar de ambos materiales y por el comportamiento observado en el estudio presentado en el Capítulo 3. La región corresponde a los siguientes intervalos: Puzolana 70 a 75%, cal hidratada 25 a 30% (utilizada en la experimentación exploratoria (cf. Sección 3.3-5); cemento Portland con alto contenido de Puzolana (50 a 85%). Cemento Portland con bajo contenido de Puzolana (10 a 40%); mezclas con alto contenido de Puzolana (60 a 75%), contenido medio de cal-hidratada (15 a 30%) y contenido bajo de cemento Portland (5 a 10%). Las dosificaciones se especifican en la matriz de diseño mostrada en la Tabla 4.4. El cemento hidráulico utilizado para el diseño de mezclas fue un CPO 30 RB. La cal utilizada fue la misma de la Sección 3.1. Para el diseño del experimento de la evaluación inicial, se realizaron especímenes cúbicos de diferentes proporciones de componentes (Fig. 4.4a). Se contemplaron tres edades de endurecimiento (Fig. 4.4b), implementando dos niveles de finura donde se elaboraron tres muestras para cada dosificación de mezcla (Fig. 4.4c), para posteriormente ensayarlas a compresión simple de acuerdo a su edad correspondiente.

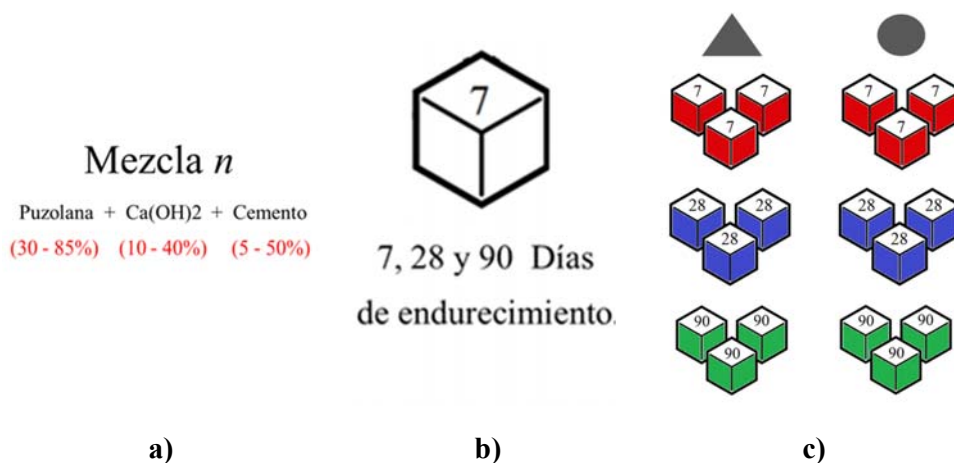


Figura 4.4. Diseño experimental para la mezcla n : a) proporciones de componentes; b) edades de endurecimiento y c) nivel de finura (*i.e.* triángulo y círculo; cuatro y seis horas respectivamente) con el número correspondiente de especímenes por mezcla.

El experimento supone ocho mezclas con diferentes proporciones de componentes que se detallan en la Tabla 4.4. Con ellas se realizaron especímenes de 5 x 5 x 5 cm, con tres muestras para cada dosificación. Las probetas fueron ensayadas a compresión simple en diferentes edades de endurecimiento (7, 28 y 90 días), con dos niveles de finura (cuatro y seis

horas). Esto significa un total de **144** especímenes elaborados con mezclas de cal hidratada, Puzolana y cemento portland, sometidas a variaciones en tiempo de curado y tamaño de partícula de Puzolana. El diseño experimental completo se muestra en la [Figura 4.5](#).

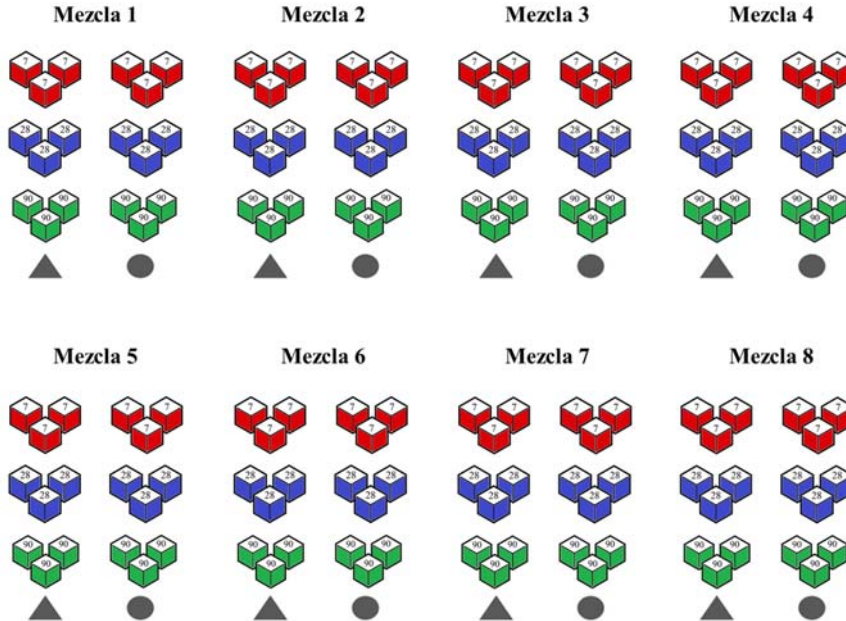


Figura 4.5. Diseño experimental completo para las 8 mezclas de las [Tablas 4.1-4](#) con los dos niveles de finura (*i.e.* triángulo y círculo; cuatro y seis horas respectivamente) con el número correspondiente de especímenes por mezcla.

Como se mencionó en la [Sección 3.1](#), en esta evaluación se elaboraron mezclas de pasta pura siguiendo las especificaciones de la norma [NMX-061 \(2015\)](#), a excepción de la adición de arena graduada en las mezclas y la implementación de bolsas para el curado de los especímenes. Estas excepciones, se consideraron para optimizar los procesos del experimento y minimizar la cantidad de arena graduada para la elaboración de especímenes, debido a que su obtención requiere un procedimiento minucioso y tardado que depende de la calidad (graduación) de la arena (*i.e.* es necesario obtener partículas muy pequeñas que no todas las arenas tienen en abundancia). El procedimiento de mezclado, la obtención de la fluidez, el moldeado, el apisonado ([Fig. 4.6a](#)) y el almacenado de los especímenes ([Fig. 4.6b](#)) se realizó de acuerdo a la [Sección 3.2](#). Las cantidades de agua para garantizar la fluidez deseada, variaron en cada una de las proporciones de mezcla.

Después de haber transcurrido las 24 ± 2 horas que menciona la normativa correspondiente (*i.e.* NMX-061), se realizó el desmolde para posteriormente efectuar el almacenado en bolsas plásticas por cada mezcla para conservar las condiciones de temperatura hasta el cumplimiento de las edades de endurecimiento de evaluación (Fig. 4.6c). Una vez cumplida la edad de endurecimiento se procedió a evaluar la resistencia a la compresión de la misma manera que la Sección 3.3.

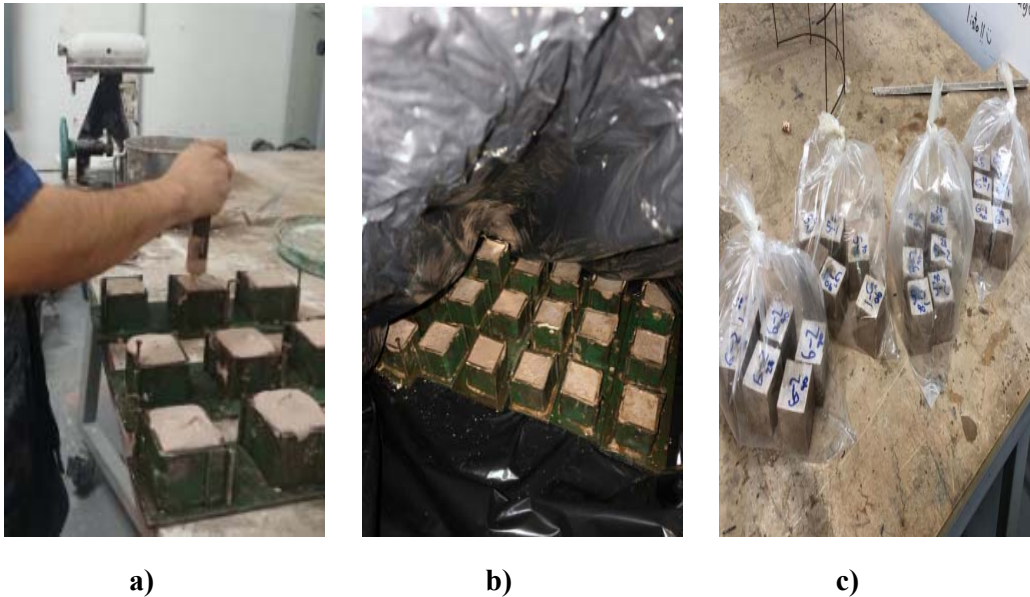


Figura 4.6. Proceso de elaboración de especímenes para evaluación inicial: a) mezclado, fluidez y apisonado; b) almacenado en bolsas plásticas durante $24 \text{ h} \pm 2$ y c) almacenado para edades de endurecimiento correspondientes de los especímenes.

En la Figura 4.7a se muestra la extracción de los especímenes a evaluar a resistencia a la compresión. Para garantizar la estabilidad al momento de efectuar el ensaye de resistencias, se implementaron un conjunto de barras y placas metálicas (Fig. 4.7b) evitando el descenso excesivo del cabezal de la máquina universal. Los mecanismos de fallas encontradas en los especímenes (Fig. 4.7c) variaron de acuerdo a las proporciones de mezcla y a las edades de endurecimiento. Estos, presentaron humedad aparente en las edades más tempranas y nula o parcial en las edades más avanzadas; donde se aprecia que en las mezclas con menor porcentaje de cemento Portland (*e.g.* M5-8), se presentaba una apariencia de humedad más definida a comparación de las mezclas con mayor porcentaje de este (*e.g.* M1-4).

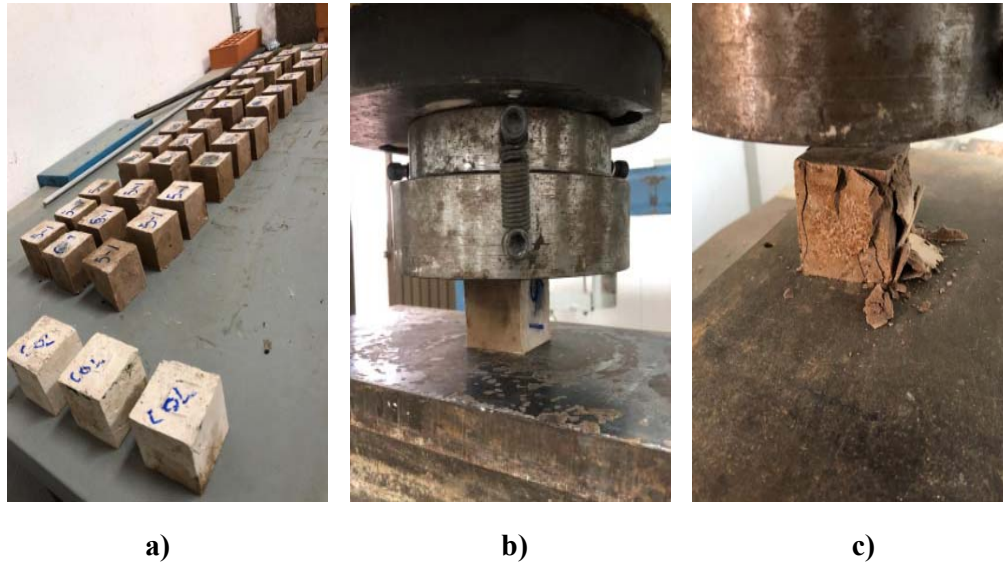


Figura 4.6. Ensayo de resistencia a la compresión: a) especímenes antes del almacenado en manta húmeda; b) estado inicial para prueba de resistencia y c) falla típica a compresión en especímenes.

Los mecanismos de fallas encontrados en los especímenes con 7 días de endurecimiento se muestran en la [Figuras 4.8a-c](#). En los especímenes con mayor cantidad de cemento Portland, se presentó el comportamiento típico de aplastamiento y una propagación de la distribución columnar vertical y semi-diagonal de las grietas ([Fig. 4.8a](#)). En especímenes de menor cantidad de cemento, se generó un mecanismo de desprendimiento cónico, por así decirlo, al presentarse una falla cónica-columnar en el extremo inferior ([Fig. 4.8b](#)) junto con fisuras verticales a través del extremo superior y viceversa ([Fig. 4.8c](#)) donde al mismo tiempo se separaron en dos partes.

Además, en estos especímenes, se apreció notablemente la cantidad de agua retenida por las mezclas en general, al presentarse adherencia excesiva en el cabezal de la Prensa Universal, puesto que para “despegar” los especímenes, fue necesaria la utilización de una espátula aplicando un golpe transversal para desprenderlos y un proceso de limpieza (*i.e.* rascado) para quitar los restos. Los mecanismos de fallas encontrados en los especímenes con 28 días de endurecimiento se muestran en las [Figuras 4.9a-c](#), donde en todos los especímenes, se presentó el comportamiento típico de aplastamiento y una propagación de la distribución columnar vertical y semi-diagonal de las grietas ([Figs. 4.9a-b](#)). Además, se aprecia una diferencia considerable en el contenido de agua de los especímenes en comparación con los de edades tempranas de endurecimiento ([Figs. 4.8a-c](#)).

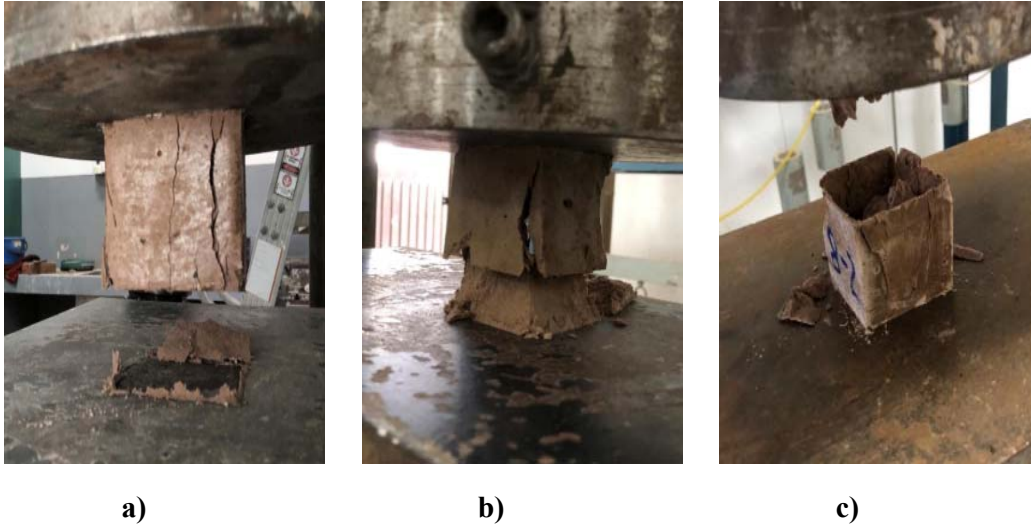


Figura 4.8. Mecanismos de falla encontrados en especímenes con 7 días de endurecimiento: a) falla columnar vertical y semi-diagonal; b) falla cónica-columnar con desprendimiento cónico inferior y c) falla cónica-columnar con desprendimiento cónico superior.

También, en la mayoría de estos se presentó un comportamiento de falla cónica (Fig. 4.9c), observada cuando se logra aplicar una carga de compresión total y correctamente distribuida; la cual comúnmente se encuentra asociada a la falla “ideal” esperada en el diseño de mezclas en general. Para lograr una mejor apreciación se retiraron los fragmentos “suelos” y semi-suelos de los especímenes que presentaran esta condición, apreciándose con mayor certeza la falla cónica que se generó en la mayoría de los casos (Fig. 4.10).

