



Universidad Tecnológica de la Mixteca

“Labor et Sapientia Libertas”

Análisis Estadístico del Ensayo a la Compresión de Adobe Compuesto

Tesis

Para Obtener el Título de

Ingeniero Industrial

Presenta

Jesús Enrique Ruíz Carrera

Director de Tesis

Dr. Juan Manuel Espinoza Cuadra

Co-Director de Tesis

Dr. Carlos Vázquez Cid de León

Heroica Ciudad de Huajuapán de León, Oax., junio de 2023

DEDICATORIA

A Dios, por permitirme tener una vida plena y productiva.

A mis padres y pilares de mi vida, por sus consejos, sus desvelos, sus jornadas extras de trabajo, sus sacrificios, su apoyo incondicional, su amor y su confianza que me han brindado en el transcurso de mi vida. Los amo.

A mis amadas hermanas, por acompañarme y apoyarme en este duro camino desde principio a fin. Espero que este logro les sirva de ejemplo de que todo se puede lograr.

A mis abuelos, Eulalia y Federico†, Inez y Rafael, por su cariño, sus consejos y por enseñarme a trabajar y a no dejar de disfrutar de la vida.

A mi director de tesis, por su orientación, su sabiduría y su paciencia. Quien ha sido un mentor excepcional en este logro.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, la Lic. en Educación Lesly Carrera Guerrero y el Lic. en Educación Asis Ruiz Martínez por brindarme su apoyo y amor a lo largo de los años.

A mis hermanas la Lic. en Odont. Leticia Saray, Karen Alelí y Wendy Ivette, por apoyarme en todo momento de debilidad y dificultad en mi vida.

A mi director de tesis el Dr. Juan M. Espinoza Cuadra, agradezco su tiempo, apoyo, dedicación, motivación y experiencia. Y que, a través de su ejemplo, he aprendido el valor del trabajo duro, la dedicación y la perseverancia en la búsqueda del conocimiento.

A mi codirector y sinodales, el Dr. Carlos Vazquez Cid de León, Dra. Patricia Magaly Gallegos Acevedo, Dr. Álvaro Jesus Mendoza Jasso y Dr. Salvador Montesinos Gonzalez, por su valioso tiempo y consejos brindados.

A la Universidad Tecnológica de la Mixteca por brindarme las instalaciones necesarias para la adquisición de nuevos conocimientos necesarios para mi desarrollo profesional y para este proyecto de tesis.

A mis mejores amigos y compañeros con quienes compartí aula, pasillos, comidas y emociones dentro y fuera de la universidad, gracias por su apoyo, su amistad y compañerismo en estos años. Les deseo éxito en sus vida personal y profesional.

Al cuerpo académico UTMIX-CA-039 por acogerme durante mi estancia en el Instituto de Minería.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ABREVIATURAS.....	x
RESUMEN	xi
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Introducción	1
1.2 Planteamiento del Problema	4
1.3 Justificación	6
1.4 Hipótesis	7
1.5 Objetivo General.....	7
1.6 Objetivos Específicos.....	7
1.7 Metas.....	8
1.8 Metodología	8
1.8.1 Materiales	12
1.8.2 Herramientas	13
1.8.3 Equipos	13
1.9 Límites y Alcances.....	14
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	15
2.1 Antecedentes Relevantes de la Investigación	15
2.2 Fundamentos y Características del Adobe	16
2.2.1 ¿Qué es el Adobe?	16
2.2.2 Usos del Adobe	17
2.2.3 Propiedades Físicas Mecánicas del Adobe	17

2.2.4	<i>Estándares y Recomendaciones Técnicas del Adobe</i>	20
2.2.5	<i>Cementantes</i>	22
2.2.5.1	<i>Arcilla</i>	24
2.2.5.1.1	¿Qué es la Arcilla?.....	24
2.2.5.1.2	Producción.....	25
2.2.5.1.3	Usos.....	25
2.2.5.2	<i>Yeso</i>	25
2.2.5.2.1	¿Qué es el yeso?.....	25
2.2.5.2.2	Producción.....	25
2.2.5.2.3	Usos.....	26
2.2.5.3	<i>Cemento Portland</i>	26
2.2.5.3.1	¿Qué es el CP?.....	27
2.2.5.3.2	Producción.....	27
2.2.5.3.3	Usos.....	28
2.2.5.4	<i>Ceniza de Bagazo de Agave</i>	28
2.2.5.4.1	¿Qué es la CBA?.....	29
2.2.5.4.2	Producción.....	29
2.2.5.4.3	Usos.....	29
2.3	<i>Agregados Pétreos</i>	29
2.3.1	<i>Vidrio</i>	30
2.3.1.1	¿Qué es el Vidrio?.....	30
2.3.1.2	Usos.....	30
2.3.2	<i>Arena</i>	30
2.3.2.1	¿Qué es la Arena?.....	30
2.3.2.2	Usos.....	31
2.4	<i>Herramientas Para el Análisis de Resultados</i>	31
2.4.1	<i>Coefficientes de Determinación</i>	31
2.4.2	<i>Coefficiente de Correlación</i>	31
2.4.3	<i>Análisis de Varianza</i>	32
2.4.3.1	Suposición de Normalidad.....	35

2.4.3.2 Suposición de Homocedasticidad	35
CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA	37
3.1 Diseño de Experimentos	37
3.2 Selección de Variables	39
3.2.1 Ceniza de Bagazo de Agave	39
3.2.2 Arcilla	40
3.2.3 Vidrio	41
3.2.4 Arena	42
3.3 Diseño de Mezclas	43
3.3.1 Primera etapa	45
3.3.2 Segunda etapa	47
3.4 Elaboración de Mezclas para probetas	49
3.5 Pruebas de resistencia a compresión	52
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS	53
4.1 Recolección de los datos	53
4.2 Análisis de resultados	58
4.2.1 Análisis de la Primer Etapa	58
4.2.2 Análisis de la Segunda Etapa	64
CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	72
5.1 Discusión	72
5.2 Conclusiones	74
5.3 Trabajos Futuros	75
REFERENCIAS	76
APÉNDICE A	84
APÉNDICE B	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Fases de la metodología con descripción</i>	10
Tabla 2: <i>Resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de adobe de casas y muros del distrito de Aveiro, Portugal por Silveira et al. (2012)</i>	19
Tabla 3: <i>Valores de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción de construcciones de adobes en diferentes ubicaciones</i>	20
Tabla 4: <i>Estándares y valores de mínimos de resistencia a la compresión</i>	21
Tabla 5: <i>Pruebas Post Hoc</i>	33
Tabla 6: <i>Variables del experimento</i>	43
Tabla 7: <i>Constantes del experimento</i>	44
Tabla 8: <i>Propuesta de 3 factores iniciales</i>	45
Tabla 9: <i>Factores replanteados</i>	45
Tabla 10: <i>Sustitución de arena por vidrio</i>	46
Tabla 11: <i>Mezclas de la primera etapa</i>	46
Tabla 12: <i>Factores de la segunda etapa</i>	47
Tabla 13: <i>Adición de cementante extra por arena</i>	48
Tabla 14: <i>Mezclas de la segunda etapa</i>	48
Tabla 15: <i>Datos primer etapa</i>	54
Tabla 16: <i>Datos segunda etapa</i>	55
Tabla 17: <i>Coeficiente de correlación (R) y determinación (R²) de la primera etapa</i>	58
Tabla 18: <i>Prueba de Kolmogórov-Smirnov con corrección de Lilliefors primera etapa</i> .	60
Tabla 19: <i>Prueba Levene primer etapa</i>	62

Tabla 20: <i>Resultados de ANOVA univariable primera etapa</i>	62
Tabla 21: <i>Prueba Post-Hoc primer etapa</i>	63
Tabla 22: <i>Coeficiente de correlación (R) y determinación (R²) de la segunda etapa</i>	65
Tabla 23: <i>Prueba de normalidad segunda etapa</i>	67
Tabla 24: <i>Prueba Levene segunda etapa</i>	68
Tabla 25: <i>Resultados de ANOVA univariable, segunda etapa</i>	68
Tabla 26: <i>Prueba Post-Hoc segunda etapa</i>	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Proceso cuantitativo</i>	9
Figura 2: <i>Ejemplos de construcciones en el distrito de Aveiro, Portugal, por Silveria et al. (2012)</i>	18
Figura 3: <i>Tipos de tendencia en el gráfico de valores Esperados vs. Residuales</i>	36
Figura 4: <i>Diseño factorial 2^k</i>	39
Figura 5: <i>Etapas de la obtención de CBA</i>	40
Figura 6: <i>Procesamiento de la arcilla</i>	41
Figura 7: <i>Procesamiento del vidrio</i>	42
Figura 8: <i>Procesamiento de la arena</i>	43
Figura 9: <i>Preparación de materiales</i>	49
Figura 10: <i>Preparación de la mezclas</i>	51
Figura 11: <i>Desmolde, secado y almacenado de probetas</i>	51

Figura 12: <i>Equipo de compresión automática PILOT COMPACT-LINE</i>	52
Figura 13: <i>Resultados de la primera etapa</i>	54
Figura 14: <i>Resultados de la segunda etapa</i>	56
Figura 15: <i>Resultados obtenidos de los ensayos a resistencia a la compresión</i>	57
Figura 16: <i>Gráfico de probabilidad normal primera etapa</i>	60
Figura 17: <i>Gráfico de valores esperados vs residuales primera etapa</i>	61
Figura 18: <i>Gráfico de medias primer etapa</i>	64
Figura 19: <i>Gráfico de probabilidad normal segunda etapa</i>	66
Figura 20: <i>Gráfico de esperados vs residuales segunda etapa</i>	67
Figura 21: <i>Gráfico de medias segunda etapa</i>	70
Figura 22: <i>Datos de la resistencia a la compresión del proyecto de tesis y datos obtenidos por Silveira et al. (2012)</i>	71

ABREVIATURAS

CBA	Ceniza de Bagazo de Agave
CP	Cemento Portland
D	Diferencia máxima (valor de significancia para la prueba de Kolmogorov-Smirnov con corrección de Lilliefors)
DoE	Diseño de Experimentos
IM	Instituto de Minería
MO	Materia Orgánica
RAEE	Residuos de Aparatos Eléctricos/Electrónicos
SC	Suma de Cuadrados
SUNEO	Sistema de Universidades Estatales Oaxaca
TRC	Tubos de Rayos Catódicos
UTM	Universidad Tecnológica de la Mixteca

RESUMEN

Uno de los materiales de construcción más antiguos y usados alrededor del mundo es el adobe, el cual es elaborado principalmente con 3 componentes: arcilla, arena y agua. En este trabajo de investigación se incluyeron 2 constituyentes extras: el vidrio de desecho y algunos cementantes, como el cemento Portland (CP), ceniza de bagazo de agave (CBA) y yeso, con el fin de mejorar la resistencia a la compresión.

En el estado de Oaxaca, como en cualquier otro lugar, los desechos como el vidrio y el bagazo de agave, son un problema para el medio ambiente, en especial aquellos que intervienen en las propiedades del suelo o su capacidad de absorción de agua.

Por otro lado, el CP, es uno de los materiales más utilizados actualmente en la industria de la construcción, puesto que mejora la resistencia a la compresión; sin embargo, es uno de los mayores productores de CO₂.

La etapa de experimentación de este trabajo de investigación trajo consigo información relacionada con los porcentajes adecuados para mezclas que presentan los más altos valores para la resistencia a la compresión del adobe compuesto. Los resultados, discusión y conclusiones son presentados seguidamente.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La tierra es un material de construcción natural, ampliamente utilizada alrededor del mundo, de la que se elaboran ladrillos sin cocer (adobe o tierra apisonada), fabricados principalmente en regiones cálidas y áridas. Este tipo de material de construcción tiene presencia en un tercio de las edificaciones a nivel global y aproximadamente el 50% en países en desarrollo (Avrami, et al., 2008; Millongo et al., 2014 y Minke et al., 2006, como se citó en Dormohamadi y Rahimnia, 2020). Se usa preferencialmente al mortero y hormigón debido a su bajo costo de fabricación y disponibilidad para obras domésticas (Khadka, 2019, como se citó en Mellaikhafi, Tilioua et al., 2021). Hoy en día, en muchos países desarrollados se han sustituido progresivamente estas viviendas de tierra sin cocer, para fabricar alojamientos con materiales más resistentes, principalmente hormigón, acero y mampostería confinada con arcilla cocida o ladrillos de hormigón. Consecuentemente, el conocimiento tradicional sobre la construcción con tierra sin cocer se ha ido perdiendo, privando a la comunidad técnica y científica de esta enseñanza para llevar a cabo nuevos estudios; es por ello, que las normativas y códigos para la caracterización de este tipo de material, han dejado de ser una prioridad (Mellaikhafi, Ouakarrouch et al., 2021).

Históricamente, los ladrillos de adobe han sido elaborados a mano con cuatro (4) principales materiales: arcilla, arena, agua y residuos vegetales. La fabricación de estos ladrillos se realiza con materiales que no han experimentado ningún proceso industrial o cuya selección como la granulometría, cantidad de agua, proporciones de la mezcla se realiza sin rigor, por lo que intuitivamente carecen de resistencia mecánica y posiblemente se desconoce su resistencia

térmica, lo que suscita se fabriquen más gruesos y anchos. Esta aparente solución, induce a una alta probabilidad de agrietamiento durante el secado al sol, contracciones axiales y deformación de sus paredes (Calatan et al., 2016).

El cemento Portland (CP) es uno de los materiales de construcción más usados a nivel mundial, debido a las características físico-mecánicas que posee, es por ello, que la industria cementera ha ido en aumento convirtiéndose en una de las principales consumidoras de combustible fósil, con un aproximado de 12–15% del consumo de energía industrial (Shehata et al., 2021) que a su vez, emite de un 7-9% de las emisiones globales de CO₂ (Feiz et al., 2015).

Debido a la preocupación del cambio climático y las altas emisiones de CO₂ de la producción de CP, se ha optado por la creación de materiales para la construcción más amigables con el medio ambiente, tales como los geopolímeros (polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización), que destacan por un bajo consumo de energía, captación de residuos de otras industrias y baja liberación de emisiones de CO₂ para su producción. Las características de estos materiales están aún en investigación, por el momento, se han demostrado sus buenas características para ser usado como material de aislamiento solar térmico (Ramón-Álvarez et al., 2021).

Los investigadores Dormohamadi y Rahimnia (2020) han demostrado que el efecto de la compactación dinámica en tierra apisonada, bloques de tierra comprimida y ladrillos de adobe fabricados por métodos tradicionales en la región de Irán, han incrementado la resistencia a la compresión en un 36% y resistencia a la tracción y flexión en un 53% en comparación con los no compactados.

El grupo de investigadores: Calatan, Mircea, Hegyi y Dico (2016) se han enfocado en estudiar la influencia de las fibras naturales en el adobe, y su efecto en la resistencia térmica y a la compresión, teniendo resultados satisfactorios al momento de fijar en 9 y 10% el valor óptimo para fibras de cáñamo y la adición de paja entre 30–40% del volumen total.

P. Muñoz, Letelier, L. Muñoz, y Bustamante, (2020), elaboraron un adobe reforzado con una adición del 12.5% de residuos de papel y celulosa obteniendo una reducción a la conductividad térmica en un 30% y un aumento del 190% a la resistencia a la compresión.

En Argelia, Hadji, Ihaddadene N., Ihaddadene R., Betga, Charick y Logerais (2020), usaron el método de hilo caliente para determinar la conductividad térmica de materiales de construcción tradicionales con dos tipos de tierra y diferentes cantidades de paja, de los cuales demostraron que la conductividad térmica de todos sus ensayos con y sin paja, están entre 0.1–2 W/m · K.

En Egipto, el estudio realizado por Morsy, Alakeel, Ahmed, Abbas, Omara, Abdelsalam y Emaish (2022), demostró que las cenizas de paja de arroz activadas con hidróxido de sodio como material estabilizador para ladrillos de adobe de geopolímeros tienen una mejora importante en la conductividad térmica, absorción del agua y aumento en la resistencia a la compresión, con un valor máximo de 2.1 MPa adecuada para muros sin carga.

Los investigadores Hussain, Levacher, Leblanc, Zmamou, Djeran-Maigre, Razakamanantsoa y Saouti (2022), usaron el tratamiento de sedimentos de la ciudad portuaria de Dunkerque en Francia, del río guatemalteco Usumacinta, elaborando adobes adicionados de fibras de cáñamo Shiv y fibras de flores de aceite de palma, obteniendo adobe con una resistencia a la

tracción de 0.25 MPa, requerimiento mínimo en la norma E.080 (Norma E.080, Diseño y Construcción con tierra reforzada, Perú).

1.2 Planteamiento del Problema

El adobe es uno de los materiales de construcción más antiguos, del que se han encontrado vestigios que datan de los años 3000 a. C., en diferentes partes del mundo, principalmente las ciudades de Çatalhöyük en Antolia, el Antiguo Egipto; en Perú, la ciudadela de Chan Chan (la más grande elaborada de barro) y en España, en las regiones secas de Castilla y León donde fueron elaboradas grandes construcciones con este material. Una de las principales características del uso de este material para construcción es la facilidad de elaborar los bloques de adobe, puesto que no se necesita un proceso industrial de horneado o secado, basta con tener un suelo con altos contenidos de arcilla, arena y agua para fabricarlos y un lugar amplio para su preparación y secado. El secado depende del clima donde se manufacturen, para que puedan moverse sin deformación. Para su pegado es suficiente agregar mezcla, misma con la que se elaboraron los bloques, para construir las paredes. Otra ventaja es que éste es uno de los materiales más económicos, dado que la arcilla puede ser extraída del mismo lugar donde se realiza la construcción y se invertiría, probablemente, en arena, material pétreo comúnmente extraído de ríos u obtenido de la molienda de grava (Hernández, 1984).