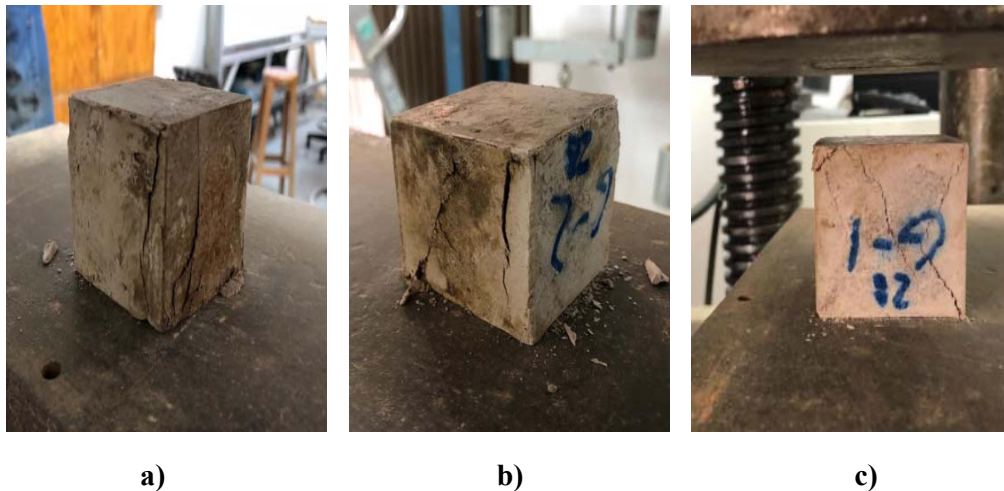


Figura 4.9. Mecanismos de falla encontrados en especímenes con 28 días de endurecimiento: a) falla columnar vertical y semi-diagonal; b) falla cónica-columnar con desprendimiento cónico inferior y c) falla cónica.



Figura 4.10. Mecanismo de falla cónica encontrada en la mayoría de los especímenes con 28 días de endurecimiento.

Los mecanismos de fallas encontrados en los especímenes con 90 días de endurecimiento se muestran en la [Figura 4.11](#), donde en todos los especímenes, se presentó el mismo comportamiento típico de aplastamiento y una propagación de la distribución columnar vertical y semi-diagonal de las grietas ([Figs. 4.9a-b](#)). También, en la mayoría de estos, se presentó un comportamiento de falla cónica, observada cuando se logra aplicar una carga de compresión total y correctamente distribuida; la cual comúnmente se encuentra asociada a la falla “ideal” esperada en el diseño de mezclas en general. Para lograr una mejor apreciación se retiraron los fragmentos “suelos” y semi-suelos de los especímenes que presentaran esta condición, apreciándose con mayor certeza la falla cónica que se generó en la mayoría de los casos ([Fig. 4.11](#)). Los resultados y las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los mismos se muestran en las [Tablas 4.1-3](#).



Figura 4.11. Mecanismo de falla cónica encontrada en la mayoría de los especímenes con 90 días de endurecimiento.

Tabla 4.1. Resumen de propiedades mecánicas de especímenes evaluados a resistencia a la compresión a una edad de 7 días de endurecimiento.

<i>M</i> (<i>e</i> ₁₋₃)	<i>P1-7</i>					<i>P2-7</i>				
	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)
1	1.66	0.054	5.53	0.072	76.49	1.82	0.078	6.08	0.093	65.71
	1.49	0.065	4.97	0.085	58.75	1.73	0.037	5.78	0.058	99.66
	1.65	0.057	5.51	0.076	72.23	1.90	0.018	6.35	0.035	180.79
*Σ^1	1.60	0.059	5.34	0.078	69.16	1.82	0.044	6.07	0.062	115.39
2	1.11	0.057	3.70	0.075	49.18	0.87	0.064	2.89	0.086	33.46
	0.96	0.006	3.21	0.033	96.73	0.93	0.005	3.10	0.023	136.79
	1.01	0.062	3.37	0.090	37.65	0.90	0.040	2.99	0.054	55.87
*Σ^2	1.03	0.042	3.43	0.066	61.19	0.90	0.036	3.00	0.054	75.38
3	0.55	0.006	1.84	0.024	76.16	0.59	0.002	1.98	0.026	76.59
	0.56	0.013	1.87	0.030	62.85	0.49	0.013	1.62	0.030	53.47
	0.52	0.016	1.73	0.036	47.95	0.48	0.005	1.60	0.036	44.14
*Σ^3	0.54	0.011	1.81	0.030	62.32	0.52	0.007	1.73	0.031	58.07
4	4.67	0.017	15.56	0.032	486.82	3.74	0.015	12.48	0.034	367.53
	4.46	0.019	14.86	0.037	397.89	3.85	0.033	12.82	0.053	241.48
	4.39	0.013	14.65	0.033	443.86	4.07	0.015	13.57	0.033	417.38
*Σ^4	4.51	0.016	15.02	0.034	442.86	3.89	0.021	12.96	0.040	342.13
5	0.10	0.014	0.32	0.033	9.50	0.08	0.020	0.28	0.036	7.70
	0.06	0.009	0.21	0.018	11.92	0.08	0.010	0.27	0.023	11.42
	0.10	0.015	0.33	0.013	25.85	0.07	0.000	0.23	0.016	14.73
*Σ^5	0.09	0.013	0.29	0.021	15.76	0.08	0.010	0.26	0.025	11.28
6	0.22	0.005	0.73	0.028	25.98	0.21	0.007	0.71	0.025	28.33
	0.25	0.006	0.82	0.024	34.14	0.23	0.015	0.76	0.035	21.65
	0.24	0.003	0.81	0.020	41.45	0.22	0.005	0.74	0.020	36.12
*Σ^6	0.24	0.005	0.79	0.024	33.85	0.22	0.009	0.73	0.027	28.70
7	0.01	0.000	0.05	0.007	6.83	0.44	0.071	1.46	0.094	15.62
	0.41	0.079	1.38	0.100	13.83	0.45	0.012	1.51	0.031	49.14
	0.38	0.007	1.27	0.027	46.82	0.47	0.044	1.55	0.059	26.22
*Σ^7	0.27	0.029	0.90	0.045	22.50	0.45	0.042	1.51	0.061	30.33
8	0.67	0.032	2.23	0.053	42.17	0.88	0.017	2.93	0.036	81.13
	0.64	0.012	2.12	0.034	62.76	0.63	0.009	2.11	0.042	50.13
	0.69	0.010	2.31	0.032	72.04	0.74	0.015	2.46	0.037	66.10
*Σ^8	0.67	0.018	2.22	0.040	58.99	0.75	0.014	2.50	0.038	65.79

M= mezcla "n" con proporciones de la [Tabla 4.4](#); *e*₁₋₃= especímenes 1-3 de cada mezcla; *P1-7* y *P2-7*= Puzolana con nivel de molienda de 4 y 6 h respectivamente, para mezclas evaluadas a compresión a 7 días de endurecimiento; σ_{el} = esfuerzo elástico; ε_{el} = deformación elástica; σ_u = esfuerzo último; ε_u = deformación última; *E*= módulo de elasticidad y Σ^n =media de la mezcla "n".

Tabla 4.2. Resumen de propiedades mecánicas de especímenes evaluados a resistencia a la compresión a una edad de 28 días de endurecimiento.

<i>M</i> (<i>e</i> ₁₋₃)	<i>P1-28</i>					<i>P2-28</i>				
	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)
1	3.76	0.037	12.55	0.054	232.73	3.85	0.023	12.82	0.039	332.44
	3.41	0.015	11.36	0.032	350.24	3.43	0.028	11.45	0.045	255.03
	3.47	0.036	11.57	0.052	220.79	3.67	0.039	12.22	0.058	211.16
*Σ^1	3.55	0.029	11.83	0.046	267.92	3.65	0.030	12.16	0.047	266.21
2	2.62	0.038	8.74	0.052	168.55	1.98	0.021	6.58	0.033	199.55
	2.45	0.032	8.15	0.046	175.87	1.81	0.026	6.03	0.044	138.48
	2.48	0.025	8.27	0.043	192.56	1.56	0.022	5.19	0.054	95.78
*Σ^2	2.52	0.032	8.39	0.047	178.99	1.78	0.023	5.94	0.044	144.60
3	1.35	0.048	4.49	0.064	69.75	1.46	0.029	4.87	0.045	107.59
	1.29	0.024	4.32	0.039	111.21	1.50	0.021	5.01	0.035	144.30
	1.25	0.025	4.15	0.039	105.89	1.48	0.032	4.94	0.044	111.32
*Σ^3	1.30	0.032	4.32	0.047	95.61	1.48	0.027	4.94	0.041	121.07
4	6.85	0.023	22.83	0.049	464.40	7.40	0.036	24.68	0.058	423.10
	7.93	0.054	26.43	0.074	356.34	7.07	0.052	23.58	0.073	323.40
	7.00	0.029	23.35	0.049	472.98	8.05	0.060	26.83	0.083	325.15
*Σ^4	7.26	0.035	24.20	0.058	431.24	7.51	0.049	25.03	0.071	357.22
5	0.70	0.074	2.35	0.114	20.54	0.74	0.041	2.47	0.069	35.88
	0.72	0.047	2.41	0.085	28.35	0.81	0.027	2.71	0.051	53.33
	0.81	0.015	2.71	0.040	67.60	0.82	0.016	2.74	0.040	67.83
*Σ^5	0.75	0.045	2.49	0.080	38.83	0.79	0.028	2.64	0.053	52.35
6	1.18	0.013	3.93	0.039	100.49	0.98	0.016	3.26	0.053	61.09
	1.15	0.024	3.84	0.049	78.19	1.13	0.014	3.76	0.041	90.73
	1.18	0.025	3.92	0.048	82.56	1.16	0.013	3.87	0.036	107.52
*Σ^6	1.17	0.021	3.90	0.045	87.08	1.09	0.014	3.63	0.044	86.45
7	1.62	0.078	5.39	0.092	58.66	1.65	0.031	5.48	0.045	121.12
	1.63	0.052	5.43	0.065	83.77	1.64	0.022	5.47	0.038	145.54
	1.48	0.010	4.92	0.027	182.29	1.69	0.019	5.62	0.037	153.43
*Σ^7	1.57	0.047	5.25	0.061	108.24	1.66	0.024	5.53	0.040	140.03
8	1.71	0.011	5.70	0.026	215.63	1.73	0.042	5.76	0.064	89.38
	1.77	0.012	5.89	0.025	234.90	1.94	0.028	6.47	0.046	140.92
	1.61	0.023	5.35	0.038	142.21	1.66	0.014	5.53	0.040	137.32
*Σ^8	1.69	0.015	5.65	0.030	197.58	1.78	0.028	5.92	0.050	122.54

M= mezcla "n" con proporciones de la [Tabla 4.4](#); *e*_{1,3}= especímenes 1-3 de cada mezcla; *P1-28* y *P2-28*= Puzolana con nivel de molienda de 4 y 6 h respectivamente, para mezclas evaluadas a compresión a 28 días de endurecimiento; σ_{el} = esfuerzo elástico; ε_{el} = deformación elástica; σ_u = esfuerzo último; ε_u = deformación última; *E*= módulo de elasticidad y Σ^n =media de la mezcla "n".

Tabla 4.3. Resumen de propiedades mecánicas de especímenes evaluados a resistencia a la compresión a una edad de 90 días de endurecimiento.

<i>M</i> (<i>e</i> ₁₋₃)	<i>P1-90</i>					<i>P2-90</i>				
	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)
1	5.35	0.025	17.84	0.050	355.74	6.55	0.016	21.83	0.035	622.90
	5.98	0.015	19.93	0.033	604.52	6.36	0.017	21.21	0.038	564.06
	5.72	0.021	19.07	0.045	426.84	6.20	0.019	20.68	0.038	551.24
*Σ^1	5.68	0.020	18.95	0.043	462.37	6.37	0.017	21.24	0.037	579.40
2	4.34	0.016	14.47	0.041	353.87	3.34	0.013	11.15	0.028	392.43
	3.72	0.028	12.41	0.056	222.70	3.16	0.016	10.54	0.041	255.56
	3.96	0.022	13.19	0.043	305.59	3.63	0.015	12.11	0.032	379.90
*Σ^2	4.01	0.022	13.35	0.047	294.05	3.38	0.014	11.27	0.034	342.63
3	2.33	0.015	7.76	0.035	224.76	2.83	0.014	9.44	0.029	320.52
	2.44	0.014	8.14	0.032	251.72	2.65	0.015	8.83	0.034	259.65
	2.14	0.014	7.13	0.039	182.17	2.46	0.011	8.21	0.034	239.43
*Σ^3	2.30	0.014	7.68	0.035	219.55	2.65	0.013	8.82	0.033	273.20
4	3.97	0.014	13.24	0.028	476.19	7.78	0.015	25.93	0.035	746.72
	9.68	0.017	32.27	0.035	914.58	6.96	0.030	23.21	0.057	407.11
	10.32	0.021	34.42	0.047	734.14	7.66	0.020	25.52	0.051	502.36
*Σ^4	7.99	0.017	26.64	0.037	708.30	7.47	0.022	24.88	0.048	552.06
5	2.03	0.017	6.77	0.034	198.78	1.92	0.016	6.40	0.039	162.98
	2.02	0.050	6.75	0.067	101.34	2.07	0.032	6.89	0.046	149.79
	1.95	0.038	6.49	0.054	120.91	1.88	0.011	6.27	0.024	261.16
*Σ^5	2.00	0.035	6.67	0.051	140.34	1.96	0.020	6.52	0.036	191.31
6	2.53	0.030	8.43	0.050	169.57	2.50	0.039	8.35	0.057	146.31
	2.64	0.013	8.81	0.031	282.35	2.42	0.010	8.07	0.030	266.57
	2.39	0.023	7.97	0.036	220.64	2.80	0.034	9.33	0.051	182.18
*Σ^6	2.52	0.022	8.40	0.039	224.19	2.57	0.028	8.58	0.046	198.35
7	2.83	0.045	9.45	0.061	154.99	3.45	0.053	11.50	0.071	161.13
	2.67	0.010	8.91	0.029	307.92	3.14	0.025	10.48	0.041	252.82
	2.92	0.012	9.74	0.030	328.04	2.73	0.026	9.10	0.043	213.62
*Σ^7	2.81	0.022	9.36	0.040	263.65	3.11	0.035	10.36	0.052	209.19
8	1.75	0.030	5.84	0.056	105.10	2.22	0.011	7.40	0.027	276.85
	1.93	0.021	6.42	0.039	163.63	2.12	0.011	7.08	0.027	266.89
	1.86	0.009	6.20	0.024	253.72	1.84	0.011	6.12	0.015	420.52
*Σ^8	1.85	0.020	6.15	0.040	174.15	2.06	0.011	6.87	0.023	321.42

M= mezcla "n" con proporciones de la [Tabla 4.4](#); *e*_{1,3}= especímenes 1-3 de cada mezcla; *P1-90* y *P2-90*= Puzolana con nivel de molienda de 4 y 6 h respectivamente, para mezclas evaluadas a compresión a 90 días de endurecimiento; σ_{el} = esfuerzo elástico; ε_{el} = deformación elástica; σ_u = esfuerzo último; ε_u = deformación última; *E*= módulo de elasticidad y Σ^n =media de la mezcla "n".

Tabla 4.4. Proporciones de mezclas para pastas de evaluación inicial junto con promedios de esfuerzos máximos por mezcla a 7, 28 y 90 días de endurecimiento.

<i>M</i> (<i>n</i>)	<i>Puz</i> (%)	<i>Cal</i> (%)	<i>Cem</i> (%)	σ_{P1-7} (MPa)	σ_{P2-7} (MPa)	σ_{P1-28} (MPa)	σ_{P2-28} (MPa)	σ_{P1-90} (MPa)	σ_{P2-90} (MPa)
1	29.37	29.37	41.25	5.34	6.07	11.83	12.16	18.95	21.24
2	33.75	33.75	32.50	3.43	3.00	8.39	5.94	13.35	11.27
3	38.12	38.12	23.75	1.81	1.73	4.32	4.94	7.68	8.82
4	50.00	0.00	50.00	15.02	12.96	24.2	25.03	26.64	24.88
5	70.00	30.00	0.00	0.29	0.26	2.49	2.64	6.67	6.52
6	75.00	20.00	5.00	0.79	0.73	3.9	3.63	8.4	8.58
7	80.00	10.00	10.00	0.9	1.51	5.25	5.53	9.36	10.36
8	85.00	0.00	15.00	2.22	2.5	5.65	5.92	6.15	6.87

M= mezcla "n"; Puz= cantidad de Puzolana; Cal= cantidad de cal; Cem= cantidad de cemento Portland; σ = promedio de esfuerzos máximos de especímenes de la muestra "n"; P1-7,28,90 y P2-7, 28, 90= Puzolana con nivel de molienda de 4 y 6 h respectivamente, para mezclas evaluadas a compresión a 7, 28 y 90 días de endurecimiento.

En la [Tabla 4.4](#) se muestra un resumen de los promedios de evaluación inicial de la resistencia a la compresión simple. Una primera valoración basada en los resultados muestra resistencias interesantes comparadas con las de los cementantes convencionales (*i.e.* 20-50 MPa / 203.90-509.86 kg/cm²) a 28 días, donde se cumple la tendencia de que a mayor edad de endurecimiento mayor resistencia a la compresión con los siguientes resultados:

Para la edad de 7 días las resistencias representan entre el 7-85% de la resistencia convencional para cementantes a 7 días (4.4 MPa / 44.87 kg/cm²), a excepción de las mezclas 1 y 4. Por otro lado, para la edad de 28 días las resistencias representan entre el 13-30% de la resistencia convencional (20 MPa / 203.90 kg/cm²), a excepción de las mezclas 1 y 4. Se aprecia además que el incremento de resistencia entre cada edad de endurecimiento varía aproximadamente el 50%.

En cada edad de endurecimiento se aprecia variabilidad en las resistencias para ambas finuras, sin embargo, esta no representa incrementos considerables como para suponer que al aumentar el nivel de finura la resistencia incrementará linealmente, por lo que se determina que el nivel de finura P2, es el nivel "máximo" donde el tamaño de las partículas es contraproducente para la resistencia. Sin embargo, es necesario realizar un análisis estadístico para obtener resultados concluyentes.

Cabe destacar que todos los restos de los especímenes ensayados se almacenaron de manera independiente con una distribución por número de mezcla para desarrollar un estudio posterior a esta investigación, al evaluar la viabilidad de implementar estos productos como materia prima en la generación de mezclas nuevas a base de morteros reciclados. Así mismo, esto se propondrá como línea de investigación futura en la sección correspondiente.

4.3. Análisis de regresión lineal múltiple

En esta sección se aborda el diseño de experimento factorial 3^k para explorar la influencia de los componentes (*i.e.* cal hidratada, Puzolana y cemento Portland) y la relación de las variables de proceso (*i.e.* tiempo de curado y tamaño de partícula de Puzolana). El análisis del experimento se realizó con *Statgraphics 18*[®] donde este paquete de análisis permite identificar los efectos de las variables de proceso. En esta sección se definen los parámetros a considerar para la generación del diseño factorial y las herramientas implementadas para el análisis estadístico de resultados.

Para identificar los efectos de las variables de proceso sobre la variable de respuesta, se genera una modificación en los valores de los parámetros β_i en función de las mismas (Ec. 1 y 2).

$$\beta_i = \alpha_{0,i} + \alpha_{1,i}Z_1 + \alpha_{2,i}Z_2 + \alpha_{1*2,i}Z_1 * Z_2 \quad (Ec. 1)$$

$$\beta_i = \alpha_{0,ij} + \alpha_{1,ij}Z_1 + \alpha_{2,ij}Z_2 + \alpha_{1*2,ij}Z_1 * Z_2 \quad (Ec. 2)$$

Al generar estas modificaciones se obtienen las variables de las Ecuaciones 1-2, en donde $\alpha_{0,i}$ es el valor medio esperado de la respuesta para la mezcla pura de la componente i en las condiciones promedias de las variables de proceso mientras que $\alpha_{1,i}$ es el efecto que la variable Z_l de proceso tiene sobre el valor medio esperado de la respuesta para la mezcla pura de la componente i . $\alpha_{1*2,i}$ es la interacción entre los efectos de las variables Z_1 y Z_2 de proceso sobre el valor medio esperado de la respuesta para la “mezcla” pura de la componente i mientras que $\alpha_{0,ij}$ es la interacción entre las componentes x_i y x_j de la mezcla, trabajando en las condiciones promedias de las variables de proceso. $\alpha_{1,ij}$ es el efecto que la variable Z_l de proceso tiene sobre la interacción entre las componentes x_i y x_j de la mezcla y $\alpha_{1*2,ij}$ es la interacción entre los efectos de las variables Z_1 y Z_2 de proceso sobre la interacción entre las componentes x_i y x_j de la mezcla (Vargas, 2002).

De la misma manera que en la [Sección 4.2](#), los factores involucrados en la variable de respuesta y_u que representa la resistencia a la compresión simple en kg/cm^2 , son aquellos conformados por los componentes a manera de proporciones de Puzolana x_1 , cal x_2 y cemento Portland x_3 con variaciones del 30-85%, 10-40% y 5-50% respectivamente del peso seco de la mezcla n , de acuerdo a la matriz de diseño (cf. [Tabla 4.4](#)).

Se contemplaron dos variables de proceso, las cuales se representan por la edad de endurecimiento de los especímenes y el tamaño de partículas resultante de la molienda de la Puzolana, estableciéndose como Z_1 para la edad correspondiente (i.e. 7, 28 y 90 días) y Z_2 para el tamaño de partículas generado por las horas de molienda (i.e. P1 y P2; 4 y 6 h respectivamente). Para evitar sesgos derivados de variables no contempladas en el experimento, las pruebas fueron realizadas con condiciones controladas, siguiendo el procedimiento metodológico descrito en la [Sección 3.2-3](#).

Como se mencionó en la [Sección 3.4](#), se empleó *Statgraphics 18*[®] para el análisis de acuerdo con los trabajos de [Burril \(1998\)](#) y [Gutiérrez \(2012\)](#). En esta evaluación se implementó un análisis mediante el método *Multiple Regression*, al incluir como variables explicativas la interacción de las variables de proceso que multiplican a los diferentes parámetros α ([Ecs. 1 y 2](#)). Los predictores o variables independientes e interacciones entre ellas, es decir, las posibles combinaciones de los componentes con las variables de proceso de primer hasta cuarto orden, se determinaron con la obtención del número combinatorio (i.e. división de la variación ordinaria de n elementos tomados de r en r , dividido entre una permutación de r elementos); obteniendo 30 interacciones en un principio. Se descartaron aquellas que resultaran la combinación lineal de otras variables, generando un modelo con 24 predictores (cf. [Tabla 4.5](#)). Se eliminaron dos observaciones que presentaron una variabilidad anómala, para dar lugar a un modelo experimental basado en 142 observaciones. Este análisis se muestra en la [Tabla 4.5](#) e incluye todos los coeficientes estimados para cada término del modelo, su significancia estadística, así como su análisis de varianza correspondiente.

Este modelo general cuenta con un coeficiente de determinación R de 97.85% y un coeficiente de determinación ajustada $*R^2$ de 97.43%. Esto significa que el modelo describe en más de 95% la variabilidad de la resistencia a la compresión, lo cual da validez al experimento.

Tabla 4.5. Parámetros estadísticos del método *Multiple Regression*.

V_i	c	df	t	p
x_1	-0.506745000	0.96118100	-0.5272110	0.5990
x_2	-2.743800000	6.64022000	-0.4132090	0.6802
x_3	1.770950000	4.52808000	0.3911030	0.6964
$x_1 * x_2$	0.054966900	0.11800100	0.4658160	0.6422
$x_1 * x_3$	0.035393400	0.10916400	0.3242220	0.7463
$x_1 * z_1$	-0.015623200	0.01762070	-0.8866390	0.3771
$x_1 * z_2$	0.209949000	0.60631300	0.3462710	0.7298
$x_2 * x_3$	-0.007286830	0.13141800	-0.0554479	0.9559
$x_2 * z_1$	-0.131039000	0.12039100	-1.0884500	0.2786
$x_2 * z_2$	1.528260000	4.16501000	0.3669290	0.7143
$x_3 * z_1$	0.033118500	0.08238140	0.4020140	0.6884
$x_3 * z_2$	1.304390000	2.84844000	0.4579300	0.6478
$x_1 * x_2 * z_1$	0.002742300	0.00214410	1.2790000	0.2034
$x_1 * x_2 * z_2$	-0.027759300	0.07409570	-0.3746420	0.7086
$x_1 * x_3 * z_1$	0.000900912	0.00199006	0.4527070	0.6516
$x_1 * x_3 * z_2$	-0.027273800	0.06870420	-0.3969740	0.6921
$x_1 * z_1 * z_2$	0.011678900	0.01111370	1.0508600	0.2955
$x_2 * x_3 * z_1$	0.000750385	0.00238071	0.3151930	0.7532
$x_2 * x_3 * z_2$	-0.039972400	0.08239340	-0.4851410	0.6285
$x_2 * z_1 * z_2$	0.019843100	0.07581110	0.2617430	0.7940
$x_3 * z_1 * z_2$	0.008836390	0.05196200	0.1700550	0.8653
$x_1 * x_2 * z_1 * z_2$	-0.000667865	0.00135056	-0.4945090	0.6219
$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	-0.000810343	0.00125491	-0.6457390	0.5197
$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	0.000331366	0.00149893	0.2210680	0.8254

V_i = predictores o variables independientes e interacciones entre ellas; p = p -value; df =error estándar; R^2 =coeficiente de determinación múltiple (%); $*R^2$ =coeficiente de determinación múltiple ajustada (%); MSE =error cuadrático promedio.

Sin embargo, a pesar de que el modelo anterior presenta un alto coeficiente de correlación, se requiere depurar el modelo para volverlo más simple y que solo incluya términos estadísticamente significativos [Gutiérrez \(2012\)](#). Para ello se realizó una selección de variables hacia adelante y hacia atrás (*forward selection* y *backward selection*) mediante la técnica de *Stepwise regression* (cf. [Tabla 4.6](#)).

Tabla 4.6. *Stepwise regression con forward selection* para determinación de variables independientes estadísticamente significativas.

<i>Step</i>	<i>Vi</i>	<i>p</i>	<i>df</i>	<i>R</i> ²	<i>*R</i> ²	<i>MSE</i>	ΣVi
0	-	0.000000	142	0.00	0.00	11982.200	0
1	$x_1 * x_3$	0.000000	141	79.18	79.04	2511.830	1
2	$x_3 * z_1$	0.000000	140	89.92	89.77	1225.490	2
3	$x_1 * x_2 * z_1$	0.000040	139	91.07	90.88	1092.550	3
4	$x_2 * z_1$	0.000000	138	93.39	93.20	814.430	4
5	$x_1 * x_3 * z_1$	0.000000	137	95.36	95.19	576.237	5
6	x_2	0.000045	136	95.90	95.72	513.310	6
7	x_3	0.000626	135	96.24	96.04	474.036	7
8	$x_1 * x_2$	0.000000	134	96.95	96.77	387.190	8
9	$x_1 * x_3$	0.191965	135	96.91	96.75	389.254	7
10	$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	0.004820	134	97.09	96.92	369.500	8
11	$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	0.008637	133	97.24	97.05	353.397	9
12	$x_1 * x_3 * z_1$	0.421575	134	97.22	97.06	352.474	8
13	x_1	0.005809	133	97.38	97.20	335.307	9
14	$x_1 * z_1 * z_2$	0.007330	132	97.52	97.33	319.870	10
15	$x_2 * x_3$	0.010473	131	97.64	97.44	306.528	11
16	x_2	0.057251	132	97.57	97.39	312.751	10
17	$x_1 * x_2$	0.062134	133	97.51	97.34	318.722	9
18	$x_1 * x_3$	0.033114	132	97.59	97.41	310.239	10
19	x_1	0.956087	133	97.59	97.43	307.914	9
20	$x_2 * z_1 * z_2$	0.043386	132	97.67	97.49	300.768	10
21	$x_1 * z_1$	0.043948	131	97.74	97.55	293.784	11

Step= pasos de *Stepwise regression con forward selection*; *Vi*= predictores o variables independientes e interacciones entre ellas; *p*= *p-value* con valores inferiores a 0.05 asegurando un 95% de relación estadísticamente significativa a la resistencia a la compresión; *df*=error estándar; *R*²=coeficiente de determinación múltiple (%); **R*²=coeficiente de determinación múltiple ajustada (%); *MSE*=error cuadrático promedio y ΣVi = cantidad de predictores considerados por paso en el modelo final.

En la [Tabla 4.6](#) se encuentran los pasos seguidos por la técnica *Stepwise regression con forward selection* para la determinación de predictores estadísticamente significativos, en donde se obtuvieron los parámetros *p-value*, el error estándar; el coeficiente de determinación normal y ajustada; el error cuadrático promedio y la cantidad de predictores ΣVi incluidos en cada paso por cada implementación de la variable independiente V_{in} . Los renglones color rojo de la tabla indican los predictores o variables independientes e interacciones entre ellas que fueron descartadas del modelo.

El primer parámetro evalúa que tan significativo resulta cada uno de los factores, donde al asignar valores inferiores a 0.05, se determina que aquellos valores que se encuentren por debajo de este parámetro presentan el 95.00% de exactitud en efectos estadísticamente significativos para la obtención de la resistencia a la compresión. El error estándar mide la precisión con la que el modelo estima el valor desconocido del coeficiente. Los coeficientes de determinación múltiple R^2 y $*R^2$ representan una medida estadística de qué tan cerca están los datos de la línea de regresión o el porcentaje de la variación en la variable de respuesta, es decir, que un valor del 0% indica que el modelo no explica ninguna porción de la variabilidad de los datos de respuesta de acuerdo a su porcentaje. Por otro lado, un valor del 100% indica que el modelo explica toda la variabilidad de los datos de respuesta (*i.e.* a mayor porcentaje de $R^2/*R^2$ el modelo se acerca más a la realidad). Estos coeficientes, se implementan dependiendo del número de variables independientes que se requiera estudiar, en donde la utilización del $*R^2$ resulta más adecuada para comparar modelos con diferentes números de variables independientes.

El cuadrado medio del error MSE se obtiene dividiendo la suma de los cuadrados del error residual entre los grados de libertad representando la distancia cuadrada promedio entre el valor real y el valor pronosticado, por lo que mientras menor valor presente, el modelo se estará acercando con mayor significancia estadística a la realidad. Al contemplar los parámetros indicadores descritos anteriormente, en la [Tabla 4.6](#) se muestran los resultados de los pasos realizados por la técnica de *Stepwise regression* con *forward selection*. Se analizaron los 24 predictores (*cf.* [Tabla 4.5](#)) por medio de 21 corridas o pasos de análisis para la determinación de que variables resultan más estadísticamente significativas, generando un modelo final con la participación de 11 predictores. El resultado del modelo depurado se muestra en la [Tabla 4.7](#). Este modelo presenta un coeficiente de determinación ajustada $*R^2$ del 97.5654% y un error estándar df de 17.1401.

Por otro lado, el análisis de varianza generado para el modelo presenta una sumatoria de cuadrados del 1662980, un error estándar df de 11, una media cuadrática de 151180, un F -ratio de 514.60 y un p -value de 0.0000; mientras que el análisis de varianza de los residuales, presenta valores de 38485.7, 131 y 293.784 respectivamente.

Tabla 4.7. Resumen de análisis de regresión múltiple del modelo simplificado con un 97.57% de variabilidad en la estimación de la variable de respuesta y precisión de ± 17 .