Dado que el adobe es un material que no tiene ningún proceso industrial, presenta algunas desventajas en comparación con otros materiales de construcción que se han modificado para cumplir algunos requerimientos técnicos, por tanto, este es un factor crucial por el que se ha dejado de emplear el adobe. Una desventaja notoria del adobe es su bajo valor de la resistencia a la

compresión, debido a la porosidad, diferencia en la granulometría de sus componentes y falta de aglutinantes.

El enfoque de este trabajo de investigación es aumentar, si fuese posible, el valor de la resistencia a la compresión haciendo uso de diferentes cementantes, como el CP, la CBA y, yeso, así como la sustitución del recurso pétreo (arena) por vidrio del desecho de aparatos eléctricos-electrónicos, que es abundante.

El CP ha acaparado el mercado constructivo, puesto que, sus propiedades mecánicas, en específico, su resistencia a la compresión es alta, permitiendo erigir construcciones de más altura con techos sólidos, principales características para satisfacer el requerimiento de una vivienda segura o construcciones de mayores dimensiones. Por otra parte, la industria del CP es una de las principales emisoras de CO₂, produciendo una tonelada de CO₂ por tonelada de CP y un consumo de combustible fósil aproximadamente del 12-15% del consumo de la energía industrial (CEMEX, 2021; Shehata et al., 2021).

Por otra parte, Oaxaca es el principal estado productor de mezcal de la República Mexicana con un 65% de la producción nacional, con nombre por denominación de origen. La producción de mezcal tiene la desventaja de producir grandes volúmenes de desechos: el bagazo de agave, al que se le ha conferido diferentes usos entre los que está emplearlo como materia prima en productos reciclables. En algunos casos, éste es depositado en rellenos sanitarios o utilizado como combustible para el proceso de la destilación. Dadas las propiedades químicas (pH, nitrógeno y potasio; Hoz-Zavala y Nava-Diguero, 2017) de este residuo, no es conveniente almacenarlo por largos períodos de tiempo ni tirarlo al aire libre en grandes cantidades, puesto que se propiciaría contaminar el suelo, aire y agua, sumado a los olores por descomposición. Por ello, se plantea la

idea de transformarlo en ceniza, disminuyendo su volumen y utilizar este desecho como un sustituto del CP (Gobierno de México, 2020; Martínez-Gutiérrez et al., 2013).

1.3 Justificación

La Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) es el centro de acopio del Sistema de Universidades Estatales de Oaxaca (SUNEO), donde los desechos que llegan a esta son, principalmente, monitores de tubo de rayos catódicos (TRC), fotocopiadoras, impresoras, vidrios rotos de ventanales, vidrio de botellas, componentes eléctricos y electrónicos. Debido a los volúmenes de estos desperdicios, los de tipo polimérico y vítreo son triturados para evaluar su uso como agregados en mezclas con mortero, hormigón, yeso, y en este caso, adobe. Además, el almacenamiento del triturado ocupa un menor espacio.

El adobe compuesto de este estudio, es una mezcla básica de arcilla y arena, a la que se le sustituye la arena por vidrio triturado en diferentes porcentajes y para reforzar el efecto cementante de la arcilla, se agrega CP o CBA. La sustitución de arena por vidrio triturado de desecho persigue evitar la extracción de arena de ríos, donde se encuentran flora y fauna endémicas o la destrucción de cerros con gran contenido de arenas.

El mezcal es uno de los productos de mayor producción del Estado de Oaxaca, por lo tanto, una de las industrias con mayor cantidad de desechos presentes como lo son las hojas o pencas del agave y el bagazo que es el residuo obtenido de la trituración de la piña. El bagazo de agave es de los desechos que más contaminan los suelos al dejarlos a la intemperie, amontonado, y que debido a su proceso de fermentación genera gases y alcoholes que dañan el suelo haciéndolo inerte para futuros plantíos. Es por ello que muchos productores optan por quemarlo y tirar las cenizas en

espacios abiertos, provocando contaminación. Al ser calcinado, la ceniza presenta propiedades puzolánicas, similares a las del CP. Este estudio agregó CBA a la mezcla de adobe y valoró la resistencia a la compresión.

1.4 Hipótesis

Proponer mezclas de adobe sustituyendo la arena por hasta el 35% de vidrio reciclado proveniente de los desechos de residuos de aparatos eléctricos/electrónicos (RAEE), agregándole los cementantes CP, CBA y yeso, con el fin de sobrepasar la resistencia a la compresión de 1.72 MPa (valor mínimo establecido por la norma 14.7.4 NMAC 2009 New Mexico Earthen Building Materials Code), o los valores reportados por D. Silveira.

1.5 Objetivo General

Elaborar mezclas de “adobe compuesto” constituidas de CP o CBA o yeso y vidrio de desecho y, si se superan los valores de la resistencia a la compresión planteados en la hipótesis, recomendarlas como materiales para construcciones de bajo costo.

1.6 Objetivos Específicos

- ✓ Producir cementantes sustitutos (CBA), enfatizando en la facilidad de producción y sustentabilidad.

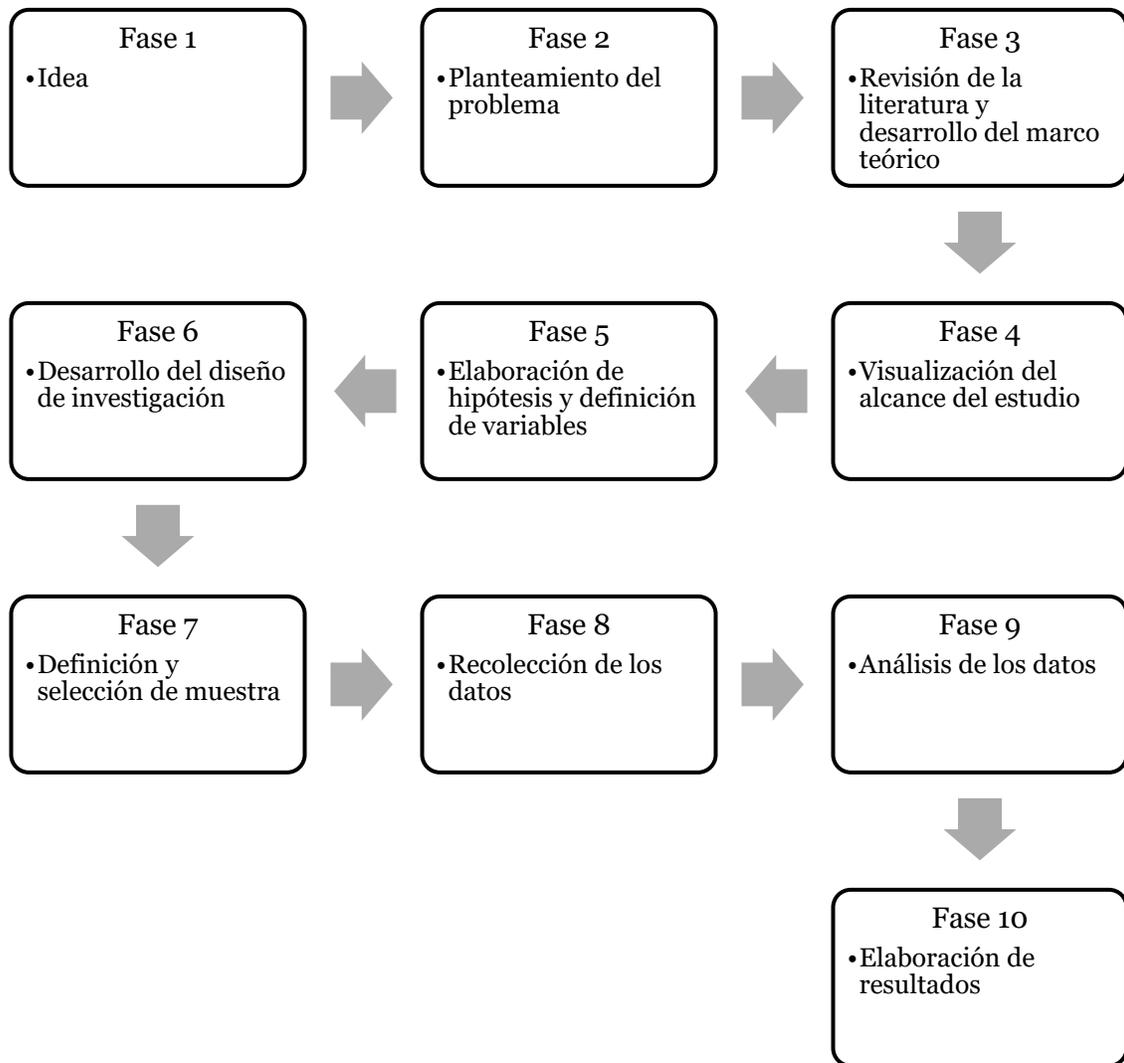
- ✓ Estudiar diferentes mezclas entre arcilla, cementantes (CBA, CP, yeso) y distintas proporciones arena-vidrio, para elegir la que presente los valores más altos de la resistencia a la compresión.
- ✓ Analizar estadísticamente los datos obtenidos tras la realización del ensayo a la compresión de las probetas cúbicas de 10·10·10 cm.

1.7 Metas

- ✓ Utilizar la CBA como cementante, con el fin de evitar descargar a la atmósfera las toneladas de CO₂ provocadas por el uso del CP.
- ✓ Divulgar y cooperar sin costo, entre los interesados, las proporciones de los componentes del adobe compuesto que presenta lo más altos valores para la resistencia a la compresión.
- ✓ Interpretar, discutir y concluir los resultados que superen o no los valores de resistencia a la compresión planteados en la hipótesis.

1.8 Metodología

El enfoque cuantitativo de investigación propuesto por Hernández Sampieri (2014), se define como: “recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías” (p. 4), para el que se establece un proceso secuencial y probatorio con 10 fases, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1*Proceso cuantitativo*

Nota. Figura ilustrativa del proceso cuantitativo. Tomado de *Metodología de la investigación* (p. 5), por R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, 2014, MCGRAW-HILL.

En la Tabla 2, se hace referencia a cada una de las fases y una pequeña descripción de las actividades a realizar, que sobrellevan el desarrollo de este proyecto de tesis.

Tabla 1*Fases de la metodología con descripción*

Fase	Descripción
1. Idea	Se plantea una solución integral al problema de la sobreexplotación de la corteza terrestre debido a la extracción de arena, aunado a la contaminación debida al bagazo de agave expuesto en los predios de los palenques y a la alta generación de CO ₂ debido al uso del CP como aglomerante en mezclas para la construcción civil.
2. Planteamiento del problema	Se bosqueja el uso de vidrio de desecho en vez de arena; se propone reforzar la arcilla con CP, CBA y yeso y, evaluar la resistencia a la compresión.
3. Revisión de la literatura y desarrollo del marco teórico	Se revisó y analizó la literatura especializada respecto al uso del vidrio en las mezclas de mortero, hormigón y adobe; el reforzamiento de la arcilla con CP, CBA y yeso en la resistencia a la compresión.
4. Visualización del alcance del estudio	Que el adobe compuesto supere los valores de la resistencia a la compresión planteados en la hipótesis; que el material elaborado sea mucho más económico que los bloques y que este conocimiento esté disponible para cualquier interesado.
5. Elaboración de hipótesis y definición de variables	A partir de la revisión de la literatura y de la elaboración del marco teórico y, con la apropiación de la visión del alcance de este estudio, se planteó la hipótesis de este trabajo

	de investigación. Las variables se definieron con base al DoE.
6. Desarrollo del diseño de investigación	Se fundamentó en el criterio de Hernández Sampieri respecto a que es un enfoque de una investigación cuantitativa de experimentación que consta de 10 fases y la definición del DoE que es el diseño factorial 2^k (se desarrolla en el capítulo 3).
7. Definición y selección de muestra	Es con base al diseño factorial 2^k en el que intervienen los factores siguientes: vidrio, cementante (CP, CBA, yeso), agua y arena.
8. Recolección de los datos	Se recolectaron los datos referidos a los porcentajes de las mezclas sometidas a estudio, masa en seco, y la recopilación de los datos obtenidos, al ensayar a la compresión las probetas.
9. Análisis de los datos	Se examinaron los datos mediante el R (coeficiente de correlación), R^2 (coeficiente de determinación) y ANOVA para estudiar los resultados y elaborar la discusión y conclusiones.
10. Elaboración de resultados	Con base en el análisis de los datos, y el estudio de los resultados y la discusión, se plantearon las conclusiones y, posibles recomendaciones.

Al ser una metodología cuantitativa de experimentación, en la Fase 6 (Desarrollo del diseño de investigación), se requirió un DoE, que permitió conocer el número de ensayos a realizar para cada una de las corridas, y así poder analizar los resultados obtenidos.

En la Fase 7 (Definición y selección de muestra), se definió el diseño factorial 2^k y las variables que intervienen. Los materiales, herramientas y equipos a usar se presentan a continuación:

1.8.1 Materiales

Los materiales a utilizados fueron:

- ❖ **CBA:** La ceniza proviene de la incineración del bagazo de agave procedente de Santiago Matatlán, que resulta de la molienda de la manufactura del mezcal. La granulometría utilizada fue de $297\ \mu\text{m}$ (malla No. 50).
- ❖ **Arcilla:** Extraída de San Jerónimo Silacayoapilla, Oaxaca, México. Fue secada para eliminar la humedad contenida, posteriormente se llevó a cabo un proceso de pulverización usando pulverizadores de discos y de bolas encontrados en las instalaciones del Instituto de Minería. Se tamizó a la granulometría de $105\ \mu\text{m}$ (malla No. 140).
- ❖ **Yeso:** el yeso usado, es el yeso para construcción o sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$). Su presentación es en bulto de 40 kg.
- ❖ **Cemento Portland:** Cemento gris marca Cruz Azul, el cual cumple con la norma NMX-C-414-ONNCCE, en presentación en bulto de 50 kg.
- ❖ **Vidrio:** El vidrio usado es desecho de pantallas de TRC y de ventanas. Este material es acopiado en el IM donde fue triturado. La granulometría de esta materia fue de $4760\ \mu\text{m}$ (malla No. 4).
- ❖ **Arena:** El recurso pétreo se compró en tiendas de materiales aledañas a la UTM. Este material se usó con una granulometría de $4760\ \mu\text{m}$ (malla No. 4).

- ❖ **Agua:** Es de carácter potable y para uso humano, proporcionada por la red de tuberías de la UTM.

1.8.2 Herramientas

- ❖ Statistica 10
- ❖ Paquete Microsoft Office 2019
- ❖ Software SolidWorks 2022
- ❖ Cuchara de albañilería
- ❖ Varilla punta de bala
- ❖ Moldes para probetas cubicas de 10·10·10 cm
- ❖ Cubetas, tinas, recipientes y jícaras
- ❖ Probeta graduada de 1 litro

1.8.3 Equipos

- ❖ Báscula Torrey 50 kilogramos
- ❖ Partidor de muestras tipo JONES 040G-0025 MODEL 70
- ❖ Horno desecador BINDER APT Line Serie BD
- ❖ Molino bolas ROD MILL 010E-12
- ❖ Pulverizador de anillos STANDART RING MILL CPB
- ❖ Tamizador RO-TAP RX-29
- ❖ Molino PULVEX PLASTIC 250
- ❖ Tamiz No. 4, 8, 50 y 140.
- ❖ Máquina de compresión Pilot Compact Line 50, que se encuentra dentro de las instalaciones del IM

- ❖ Cámara fotográfica para evidencia
- ❖ Equipo de cómputo

1.9 Límites y Alcances

Este trabajo se limita a elaborar mezclas de adobe compuesto con sustitución de arena por vidrio a 10, 25 y 35% así como también la adición de CBA, CP y yeso en 10, 20 y 30% de la masa total.

Otra restricción en este trabajo de experimentación fue el tiempo de fraguado, ya que en la tesis de Mayoral Noriega (2022), se demostró que el tiempo de fraguado de la CBA fue dos veces el tiempo de fraguado del CP, por lo que las probetas con adición de CBA fueron de 56 días.

Este trabajo se centra en la obtención de mezclas de adobe compuesto que superen los valores planteados en la hipótesis.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes Relevantes de la Investigación

El grupo de investigadores de Medio Oriente: Morsy, Alakeel, Ahmed, Ahmed, Abbas, Omara, Abdelsalam y Emaish (2022), en su artículo “Recycling rice straw ash to produce low thermal conductivity and moisture-resistant geopolymer adobe bricks” realizaron pruebas con resultados satisfactorios al usar ceniza de paja de arroz e hidróxido de sodio para obtener un bloque de adobe con una disminución en la densidad aparente y absorción del agua y un aumento en la resistencia a la compresión de 2.1 MPa después de 28 días con un 10% de NaOH¹ y un 20% de ceniza de paja de arroz.

En Irán, los investigadores: Faghih Khorasani y Zaman Zabir (2022) en su estudio “Experimental study on the effectiveness of short fiber reinforced clay mortars and plasters on the mechanical behavior of adobe masonry walls” realizaron la incorporación de pajas cortas remojadas y fibras de neumáticos (desecho de las fábricas locales de neumáticos) a los morteros para la unión de adobes, con el fin de estudiar sus propiedades mecánicas. Los resultados obtenidos indicaron que las mezclas de mortero reforzado con fibras de paja remojadas mejoraron 87% (2.8 MPa) la resistencia a la compresión, mientras que el reforzado con fibras de neumático mejoró 115% (3.2 MPa). Mientras que, en la elaboración de adobes comprimidos, lograron un valor

¹ Hidróxido de sodio, es usado principalmente para oxidar la MO dentro de las mezclas; no es recomendable adicionarlo, puesto que, afecta negativamente a la hidratación del cemento por ende la resistencia a la compresión (Cechin et al., 2018).

máximo de 1.9 MPa para los adobes reforzados con fibras de neumáticos y de 1 MPa para los reforzados con fibras de paja.

Por otra parte, el grupo de investigadores conformado por Calatan, Szilagyi, Hegyi y Dico (2019) ha buscado mejorar las capacidades térmicas y durabilidad del adobe en la región de Rumania, Europa, con mezclas de adobe adicionadas con cal mezclada con “cola de hueso”², NaOH y fibras de cáñamo, teniendo resultados satisfactorios para sus diferentes usos, tales son aislamientos térmicos, mortero de albañilería, tratamientos en superficie con aceites vegetales y muros con ladrillos con resistencia de 4.1 MPa a la compresión.

2.2 Fundamentos y Características del Adobe

El adobe al ser uno de los productos más accesibles desde los primeros pobladores, se ha convertido en uno de los materiales con mayor antigüedad sobre la corteza terrestre. Hoy en día es poco común ver viviendas elaboradas con adobe en pie y habitadas, dada su degradación y los nuevos métodos de construcción que soportan mayores cargas y fenómenos naturales.

2.2.1 ¿Qué es el Adobe?

Uno de los productos de arcilla más utilizados por el ser humano es el adobe. Gendrop (1997) define al adobe como “masa de barro, frecuentemente mezclada con paja cortada o estiércol y secada al aire, que se emplea en la construcción de paredes o muros, en forma de ladrillos de un tamaño mucho mayor que el de uno normal” (p. 11), esta es la definición con mayor aprobación en el ámbito constructivo.

² Adhesivo orgánico obtenido de la cocción de huesos, pezuñas, tendones y pellejos de ganado caballar o bovino, su componente principal es el colágeno (Albarrán F., 2001).

El adobe es un producto cerámico sin cocer a base de arcilla, arena, limo y agua, con características particulares, puesto que tiene una baja resistencia a la compresión, bajo coeficiente a la fricción y resistencia a la dureza y desgaste (Rethwisch y Callister, 2018). Así mismo es uno de los productos más económicos y sustentables del sector constructivo.

2.2.2 Usos del Adobe

Varum et al. (2015), menciona que:

La construcción de tierra es una de los más antiguos y más generalizados sistemas de construcción. Alrededor del 30% de la población mundial vive en construcciones de tierra. Aproximadamente el 50% de la población en países en desarrollo, incluyendo la mayoría de áreas rurales y, al menos el 20% de las áreas urbanas y urbanas marginales, viven en construcciones de tierra. Por esta razón, en este estudio, se caracterizó el comportamiento de las construcciones de adobe y de tierra apisonada a la par con la investigación para el desarrollo del reacondicionamiento y desempeño sísmico con soluciones mejoradas, considerando el patrimonio de tierra relevante construido en Portugal. Las propiedades mecánicas de las unidades de adobe y mortero fueron estudiadas y una serie de ensayos para la caracterización del comportamiento de la mampostería de adobe se llevó a cabo, en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Aveiro, llamadas: i) esfuerzo de enlace y ii) ensayos por corte en la junta.

2.2.3 Propiedades Físicas Mecánicas del Adobe

Se lee de Silveira et al. (2012), en su artículo “Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions” que las principales propiedades mecánicas del adobe, en específico, adobe de casas y muros divisorios en el distrito de Aveiro, Portugal son: a) resistencia de compresión: de

0.66 a 2.15 MPa ,con una media de 1.32 MPa para adobe de casas y de 0.80 a 1.72 MPa y su media de 1.03 MPa para adobe de muros; b) resistencia a la tensión: de 0.13 a 0.19 MPa para adobe de casas y 0.12 a 0.40 MPa para adobe de muros; c) módulo de elasticidad de 51 a 448 MPa para adobe de casas y 94 a 340 MPa para adobe de muros y d) deformación media en resistencia pico³ de 6 a 28% para adobe de casas y de 6 a 14% para adobe de muros.

Figura 2

Ejemplos de construcciones en el distrito de Aveiro, Portugal, por Silveria et al. (2012)



³ La resistencia pico o máxima es el valor máximo del esfuerzo cortante (τ) o el valor máximo de la relación entre el esfuerzo cortante (τ) y el esfuerzo normal (σ) (Howlader, 2022).

Nota. La imagen muestra construcciones elaboradas de adobe tradicional producido en Aveiro, Portugal. Tomada de Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions (p. 37), por D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira y J. Almeida, 2012, Construction and Building Materials.

Tabla 2

Resultados obtenidos en los ensayos mecánicos de adobe de casas y muros del distrito de Aveiro, Portugal por Silveira et al. (2012)

Construcción	Media de Resistencia a la Compresión (MPa)	Media de Modulo de Elasticidad (MPa)	Deformación media a la Resistencia Pico (%)	Media de Resistencia a la Tensión (MPa)
Casas				
H_01	1.24	273	7	0.13
H_02	1	203	7	0.19
H_03	0.75	97	14	0.19
H_04	0.66	51	28	-
H_05	2.15	448	6	-
H_09	0.7	87	10	-
H_10	1.98	334	7	-
H_11	1.08	143	9	-
Muros Divisorios				
W_01	0.94	138	8	-
W_02	0.83	117	9	0.13
W_04	0.99	200	6	0.12
W_05	1.72	340	8	0.4
W_06	1.25	209	8	-
W_07	0.8	94	10	-
W_09	1.05	114	14	-
W_10	0.98	127	11	-

Nota. La notación descrita en la tabla es: H para adobes de casas, W para adobes de muros y el número es el número del espécimen ensayado. Adaptado de Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions (p. 38), por D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira y J. Almeida, 2012, Construction and Building Materials.

Otros valores de resistencia a compresión y resistencia a la tracción de construcciones de adobe en diferentes partes del mundo, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 3

Valores de resistencia a la compresión y resistencia a la tracción de construcciones de adobes en diferentes ubicaciones

Ubicación	Resistencia a la Compresión (MPa)	Resistencia a la Tensión (MPa)
Aveiro - Portugal	1.17	0.19
México	1.18	0.27
México	0.51-1.57	0.20-0.43
Colombia	3.04	0.41
Marruecos	2.83 ^a	0.18-0.35
Italia	0.29-1.56	0.17-0.40

Nota. ^a Resultados obtenidos en el lugar con la prueba de esclerómetro. En la tabla se muestra una recolección de datos de resultados de resistencia a la compresión y tracción de diversas construcciones de adobe. Adaptado de Mechanical properties of adobe bricks in ancient constructions (p. 38), por D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira y J. Almeida, 2012, Construction and Building Materials.

2.2.4 Estándares y Recomendaciones Técnicas del Adobe

Los estándares y recomendaciones técnicas revisados son:

- NTE E.080 Perú; Norma Técnica de Edificación: Adobe (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2017).
- NZS 4298:1998 Nueva Zelanda; Materials and workmanship for earth buildings (Standards New Zealand [SNZ], 1998).

- 2009 New Mexico earthen building materials code (New Mexico Administrative Code [NMA], 2015).
- N-CMT-2-01-001/02 México; Ladrillos y Bloques Cerámicos (Secretaría de Comunicaciones y Transportes [SCT], 2002).
- NMX-C-404-ONNCCE-2012 México; (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación [ONNCCE], S.C., 2012).

que proporcionan los valores mínimos de resistencia a la compresión, mostrados a continuación:

Tabla 4

Estándares y valores de mínimos de resistencia a la compresión

Estándar	Límite mínimo de resistencia a la compresión
NZS 4298:1998 (Nueva Zelanda)	> a 0.7 MPa
NTE E.080 (Perú)	> a 0.7 MPa
14.7.4 NMAC (New Mexico)	> a 1.72 MPa
N-CMT-2-01-001/02 (México)	> a 2 MPa
NMX-C-404-ONNCCE-2012 (México) ^a	> a 6 MPa

Nota. ^a tabique macizo de arcilla artesanal. Se muestran las normas que rigen las construcciones con adobe en algunas naciones del mundo, y sus valores de resistencia a la compresión.

En México, el sistema constructivo con adobe sin cocer solo está reglamentado para mampostería (N-CMT-2-01-001/02), no para casas. En el caso del tabique macizo de arcilla artesanal, se hace mención en la norma NMX-C-404-ONNCCE-2012, también para mampostería.

2.2.5 Cementantes

El Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10, 2010) define a los materiales cementantes como:

Materiales que tienen propiedades cementantes por sí mismos al ser utilizados en el concreto, tales como el cemento portland, los cementos hidráulicos adicionados y los cementos expansivos, o dichos materiales combinados con cenizas volantes, otras puzolanas crudas o calcinadas, humo de sílice, y escoria granulada de alto horno o ambos (p. 323).

Mientras que en la norma ASTM C1697-21 establece que un material cementante es un material inorgánico que mejora las propiedades de una mezcla de concreto o mortero donde se requiere una acción puzolánica o hidráulica. Así también, los materiales cementantes complementarios incluyen cemento de escoria, humo de sílice, puzolanas naturales y cenizas volantes de carbón (American Society for Testing and Materials [ASTM], 2021).

Por parte de las arcillas, Yanguatin Botina (2018) menciona que:

Las arcillas en estado cristalino encuentran un uso limitado como materiales cementantes suplementarios, sin embargo, es posible utilizarlas como tal cuando son sometidas a un ciclo térmico hasta una temperatura determinada, generando la deshidroxilación (es la descomposición de una sustancia en radicales H y OH para formar agua; también se le conoce como pérdida de agua química, por el rompimiento de los enlaces químicos entre los radicales) que resulta en la transición desde una fase puramente cristalina a un estado más o menos amorfo [6]. Entre los MCS (Materiales Cementantes

Suplementarios), las arcillas calcinadas son una posible fuente de puzolanas y a su vez un medio para incrementar los niveles promedio de sustitución del Clinker (p. 41).

Los estudios relacionados con la CBA son pocos, por ello, las propiedades de este material están en estudio, González-López et al. (2015) menciona estar de acuerdo con otros autores, quienes clasifican a las cenizas de biomasa de agave como semi-reactiva con relación a aplicaciones aglutinantes para materiales de construcción.

El uso de residuos industriales para la producción de biomasa es un tema que ha ganado creciente interés. Esto se debe a la necesidad de utilizar plantas que no afecten el suministro de alimentos cuando se utilizan para la generación de energía a partir de biomasa. Los residuos de Agave salmiana cumplen con estas características. Ahora se ha propuesto como una posible fuente de producción de bioenergía debido a sus características de crecimiento. Por lo tanto, en esta investigación se estudió el efecto que podría tener la temperatura de combustión del Agave salmiana en la producción de energía. Además, se analizaron las características de estos residuos para que sirvieran de base para posibles futuras aplicaciones en materiales de construcción. Los resultados indican que las cenizas son principalmente CaCO_3 cuando se calcinan a menos de 700°C , y CaO por encima de esta temperatura. La resistencia a la compresión a edades tempranas fue hasta un 90% mayor que la referencia, cuando se realizaron mezclas de reemplazo de cemento al 5% (González-López et al., 2015).

En general, los cementantes, son aquellos que llevados a su estado plástico (por adición de agua u otro disolvente) con algún otro agregado, son capaces de unir las partículas de la mezcla hasta la pérdida total o parcial del líquido, formando así una estructura con características mecánicas deseadas.

2.2.5.1 Arcilla

Reyes Montero (2012) menciona que: “las arcillas están conformadas como rocas detríticas⁴ sedimentarias por varios silicatos de aluminio hidratado que provienen de la descomposición de los feldespatos producido de la erosión” (p. 7).

2.2.5.1.1 ¿Qué es la Arcilla? La Real Academia Española (RAE) define a la arcilla como: “tierra finamente dividida, constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratados, que procede de la descomposición de minerales de aluminio, blanca cuando es pura y con coloraciones diversas según las impurezas que contiene” (RAE, 2020).

Una definición técnica de este material es propuesta por Souza Santos (en García Ubaque, García Vaca y Vaca Bohórquez, 2013), que menciona que la arcilla es:

En forma general, material terroso, de baja granulometría y que presenta plasticidad cuando es mezclado con cierta cantidad de agua. Así mismo las arcillas están constituidas por partículas cristalinas extremadamente pequeñas (< 2 μm) denominadas “minerales de arcilla”, de naturaleza inorgánica, compuesta principalmente por Si, Al, H₂O y, frecuentemente, cantidades apreciables de Fe y metales alcalinos y alcalino-térreos. Además de minerales, una arcilla puede contener MO y otros compuestos no cristalinos o amorfos.

⁴ las rocas detríticas o clásticas son rocas sedimentarias, por lo que se forman debido a una acumulación de partículas o de sedimentos de rocas que ya existían anteriormente. Estos sedimentos se denominan “detritus” o “clastos”, los cuales están formados debido a la erosión natural de dichas rocas y se han acumulado de forma mecánica. En geología el término clástico y detrítico se utiliza para denominar a todo el conjunto de métodos sedimentarios, refiriéndose tanto a rocas sedimentarias como a partículas que participan en el transporte de las sedimentaciones. Como decimos, las rocas clásticas se forman por la unión de otros trozos pequeños de piedras y minerales que se han compactado de manera mecánica por los procesos de erosión, por lo que podremos reconocerlas en base a estas características (Servicio Geológico Mexicano, 2022).

2.2.5.1.2 Producción. Al ser un material que no necesita industrialización, es extraído del suelo manualmente o con ayuda de excavadoras, principalmente en verano, procurando quitar una primera capa de tierra para evitar MO y piedras grandes. Una vez ya extraída, ésta se seca al sol o en hornos, dependiendo de las propiedades que se requieran (Lozada, 2004).

2.2.5.1.3 Usos. La arcilla es uno de los materiales más comunes para la producción de objetos para la vida cotidiana, algunos son: ladrillos, artes plásticas, instrumentos musicales, vasijas, vasos, plastos e incluso sarcófagos. También es usada en procesos industriales como lo son: producción de cemento, obtención de sustancias de filtrado y elaboración de papel (Ladrillera Mecanizada, 2021).

2.2.5.2 Yeso

El yeso es sulfato de calcio hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 32.6% de CaO, 46.5% de SO_3 y un 20.9% de H_2O), que se presenta en forma de cristales tabulares exfoliables en láminas, comúnmente incoloros (Subsecretaría de Minería, 2017).

2.2.5.2.1 ¿Qué es el yeso? El yeso es sulfato de calcio hidratado que en su estado puro es color blanco, sin embargo, generalmente presenta impurezas que le confieren variadas coloraciones. Este material tiene una dureza de 2 en la escala de Mohs (Subsecretaría de Minería, 2017).

La presentación del yeso en el comercio es variada, dependen de su aplicación; este material está presente en la industria de la construcción, farmacéutica, minera, de energías renovables, de reciclado, etc. (Subsecretaría de Minería, 2017).

2.2.5.2.2 Producción. Debido a las variedades de yeso, los procesos de producción del yeso son diferentes para cada aplicación. Para este trabajo de investigación, se menciona el proceso

de fabricación de yeso para construcción, proporcionado por la Yesera Monterrey (Yesera Monterrey, 2021):

Extracción de la roca: Extracción del mineral de yeso en su forma natural (roca) con estrictos controles de calidad en la pureza y color. Posteriormente es enviado a las plantas productoras.

Trituración y molienda: El material es pulverizado hasta alcanzar la granulometría especificada por el tipo de aplicación.

Calcinación: El material que ha sido molido, es calcinado en temperaturas superiores a los 1000 °C para evaporar la mayor cantidad de agua.

Mezclado: En este proceso, el yeso molido y calcinado es mezclado con otros aditivos químicos que cambian sus propiedades de fraguado, para así cumplir con los requerimientos de las aplicaciones industrial cerámica, artesanal y constructiva.

Envasado y almacenaje: finalmente, el yeso es envasado según la presentación, ya sea en saco de papel o saco industrial, para su posterior almacenamiento.

2.2.5.2.3 Usos. En construcción es usado para elaboración de productos prefabricados como bases de revestimiento, plafones, lienzos (tabla roca) y planchas de yeso y fieltro. También es usado en decoraciones y tabiques de aislamiento (Subsecretaría de Minería, 2017).

2.2.5.3 *Cemento Portland*

El CP es un polvo finamente molido color grisáceo, compuesto por silicatos de calcio y aluminatos de calcio (CEMEX, 2019).

2.2.5.3.1 ¿Qué es el CP? La Norma N CMT 2 02 001/02 Calidad del Cemento Pórtland (2002) define al CP como:

Conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece. Se obtiene mediante un proceso industrial, pulverizando a un grado de finura determinado una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, previamente sometida a cocción, que se denomina Clinker Portland, al cual se le adiciona sulfato de calcio como anhidrita (CaSO_4), yeso o hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), para regular el tiempo de fraguado. Según las propiedades que se requieran o para auxiliar la molienda (p. 1).