V_i	c	df	t	p
x_3	4.28025	0.477241	8.96875	0.0000
$x_1 * x_3$	-0.0209102	0.00869064	-2.40606	0.0175
$x_1 * z_1$	-0.00502183	0.00246867	-2.03422	0.0439
$x_2 * x_3$	-0.0750147	0.0072855	-10.2964	0.0000
$x_2 * z_1$	-0.0699401	0.0101454	-6.89376	0.0000
$x_3 * z_1$	0.058702	0.00496675	11.819	0.0000
$x_1 * x_2 * z_1$	0.00153528	0.000205507	7.47069	0.0000
$x_1 * z_1 * z_2$	0.00567121	0.00147847	3.83587	0.0002
$x_2 * z_1 * z_2$	-0.012585	0.00440455	-2.85726	0.0050
$x_1 * x_3 * z_1 * z_2$	-0.000400327	0.000059865	-6.68717	0.0000
$x_2 * x_3 * z_1 * z_2$	0.000628734	0.000122278	5.14183	0.0000

V_i = predictores o variables independientes e interacciones entre ellas; c =coeficientes de las V_i ; df =error estándar; t = t -value, representa significativamente la varianza en la interacción de las V_i ; p = p -value con valores inferiores a 0.05 asegurando un 95% de relación estadísticamente significativa a la resistencia a compresión.

Los coeficientes c de las variables independientes representan el cambio medio en la variable de respuesta para una unidad de cambio en la variable predictora, mientras mantiene otros predictores en la constante del modelo, es decir, aislando cada una de las variables del resto. Los t -value representan qué predictores (*i.e.* variables independientes y sus interacciones) contribuyen de manera significativa a explicar la varianza en y_u , es decir, mientras mayor sea este parámetro, mayor contribución estadística en la resistencia a la compresión. Los p -value con valores inferiores a 0.05 aseguran un 95% de relación estadísticamente significativa a y_u , en donde los todos los predictores, representan el 97.57% de confianza estadísticamente significativa en relación a y_u . En la [Figura 4.12](#) se muestra la comparación de observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u .

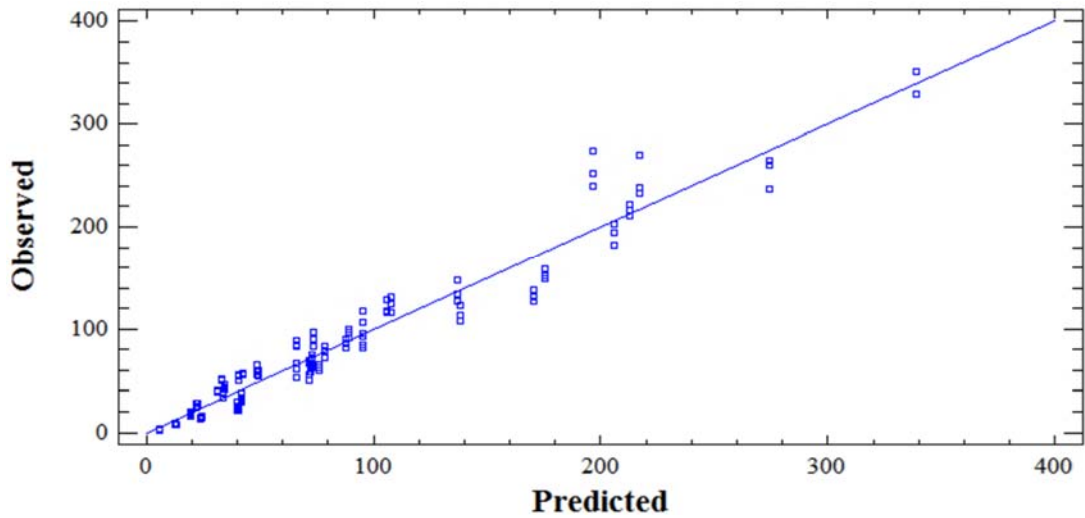


Figura 4.12. Observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2 .

Al obtener un coeficiente de determinación ajustada $*R^2$ del 97.5654%, pudiera interpretarse en la mayoría de los modelos experimentales como un porcentaje de predicción muy cercano a la realidad. Como se aprecia en la [Figura 4.12](#), el modelo está en concordancia con las observaciones obtenidas (*i.e.* cuadrados azules). Asimismo, es necesaria la inspección minuciosa de la gráfica de residuales vs ajustes para evaluar la validez del experimento. En ellos, no se deben observar patrones, que pudieran significar sesgos; es decir, variables que modifican el comportamiento del modelo, pero no fueron consideradas en el experimento ([Fig. 4.13-4.14](#)).

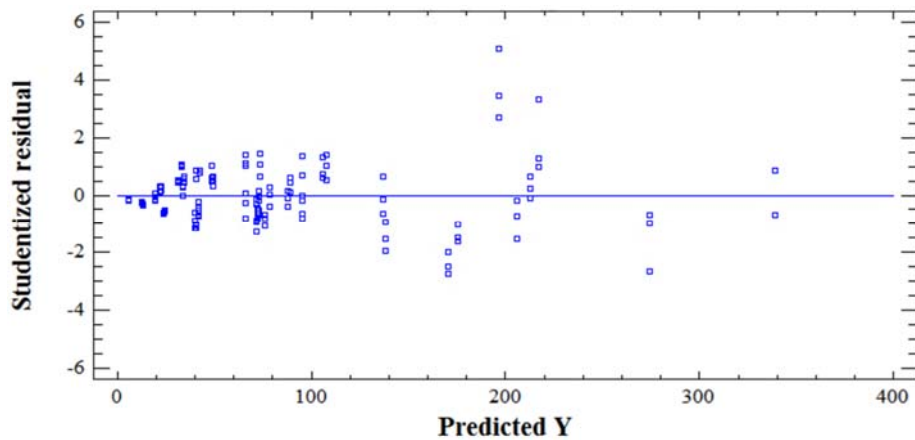


Figura 4.13. Residuales estandarizados de observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2

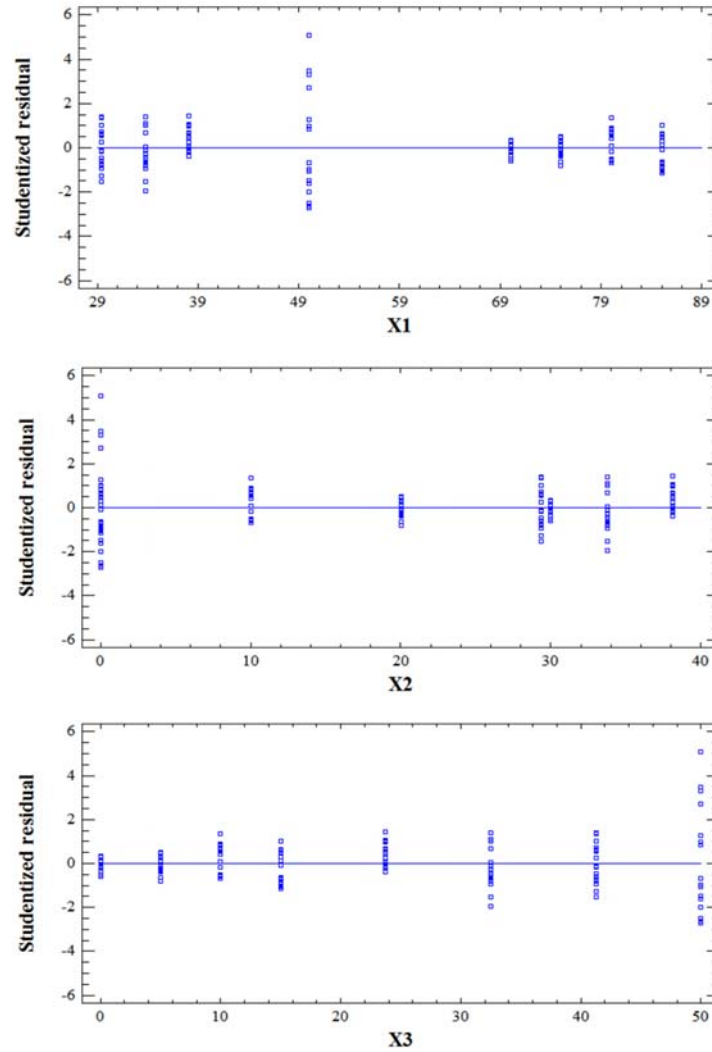


Figura 4.14. Residuales estandarizados de observaciones *vs* predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2 para X1, X2 y X3.

Por último, se presenta la [Ecuación 3](#), que es el modelo de regresión lineal múltiple que describe la relación entre la variable de respuesta y_u en kg/cm^2 junto con los 11 predictores (*i.e.* variables independientes y sus interacciones), garantizando en un 97.5654% la predicción en la resistencia a la compresión con una exactitud de ± 17 .

$$\begin{aligned}
 y_u = & 4.28025 * x_3 - 0.0209102 * x_1 * x_3 - 0.00502183 * x_1 * z_1 \\
 & - 0.0750147 * x_2 * x_3 - 0.0699401 * x_2 * z_1 + 0.058702 * x_3 * z_1 \\
 & + 0.00153528 * x_1 * x_2 * z_1 + 0.00567121 * x_1 * z_1 * z_2 \\
 & - 0.012585 * x_2 * z_1 * z_2 - 0.000400327 * x_1 * x_3 * z_1 * z_2 \\
 & + 0.000628734 * x_2 * x_3 * z_1 * z_2
 \end{aligned}
 \tag{Ec. 3}$$

4.4. Discusión de análisis estadístico

En las Secciones anteriores se realizó la evaluación y el análisis inicial para el experimento mixto formado por el diseño de mezcla de tres componentes y el diseño factorial, con el cual se logró identificar la influencia de los componentes (*i.e.* hidróxido de calcio, Puzolana y cemento Portland), junto con las variables de proceso consideradas (*i.e.* tiempo de curado, cantidad y tamaño de partícula de Puzolana). A partir del análisis experimental para los coeficientes, como se aprecia en la [Ecuación 3](#) y en la [Tabla 4.7](#) se puede destacar lo siguiente:

- La contribución del tamaño de las partículas Z_2 no varía significativamente entre los tamaños de las Puzolanas P1 y P2. Esto concuerda con el análisis granulométrico observado en la [Figura 4.3](#) y lo observado en las [Tablas 4.1-4.4](#). Por lo tanto, se utilizará solamente la Puzolana P1 por generar un menor impacto energético en su fabricación (*i.e.* cuatro horas de trituración).
- La proporción de cemento Portland x_3 es la que presenta el aumento más significativo en y_u , al tratarse de la variable con el mayor coeficiente y ser directamente proporcional.
- En las interacciones de segundo orden, la más importante es la interacción del cemento Portland con la edad de endurecimiento $x_3 * z_1$. Esto concuerda con la observación anterior.
- La cal presenta comportamiento antagónico para la resistencia a la compresión ($x_2 * x_3$ y $x_2 * z_1$), con coeficientes (*t-value*) negativos considerablemente altos, que describen una interacción negativa con el cemento Portland y con el tiempo de curado. Esta interacción es considerablemente menos desfavorable en el caso de la Puzolana ($x_1 * x_3$ y $x_1 * z_1$), lo cual demuestra su superioridad como aditivo del cemento, con respecto a la cal.
- En mezclas conformadas por el 100% de Puzolana se desarrollarán bajas resistencias sin importar el tiempo de curado $x_1 * z_1$. Como era de esperarse de acuerdo al estado del arte del [Capítulo 2](#).
- El comportamiento benéfico de la Puzolana se observa en las interacciones de tercer orden, interactuando positivamente con la cal, a mayores edades de curado ($x_1 * x_2 * z_1$), y con una relativa mejora con mayores grados de finura ($x_1 * x_2 * z_2$). Esto concuerda con el estado del arte de las Puzolanas.

- A pesar de no ser relevante, la puzolana de mayor finura pareciera interactuar negativamente con el cemento a edades avanzadas ($x_1 * x_3 * z_1 * z_2$).
- La cal interactúa de forma positiva con el cemento a edades avanzadas y en presencia de Puzolana fina ($x_2 * x_3 * z_1 * z_2$). Sin embargo, este efecto benéfico queda ensombrecido por las relaciones antagónicas que presenta la cal en sus interacciones de segundo orden.
- Para efectos prácticos, y por las mencionadas interacciones negativas de la cal, las mejores resistencias se obtienen al mezclar Puzolana con cemento Portland x_1 y x_3 .
- En mezclas compuestas 100% por cal se desarrollarán bajas resistencias sin importar el tiempo de curado $x_2 * z_1$. Además, estas perderán su resistencia en el paso del tiempo $x_2 * z_1 * z_2$. Sin embargo, cabe señalar que, por el tipo de curado del experimento, que evalúa las propiedades hidráulicas, se subestiman las propiedades de la cal.

Capítulo V

Calibración

5.1. Calibración de acuerdo a normativa

Hasta este punto de la investigación en la [Sección 4.2](#) se evaluaron mezclas de pasta pura con tres componentes (*i.e.* Puzolana, cal y cemento Portland), se realizó un estudio estadístico detallado en la [Sección 4.3](#) donde se determinó que al generar dosificaciones binarias (*i.e.* Puzolana con cemento Portland) se obtienen mejores resultados en la resistencia a la compresión para todas las edades de endurecimiento. También, que, la contribución del tamaño de las partículas Z_2 no varía significativamente entre los tamaños de las Puzolanas P1 y P2, por lo que se utilizó solamente la Puzolana P1 por generar un menor impacto energético en su fabricación (*i.e.* cuatro horas de trituración).

Sin embargo, en la evaluación inicial se consideraron ciertas excepciones en la normativa ([Sección 3.1](#)) para optimizar los tiempos en la generación de resultados del experimento. Por ello, en este Capítulo se generó una evaluación de calibración cumpliendo todas las especificaciones para la obtención de la resistencia a la compresión de acuerdo a la norma [NMX-061 \(2015\)](#). Además, con esta calibración fue posible obtener proporciones ideales para la fabricación de mortero de albañilería, mortero estructural y cemento hidráulico. Debido a que la evaluación de resistencias para el mortero estructural y el cemento hidráulico siguen el mismo procedimiento, se evaluaron ambas mezclas dentro de los límites de componentes correspondientes a un CPP de acuerdo a la [Tabla 2.4](#). Es decir, del 5-94% de cemento Portland necesario para elaborar especímenes [NMX-061 \(2015\)](#).

Con dichas mezclas, se evaluaron las mismas proporciones tanto para mortero estructural como para cemento hidráulico, sin necesidad de repetir el procedimiento con el doble de especímenes. Las consideraciones adicionales que se agregaron para esta evaluación fueron:

- Adición tanto de arena de cuarzo graduada de acuerdo a la norma [NMX-486 \(2014\)](#) para especímenes de mortero estructural y a la [NMX-414 \(2014\)](#) para cemento hidráulico, las cuales corresponden a la granulometría indicada por la [NMX-061 \(2015\)](#); como de arena de sílice graduada de acuerdo a la norma

NMX-021 (2015) para especímenes de mortero de albañilería. La granulometría de ambas se encuentra en la [Tabla 5.1](#).

- Para el cemento hidráulico y el mortero estructural: almacenamiento en cuarto de curado por 24 horas inmediatamente después de la elaboración de los especímenes para desmoldar y sumergir en agua saturada de cal hasta su ensayo a 28 días de endurecimiento.
- Para el mortero de albañilería: almacenamiento en cuarto de curado por 50 horas inmediatamente después de la elaboración de los especímenes para desmoldar y dejarlos siete días en gabinete, ensayar una parte de las muestras a dicha edad y posteriormente, sumergir el resto en agua saturada de cal hasta su ensayo a 28 días de endurecimiento.
- El agua del tanque estuvo saturada de CaOH₂ (*i.e.* cal) 3 g / L → 3 kg/m³.
- La temperatura del cuarto de curado, así como del agua del tanque de almacenamiento se mantuvo en 23° ± 2.
- Separación entre los especímenes 1 cm.
- Separación de las paredes del tanque 3 cm.
- 5 cm de tirante superior.

Tabla 5.1. Granulometría para arena graduada de acuerdo a las normas NMX-021 (2015) y NMX-061 (2015).

<i>Granulometría A₂₁ de arena de sílice (NMX-021)</i>		<i>Granulometría A₆₁ de arena de cuarzo (NMX-061)</i>	
<i>Malla (mm)</i>	<i>Retenido (%)</i>	<i>Malla (mm)</i>	<i>Retenido (%)</i>
No. 16 (1.180 mm)	0	100	98 ± 2
No. 20 (0.850 mm)	15 (máx.)	50	75 ± 5
No. 30 (0.600 mm)	95-100 (máx.)	40	30 ± 5
		30	2 ± 2
		16	0

La granulometría de la norma NMX-486 (2014) para especímenes de mortero estructural y a la NMX-414 (2014) para cemento hidráulico, corresponden a la granulometría indicada por la NMX-061 (2015).