2.2.5.3.2 Producción. Dada las variedades del CP, los procesos de fabricación y materias primas son diferentes, pero en general se pueden caracterizar las siguientes etapas (Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones, 2017):

1. Recolección y preparación de materias primas: Las canteras son dinamitadas para la extracción de materiales duros, mientras que, para los blandos, son extraídos con excavadoras.
2. Trituración: Todas las rocas extraídas son clasificadas y trituradas hasta obtener la granulometría deseada, posteriormente es trasladada por cintas a contenedores de la materia en crudo.
3. Pre-homogeneización: El material triturado es dosificado y almacenado en crudo, para su posterior molienda.
4. Molienda en crudo: El material pre-homogeneizado es molido hasta alcanzar una granulometría específica, posteriormente es almacenada en silos para incrementar la uniformidad de las mezclas.

5. Precalentador de ciclones: El material molido es introducido al horno, mientras que el material crudo es precalentado por los gases producidos por el material que se encuentra en el horno.
6. Fabricación del Clinker – Horno: el material es calentado hasta los 1500 °C, para así lograr el Clinker.
7. Fabricación del Clinker – Enfriador: El Clinker se introduce al enfriador, el cual inyecta aire frío del exterior disminuyendo la temperatura del Clinker de 1400 °C a 100 °C.
8. Molienda de Clinker y fabricación de cemento: El Clinker es mezclado con yeso y otras sustancias (dependiendo el tipo de cemento) en un molino, así teniendo como resultado el cemento con la granulometría final.
9. Almacenamiento del cemento: El cemento es almacenado en silos hasta su envasado.
10. Envasado o carga a granel: El cemento se ensaca o se descarga en un camión cisterna para su transporte.

2.2.5.3.3 Usos. Los diferentes tipos de CP permiten una variedad de usos, el más común es en construcciones civiles e industriales, permitiendo hacer desde una casa habitación hasta grandes presas (CEMEX, 2019).

2.2.5.4 Ceniza de Bagazo de Agave

El agave es la materia esencial para la producción de mezcal, puesto que para la producción de 1 litro de mezcal se necesitan entre 6 y 8 kg de agave (Cámara Nacional de la Industria Tequilera), es decir, que se generan entre 6 y 8 kg de bagazo de agave como residuo.

Oaxaca es uno de los estados con mayor producción a nivel nacional, con una participación del 85.40% de los 8,099,591 litros producidos a nivel nacional en 2022 (Comercio Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A.C., 2022).

2.2.5.4.1 ¿Qué es la CBA? Al ser uno de los desperdicios más abundantes y contaminantes del Estado de Oaxaca, muchas fábricas optan por incinerar estos desechos luego del proceso de destilación (en la producción del mezcal) disminuyendo los volúmenes de esta basura.

Al ser incinerado, este material pierde la MO, quedando metales pesados y sílice (SiO_2) en grandes cantidades. Está demostrado que la ceniza de paja de arroz contiene un 87-97% de sílice (Morsy et al., 2022).

2.2.5.4.2 Producción. Para la obtención de este material, es indispensable que el bagazo de agave esté seco e incinerarlo para obtener las cenizas; es importante apilarla para que se consuma la MO.

2.2.5.4.3 Usos. Los obreros usan la ceniza como remedio para la curación de las ollas de barro o cuando éstas presentan fisuras. Basta con humedecer la CBA y colocar una ligera capa en la fisura para corregir el defecto.

2.3 Agregados Pétreos

Los agregados pétreos constituyen un 60-75% del volumen total de las mezclas con cementos o arcillas. Estos tienen un predominio fundamental en las propiedades finales del vaciado (CEMEX, 2019).

La Norma N CMT 2 02 002/02 Materiales Para Concreto Hidráulico (2002b) define a los agregados como: “materiales pétreos naturales seleccionados: materiales sujetos a tratamientos de

disgregación, cribado, trituración o lavado, o materiales producidos por expansión, calcinación o fusión excipiente, que se mezclan con cemento Pórtland y agua, para formar concreto hidráulico” (p. 1).

2.3.1 Vidrio

Material totalmente inorgánico duro, pero muy frágil.

2.3.1.1 ¿Qué es el Vidrio? Es el resultado de la fundición de diversas sustancias minerales, tales como carbonatos o sales y arena a altas temperaturas (mayores a 1600°C) y luego vertido en moldes donde se moldean y enfrían. Este producto es uno de los materiales producidos con mayor antigüedad (Equipo editorial Etecé, 2023).

2.3.1.2 Usos. En la antigüedad, este era usado como remplazo de piedras preciosas, dado a su fácil manipulación de color y texturas, en la actualidad, éste es usado en la mayoría de rubros, principalmente en la industria alimenticia y la estética (Equipo editorial Etecé, 2023).

2.3.2 Arena

Es un agregado fino que se utiliza en el sector constructivo, este se compone principalmente por partículas pequeñas de rocas trituradas.

2.3.2.1 ¿Qué es la Arena? La norma N CMT 2 02 002/02 Materiales Para Concreto Hidráulico (2002b) define a la arena como: “Material seleccionado u obtenido mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre setenta y cinco (75) μm (malla No. 200) y cuatro coma setenta y cinco (4,75) milímetros (malla No. 4), pudiendo contener finos de menor tamaño [...]” (p. 1).

2.3.2.2 Usos. La arena fina se usa para albañilería y aplanados, mientras que la arena gruesa es mezclada con grava y se usa en la industria de la construcción para formar pisos o como parte de cimientos (Ferrex, 2022).

2.4 Herramientas Para el Análisis de Resultados

2.4.1 Coeficientes de Determinación

El coeficiente de determinación (R^2) es uno de los estadísticos más útiles para medir la calidad global del modelo de regresión múltiple. Se calcula por medio de la ecuación:

$$R^2 = \frac{SC_{total} - SC_{error}}{SC_{total}} \times 100 = \frac{SC_{modelo}}{SC_{total}} \times 100$$

este coeficiente compara la variabilidad explicada por el modelo frente a la variación total, a través de la suma de cuadrados (SC) cumpliendo con $0.0 \leq R^2 \leq 1.0$, en general se recomienda un R^2 de al menos 7.0 (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2008).

2.4.2 Coeficiente de Correlación

Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, mencionan que:

El coeficiente de correlación (R) mide la intensidad de la relación lineal entre dos variables X e Y. Si se tiene n pares de datos de la forma (x_i, y_i) , entonces este coeficiente se obtiene de la siguiente manera:

$$R = \frac{S_{xy}}{\sqrt{S_{xx}S_{yy}}}$$

El coeficiente de correlación cumple con $-1.0 \leq R \leq 1.0$, donde, para valores próximos a -1 se tiene una relación lineal negativa fuerte, por el contrario, si R es próximo a 1, se tiene una

relación lineal positiva fuerte, y si R es próximo a 0 entonces no se tiene correlación lineal (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2008).

Es importante tomar en cuenta que solo para el caso particular del modelo de la línea recta de regresión, existe una relación entre R y R^2 , ya que (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2008):

$$R^2 = \frac{SC_R}{S_{yy}} = \frac{\hat{\beta}_1 S_{xy}}{S_{yy}} = \frac{\frac{S_{xy}}{S_{xx}} S_{xy}}{S_{yy}} = \frac{(S_{xy})^2}{S_{xx} S_{yy}} = R^2$$

2.4.3 Análisis de Varianza

Devore (2008) menciona que:

El análisis de la varianza, o más brevemente, ANOVA, se refiere en general a un conjunto de situaciones experimentales y procedimientos estadísticos para el análisis de respuestas cuantitativas de unidades experimentales. El problema ANOVA más simple se conoce indistintamente como unifactorial, de clasificación única o ANOVA unidireccional e implica el análisis de datos muestreados de más de dos poblaciones (distribuciones) numéricas o de datos de experimentos en los cuales se utilizaron más de dos tratamientos.

La característica que diferencia los tratamientos o poblaciones una de otra se llama factor en estudio y los distintos tratamientos o poblaciones se conocen como niveles del factor (p. 369).

El ANOVA es la principal técnica de análisis de datos experimentales. Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar mencionan (2008) que: “La idea general de esta técnica es separar la variación total en las partes con las que contribuye cada fuente de variación en el experimento” (p. 65).

Su enfoque en la comparación de más de dos medias de población o tratamiento se expresa como:

i = Número de poblaciones o tratamientos que se están comparando.

$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_i$ = Media de la población i o la respuesta promedio verdadera cuando se aplica el tratamiento i .

Las hipótesis pertinentes son:

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_i$$

H_A : Por lo menos dos de las μ_i son diferentes.

En caso de rechazo de H_0 , se necesita realizar una búsqueda de la o las variables que no cumplan con la igualdad de medias, para ello se tiene que utilizar algún tratamiento de comparaciones de medias dos a dos (pruebas Post Hoc) (Aguilar et al., 2015), como lo pueden ser:

Tabla 5

Pruebas Post Hoc

Prueba Post Hoc	Características
LSD (Least Significant Difference)	<ul style="list-style-type: none"> • Basada en la distribución t de Student. • No tiene relación sobre la tasa de error. • Alto error tipo I. • El valor de F en el ANOVA debe ser significativo.

- Utiliza el mismo estadístico entre cada par de medias a comparar.
- Scheffé
- Basada en la distribución F.
 - El error se controla en parejas.
 - Muy conservador.
 - Es independiente de la muestra de cada par.
- Bonferroni
- Basada en la distribución t de Student.
 - Control en la tasa de error: división del nivel de significancia entre el número de comparaciones.
 - Se tiene interés en un conjunto.
- Tukey
- Siempre utiliza la misma diferencia mínima.
 - Las estimaciones son menos precisas si los tamaños muestrales son diferentes.
 - Se quiere estudiar todos los posibles pares de medias.
 - Tiene un control en la tasa de error.
- SNK (Student Neuman Keuls)
- Basada en la distribución del rango estudentizado.
 - Control de error por pasos.
 - Cambia la diferencia mínima por pasos.
 - Obtiene más pares significativos que Tukey.
 - Útil con diferentes tamaños de grupos.
- Duncan
- Basada en la distribución del rango estudentizado.
 - Menos potente que SNK.
 - Cambia la diferencia mínima entre pasos.
 - Útil para comprar con un grupo en específico.
-

Nota. Se muestran diferentes pruebas Post Hoc y sus principales características. Tomada de Análisis de experimentos (pp. 40-44), por J. Perea, 2021, Universidad de Córdoba.

Por el tipo de análisis para este estudio, se optó por el uso de la prueba post hoc de Tukey, la cual es representada por una matriz simétrica que muestra la diferencia entre medias de las filas menos las columnas, según se requiera.

Para realizar el ANOVA, se deben de cumplir con la suposición de normalidad y la suposición de homocedasticidad, las cuales son indispensables para determinar si es viable o no realizar el ANOVA y posteriormente la prueba post hoc. Para ello, existen dos formas para realizar cada una de las suposiciones, ya sea de manera gráfica o inferencial.

2.4.3.1 Suposición de Normalidad. La manera gráfica de presentar la suposición de normalidad es por medio de un gráfico de dispersión, en el cual los residuos se estandarizan y ordenan por rango. Los datos del eje de las Y serán los valores de Z, mientras que los del eje de las X es de los residuos. Para el cumplimiento de esta suposición, los datos deben tener una dispersión casi lineal.

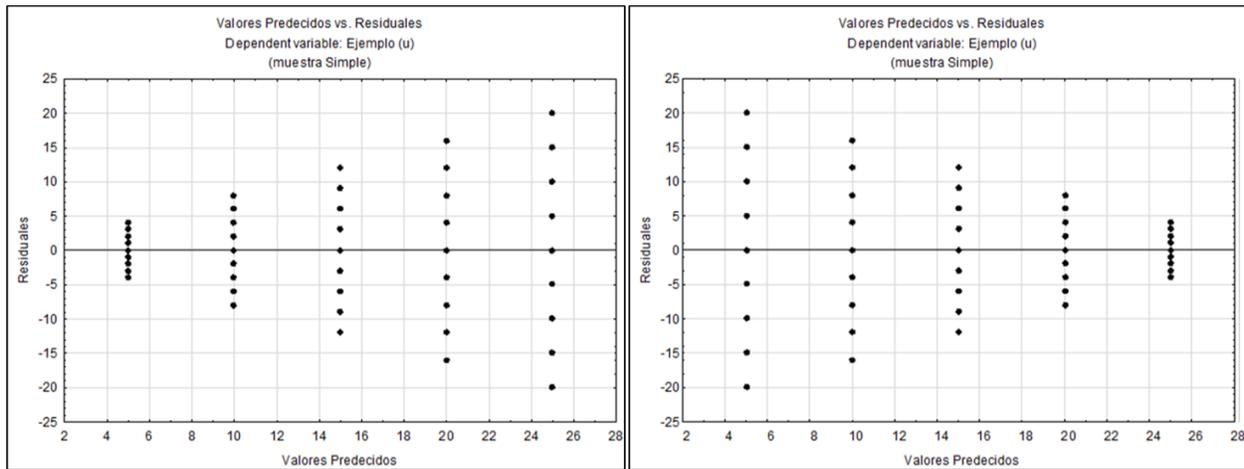
Para la manera inferencial, se lleva a cabo la prueba de Kolmogórov-Smirnov con corrección de Lilliefors, en la que el valor de significancia (D) debe ser > 0.05 . Si el resultado de la prueba es mayor, se afirma que los datos siguen una distribución normal.

2.4.3.2 Suposición de Homocedasticidad. Gráficamente se presenta esta suposición por medio de valores Esperados vs. Residuales, en la que los datos de las medias se encuentran en el eje de las X y en el eje Y los residuales. Para afirmar que las varianzas son homogéneas y cumplen con la suposición de homocedasticidad, la dispersión de los residuales no debe mostrar tendencias, por ejemplo, forma de cono, como se muestra en la Figura 3.

Para comprobarlo de manera inferencial, se realiza la prueba de Levene, cuyo valor de significancia debe ser > 0.05 para el caso del cumplimiento de la prueba de homocedasticidad.

Figura 3

Tipos de tendencia en el gráfico de valores Esperados vs. Residuales



Nota. Las figuras muestran los tipos de tendencia que se pueden tener en el gráfico de valores Esperados vs. Residuales.

CAPÍTULO 3. DESARROLLO DE LA METODOLOGÍA

La metodología usada en este trabajo de investigación consta de 10 fases, explicadas en el Capítulo 1 en el apartado Metodología, de las cuales ya se han desarrollado las primeras 5 fases en los dos capítulos anteriores y en este capítulo se encuentran las fases 6 y 7.

3.1 Diseño de Experimentos

El diseño de un experimento se basa en una decisión sobre qué prueba realizar y cómo obtener los datos, que al ser analizados estadísticamente brindan una prueba objetiva que permite responder a las preguntas planteadas al inicio del experimento, de esta forma aclara puntos inciertos de un proceso, da soluciones a un problema o se obtienen mejoras (Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, 2008).

Gutiérrez Pulido y de la Vara Salazar, en su libro "Análisis y diseño experimental" mencionan que, en general, existen 2 formas principales de obtener información importante para el diseño estadístico de experimentos, una de ellas se logra observando o monitoreando con la ayuda de herramientas estadísticas, hasta obtener una señal útil que permita solucionarlo; por lo general, esta táctica se conoce como pasiva. La otra es una estrategia experimental, es decir, se realizan cambios estratégicos y premeditados al proceso para provocarle señales útiles de acuerdo a lo investigado. Al obtener los datos de cualquiera de las modalidades, estos son analizados a fin de brindar una guía para la realización de mejoras. En relación con esto, el experimentar con las variables es mejor que esperar a que a estas le suceda algo "extraordinario" (2008).

El diseño experimental factorial, propuesto por Montgomery y Runger (2003), es una técnica eficaz en la experimentación con dos o más factores, en los cuales el experimentador considerará las variables de mayor importancia y las hace variar de forma controlada. En general,

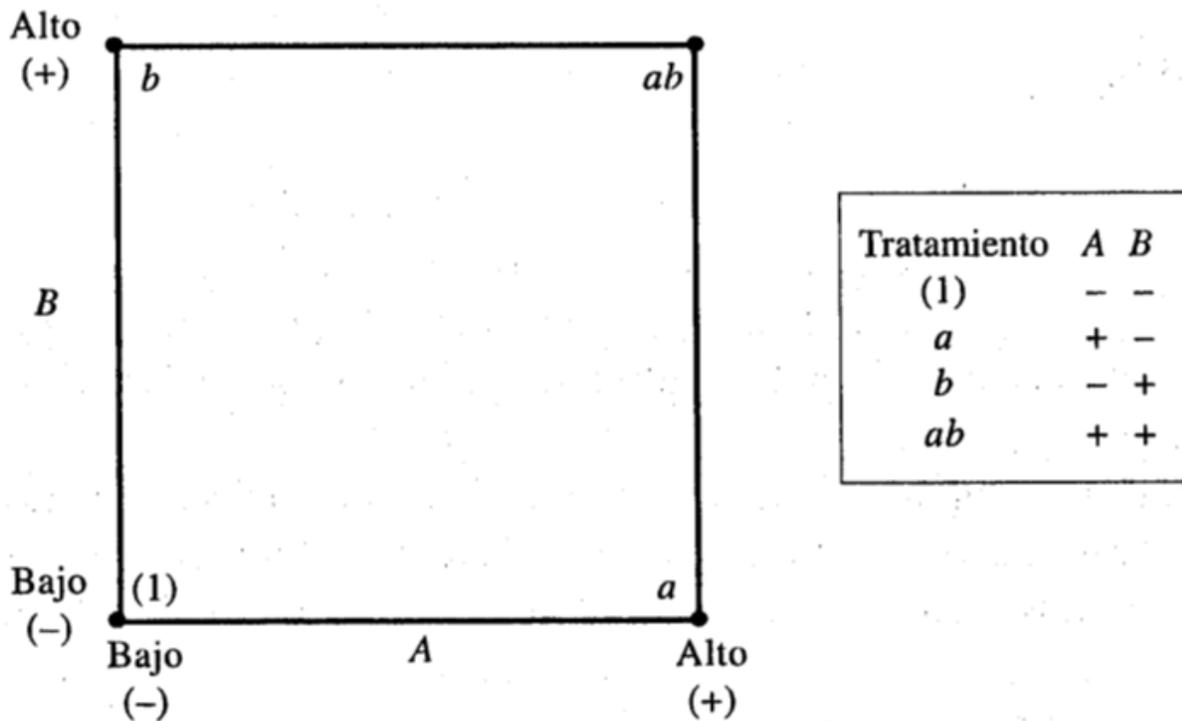
el diseño experimental factorial son un número n -ésimo de corridas, a fin de poder encontrar una relación entre la variabilidad de los factores y los resultados de cada una de las composiciones.

Montgomery y Runger (2003) mencionan que, para dar un enfoque estadístico al DoE, se deben respetar tres principios básicos:

- Replicación
- Aleatorización
- Análisis por bloques

Para este trabajo se usará el diseño factorial 2^k , el cual es de particular utilidad en etapas iniciales de un trabajo de investigación de muchos factores, puesto que proporciona el menor número de corridas con las que pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. Dado que solo son dos niveles para cada factor, debe suponerse que la respuesta es aproximadamente lineal en el rango escogido para los niveles de los factores (Montgomery y Runger, 2003).

El diseño factorial 2^k más sencillo es el 2^2 ; es decir solo dos factores A y B, cada uno tendrá solamente 2 niveles. Por lo general, estos niveles son denotados como nivel alto y nivel bajo del factor. De forma geométrica podemos denotar como un cuadrado (Figura 4) en el que las $2^2 = 4$ corridas o combinaciones de los tratamientos, los cuales forman los vértices del cuadrado. En el diseño 2^2 es común denotar los niveles alto y bajo de los factores A y B con los signos + y -, respectivamente, llamado notación geométrica del diseño (Montgomery y Runger, 2003).

Figura 4*Diseño factorial 2^k* 

Nota. Está figura ilustra el diseño factorial 2^k de forma geométrica. Tomado de *Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería* (p. 648), por D. Montgomery y G. Runger, 2003, LIMUSA WILEY.

3.2 Selección de Variables

Los materiales utilizados fueron: CBA, arcilla, vidrio, CP, yeso, arena y agua.

3.2.1 Ceniza de Bagazo de Agave

El bagazo de agave, se recolectó de una fábrica mezcalera ubicada en el cruce de Teotitlán del Valle en San Jerónimo Tlacoahuaya, Oaxaca, México. Posteriormente, se incineró y tamizó manualmente a una granulometría $< 300 \mu\text{m}$ (Malla No. 50) para eliminar las impurezas y tener un control en el tamaño de partícula.

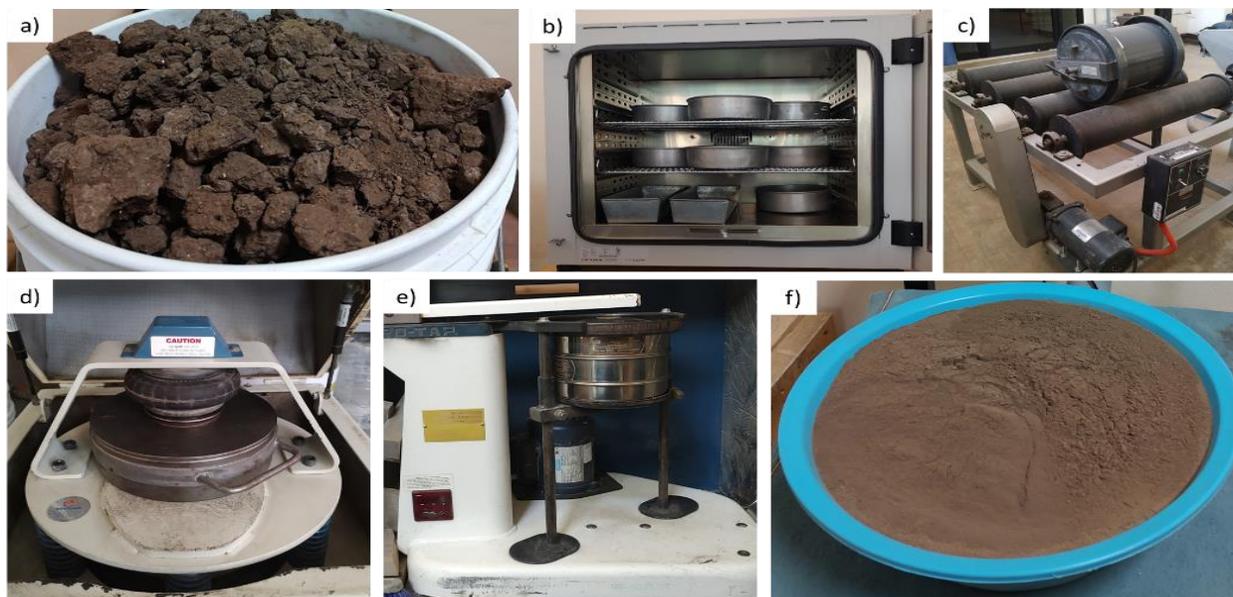
Figura 5*Etapas de la obtención de CBA*

Nota. a) Recolección del bagazo de agave seco, b) Ceniza de bagazo de agave, c) Tamices usados, d) Material que paso la malla No. 50 ($< a 300 \mu\text{m}$) y e) Material que se quedó por encima de la malla No. 50 ($> a 300 \mu\text{m}$).

3.2.2 Arcilla

La arcilla usada para este trabajo fue recolectada en el municipio de San Jerónimo Silacayoapilla, Oaxaca, México; secada en el horno desecador BINDER APT Line Serie BD a 150°C por 24 horas para posterior molienda en el molino de bolas ROD MILL 010E-12 y el pulverizador de anillos STANDART RING MILL CPB. Finalmente fue cribada en el tamizador RO-TAP RX-29 hasta obtener una granulometría $< a 105 \mu\text{m}$ (malla No. 140).

Antes del almacenamiento, esta fue dispersada homogéneamente para así poder tener una mejor distribución de partículas, de igual manera, al realizar el pesado del material para las mezclas, la arcilla fue separada por el partidor de muestras tipo JONES 040G-025 MODEL 70.

Figura 6*Procesamiento de la arcilla*

Nota. a) Arcilla en bruto, b) Arcilla en proceso de secado en el horno desecador BINDER APT Line Serie BD, c) Arcilla en proceso de molienda en el molino de bolas ROD MILL 010E-12, d) Arcilla en proceso de pulverización en el pulverizador de anillos STANDART RING MILL CPB, e) Arcilla en proceso de tamizado en el tamizador RO-TAP RX-29, f) Arcilla con granulometría <math>< 105 \mu\text{m}</math> (malla No. 140).

3.2.3 Vidrio

El vidrio usado -vidrio reciclado- procede del vidrio triturado y almacenado en las instalaciones del IM en la UTM; proviene de televisores en desuso, botellas de refrescos y licores, ventanas rotas de los eventos sísmicos, principalmente. Primero fue lavado para eliminar las impurezas y etiquetas, seguidamente se rompió con ayuda de un martillo de mango largo dentro de una cubeta para su posterior molienda en el molino PULVEX PLASTIC 250 (manufactura nacional), por último, fue pasado por el tamizador RO-TAP RX-29 hasta obtener una granulometría <math>< 2380 \mu\text{m}</math> (malla No. 8).

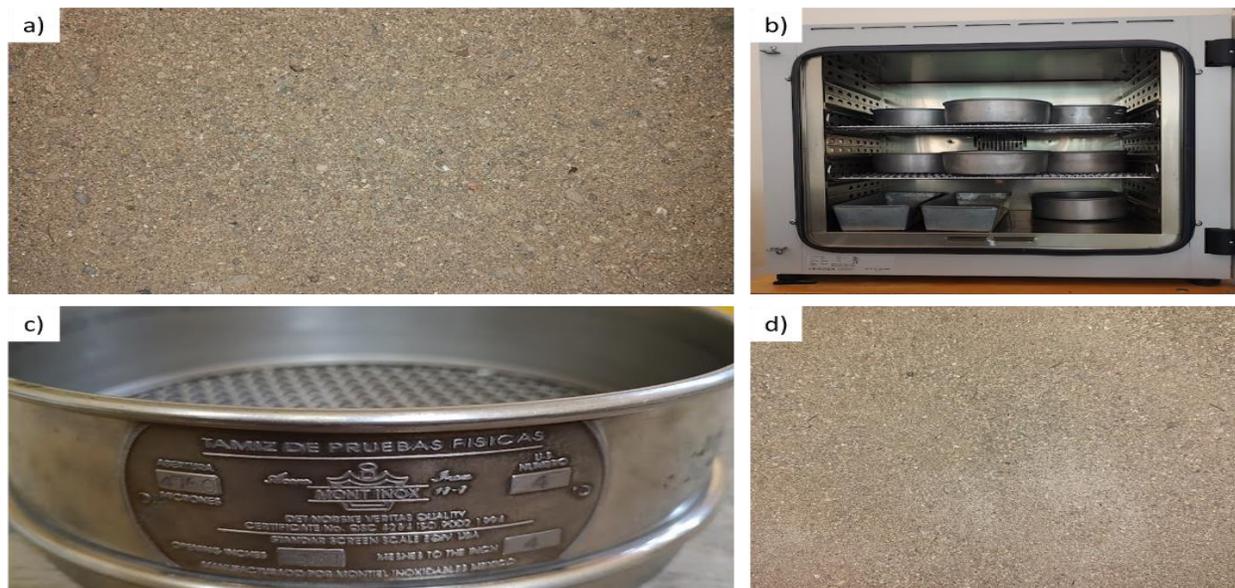
Figura 7*Procesamiento del vidrio*

Nota. a) Desechos de vidrio con etiqueta, b) Desechos de vidrio lavado, c) Desechos de vidrio quebrado, d) Molino de Vidrio PULVEX PLASTIC 250, e) Tamiz usado en el proceso de tamizado en el equipo RO-TAP RX-29 y f) Material con granulometría < a 2380 μm (malla No. 8).

3.2.4 Arena

La arena⁵ fue comprada en una tienda de materiales ubicada en el centro de la Ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca. Para su uso, fue secada en el horno desecador BINDER APT Line Serie BD a 150 °C por 24 horas, después fue tamizada manualmente a una granulometría < a 4760 μm (malla No. 4).

⁵ En geología, la arena es un material compuesto por partículas que varían en tamaño de 0.063 a 2 mm. Una partícula individual en este rango se llama grano de arena o clasto de arena, una roca consolidada y compuesta por estas partículas se denomina arenisca (o psamita) o calcarenita, si los componentes son calcáreos. Las partículas por debajo de 0.063 mm a 0.004 mm se denominan limo y las partículas más grandes que un grano de arena hasta 64 mm como grava. El componente más común en la arena, en ambientes continentales y en costas no tropicales, es la sílice, principalmente en forma de cuarzo. Sin embargo, la composición de la arena varía según a procedencia de esta, por ejemplo, la arena fina que se encuentra en los arrecifes de coral, contiene piedra caliza molida, que ha sido digerida por los peces loro. En otros casos su contenido es de hierro, feldespato o yeso, a consecuencia, su apariencia varía dependiendo de la roca de origen (Muciño Vélez y Santa Ana Lozada, 2017).

Figura 8*Procesamiento de la arena*

Nota. a) Arena de construcción, b) Arena en proceso de secado en el horno desecador BINDER APT.Line Serie BD, c) Tamiz usado en el tamizado manual de la arena y d) Arena con granulometría < a 4760 μm (malla No. 4).

3.3 Diseño de Mezclas

Para el diseño de mezclas, se definieron las variables usadas en este proyecto de investigación, las cuales se presentan en la Tabla 7:

Tabla 6*Variables del experimento*

Variable	Notación	Variación (%)
Ceniza de Bagazo de Agave	ag	10 y 20
Cemento Portland	cp	10, 20 y 30
Yeso	y	30
Arena	A	15 – 70
Vidrio	v	10, 25 y 35

Nota. Todas las variables variaron respecto a la masa total en seco de las mezclas.

Mientras que las constantes se muestran en la Tabla 8:

Tabla 7

Constantes del experimento

Constantes	Notación	Valor
Arcilla	a	30% ^a
Relación Agua/Cementantes	aa/c	80% ^b

Nota. ^a del total de la mezcla elaborada, ^b del total de cementante agregado.

La investigación realizada se fundamenta en el enfoque de investigación cuantitativo experimental puro propuesta por Hernández Sampieri, del cual se realiza el DoE que queda de la siguiente manera:

Para la elaboración del adobe de referencia se realizó una mezcla de arcilla, agua y arena

$$\text{arcilla} + \text{agua} + \text{arena}$$

Mientras que, para el adobe compuesto, se realizaron sustituciones porcentuales de arena por vidrio y la adición de cementante:

$$\text{arcilla} + \text{agua} + \text{arena/vidrio} + \text{cementante}$$

Por motivos de ahorro de material se dividió el experimento en dos etapas, en la primer etapa se priorizó la sustitución de la arena por vidrio; en la segunda etapa se realizó la adición del cementante.

3.3.1 Primera etapa

La mezcla para la primer etapa fue la siguiente:

$$\text{arcilla} + \text{agua} + \text{arena/vidrio}$$

Por lo que, el diseño factorial sobre el comportamiento de las mezclas propuso 3 factores iniciales (Tabla 9).

Tabla 8

Propuesta de 3 factores iniciales

Factor	Material
A	Arcilla
B	Agua
C	Arena

Dada la existencia de una relación $a/c = 0.8$ y la adición de un nuevo factor (vidrio), se replantearon los factores (Tabla 10):

Tabla 9

Factores replanteados

Factor	Material
A	Agua / Arcilla
B	Arena
C	Vidrio

La sustitución de arena por vidrio fue la siguiente (Tabla 11):

Tabla 10*Sustitución de arena por vidrio*

N° Corrida	Vidrio (%)	Arena (%)
Referencia (Ref.)	0	70
1	10	60
2	25	45
3	35	35

Nota. Las proporciones fueron en relación a la masa total en seco de la mezcla.

Por consiguiente, las mezclas de la primer etapa quedaron de la siguiente manera (Tabla 12):

Tabla 11*Mezclas de la primera etapa*

No. Corrida	Arcilla (%)	Vidrio (%)	Arena (%)
Ref.	30	0	70
1	30	10	60
2	30	25	45
3	30	35	35

Nota. Todos los materiales fueron agregados a proporción de la masa total en seco de la mezcla.

3.3.2 Segunda etapa

Los resultados de la primera etapa mostraron que la mezcla de la segunda corrida (Tabla 12):

$$30a - 25v - 45A$$

obtuvo la mejor resistencia a la compresión. Esta es la mezcla que se eligió para la siguiente etapa de experimentación que consistió en añadir cementante, presentándose esquemáticamente de la siguiente manera:

$$\frac{\text{arcilla}}{\text{agua}} + \text{vidrio} + \text{arena} + \text{cementante extra}$$

En la Tabla 13, se muestran los factores de la segunda etapa.

Tabla 12

Factores de la segunda etapa

Factor	Material
A	Agua/Arcilla
B	Vidrio
C	Arena
D	Cementante

Para la adición del cementante se consideró constante los contenidos de arcilla y vidrio (mezcla 30a-45A-25v) que según la gráfica de la Figura 13 presentaron los más altos valores de

resistencia a la compresión en comparación a las otras mezclas; las variables fueron: la arena y el cementante extra (CE), quedando en las siguientes proporciones:

Tabla 13

Adición de cementante extra por arena

Arena (%)	Cementante extra (%)
35	10
25	20
15	30

Nota. Las proporciones fueron en relación a la masa total en seco de la mezcla.

De modo que, las mezclas de la segunda etapa fueron:

Tabla 14

Mezclas de la segunda etapa

No. Corrida	Arcilla/agua (%) <i>constante</i>	Vidrio (%) <i>constante</i>	CP (%)	CBA (%)	Yeso (%)	Arena (%)
4	30	25	10	-	-	35
5	30	25	20	-	-	25
6	30	25	-	10	-	35
7	30	25	-	20	-	25
8	30	25	30	-	-	15
9	30	25	-	-	30	15

Nota. Las proporciones fueron en relación a la masa total en seco de la mezcla.