En la [Tabla 5.1](#) se muestra la granulometría de la arena de cuarzo y la arena de sílice de acuerdo a su normativa correspondiente, las cuales se obtuvieron cribándolas por vía seca utilizando tres juegos de tamices sobre una mesa vibratoria para eficientar el procedimiento de cribado. Para el diseño del experimento de calibración, se realizaron nuevamente especímenes cúbicos de 5 x 5 x 5 cm con diferentes proporciones de ambos componentes (*i.e.* Puzolana y cemento Portland) con edades de endurecimiento establecidas por la normativa correspondiente al tipo de cementante a evaluar ([Tabla 2.8](#)). Se elaboraron tres muestras para cada dosificación de mezcla para posteriormente ensayarlas a compresión simple de acuerdo a su edad correspondiente.

El procedimiento de mezclado, la obtención de la fluidez, el moldeado y el apisonado se realizó de acuerdo a la [Sección 3.2](#) mientras que, para el almacenamiento, se realizaron las condiciones descritas al inicio de este Capítulo (*i.e.* usando arenas graduadas, cuarto de curado y tanque de almacenamiento). Las cantidades de agua para garantizar la fluidez deseada variaron en cada una de las proporciones de mezcla. Una vez cumplidas dichas consideraciones y las edades de endurecimiento de los especímenes, se procedió a evaluar la resistencia a la compresión de la misma manera que la [Sección 3.3](#).

Los mecanismos de fallas encontrados en los especímenes con siete y 28 días de endurecimiento fueron muy similares a los mostrados en las [Figuras 4.7a-c](#) y [4.8a-c](#) respectivamente, donde en todos los especímenes se presentó el comportamiento típico de aplastamiento y una propagación de la distribución columnar vertical y semi-diagonal de las grietas ([Figs. 4.8a-b](#)). También, se presentó el mismo comportamiento de falla cónica ([Fig. 4.8c](#)) observada cuando se logra aplicar una carga de compresión total y correctamente distribuida; la cual comúnmente se encuentra asociada a la falla “ideal” esperada en el diseño de mezclas en general. Los resultados y las propiedades mecánicas obtenidas a partir de los mismos se muestran en la [Tabla 5.2-3](#).

Tabla 5.2. Resumen de propiedades mecánicas para especímenes de calibración de morteros de albañilería evaluados a resistencia a la compresión a una edad de 7 y 28 días de endurecimiento.

<i>M</i> (<i>e</i> ₁₋₃)	7 días					28 días				
	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)
20	0.64	0.043	2.14	0.081	26.44	0.96	0.005	3.20	0.026	124.14
	0.65	0.014	2.18	0.048	45.46	0.89	0.011	2.96	0.046	63.73
* Σ^{20}	0.74	0.028	2.46	0.073	33.67	0.88	0.001	2.93	0.024	121.22
	0.68	0.028	2.26	0.067	35.19	0.91	0.006	3.03	0.032	103.03
30	0.90	0.004	3.01	0.038	79.25	1.27	0.008	4.25	0.043	98.88
	0.95	0.008	3.18	0.034	93.50	1.45	0.011	4.82	0.034	142.11
* Σ^{30}	0.93	0.004	3.09	0.028	110.33	1.31	0.004	4.36	0.026	167.30
	0.93	0.028	3.09	0.067	94.36	1.34	0.008	4.48	0.034	136.10
40	1.18	0.008	3.95	0.036	109.58	1.86	0.024	6.22	0.042	148.86
	1.21	0.023	4.03	0.058	69.51	1.75	0.019	5.84	0.039	151.32
* Σ^{40}	1.14	0.007	3.80	0.030	126.69	1.71	0.015	5.71	0.013	435.36
	1.18	0.028	3.93	0.067	101.93	1.78	0.020	5.92	0.031	245.18
50	1.27	0.013	4.22	0.053	79.71	2.23	0.039	7.43	0.055	135.74
	1.47	0.009	4.90	0.032	152.99	2.16	0.026	7.21	0.047	152.43
* Σ^{50}	1.55	0.049	5.16	0.077	66.95	2.24	0.016	7.47	0.040	184.83
	1.43	0.028	4.76	0.067	99.88	2.21	0.027	7.37	0.047	157.66

M= mezcla "n" con proporciones de la [Tabla 4.4](#); *e*₁₋₃= especímenes 1-3 de cada mezcla, para mezclas evaluadas a compresión a 7 y 28 días de endurecimiento; σ_{el} = esfuerzo elástico; ε_{el} = deformación elástica; σ_u = esfuerzo último; ε_u = deformación última; *E*= módulo de elasticidad y * Σ^n =media de la mezcla "n".

Tabla 5.3. Resumen de propiedades mecánicas para especímenes de calibración de cemento hidráulico y mortero estructural, evaluados a resistencia a la compresión a una edad de 28 días de endurecimiento.

<i>ME</i> (<i>e</i> ₁₋₃)	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)	<i>ME</i> (<i>e</i> ₁₋₃)	σ_{el} (MPa)	ε_{el} (mm/mm)	σ_u (MPa)	ε_u (mm/mm)	<i>E</i> (MPa)
40	3.38	0.014	11.28	0.040	278.89	70	6.28	0.043	20.94	0.063	331.40
	2.82	0.008	9.41	0.031	305.93		5.92	0.064	19.72	0.082	239.68
	3.42	0.022	11.42	0.047	243.30		6.42	0.064	21.39	0.081	263.66
*Σ^{40}	3.21	0.015	10.70	0.039	276.04	*Σ^{70}	6.21	0.057	20.68	0.076	278.25
45	3.56	0.024	11.88	0.041	287.55	75	6.80	0.045	22.68	0.062	363.20
	3.93	0.059	13.10	0.082	159.77		6.47	0.041	21.56	0.061	352.72
	3.63	0.017	12.11	0.040	302.52		6.84	0.041	22.81	0.059	384.24
*Σ^{45}	3.71	0.033	12.37	0.054	249.95	*Σ^{75}	6.70	0.042	22.35	0.061	366.72
50	3.99	0.023	13.28	0.045	297.06	80	7.38	0.044	24.61	0.059	415.79
	4.53	0.029	15.11	0.054	279.23		7.35	0.037	24.51	0.053	464.83
	4.11	0.027	13.69	0.053	260.09		6.87	0.051	22.92	0.071	322.22
*Σ^{50}	4.21	0.027	14.03	0.050	278.79	*Σ^{80}	7.20	0.044	24.01	0.061	400.95
55	5.01	0.016	16.69	0.035	481.77	85	8.12	0.075	27.08	0.091	298.64
	5.07	0.015	16.88	0.033	511.02		7.48	0.015	24.94	0.030	822.45
	4.05	0.030	13.51	0.053	254.45		7.50	0.063	25.01	0.077	323.81
*Σ^{55}	4.71	0.020	15.69	0.040	415.75	*Σ^{85}	7.70	0.051	25.68	0.066	481.63
60	5.50	0.044	18.34	0.065	281.92	90	7.67	0.038	25.56	0.057	446.28
	5.21	0.039	17.35	0.058	298.94		8.03	0.044	26.78	0.060	443.07
	4.92	0.031	16.38	0.053	307.27		8.90	0.045	29.68	0.060	495.62
*Σ^{60}	5.21	0.038	17.36	0.059	296.05	*Σ^{90}	8.20	0.043	27.34	0.059	461.66
65	5.52	0.037	18.41	0.055	334.90	94	9.29	0.042	30.96	0.054	570.71
	5.78	0.037	19.28	0.054	354.43		8.57	0.008	28.56	0.039	732.36
	5.81	0.046	19.37	0.065	300.29		7.95	0.024	26.50	0.041	644.98
*Σ^{65}	5.71	0.040	19.02	0.058	329.88	*Σ^{94}	8.60	0.024	28.67	0.040	649.35

ME= mezcla "n" con proporciones de la [Tabla 4.4](#); *e*₁₋₃= especímenes 1-3 de cada mezcla; para mezclas evaluadas a compresión a 28 días de endurecimiento; σ_{el} = esfuerzo elástico; ε_{el} = deformación elástica; σ_u = esfuerzo último; ε_u = deformación última; *E*= módulo de elasticidad y Σ^n =media de la mezcla "n".

En la [Tabla 5.4](#) se muestra un resumen de los promedios de la evaluación de calibración de la resistencia a la compresión simple. Una primera valoración basada en los resultados muestra resistencias promedio para el mortero de albañilería de entre 2.26-4.76 MPa (20.05-48.54 kg/cm²) a siete días y de 3.03-7.37 76 MPa (30.90-75.15 kg/cm²) a 28 días. Por otro lado, para el mortero estructural y el cemento hidráulico, se aprecian resistencias promedio de entre 10.70-28.67 MPa (109.11-292.35 kg/cm²) a 28 días de endurecimiento.

Tabla 5.4. Proporciones de mezclas de calibración junto con promedios de esfuerzos por mezcla a 7 y 28 días de endurecimiento.

<i>M</i> (<i>n</i>)	<i>Puz</i> (%)	<i>Cem</i> (%)	<i>A₂₁</i> (%)	<i>A₆₁</i> (%)	σ_{-7} (MPa)	σ_{-28} (MPa)
M-20	18.87	4.72	38.21	38.21	2.26	3.03
M-30	16.51	7.08	38.21	38.21	3.09	4.48
M-40	14.15	9.43	38.21	38.21	3.93	5.92
M-50	11.79	11.79	38.21	38.21	4.76	7.37
ME-40	16.00	10.67	-	73.33	-	10.70
ME-45	14.67	12.00	-	73.33	-	12.37
ME-50	13.33	13.33	-	73.33	-	14.03
ME-55	12.00	14.67	-	73.33	-	15.69
ME-60	10.67	16.00	-	73.33	-	17.36
ME-65	9.33	17.33	-	73.33	-	19.02
ME-70	8.00	18.67	-	73.33	-	20.68
ME-75	6.67	20.00	-	73.33	-	22.35
ME-80	5.33	21.33	-	73.33	-	24.01
ME-85	4.00	22.67	-	73.33	-	25.68
ME-90	2.67	24.00	-	73.33	-	27.34
ME-94	1.60	25.07	-	73.33	-	28.67

M= mezcla "n"; Puz= cantidad de Puzolana; Cem= cantidad de cemento Portland; A₂₁ y A₆₁= cantidad de arena graduada de acuerdo a la Tabla 5.; σ = promedio de esfuerzos máximos de especímenes de la muestra "n" para mezclas evaluadas a compresión a 7 y 28 días de endurecimiento.

Los resultados de calibración, presentan el comportamiento esperado con resistencias dentro de las clasificaciones de cementantes en México (Tabla 2.8) con valores mínimos de 4.4 MPa y 7.8 MPa para mortero de albañilería a siete y 28 días respectivamente; con resistencias promedio de 6-18 MPa para morteros estructurales y de más de 20 MPa para cemento hidráulico. Además, estos presentan un comportamiento esperado asociado al incremento en la respuesta de la resistencia a la compresión conforme se aumenta la cantidad de cemento Portland en las mezclas y concuerda de cierta manera con las observaciones realizadas en las Secciones 4.3-4. Sin embargo, al igual que en dichas secciones, se realizó un análisis estadístico para determinar resultados concluyentes y encontrar las proporciones ideales para el cumplimiento de la resistencia a la compresión del material cementante correspondiente.

5.2. Análisis de evaluación de calibración por regresión lineal múltiple

Nuevamente se realizaron análisis utilizando herramientas estadísticas como *Statgraphics 18*[®] para describir el comportamiento aproximado de la calibración. Se realizaron dos análisis, uno para mortero de albañilería y otro para mortero estructural junto con cemento hidráulico, con la finalidad de obtener nuevas ecuaciones capaces de predecir resistencias ideales que puedan cumplir con los requerimientos óptimos conforme a normativas. Estos análisis se nombraron NMX21 y NMX414 respectivamente. Su nomenclatura se encuentra relacionada de acuerdo a la graduación de la arena para la elaboración de los especímenes mostrada en la [Tabla 5.1](#) siguiendo la observación realizada al inicio de este Capítulo (*i.e.* se evaluaron las mismas proporciones tanto para mortero estructural como para cemento hidráulico y corresponden al análisis NMX414). De la misma manera que en la [Sección 4.2](#), para ambos análisis los factores involucrados en la variable de respuesta y_u que representa la resistencia a la compresión simple en kg/cm^2 , son aquellos conformados por los componentes a manera de proporciones de Puzolana x_1 y cemento Portland x_3 con variaciones de acuerdo a la matriz de diseño (*cf.* [Tabla 5.4](#)).

Solamente para el análisis NMX21 se contempló una variable de proceso, la cual representa la edad de endurecimiento de los especímenes estableciéndose como Z_1 para la edad correspondiente (*i.e.* siete y 28 días). Las variables correspondientes a la cantidad y tipo de arena graduada (*i.e.* arenas de acuerdo la [Tabla 5.1](#)) empleadas en la fabricación los especímenes fueron fijadas por la posibilidad de tomarse como constantes en el modelo estadístico. En esta evaluación de calibración se implementaron dos análisis mediante el método *Multiple Regression* con *Stepwise regression* y *forward selection* para la determinación de variables independientes estadísticamente significativas.

Los predictores o variables independientes e interacciones entre ellas se redujeron a cuatro para el análisis NMX21 y a dos para el NMX414, utilizando para cada análisis 24 y 36 observaciones respectivamente. Se analizaron los predictores por medio de corridas o pasos de análisis para la determinación de qué variables resultan más estadísticamente significativas (*i.e.* poseen mayor importancia en el modelo). Los análisis se muestran en las [Tablas 5.5-6](#) e incluyen todos los coeficientes estimados para cada término del modelo, su significancia estadística, así como su análisis de varianza correspondiente. En las [Tablas 5.5-6](#) se encuentran los pasos seguidos por la técnica *Stepwise regression* con *forward selection* para la determinación de predictores estadísticamente significativos, en donde se obtuvieron los

parámetros *p-value*, el error estándar; el coeficiente de determinación normal y ajustada; el error cuadrático promedio y la cantidad de predictores ΣVi incluidos en cada paso por cada implementación de la variable independiente Vi_n . Estos modelos presentan un coeficiente de determinación ajustada $*R^2$ del 99.7701 % y un error estándar *df* de 2.31388 para el NMX21, mientras que, para el NMX414 se presentan un coeficiente de determinación ajustada $*R^2$ del 99.7255 % y un error estándar *df* de 11.1925.

Tabla 5.5. Análisis NMX21y NMX414 por *Stepwise regression* con *forward selection* para determinación de variables independientes estadísticamente significativas.

<i>Model</i>	<i>Step</i>	<i>Vi</i>	<i>p</i>	<i>df</i>	<i>R</i> ²	<i>*R</i> ²	<i>MSE</i>	ΣVi
<i>NMX21</i>	0	-	0.000000	24	0.00	0.00	2231.36	0
	1	x_3	0.000000	23	95.88	95.70	95.9611	1
	2	$x_3 * z_1$	0.000000	22	99.73	99.71	6.49207	2
	3	x_1	0.026725	21	99.79	99.76	5.35404	3
<i>NMX414</i>	0	-	0.000000	36	0.00	0.00	44364.5	0
	1	x_3	0.000000	35	99.64	99.63	165.854	1
	2	x_1	0.001276	34	99.73	99.72	125.273	2

Step= pasos de *Stepwise regression* con *forward selection*; *Vi*= predictores o variables independientes e interacciones entre ellas; *p*= *p-value* con valores inferiores a 0.05 asegurando un 95% de relación estadísticamente significativa a la resistencia a compresión; *df*=error estándar; *R*²=coeficiente de determinación múltiple (%); **R*²=coeficiente de determinación múltiple ajustada (%); *MSE*=error cuadrático promedio y ΣVi = cantidad de predictores considerados por paso en el modelo final.

Esto significa que ambos modelos describen en más de 95% la variabilidad de la resistencia a la compresión, lo cual da validez al experimento. El análisis de varianza generado para el modelo NMX21 presenta una sumatoria de cuadrados del 53440.2, un error estándar *df* de 3, una media cuadrática de 17813.4, un *F-ratio* de 3327.09 y un *p-value* de 0.0000; mientras que el análisis de varianza de los residuales, presenta valores de 112.435, 21 y 5.35404 respectivamente. Por otro lado, el análisis de varianza generado para el modelo NMX414 presenta una sumatoria de cuadrados del 1592860, un error estándar *df* de 2, una media cuadrática de 796431, un *F-ratio* de 6357.58 y un *p-value* de 0.0000; mientras que el análisis de varianza de los residuales, presenta valores de 4259.27, 2 y 125.273 respectivamente. En las Figuras 5.1-2 se muestra la comparación de observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u para ambos modelos.

Como se aprecia en las Figuras 5.1-2, los modelos están en concordancia con las observaciones obtenidas (*i.e.* cuadrados azules). Asimismo, es necesaria la inspección minuciosa de la gráfica de residuales vs ajustes para evaluar la validez del experimento. En ellos, no se deben observar patrones, que pudieran significar sesgos; es decir, variables que modifican el comportamiento del modelo, pero no fueron consideradas en el experimento (Fig. 5.3-4).

Tabla 5.6. Resumen de análisis de regresión múltiple de los modelos NMX21 y NMX414 simplificados.

<i>Model</i>	<i>Vi</i>	<i>c</i>	<i>df</i>	<i>t</i>	<i>p</i>
NMX21	x_1	0.15686	0.065839	2.38248	0.0267
	x_3	3.30424	0.149073	22.1652	0.0000
	$x_3 * z_1$	0.101934	0.00519127	19.6356	0.0000
NMX414	x_3	-0.266082	0.0757515	-3.51256	0.0013
	x_1	3.12723	0.0400888	78.0077	0.0000

Vi= predictores o variables independientes e interacciones entre ellas; *c*=coeficientes de las *Vi*; *df*=error estándar; *t*= *t*-value, representa significativamente la varianza en la interacción de las *Vi*; *p*= *p*-value con valores inferiores a 0.05 asegurando un 95% de relación estadísticamente significativa a la resistencia a compresión.

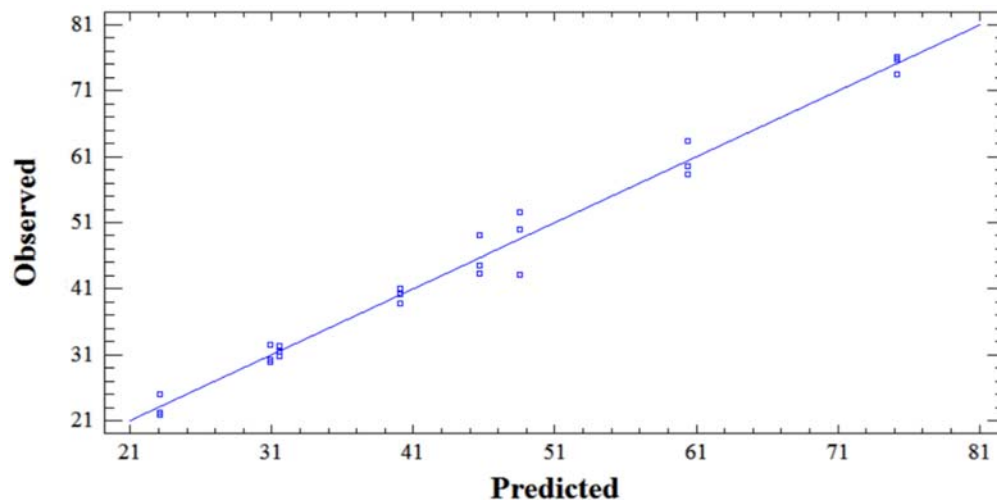


Figura 5.1. Observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2 para el modelo NMX21 (Ec. 4).

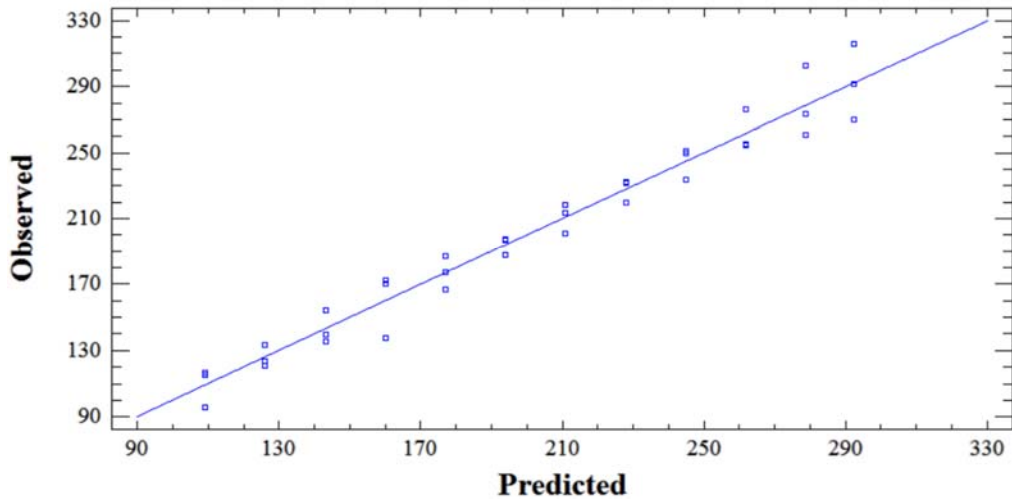


Figura 5.2. Observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2 para el modelo NMX414 (Ec. 5).

Por último, se presentan las Ecuaciones 4 y 5, que son los modelos de regresión lineal múltiple que describen la relación entre la variable de respuesta y_u en kg/cm^2 junto con los predictores (*i.e.* variables independientes y sus interacciones), garantizando en un 99.7846% la predicción en la resistencia a la compresión con una exactitud de ± 2 para el modelo NMX21 y garantizando en un 99.7255% la predicción en la resistencia a la compresión con una exactitud de ± 11 para el modelo NMX414.

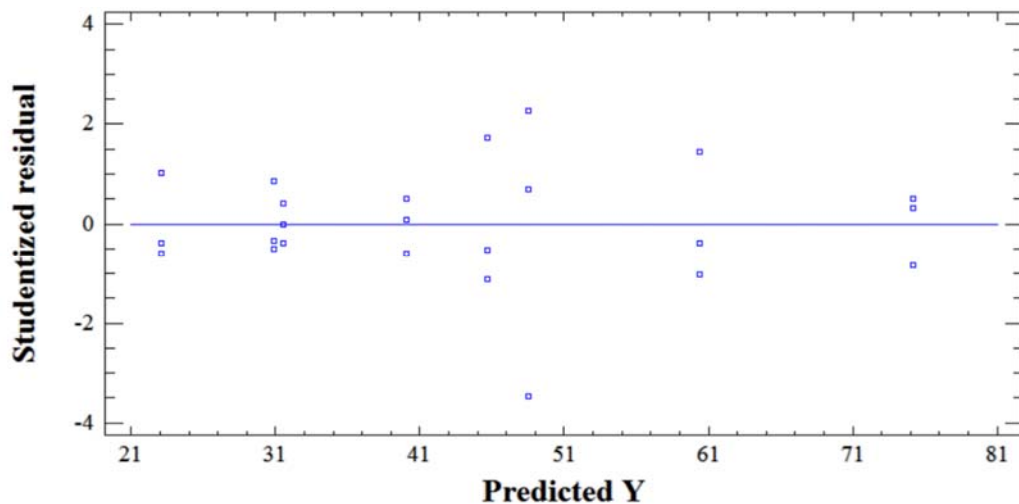


Figura 5.3. Residuales estandarizados de observaciones vs predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2 para el modelo NMX21.

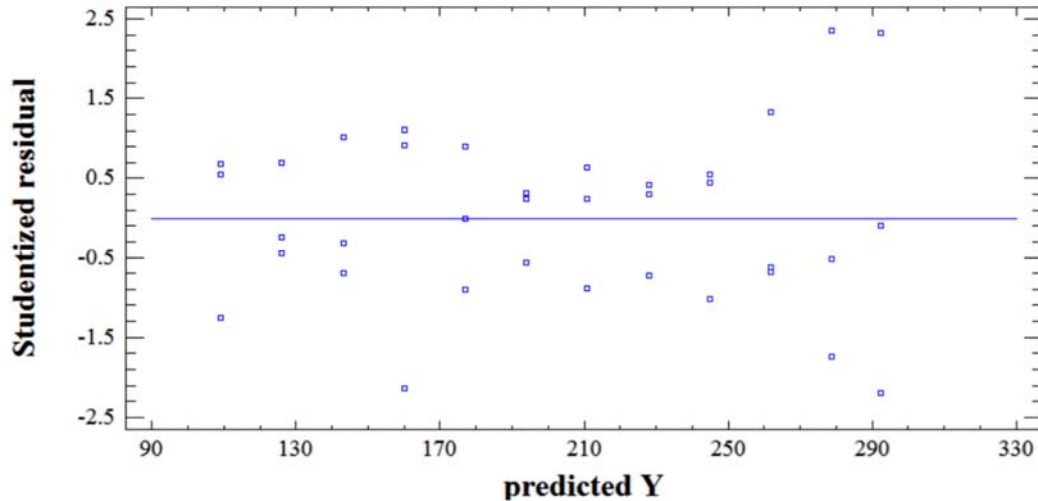


Figura 5.4. Residuales estandarizados de observaciones *vs* predicciones del experimento de resistencia a compresión y_u en kg/cm^2 para el modelo NMX414.

$$y_u = 0.15686 * x_1 + 3.30424 * x_3 + 0.101934 * x_3 * z_1 \quad (\text{Ec. 4})$$

$$y_u = -0.266082 * x_1 + 3.12723 * x_3 \quad (\text{Ec. 5})$$

5.3. Discusión y análisis de resultados

Hasta este punto de la investigación se han cumplido los objetivos particulares descritos en la [Sección 1.2](#), con la realización de dos experimentos para evaluar aproximaciones de resistencia a la compresión en la elaboración de cementantes con Puzolana para obtener un cemento de albañilería CA Puzolanico. Este tipo de cementante es la materia prima necesaria para generar proporciones de componentes para evaluar y cumplir la resistencia de materiales convencionales ([Tabla 2.8](#)) por el procedimiento que se establece en la [NMX-061 \(2015\)](#) generando de esta manera, los PI (*i.e.* MPP, MEPP y CPP). Con el primer experimento ([Sección 4.3](#)) se obtuvo la [Ecuación 3](#), con la cual es posible obtener proporciones de componentes para fabricar cementantes que cumplan con la resistencia de la normativa. Sin embargo, esta normativa no se cumple cabalmente porque el experimento fue realizado con mezclas de pasta pura, sin arena graduada, y la variación en las condiciones de curado para obtener dicha resistencia ([Secciones 4.2-4](#)).

Con el segundo experimento ([Secciones 5.1-2](#)), se obtuvieron las [Ecuaciones 4 y 5](#) con las cuales es posible determinar proporciones de componentes para fabricar cementantes con todas las especificaciones que se establecen por la [NMX-061 \(2015\)](#) para evaluar la resistencia y cumplirla correctamente. En las siguientes secciones, se abordan posibles proporciones de componentes usando las tres ecuaciones descritas para el cumplimiento de la resistencia a la compresión simple de las [NMX-414 \(2017\)](#), [NMX-486 \(2014\)](#) y la [NMX-021 \(2015\)](#) para la fabricación de cemento hidráulico, mortero estructural y mortero de albañilería respectivamente.

5.5. Productos de la investigación

A partir de la [Ecuación 4](#) que fue presentada en la sección anterior, es posible aportar mezclas de CPO 30 y Puzolana fabricada con Tepetate que cumplan con las normativas de calidad. En este sentido, un Mortero de Albañilería Puzolánico (MPP) puede fabricarse a partir de una proporción de 48% de cemento Portland + 52% de Tepetate. Las resistencias serían de 4.4 MPa (44.86 Kg/cm²) a siete días y 7.8 MPa (79.54 Kg/cm²) a 28 días ([Tabla 2.8](#)).

De la misma manera, a partir de la [Ecuación 5](#) que fue presentada en la sección anterior, es posible aportar mezclas de CPO 30 y Puzolana fabricada con Tepetate que cumplan con las normativas de calidad. En este sentido, un Cemento Hidráulico Portland Puzolanico clase 20 (CPP 20) puede fabricarse a partir de una proporción de 70% de cemento Portland + 30% de Tepetate. La resistencia sería de 20 MPa (203.90 kg/cm²) a 28 días ([Tabla 2.8](#)). Además, es posible obtener los tres tipos de morteros estructurales implementando dicha ecuación. En este sentido, un Mortero Estructural Portland Puzolanico Tipo I (MEPP I) puede fabricarse a partir de una proporción de 65% de cemento Portland + 35% de Tepetate y presentar una resistencia de 18 MPa (183.55 kg/cm²); un Mortero Estructural Portland Puzolanico Tipo II (MEPP II) puede fabricarse a partir de una proporción de 45% de cemento Portland + 55% de Tepetate y presentar una resistencia de 11 MPa (112.20 kg/cm²) y un Mortero Estructural Portland Puzolanico Tipo III (MEPP III) puede fabricarse a partir de una proporción de 30% de cemento Portland + 70% de Tepetate y presentar una resistencia de 6 MPa (61.20 kg/cm²) a 28 días ([Tabla 2.8](#)).

Para generar un correcto entendimiento de los resultados obtenidos a partir de las Ecuaciones 4-5, se generó la Tabla 5.7, donde se aprecian las diferencias en proporciones de componentes para la fabricación de cemento hidráulico, mortero estructural y mortero de albañilería. En la columna A se muestran las proporciones necesarias para cumplir todas las especificaciones de componentes junto con las condiciones de curado para la obtención y cumplimiento de la resistencia de cada cementante de acuerdo a la normativa correspondiente.

Tabla 5.7. Resumen de proporciones de componentes para los Productos de la Investigación cumpliendo con todas las especificaciones para la resistencia a la compresión simple de acuerdo a la normativa correspondiente.

Clasificación	A				
	σ_{-7} (MPa)	σ_{-28} (MPa)	Cem (%)	Puz (%)	
CPP 20	-	20	70	30	NMX-414 (2017)
MEPP-I	-	18*	65	35	
MEPP-II	-	11*	45	55	NMX-486 (2014)
MEPP-III	-	6*	30	70	
MPP	4.4	7.8	48	52	NMX-021 (2015)

*Clasificación= clasificaciones propuestas en esta investigación (Tabla 2.8); σ_{-7} y σ_{-28} = resistencia a la compresión simple a una edad de endurecimiento de 7 y 28 días de acuerdo a las NMX-414 (2017), NMX-486 (2014) y la NMX-021 (2015) para la fabricación de cemento hidráulico, mortero estructural y mortero de albañilería respectivamente, obtenidas de acuerdo a la NMX-061 (2015); C= cemento hidráulico; M= mortero; ME= mortero estructural; PP= Portland Puzolanico; *= resistencia promedio.*

Estas proporciones, corresponden al cemento de albañilería (*i.e.* Puzolana + cemento Portland) necesario para el cumplimiento de la resistencia de la misma tabla. Es decir, que, para el caso del cemento hidráulico, el cual convencionalmente se compone al 100% de CPO, se sustituye por las proporciones de dicha tabla para cumplir su resistencia. Por otro lado, para el caso de los cuatro tipos de morteros, convencionalmente se componen de CPO + arena, por lo que las proporciones de la columna A, sustituyen solamente al CPO convencional.

Capítulo VI

Conclusiones generales y líneas de investigación futura

En esta investigación se realizó un estudio para evaluar la viabilidad técnica de implementar Puzolanas de la región en la fabricación de cementantes alternativos para la construcción. Primeramente, se realizó un estado del arte para conocer más de cerca las características y particularidades de los materiales Puzolanicos y como se han estado utilizando a lo largo del tiempo; desde construcciones del tiempo del imperio romano hasta la actualidad, en la que el cemento Portland es el material dominante, y las puzolanas se utilizan como agregados que le aportan características especiales. Además, se estudiaron los materiales cementantes que se comercializan en México, diferenciando sus designaciones normalizadas (*i.e.* nomenclatura), características y resistencias, así como también la normatividad correspondiente para su evaluación y clasificación.