3.4 Elaboración de Mezclas para probetas

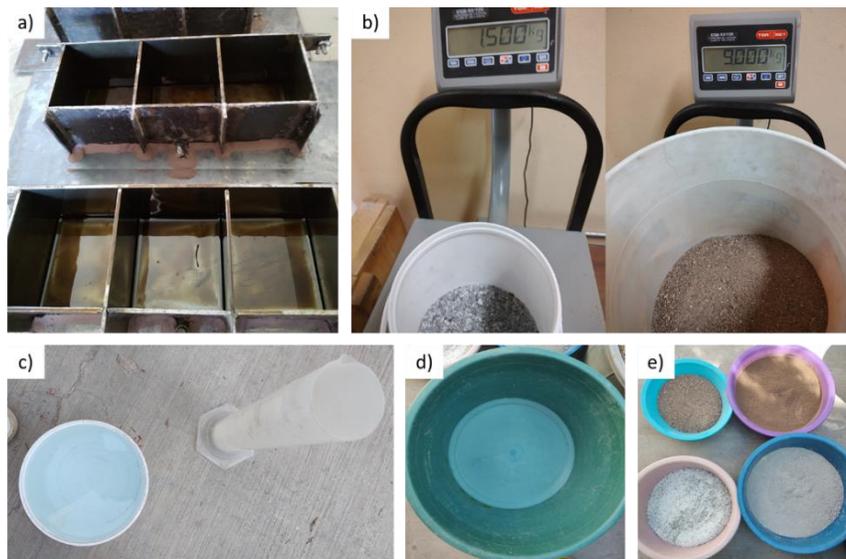
El método que se empleó para realizar las mezclas fue manual.

Los pasos para la preparación del área y materiales fueron:

1. Limpieza del área de trabajo.
2. Armado de moldes.
3. Engrasado de moldes (Figura 9a).
4. Preparación de los recipientes a usar (cubetas, tinas y jícaras, Figura 9d).
5. Preparación de las herramientas a usar (varilla punta de bala, cuchara de albañilería, probeta graduada).
6. Pesado de los materiales a usar según la mezcla (Figura 9b).
7. Medición del agua a usar respecto a la relación aa/c (para esto se empleó una cubeta de 20 l, Figura 9c).

Figura 9

Preparación de materiales



Nota. a) moldes armados y engrasados, b) pesado de materiales, c) Medición del agua para la mezcla, d) Tina para la mezcla y e) Material pesado.

Los pasos para la elaboración de las probetas de las dos primeras etapas fueron:

1. Vaciado de los agregados (vidrio y arena) a la tina que se empleó para la mezcla (Figura 10a y 10b).
2. Pre-mezclado de los agregados (solamente cuando se integren ambos agregados).
3. Vaciado de la arcilla y cementantes a los agregados pre mezclados (Figura 10c).
4. Mezclado de todos los materiales sólidos (Figura 10d).
5. Vaciado del agua a la mezcla (Figura 10e).
6. Mezclado por 10 minutos (Figura 10f y 10g).
7. Vaciado de la mezcla homogenizada a los moldes previamente preparados a un 75% de la capacidad de cada cubo.
8. Se pica 20 veces cada muestra con la varilla punta de bala para desalojar todo el aire atrapado en la muestra y garantizar que las esquinas de los cubos estén llenas.
9. Llenado de los moldes con la mezcla (Figura 10h).
10. Enrasar la mezcla para alisar la cara.
11. Secado al sol.
12. Desmolde de probetas.
13. Secado de probetas en el horno desecador BINDER APT.Line Serie BD por 24 horas a 50°C.
14. Marcado de probetas.
15. Almacenado de probetas hasta el día del ensayo a compresión en un lugar sin humedad ni expuesto al sol.

Se elaboraron las mezclas por la mañana, para secar la mezcla durante el día y desmoldar al día siguiente.

Figura 10

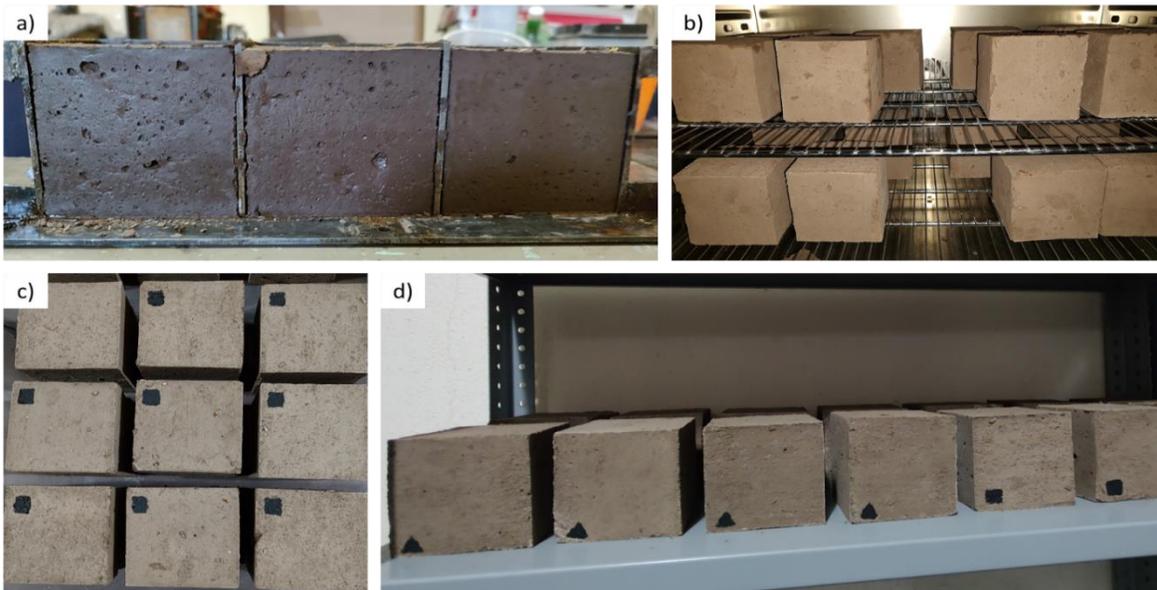
Preparación de las mezclas



Nota. Mezcla 30a-45A-25v (corrida No. 2).

Figura 11

Desmolde, secado y almacenado de probetas



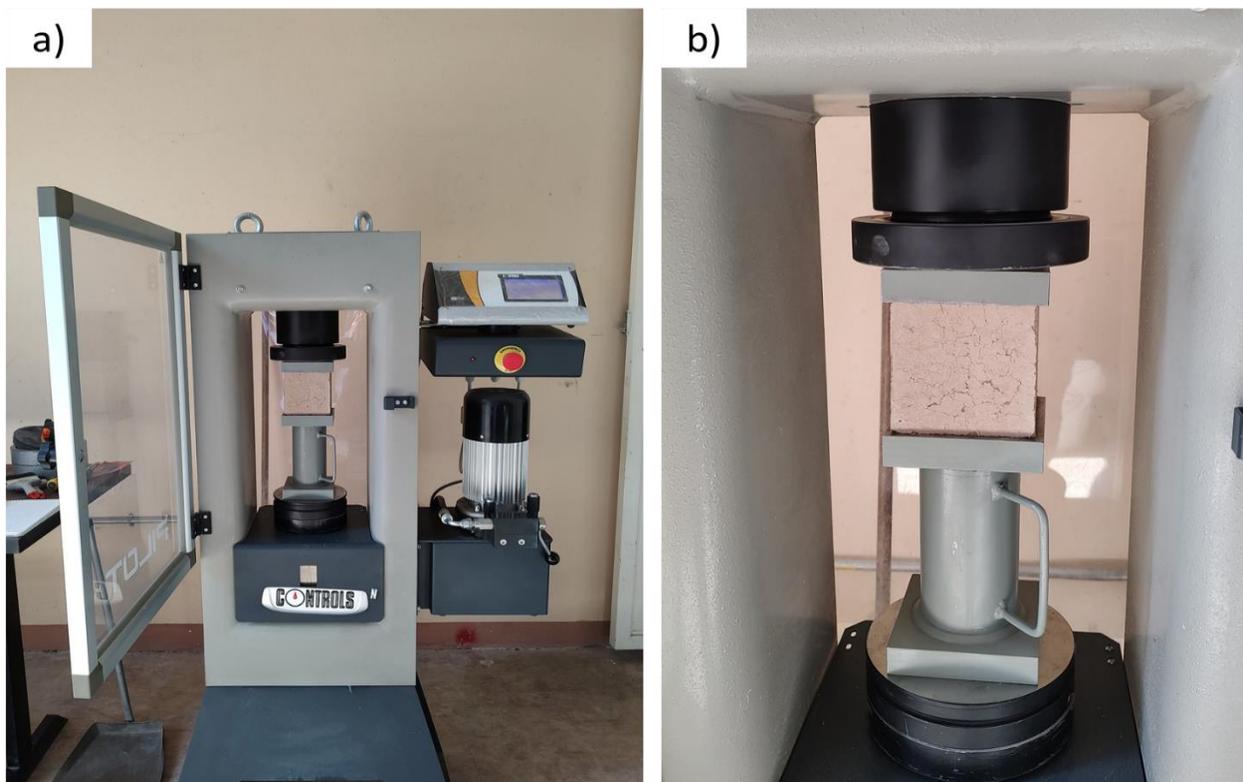
Nota. a) Desmolde de probetas (Probetas de referencia), b) Probetas dentro del horno desecador BINDER APT Line Serie BD después de 24 horas a 50 °C, c) Marcado de Probetas y d) Almacenado de probetas.

3.5 Pruebas de resistencia a compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron en el equipo de compresión automática PILOT COMPACT-LINE de 1500 kN (Figura 12a) con accesorio para ensayos a cubos de 10·10·10 cm.

Figura 12

Equipo de compresión automática PILOT COMPACT-LINE



Nota. a) equipo de compresión automática PILOT COMPACT-LINE, b) ajuste para compresión de cubos de 10·10·10 cm.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se mencionó, la metodología usada consta de 10 fases, se han expuesto 7 y, en este capítulo se aborda la octava (recolección de datos), novena (análisis de resultados) y décima (discusión y conclusiones).

4.1 Recolección de los datos

En la fase, recolección de datos, se presentan los resultados obtenidos de cada uno de los ensayos a compresión realizados en el presente trabajo. Todos los resultados están tabulados por grupos y graficados en total de corridas, para facilitar el análisis de resultados.

Cada mezcla tuvo variaciones en la cantidad de arena total utilizada, dado que en la primera etapa se sustituyó la arena por vidrio, y en la segunda etapa la sustitución fue por un cementante extra (CP o CBA); para todas las mezclas se usó la relación arcilla/agua = 0.8, con un tiempo de mezclado de 10 minutos. Uno de los aspectos importantes fue el mezclado, ya que este se realizó manualmente para igualar las condiciones de cada mezcla, y así tener un mejor control de las variables.

Los datos obtenidos del ensayo a la resistencia a la compresión de la primera etapa se muestran en la Tabla 16 y Figura 13, mientras que los datos obtenidos del ensayo a la resistencia a la compresión de la segunda etapa se muestran en la Tabla 17 y Figura 14, finalmente en la Figura 15 se muestran los resultados obtenidos de todos los ensayos a compresión realizados.

Tabla 15

Datos de la primera etapa

Número de probeta	Ref. 30a-70A-ref	Corridas (MPa)		
		1 30a-10v-60A	2 30a-25v-45A	3 30a-35v-35A
1	1.09	1.17	1.32	0.86
2	1.12	1.18	1.32	0.87
3	1.13	1.20	1.32	0.88
4	1.14	1.22	1.33	0.88
5	1.16	1.22	1.34	0.88
6	1.17	1.23	1.38	0.89
7	1.19	1.23	1.38	0.90
8	1.20	1.24	1.39	0.91
9	1.21	1.26	1.41	0.93
Promedio	1.16	1.22	1.35	0.89

Figura 13

Resultados de la primera etapa

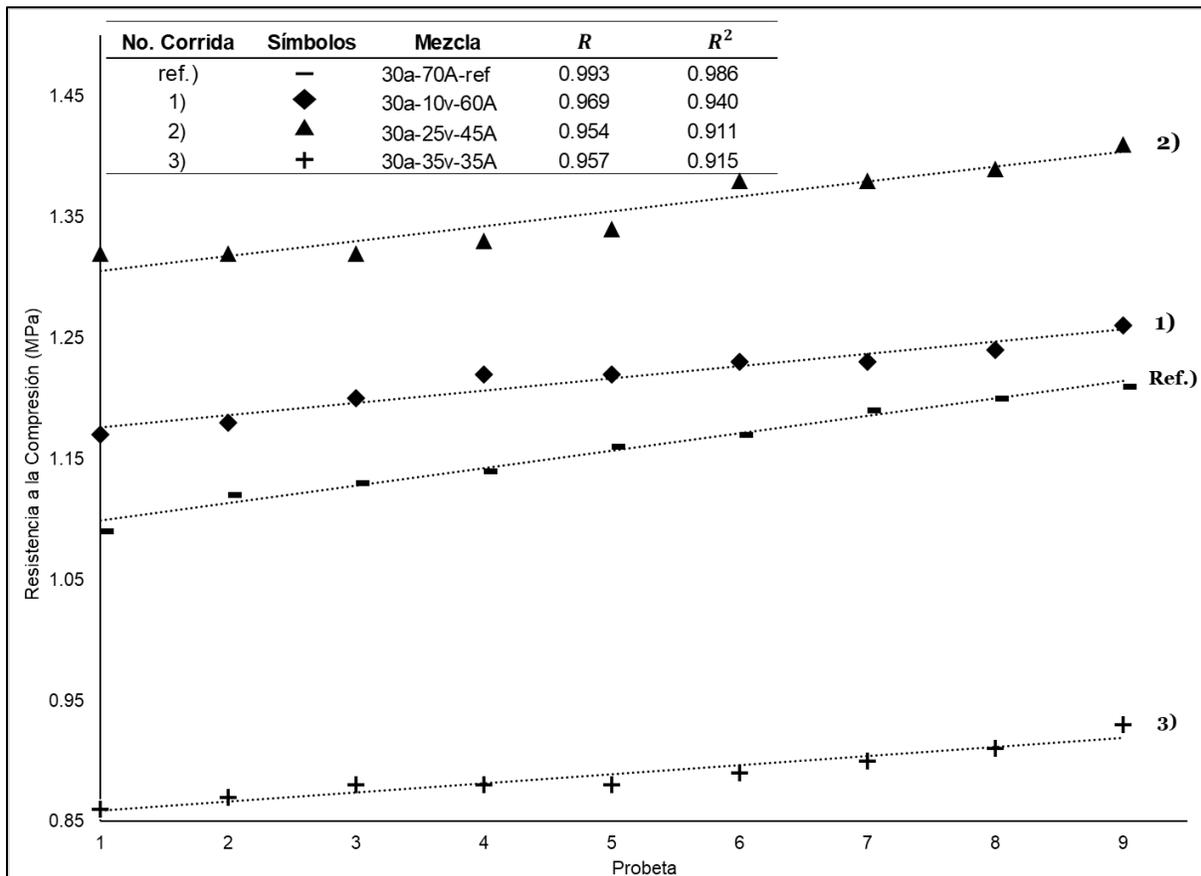


Tabla 16*Datos segunda etapa*

Número De probeta	Corridas (MPa)						
	2	4	5	6	7	8	9
	45A-25v-30a	35A-10cp-25v-30a	25A-20cp-25v-30a	35A-10ag-25v-30a	25A-20ag-25v-30a	15A-30cp-25v-30a	15A-30y-25v-30a
1	1.32	0.63	1.44	1.20	1.10	1.59	1.32
2	1.32	0.63	1.45	1.22	1.12	1.61	1.39
3	1.32	0.63	1.49	1.24	1.13	1.64	1.40
4	1.33	0.67	1.49	1.26	1.13	1.68	1.41
5	1.34	0.67	1.49	1.27	1.14	1.69	1.42
6	1.38	0.67	1.55	1.28	1.17	1.69	1.45
7	1.38	0.68	1.55	1.28	1.17	1.70	1.46
8	1.39	0.68	1.56	1.29	1.20	1.73	1.47
9	1.41	0.68	1.61	1.31	1.22	1.78	1.48
Promedio	1.35	0.66	1.51	1.26	1.15	1.68	1.42