Después, se evaluaron tres Materiales Puzolánicos Regionales para seleccionar el que sería estudiado en esta investigación, al seguir las indicaciones dentro de la normatividad para la evaluación de la resistencia a la compresión simple junto con la implementación de la técnica del Autoclave para obtener resistencias de edades avanzadas en un corto periodo de tiempo, seleccionando al Tepetate para su estudio completo.

Más adelante, se realizó una evaluación inicial a la región experimental de la matriz de diseño de la [Tabla 4.4](#) para conocer el comportamiento del Tepetate como un material cementante alternativo, el cual describió un desempeño prometedor con resultados alentadores para utilizarse en la fabricación de elementos constructivos. Esta evaluación del desempeño se realizó mediante un análisis multivariable, a partir del cual fue posible lograr un correcto entendimiento de las variables de proceso y sus interacciones. Finalmente, se realizó un análisis estadístico más detallado conforme a normativas, a partir del cual fue posible aportar proporciones optimizadas que cumplirían con las normativas de calidad, para cinco materiales constructivos convencionales.

El estado del arte realizado en el [Capítulo 2](#) permitió entender la importancia de la implementación de Puzolanas a lo largo del tiempo junto con la influencia de utilizarlas en el desarrollo de infraestructura general en la actualidad. Además de la durabilidad que las estructuras desarrollan con la incorporación de Puzolanas, se contemplan múltiples ventajas que resultarían de su incorporación, pues se abre la posibilidad de producir cementantes Puzolanicos capaces de igualar las propiedades químicas, físicas y mecánicas de los cementantes convencionales. De acuerdo al análisis realizado en el estado del arte y los resultados de la investigación, el uso del cemento Portland podría reducirse en más de un 50%. Esto significa, además de una disminución en el costo de fabricación, aumentos en la resistencia a largo plazo, mejora de la trabajabilidad, mayor plasticidad, menor segregación, mejorar resistencia al ataque de sulfatos, mayor permeabilidad, menor calor de hidratación, reducción considerable de emisiones de CO₂, así como la posibilidad de generar nuevos productos elaborados de manera descentralizada. Al realizar un análisis minucioso de los conceptos comprendidos en las normas oficiales correspondientes a cementantes en México, se presenta cierta dificultad para diferenciarlos por su gran similitud en terminologías. Por lo tanto, se aporta una jerarquía para el reconocimiento de los materiales cementantes del país junto con designaciones normalizadas propuestas para morteros (*cf.* [Tabla 2.8](#)); garantizando un correcto entendimiento de todos los cementantes siguiendo el siguiente orden:

- Un cementante es cualquier material inorgánico finamente pulverizado que en presencia de agua puede fraguar y endurecer.
- Un cemento de albañilería es la combinación de un material inorgánico finamente pulverizado que contenga Clinker Portland en conjunto de algún material cementante.
- Un mortero de albañilería es un cemento de albañilería que, al mezclarse con agua y arena, adquiere resistencia mecánica determinada, clasificado en un solo tipo, con un solo grado de calidad y cumpliendo con la [NMX-021 \(2015\)](#) y las especificaciones físicas de la [Tabla 2.7](#).
- Un mortero estructural es un cemento de albañilería que en presencia de agua puede fraguar tanto en el aire como en el agua para después endurecer; cumpliendo con la [NMX-486 \(2014\)](#) con tres tipos de clases resistentes (*cf.* [Tabla 2.6](#)).

- Un cemento hidráulico es un cemento de albañilería que, al mezclarse solo con agua, o junto con arena, grava, entre otros; presenta la propiedad de fraguar desarrollando endurecimiento conforme avanza la edad, independientemente si se encuentra sumergido bajo el agua; presentando designación normalizada (cf. [Tabla 2.4-5](#)) en concordancia con la [NMX-414 \(2017\)](#).

Cabe mencionar que la normativa se apropió de los términos tradicionales, adaptando y modificando sus características con la finalidad de regular la potencialidad de materias primas que puedan considerarse como cementantes; para que la producción se genere solamente a través del proceso Portland. Si un material Puzolánico sin la adición de cemento Portland, presenta la resistencia requerida conforme a la normativa, este podría usarse en construcción de infraestructura, puentes, viaductos, carreteras, casa habitación, entre otros.

La finura del Tepetate más allá del proceso de molienda de cuatro horas que corresponde al tamaño de las partículas de la Puzolana P2 ([Figura 4.3](#)), no incrementa significativamente la resistencia a la compresión. Se recomienda el estudio detallado con tamaños de partícula un poco inferiores y superiores, con el fin de optimizar estos valores, particularmente, en caso de que se pretenda realizar una producción a mayor escala. Asimismo, dichos tamaños de partículas variaran de acuerdo a la adaptación de las condiciones del molino a utilizar.

En cuanto a los resultados de la experimentación, el diseño experimental basado en el análisis estadístico que se utilizó en esta investigación permitió un profundo entendimiento de los componentes de las mezclas, junto con las variables de proceso. Este tipo de estudios no suelen ser utilizados en la ingeniería, pero resultan indispensables durante las primeras etapas de investigación. En este caso, fue posible observar las interacciones de las variables independientes y establecer ecuaciones que poseen un alto comportamiento predictivo.

Si bien, las normativas permiten estandarizar procesos y garantizar la calidad de ciertos materiales, hace falta realizar normas para materiales cementantes alternativos. En este sentido, aunque los materiales puzolánicos pueden lograr altas resistencias y calidad, presentan la gran limitación de extender su fraguado hasta edades avanzadas; superiores a los 28 días que se utiliza en la ingeniería. Una gran aportación sería el desarrollo de aditivos que permitan lograr mejores resistencias a edades tempranas.

Cabe destacar la oportunidad de reutilizar un material que ha demostrado un excelente comportamiento y durabilidad, y luego fue marginado por el cemento Portland en el marco de la revolución industrial. Como se ha visto, hay materiales que permiten una amplia variedad de usos y aplicaciones para las personas comunes. Las personas comunes no necesitan enormes resistencias y calidad, eso es cosa de las industrias a través de las normativas de calidad. Por el contrario, al depender de procedimientos de manufactura sencilla, permiten cierta reapropiación de la producción, que ahora está concentrada en unas cuantas corporaciones internacionales.

Las principales aportaciones de esta investigación son las siguientes:

- Se generó la comprensión, de la interacción de los componentes con las variables de proceso, para la elaboración de una amplia gama de productos derivados de las [Ecuaciones 3-5](#)
- Se demostró que es posible reducir los costos de fabricación, junto con las emisiones de CO₂ involucradas en este proceso, debido a que el Tepetate no requiere de calcinación adicional, y la reducción sería semejante a su porcentaje de adición
- Se obtuvieron proporciones óptimas, cumpliendo las resistencias de las normativas correspondientes para la fabricación de cementantes específicos
- Se demostró la viabilidad técnica de sustituir un porcentaje de Cemento Portland en la fabricación de cementantes para la construcción de casa habitación en México
- Se presenta una oportunidad de reactivar la utilización de un material, que ha demostrado un excelente comportamiento y durabilidad
- Los productos de la investigación pueden presentar una apariencia agradable, agregando un factor de estética similar a la cantera
- Al depender de procedimientos de manufactura sencilla, permiten cierta reapropiación de la producción, que ahora está concentrada en unas cuantas corporaciones internacionales

Como líneas de investigación futura se proponen:

- El estudio de la Ceniza del Volcán de Colima (C-COL) adicionando mayor cantidad de componentes, complementándolo con un aditivo para mejorar su integridad y el estudio del aumento de su actividad Puzolanica empleando activación química como se abordó en la [Sección 2.3](#), debido a que es relevante por su abundancia, disponibilidad y bajo precio.
- Estudiar la influencia de los componentes (*i.e.* Puzolana y Cemento Portland); con las variables de proceso (*i.e.* tiempo de curado y tamaño de partícula de Puzolana) de procesos de molienda en 30 min, una, dos y tres horas. Esto con la finalidad de explorar si con una finura conservadora pudieran obtenerse resultados prometedores, asegurando un menor consumo energético al momento de la trituración de los materiales Puzolanicos.
- Estudiar la influencia de los componentes (*i.e.* Puzolana y Cemento Portland) empleando como cementante principal, cementos CPO 40/40 R en conjunto con las variables de proceso (*i.e.* tiempo de curado y tamaño de partícula de Puzolana), debido a que se encuentra con mayor facilidad que el cemento CPO 30.
- Diseño de pruebas de calidad que no dependan de la evaluación de la resistencia a la compresión, pues son procedimientos que exigen demasiado tiempo al demorar aproximadamente 40 minutos en la elaboración por cada muestra de 9 especímenes y esperar al ensaye de los mismos 28 días después de su elaboración. Sería conveniente que las normativas se actualizarán adoptando otras metodologías más ágiles (*e.g.* [Tabla 2.3](#)).
- A partir de los productos de la investigación, realizar el estudio de las proporciones para desarrollar un bloque prefabricado que presente las condiciones adecuadas para utilizarse en la construcción de casa habitación por medio de la implementación de análisis estadístico. Estudio de las propiedades eléctricas, acústicas, térmicas del bloque prefabricado elaborado con el CPP 20.
- El diseño de un manual con el proceso para replicar los productos de la investigación a pequeña escala con la finalidad de lograr una apropiación social en comunidades alejadas de distribuidoras de materiales convencionales.

- El diseño de maquinaria y procesos industriales a pequeña escala, que permitan fabricar cementantes a partir de las dosificaciones potenciales.
- La estimación de costos para el desarrollo procedimientos eficientes a pequeña escala, que favorezcan la apropiación social de los productos de investigación junto con el alcance constructivo (*i.e.* rendimientos de materiales).
- Estudio de las emisiones de CO₂ generadas en la fabricación individual de los productos de la investigación para poder evidenciar costos ambientales ocultos en la producción del cemento Portland
- Estudio de la interacción del MEPP-I y MEPP-II con bloques de mampostería convencionales en el comportamiento de pilas y muretes ensayados a compresión axial y diagonal; para obtener las propiedades mecánicas de su interacción y lograr determinar su eficiencia sísmica al generar un análisis estático/dinámico por medio de software especializado.
- Estudio de la interacción del MEPP-I y MEPP-II con bloques prefabricados elaborados con el CPP 20 de esta investigación, en el comportamiento de pilas y muretes ensayados a compresión axial y diagonal. Con esto, se obtendrían las propiedades mecánicas de la interacción del Tepetate y se lograría determinar su eficiencia sísmica a escala global (*i.e.* una casa habitación o edificio completo) al generar un análisis estático/dinámico por medio de software especializado.
- A partir de la [Ecuación 3](#) obtenida por el estudio de regresión múltiple, se pueden obtener una amplia gama de productos prefabricados, curados de forma acelerada con Autoclave. Estos productos pueden presentar una apariencia agradable, agregando un factor de estética similar a la cantera.
- Diseñar normativas con procedimientos específicos para materiales que no dependan del cemento Portland.

Referencias

- Abd El Salam, S. A. (2001). “*Egyptian and Graeco-Roman wall plasters and mortars: a comparative scientific study*”. Ph D Thesis, University of Leicester.
- ACI 222R (2019). “*Guide to Protection of Metals in Concrete Against Corrosion*”. ACI Committee 222
- ACI 232.1R-12 (2012). “*Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete*”. American Concrete Institute.
- Andrew, R. M. (2018). “*Global CO2 emissions from cement production, Earth Syst*”. *Sci. Data*, 10, 195-217. doi:10.5194/essd-11-1675-2019
- ArcGISApp (2020). “*Roman Empire map at its greatest extent, 117 AD*”. ArcGIS online.<https://www.arcgis.com/apps/View/index.html?appid=1cbc0019e6c54320a7664a907324875b> (último acceso el 15/04/2020).
- ASTM C 618-19 “*Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1157 / C1157M (2020). “*Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C125 (2019). “*Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C150 (2020). “*Standard Specification for Portland Cement*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C1600 / C1600M (2019). “*Standard Specification for Rapid Hardening Hydraulic Cement*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM C311 (2018). “*Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- ASTM C593 (2019). “*Standard Specification for Fly Ash and Other Pozzolans for Use with Lime for Soil Stabilization*”. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Benezet, J.C and Benhassaine, A. (1999). “*The influence of particle size on the pozzolanic reactivity of quartz powder*”. Powder Technology. 103(1), 26–29. doi:10.1016/S0032-5910(99)00010-8
- Binici, H. & Aksoğan, O. (2006). “*Sulfate resistance of plain and blended cement*”. Cement and Concrete Composites, 28, 39-46. doi:10.1016/j.cemconcomp.2005.08.002
- Bleazard, R. G. (1998). “*The History of Calcareous Cements*”. Lea’s Chemistry of Cement and Concrete (4 ed., 1-23). Elsevier. doi:10.1016/b978-075066256-7/50013-8
- Brandon, C., Hohlfelder, R. L., Oleson, J. P., & Rauh, N. (2010). “*Geology, Materials, and the Design of the Roman Harbour of Soli-Pompeiiopolis, Turkey: the ROMACONS field campaign of August 2009*”. International Journal of Nautical Archaeology, 39(2), 390–399. doi:10.1111/j.1095-9270.2010.00277.x
- Brune, P., Jackson, M.D., Perucchio, R. & Ingrassia, A.R. (2010). “*The toughness of imperial roman concrete*”. Proceedings of the International Conference FraMCoS-7, Jeju, South Korea. doi:10.13140/2.1.1122.3369
- Burgos, D. & Angulo, D. & Mejia, R. (2012). “*Durability of blended mortars using fly ash of high unburned carbon content*”. Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales. 32 (1). 61-70.
- Burril, D.F. (1998). “*Modeling and Interpreting Interactions in Multiple Regression*”. http://www.minitab.com/uploadedFiles/Content/News/Published_Articles/interactions_in_multiple_regression.pdf (último acceso el 15/04/2020).
- Callejas, J. (1969). “*Las Puzolanas*”. Monografías del Instituto Eduardo Torroja de la construcción y del cemento. 1ed. España.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M., Sümer, M., & Yurdusev, M. . (2004). “*Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production*”. Cement and Concrete Research, 34(5), 731–735. doi:10.1016/s0008-8846(03)00063-2

- Çavdar, A. & Yetgin, Ş. (2007). “Availability of tuffs from northeast of Turkey as natural pozzolan on cement, some chemical and mechanical relationships”. *Construction and Building Materials*, 21(12), 2066-2071. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.034
- CFE (2020). “Consulta de costo por kWh/\$ en el año 2018 en tarifa DIST” <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCREIndustria/Tarifas/DemandaIndustrialSub.aspx> (último acceso el 13/05/2020).
- Chakchouk, A., Samet, B. & Mnif, T. (2006). “Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material”. *Applied Clay Science*, 33(2), 79-88. doi:10.1016/j.clay.2006.03.009
- Chindaprasirt, P., & Pimraksa, K. (2008). “A study of fly ash–lime granule unfired brick”. *Powder Technology*, 182(1), 33–41. doi:10.1016/j.powtec.2007.05.001
- Columbu, S., Garau, A. M., & Lugliè, C. (2018). “Geochemical characterisation of pozzolanic obsidian glasses used in the ancient mortars of Nora Roman theatre (Sardinia, Italy): provenance of raw materials and historical–archaeological implications”. *Archaeological and Anthropological Sciences*, 11, 2121–2150. doi:10.1007/s12520-018-0658-y
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., Fairbairn, E. de M. R., & Hempel, S. (2011). “Influence of particle size and specific surface area on the pozzolanic activity of residual rice husk ash”. *Cement and Concrete Composites*, 33(5), 529-534. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.02.005
- Cowper, A. (2015). “Lime and Lime Mortars”. (First published in 1927 for the Building Research Station by HM Stationery Office, London) (Published by Routledge 2015, USA).
- Damtoft, J. S., Lukasik, J., Herfort, D., Sorrentino, D., & Gartner, E. M. (2008). “Sustainable development and climate change initiatives”. *Cement and Concrete Research*, 38(2), 115–127. doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.008
- De Casa, G., Lombardi, G., Meucci, C., Galloni, R., Vitali, P., (1999). “*Il Tufo Lionato dei monumenti Romani: Caratteri petrografici, geomeccanici, e trattamenti conservati*”. *Geologica Romana* 35, 1–25.

- Diaz-Loya, I., Juenger, M., Seraj, S., & Minkara, R. (2017). “*Extending supplementary cementitious material resources: Reclaimed and remediated fly ash and natural pozzolans*”. *Cement and Concrete Composites*. doi:10.1016/j.cemconcomp.2017.06.011
- Felder-Casagrande, S., Wiedemann, H.G. & Reller, A. (1997). “*The calcination of limestone — Studies on the past, the presence and the future of a crucial industrial process*”. *Journal of Thermal Analysis*. 49, 971-978. doi:10.1007/BF01996783
- Flores-Rodríguez, A. (2017). “*Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara*”. Trabajo de Obtención de Grado. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente (ITESO), Tlaquepaque, México.
- Fragoulis, D., Chaniotakis, E. and Stamatakis, M. G. (1997). “*Zeolitic tuffs of Kimolos island, Aegean Sea, Greece and their industrial potential*”. *Cement and Concrete Research*. 27(6), 889-905. doi:10.1016/S0008-8846(97)00072-0
- Ghrici, M, Kenai, S. & Said-Mansour, M. (2007). “*Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements*”. *Cement and Concrete Composites*. 29(7), 542-549. doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.04.009
- Giavarini, C., Samuelli Ferretti, A., Santarelli, M.L., (2006). “*Mechanical characteristics of Roman opus caementicium*”. In: Kourkolis, S.K. (Ed.), *Fracture and Failure of Natural Building Stones*. Springer, Dordrecht, 107–120.
- Gibson, Ch. (1996). “*Los Aztecas Bajo El Dominio Español 1519–1810*”. Siglo XXI, Coyoacán, México.
- Gillot, C. (2014). “*The use of pozzolanic materials in Maya mortars: new evidence from Río Bec (Campeche, Mexico)*”. *Journal of Archaeological Science*, 47, 1–9. doi:10.1016/j.jas.2014.03.037
- Goldsworthy, H. & Zhu, M. (2008). “*Mortar studies towards the replication of Roman concrete*”. *Archaeometry*. 51(6), 932-946. doi:10.1111/j.1475-4754.2009.00450.x

- Gutiérrez, H. (2012). “*Análisis y Diseño de Experimentos*”. McGraw-Hill, 3ed. México.
- Holcim (2020). <http://www.holcim.com/en/sustainable/environment/co2-reduction.html> (último acceso el 11/03/2020).
- Hossain, K. M. A., & Lachemi, M. (2007). “*Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete*”. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 759–766. doi:10.1016/j.cemconres.2007.02.014
- Husein Malkawi, A. I., Shatnawi, E., & Husein Malkawi, D. A. (2017). “*A comparative study of physical and chemical properties of different pozzolanic materials used for roller compacted concrete RCC dams*”. *MATEC Web of Conferences*, 120, 02025. doi:10.1051/mateconf/201712002025
- International Energy Agency (IEA) and World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). (2009). “*Cement Technology Roadmap 2009 - Carbon Emissions Reductions up to 2050*”.
- Jackson, M. D., Logan, J. M., Scheetz, B. E., Deocampo, D. M., Cawood, C. G., Marra, F., Vitti, M & Ungaro, L. (2009). “*Assessment of material characteristics of ancient concretes, Grande Aula, Markets of Trajan, Rome*”. *Journal of Archaeological Science*, 36(11), 2481–2492. doi:10.1016/j.jas.2009.07.011
- Jackson, M.D., Marra, F., Hay, R., Cawood, C., Winkler, E., (2005). “*The judicious selection and preservation of tuff and travertine building stone in ancient Rome*”. *Archaeometry* 47(3), 485–510. doi:10.1111/j.1475-4754.2005.00215.x
- Jahren, P. and Sui, T. (2017). “*History of concrete: A very old and modern material*”. Singapore: World Scientific Publishing.
- Jamrozy, Z. (1997). Use of silica fume for concrete. *Cement Wapno Beton*. Vol. 2, No. 4, 140-143.
- Juenger, M.C.G, Winnefeld, F., Provis, J.L. and Ideker J.H. (2011). “*Advances in alternative cementitious binders*”. *Cement and Concrete Research* 41(12), 1232–1243. doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.012
- Khan, M. I., & Alhozaimy, A. M. (2011). “*Properties of natural pozzolan and its potential utilization in environmental friendly concrete*”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 38(1), 71–78. doi:10.1139/l10-112

- Kosmatka, S.H., B. Kerkhoff and C. William (2003). “*Design and Control of Concrete Mixtures*”. 14th Ed. Portland Cement Association, USA.
- Kumar, S. (2002). “*A perspective study on fly ash–lime–gypsum bricks and hollow blocks for low cost housing development*”. *Construction and Building Materials*, 16(8), 519–525. doi:10.1016/s0950-0618(02)00034-x
- Logan, J.M., (2006). “*On-site and laboratory studies of strength loss in marble on building exteriors. In: Kourkolis, S.K. (Ed.), Fracture and Failure of Natural Building Stone*”s. Springer, Dordrecht, pp. 345–362.
- López-Lara, T., Hernandez-Zaragoza, J. B., Horta, J., Rojas Gonzalez, E., Lopez-Cajun, C., & Ramirez, G. (2013a). “*Sustainable Use of Tepetate Composite in Earthen Structure*”. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(2), 1–6. doi:10.1155/2013/806387
- López-Lara, T., Hernández-Zaragoza, J. B., Horta-Rangel, J., González, E. R., López-Cajún, C., & Rosales-Hurtado, D. (2013b). “*Tepetate as Construction Material*”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(11), 1772–1775. doi:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000722
- Luxán, M., & Sánchez de Rojas, M. (1985). “*Estudio de la aptitud de un material como adición activa al cemento*”. *Materiales de Construcción*, 35(200), 3-13. doi:10.3989/mc.1985.v35.i200.904
- Magalhães, A. and Veiga, R. (2009). “*Physical and mechanical characterisation of historic mortars. Application to the evaluation of the state of conservation*”. *Mater. Construction*, 59(295), 61-77. doi:10.3989/mc.2009.41907
- Malinowski, R. and Frifelt, K.; (in cooperation with Bonits, Hjerthem, and Flodin); (1993), “*Prehistoric Hydraulic Mortar: The Ubaid Period 5-4000 years BC: Technical Properties,*” Document D12, Swedish Council for Building Research, Stockholm, Sweden.
- Massazza, F. (1998). “*Pozzolana and Pozzolanic Cements*”. *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete* (4 ed., 471-635). Elsevier. doi:10.1016/b978-075066256-7/50022-9
- McCarthy, M. J., & Dyer, T. D. (2019). “*Pozzolanas and pozzolanic materials*”. In *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete* (5 ed., 363-467). Elsevier. doi.:10.1016/B978-0-08-100773-0.00009-5

- Nalbantoğlu, Z. (2001). “*Use of a self-cementing fly ash as a soil stabilization agent*”. Iranian Journal of Science and Technology Transactions of Civil Engineering, 25(4), 691-698. doi:10.22099/ijstc.2013.1124
- Nappi, G., De Casa, G., Volponi, G., (1979). “*Geologica e caratteristiche tecniche del Tufo Giallo della Via Tiberina*”. Bulletin Societa Geologica Italiana 98, 431–445.
- NMX-021 (2015). NMX-C-021-ONNCCE-2015. Industria de la construcción. Cemento para Albañilería (mortero). Especificaciones y Métodos de Ensayo.
- NMX-059 (2017). NMX-C-059-ONNCCE-2017. Industria de la construcción, cementantes hidráulicos. Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (método Vicat)
- NMX-061 (2015). NMX-C-061-ONNCCE-2015. Industria de la construcción, cementantes hidráulicos. Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.
- NMX-085 (2015) NMX-C-085-ONNCCE-2015. Industria de la construcción, cementantes hidráulicos. Determinación estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos
- NMX-414 (2017). NMX-C-414-ONNCCE-2017. Industria de la construcción, cementantes hidráulicos. Especificaciones y métodos de ensayo.
- NMX-486 (2014). NMX-C-486-ONNCCE-2014. Industria de la construcción, mampostería, mortero para uso estructural. Especificaciones y métodos de ensayo.
- Oleson, J. P., Brandon, C., Cramer, S. M., Cucitore, R., Gotti, E., & Hohlfelder, R. L. (2004). “*The ROMACONS Project: a Contribution to the Historical and Engineering Analysis of Hydraulic Concrete in Roman Maritime Structures*”. International Journal of Nautical Archaeology, 33(2), 199–229. doi: 10.1111/j.1095-9270.2004.00020.x

- Ortega, E. A., Cheeseman, C., Knight, J., & Loizidou, M. (2000). “*Properties of alkali-activated clinoptilolite*”. *Cement and Concrete Research*, 30(10), 1641–1646. doi:10.1016/s0008-8846(00)00331-8
- Ortega-Pérez, D., Bustamante Rúa, M., Gutiérrez-Rôa, D., & Correa-Espinal, A. (2015). “*Diseño de mezclas en formulaciones industriales*”. *DYNA*, 82(189), 149-156. doi:https://doi.org/10.15446/dyna.v82n189.42785
- Oti, J. E., Kinuthia, J. M., & Bai, J. (2009). “*Engineering properties of unfired clay masonry bricks*”. *Engineering Geology*, 107(3-4), 130–139. doi:10.1016/j.enggeo.2009.05.002
- Pérez, J.A., (2015). “*Ponencia: México cambió para siempre desde 1985 – SMIE*”. <https://www.smie.org.mx/layout/eventos/2015/ponencia-mexico-cambio-para-siempre-desde-1985-norma-mexicana-nmx-c-486-onncce-2014-mortero-uso-estructural-alvaro-perez.pdf> (último acceso el 19/03/2020).
- Poon, C. S., Lam, L., Kou, S. C., & Lin, Z. S. (1999). “*A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes*”. *Construction and Building Materials*, 13(8), 427–432. doi:10.1016/s0950-0618(99)00048-3
- Preciado, A., Rodríguez, O., Ramírez-Gaytan, A., Gutiérrez, N., Vargas D. and Ochoa, G. (2017). “*Protection of Cultural Heritage Buildings Against Earthquakes from a Sensitized Structural Engineering Perspective*.” Volume 1, Chapter 4 (pp. 101-128). *Earthquakes: Monitoring Technology, Disaster Management and Impact Assessment*, Nova Science Publishers, Inc. ISBN: 978-1-53610-356-4
- Quantin, P., Arias, A., Etchevers, J., Ferrera, R., Oleschko, K., Navarro, A., Werner, G. and Zebrowski, C. (1993). “*Tepetates de México: caracterización y habilitación para la agricultura*”. *Terra Latino América*, vol. 11, 1–72.
- Ramezaniapour, A. A. (2014) “*Cement replacement materials: Properties, durability, sustainability*”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-36721-2
- Richardson, I. G. & Groves, G. W. (1997). “*The structure of the calcium silicate hydrate phases present in hardened pastes of white Portland cement/blast-furnace slag blends*”. *Journal of Materials Science*, 32, 4793–4802. doi: 10.1023/A:1018639232570

- Rodriguez, E. & Uribe, A. (2002). “*Importance of using the natural pozzolans on concrete durability*”. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1851-1858. doi: 10.1016/S0008-8846(01)00714-1
- Savov, I. P., Luhr, J. F., & Navarro-Ochoa, C. (2008). “*Petrology and geochemistry of lava and ash erupted from Volcán Colima, Mexico, during 1998–2005*”. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 174(4), 241–256. doi:10.1016/j.jvolgeores.2008.02.007
- Scheffé, H. (1958). “*Experiments with mixtures*”. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 20: 344-360.
- SENER (2019). “*Balance Nacional de Energía 2018*”. Secretaría de Energía. 1ed. México.
- Shao, M., Li, L., Chen, W., & Liu, J. (2018). “*Investigation and modification of two kinds of Chinese traditional lime in cultural building relics*”. *Journal of Cultural Heritage*, 36118-127. doi:10.1016/j.culher.2018.02.018
- Shi, C. (2001). “*An overview on the activation of reactivity of natural pozzolans*”. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 28(5), 778–786. doi:10.1139/101-041
- Shumuye, E. D., & Dinku, A. (2018). “*Investigation of the binding materials properties and assessment of durability issue in Fasil Ghibbi palace in Gondar*”. *Engineering Failure Analysis*, 93, 309–316. doi:10.1016/j.engfailanal.2018.06.027
- Sleep, M. D., & Masley, M. (2019). “*Sustainability In Geotechnical Engineering*”. *Geo-Congress 2019*. doi:10.1061/9780784482148.023
- Tarassova, E., Tarassov, M., Pavlov, A., Ivanova, P., & Tacheva, E. (2012). “*Ancient plasters from the Thracian tomb “Shushmanets”, town of Shipka, Bulgaria: mineralogical and chemical characteristics*”. *Proceedings of the Bulgarian Geological Society*, 157–158.
- Tashima, M., Soriano, L., Monzó, J., Borrachero, M., Akasaki, J., & Payá, J. (2014). “*New method to assess the pozzolan reactivity of mineral admixtures by means of pH and electrical conductivity measurements in lime: pozzolan suspensions*”. *Materiales de Construcción*, 64(316), 32-44. doi:10.3989/mc.2014.00914

- Türkmenoğlu, A. G. & Tankut, A. (2002). “*Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements Assessment of their petrographical properties*”. Cement and Concrete Research. 32(4), 629-637.
doi:10.1016/S0008-8846(01)00734-7
- Uribe, Afif R. (1995). “*Mexican Natural Pozzolans and the Evaluation of the Specifications Related to their use*”. ACI Fifth international conference fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete. Vol.153, 531-548, USA.
- Valdez, P. (2002). “*Desarrollo de un método para evaluar materiales naturales con potencial puzolánico para su uso en cemento*”. Tesis doctoral. Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Válek, J.; Veiga, R. (2005). “*Characterisation of mechanical properties of historic mortars – testing of irregular samples*”, in: Proc. 9th International Conference on Structural Studies, Repairs and Maintenance of Heritage Architecture.
- Vargas, D. (2002). “*Caracterización de la actividad puzolánica de las tobas pumíticas de la Zona Metropolitana de Guadalajara*”. Tesis de maestría. Universidad de Guadalajara, México.
- Ventriglia, U., (1971). “*La Geologia nella citta` di Roma. Amministrazione Provinciale di Roma, Rome*”.
- Wang L, Seals RK, Roy A. (2001). “*Investigation of utilization of amorphous silica residues as supplementary cementing materials*”. Advances in Cement Research, 13(2), 85-89. doi:10.1680/adcr.13.2.85.39293
- Woods, Robert O. (2003). “*Finite elements, roman-style: a very professional corps of ancient engineers made a lasting contribution to Western civilization*”. Mechanical Engineering-CIME, 125(9), 58-60. doi:10.1115/1.2003-SEP-4
- Yang, Q., Zhang, S., Huang, S. and He, Y. (2000). “*Effect of ground quartz sand on properties of high-strength concrete in the steam-autoclaved curing*”. Cement and Concrete Research, 30(12), 1993-1998. doi:10.1016/S0008-8846(00)00395-1
- Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B., & Uz, V. (2007). “*Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement*”. Building and Environment, 42(11), 3808–3815. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.006

- Yu, L., Zhou, S., & Ou, H. (2015). “*Determining the pozzolanic activity component of volcanic rock*”. *Materials Research Innovations*, 19(S8), S8–881–S8–888.
doi:10.1179/1432891715z.0000000001830
- Yüzer N, Ulukaya S and Yoruç H. (2011). “*Determination of the properties of original materials in Historical buildings; sample of apsidal construction remains at Üsküdar*” in *Proceedings of Symposium for Protection and repair of Historical Buildings (TAYKON)*, pp. 500–509, Istanbul, Turkey.
- Zebrowski C. (1992). “*Los suelos volcánicos endurecidos de América*” *Terra Latino América*, vol. 10, 15–23.