Figura 14

Resultados de la segunda etapa

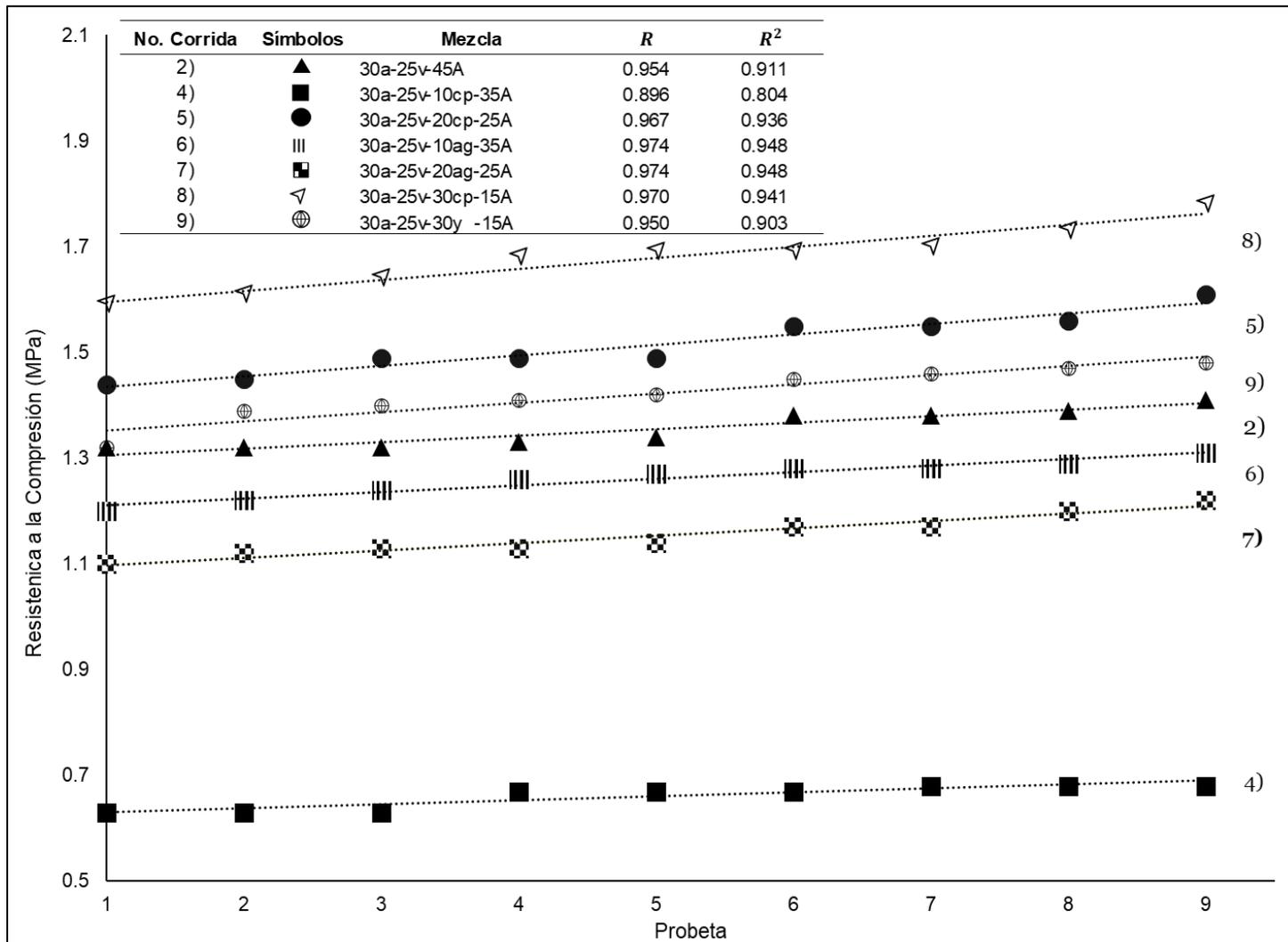
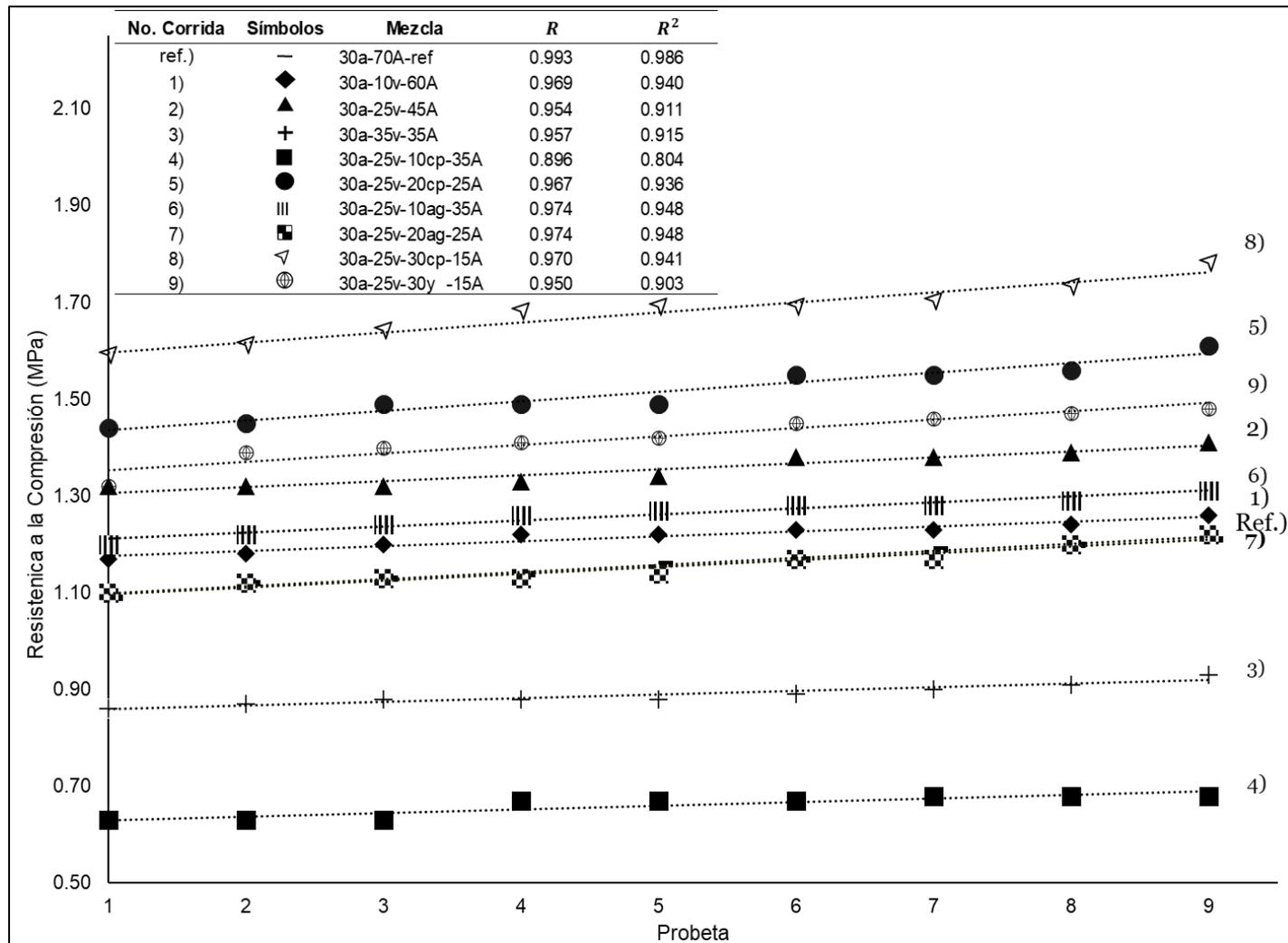


Figura 15

Resultados obtenidos de los ensayos a resistencia a la compresión



4.2 Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se recurrió a los datos obtenidos del coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de correlación (R) y análisis de varianza univariable (ANOVA One-Way) con prueba Post-Hoc de Tukey HSD. Todos los análisis se hacen por etapas, controlando los errores e interpretando los resultados.

4.2.1 Análisis de la Primer Etapa

Se evaluó los coeficientes de correlación (R) y determinación (R^2) de las 4 primeras corridas (ref., 1, 2 y 3).

Tabla 17

Coefficiente de correlación (R) y determinación (R^2) de la primera etapa

No. Corrida	Mezcla	R	R^2
ref.)	30a-70A-ref	0.993	0.986
1)	30a-10v-60A	0.969	0.940
2)	30a-25v-45A	0.954	0.911
3)	30a-35v-35A	0.957	0.915

Se observa en la Tabla 18, que los valores obtenidos de los coeficientes de correlación (R) se encuentran en el rango establecido de $-1.0 \leq R \leq 1.0$, próximos a 1, por lo que la relación entre las variables se ajusta a una línea imaginaria trazada entre los datos, ya que la correlación examina la linealidad de las relaciones entre los datos analizados. Explicado de otra forma, cuanto

más se aproxima R a 0, más débil es la relación lineal, es decir, cuánto más se aproxima a 1, más fuerte la relación lineal. Los valores de R presentan una relación lineal positiva fuerte, por la cercanía al valor de 1.

Por otro lado, los valores del coeficiente de determinación (R^2) también son mayores al 0.7 tomado por la literatura especializada como valor de referencia, encima del cuál, el ajuste del modelo será mayor. R^2 es la proporción de varianza total de la variable explicada por la regresión, en otras palabras, refleja la bondad del ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar. El coeficiente de determinación puede tomar valores entre 0 y 1. Cuando los datos obtenidos son cercanos a 1, mayor resultará el ajuste del modelo a la variable que se estudia. Valores cercanos a 0 indican un menor ajuste del modelo a la variable estudiada y dicho modelo es mucho menos fiable. En este trabajo de investigación, los datos obtenidos para la población analizada, están cercanos al 1, lo que indica mínima variabilidad y, que los procedimientos de elaboración y ensayado de las muestras fue sistemática y cuidadosa.

Seguidamente esta población de datos se examina mediante el ANOVA. Para el supuesto de normalidad se gráfica la probabilidad normal y la prueba de Kolmogórov-Smirnov con corrección de Lilliefors (D). La prueba de Kolmogórov-Smirnov (con la corrección Lilliefors) se utiliza para contrastar si un conjunto de datos que se ajustan o no a una distribución normal. La literatura especializada establece que D debe ser $>$ a 0.05 para que los datos se ajusten a una distribución normal. La tabla 19 presenta un valor para D de 0.085931, por lo tanto, los datos sí se ajustan a una distribución normal.

Figura 16

Gráfico de probabilidad normal primera etapa

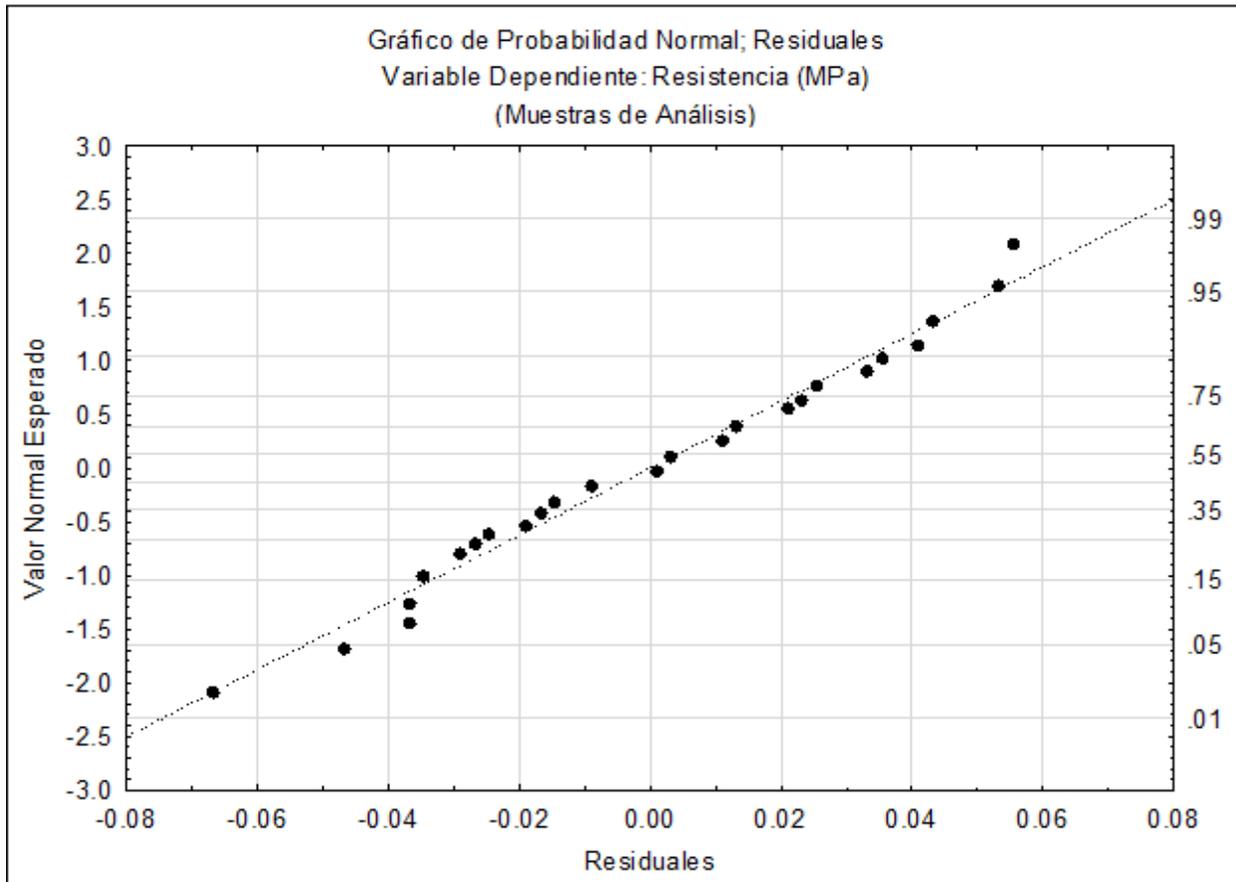


Tabla 18

Prueba de Kolmogórov-Smirnov con corrección de Lilliefors primera etapa

	N	Max D	Lilliefors - p
Residuales	36	0.085931	p > .20

En la Figura 16 se observa que los datos (puntos) están muy cercanos a la línea, por lo que, se afirma que cumplen con una distribución normal, y esto es comprobado con los cálculos realizados con la prueba Kolmogórov-Smirnov con corrección de Lilliefors (Tabla 19), concluyendo que los datos tienen una distribución normal.

La prueba de homocedasticidad, se llevó a cabo mediante el gráfico de valores esperados vs residuales y la prueba de inferencia de Levene, como se muestra a continuación.

Figura 17

Gráfico de valores esperados vs residuales primera etapa

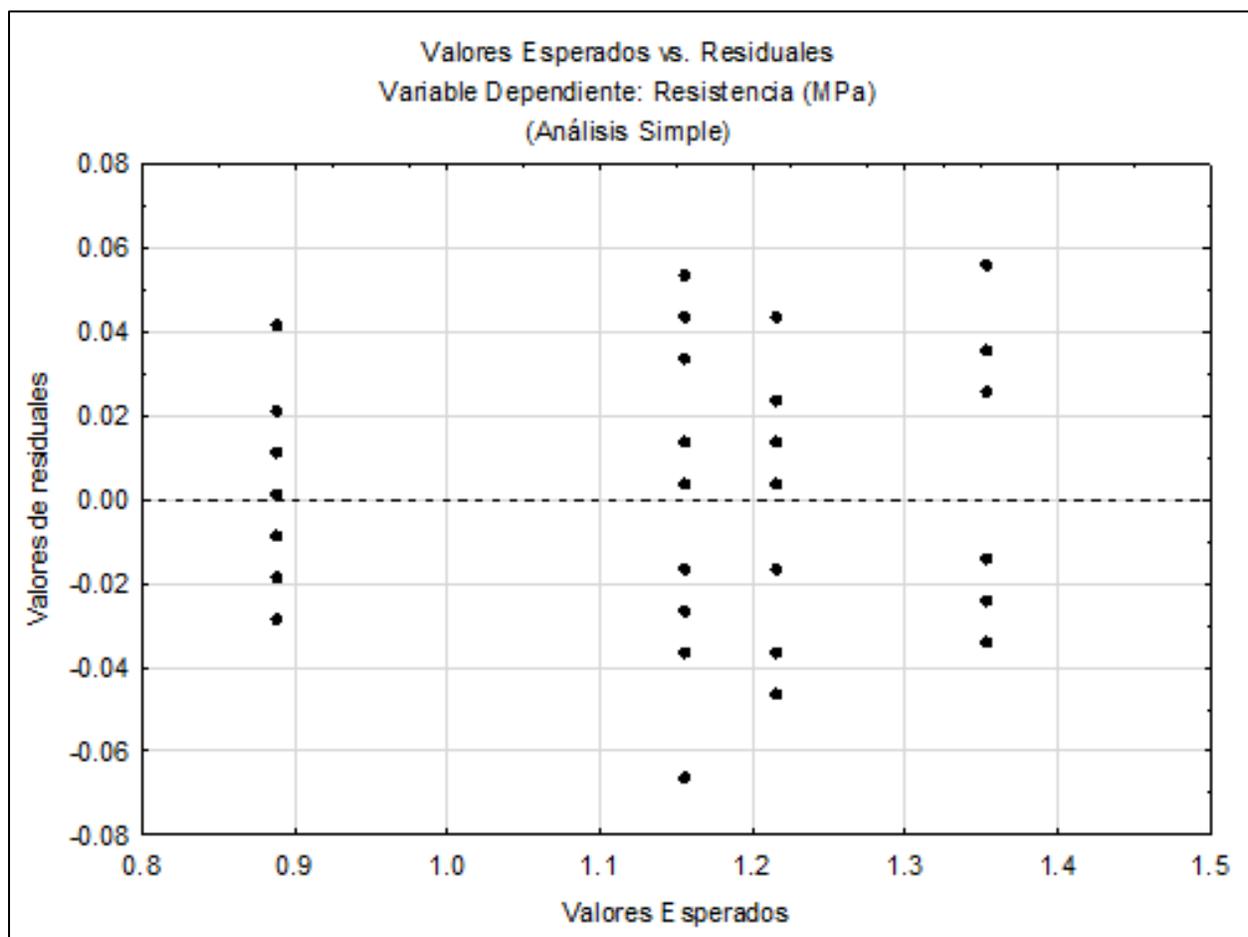


Tabla 19*Prueba Levene primer etapa*

Prueba de Levene para Homogeneidad de Varianzas. Efecto: Tipo Grados de Libertad para todos los F's: 3, 32

	MS - Efecto	MS - Error	F	p
Resistencia (MPa)	0.000535	0.000239	2.236689	0.102989

En la Figura 17 se observa que ninguno de los datos de residuales tiene tendencia (forma de cono según el ejemplo de la Figura 3), por lo tanto, existe homocedasticidad. La prueba de Levene (Tabla 20) se muestra un valor $p = 0.1029$, mayor a 0.05, consecuentemente, confirma la homocedasticidad.

Una vez determinado los supuestos (normalidad y homocedasticidad), se realizó el ANOVA (con software Statistica y de forma manual, cálculos en el Apéndice A), obteniendo los siguientes datos:

Tabla 20*Resultados de ANOVA univariable primera etapa*

Resultados Univariados Para Cada DV. Parametrización por Sigma. Descomposición de Hipótesis Efectiva

	Grados de Libertad	Resistencia (MPa) - SS	Resistencia (MPa) - MS	Resistencia (MPa) - F	Resistencia (MPa) - p
Intersección	1	47.95562	47.95562	46346.38	0.00
Tipo	3	1.02956	0.34319	331.67	0.00
Error	32	0.03311	0.00103		
Total	35	1.06267			

Se lee de la Tabla 21, que el valor de p es menor (0.00) que 0.05, por lo tanto, se rechazó H_0 . La probabilidad que el estadístico de prueba F con valor de 331.67 pertenezca a la distribución $f(0.05,3,32)$ es muy grande respecto al valor establecido de 2.8., por lo que también se rechazó H_0 . Las poblaciones de datos de la primera etapa de este trabajo de investigación tienen un efecto importante, es decir, que la sustitución de arena por vidrio tiene impacto en la resistencia a la compresión.

Para conocer la diferencia entre las mezclas ensayadas y la referencia, se realizó la prueba Post-Hoc de Tukey (LSD), que muestra una matriz simétrica, en la que las intersecciones se comparan (renglones y columnas), es decir, la confluencia es el nivel de probabilidad para la comparación entre factores.

Tabla 21

Prueba Post-Hoc primer etapa

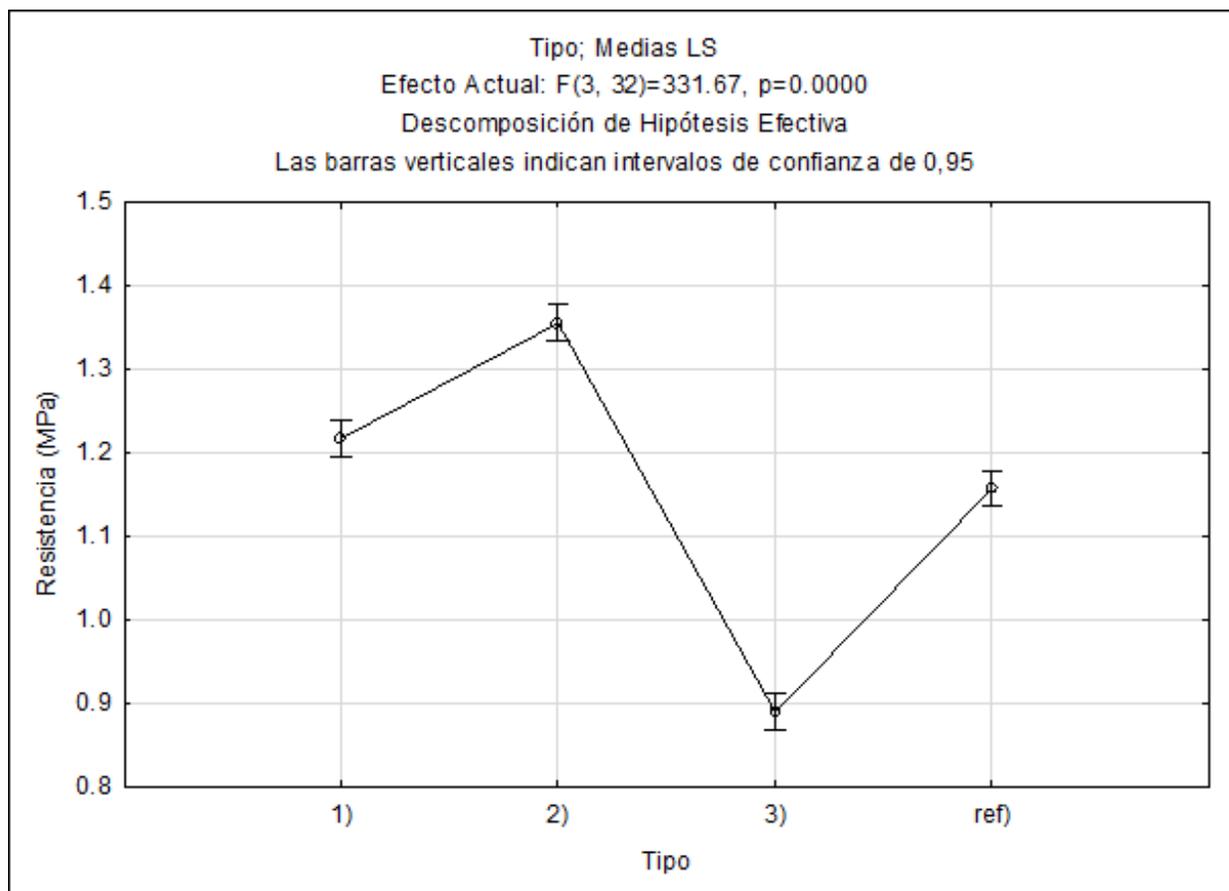
Prueba de Tukey HSD; variable Resistencia (MPa). Probabilidades Aproximadas Para Pruebas Post Hoc Error: Entre MS = .00103, df = 32.000

Tipo	{1} - 1.2167	{2} - 1.3544	{3} - 0.88889	{4} - 1.1567
1 1)		0.000165	0.000165	0.002242
2 2)	0.000165		0.000165	0.000165
3 3)	0.000165	0.000165		0.000165
4 Ref.)	0.002242	0.000165	0.000165	

Se muestra en la Tabla 22, que todos los factores tienen diferencias significativas. Consecuentemente en la Figura 18, se puede notar que la corrida 2 es la que tiene mejor resistencia a la compresión y la corrida 3, la peor resistencia a la compresión.

Figura 18

Gráfico de medias primer etapa



4.2.2 Análisis de la Segunda Etapa

Se evaluó los coeficientes de correlación (R) y determinación (R^2) de las corridas 2, 4, 5, 6, 7, 8 y 9.

Tabla 22

Coefficiente de correlación (R) y determinación (R²) de la segunda etapa

No. Corrida	Mezcla	R	R ²
2)	30a-25v-45A	0.954	0.911
4)	30a-25v-10cp-35A	0.896	0.804
5)	30a-25v-20cp-25A	0.967	0.936
6)	30a-25v-10ag-35A	0.974	0.948
7)	30a-25v-20ag-25A	0.974	0.948
8)	30a-25v-30cp-15A	0.970	0.941
9)	30a-25v-30y -15A	0.950	0.903

La Tabla 23 muestra los valores obtenidos para el coeficiente de correlación (R), comprendidos en el rango de $-1.0 \leq R \leq 1.0$. Se lee todos son próximos al valor de 1, por lo que, del mismo modo que en la primer etapa, la relación entre las variables es fuerte y, se ajustan a una línea imaginaria trazada entre los datos.

Respecto a los valores de coeficiente de determinación (R²), los datos son mayores al 0.70 y muy próximos a 1, consecuentemente demostrando la bondad del ajuste del modelo, es fiable, lo que supone que los procedimientos de elaboración y ensayado de las muestras de la segunda etapa, también fue rigurosa y cuidadosa.

Estas poblaciones de datos se examinaron mediante el ANOVA. Se comprueban los supuestos de normalidad y homocedasticidad con las mismas herramientas planteadas en la primera etapa.

Para el supuesto de normalidad se realizó el gráfico de probabilidad normal y la prueba de Kolmogórov-Smirnov Lilliefors (D).

Figura 19

Gráfico de probabilidad normal segunda etapa

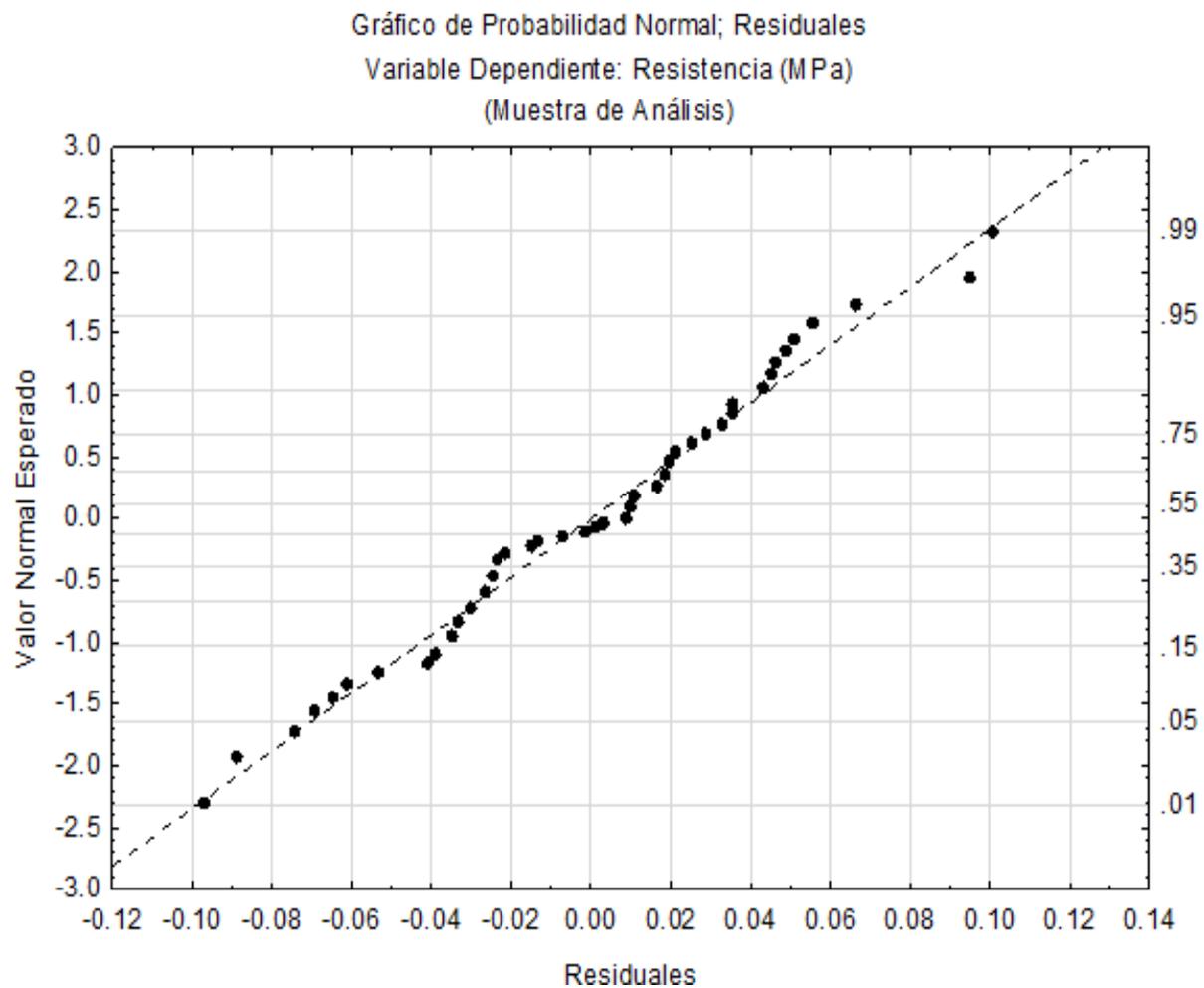


Tabla 23*Prueba de normalidad segunda etapa*

	N	Max D	Lilliefors - p
Residuales	63	0.094481	p < .20

En la Figura 19 se puede observar que los datos (puntos) están muy cerca de la línea, por lo tanto, se puede decir que los datos cumplen con una distribución normal, y esto es comprobado con los cálculos realizados con la prueba de inferencia de normalidad (Tabla 24), concluyendo que los datos tienen una distribución normal.

Para la prueba de homocedasticidad, se usó el gráfico de esperados vs residuales y la prueba de inferencia de Levene, como se muestra a continuación.

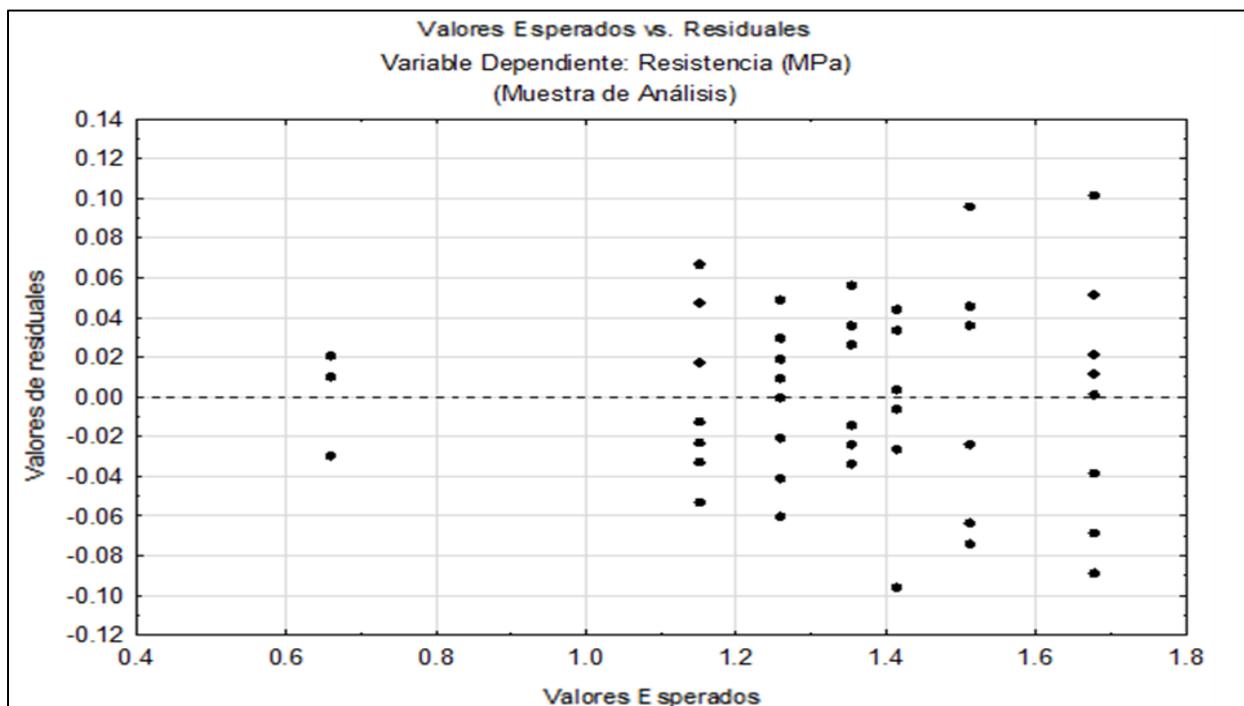
Figura 20*Gráfico de esperados vs residuales segunda etapa*

Tabla 24*Prueba Levene segunda etapa*

Prueba de Levene para Homogeneidad de Varianzas Efecto: Tipo Grados de Libertad para todos los F's: 6, 56

	MS - Efecto	MS - Error	F	p
Resistencia (MPa)	0.000768	0.000519	1.479234	0.202056

En la Figura 20 se observa que los datos de residuales no tienen tendencia, por lo tanto, existe homocedasticidad. La prueba de Levene (Tabla 25) se muestra un valor $p = 0.202056$, mayor a 0.05, consecuentemente, se tiene una homocedasticidad.

Una vez determinado los supuestos (normalidad y homocedasticidad), se realizó el ANOVA (con software Statistica y de forma manual, cálculos en el Apéndice B), obteniendo los siguientes datos:

Tabla 25*Resultados de ANOVA univariable, segunda etapa*

Resultados Univariados Para Cada DV Parametrización Restringida por Sigma
Descomposición de Hipótesis Efectiva

Efecto	Grados de Libertad	Resistencia (MPa) - SS	Resistencia (MPa) - MS	Resistencia (MPa) - F	Resistencia (MPa) - p
Intersección	1	105.0448	105.0448	55379.27	0.00
Tipo	6	5.7439	0.9573	504.69	0.00
Error	56	0.1062	0.0019		
Total	62	5.8501			

Se observa en la Tabla 26, que el valor de p es menor (0.00) que 0.05, por lo tanto, se rechazó H_0 . El estadístico de prueba F con un valor de 504.69 es mucho mayor al establecido en tabla de 2.25, distribución $f(0.05,6,56)$, por lo que también se rechazó H_0 . El factor de estudio tuvo un efecto importante en la población, es decir, que la sustitución de arena por vidrio tiene un gran impacto en la resistencia a la compresión.

Para conocer cuál es la diferencia entre las mezclas ensayadas, se realizó la prueba Post-Hoc de Tukey (LSD). Se muestra una matriz simétrica, en la que las intersecciones se comparan (renglones y columnas), es decir, la confluencia es el nivel de probabilidad para la comparación entre factores.

Tabla 26

Prueba Post-Hoc segunda etapa

Prueba de Tukey HSD; variable Resistencia (MPa) Probabilidades Aproximadas Para Pruebas							
Post Hoc Error: Entre MS = .00190, df = 56.000							
Tipo	{1} -	{2} -	{3} -	{4} -	{5} -	{6} -	{7} -
	1.3544	.66000	1.5144	1.2611	1.1533	1.6789	1.4167
1 2)		0.000135	0.000135	0.000683	0.000135	0.000135	0.053642
2 4)	0.000135		0.000135	0.000135	0.000135	0.000135	0.000135
3 5)	0.000135	0.000135		0.000135	0.000135	0.000135	0.000393
4 6)	0.000683	0.000135	0.000135		0.000175	0.000135	0.000135
5 7)	0.000135	0.000135	0.000135	0.000175		0.000135	0.000135
6 8)	0.000135	0.000135	0.000135	0.000135	0.000135		0.000135
7 9)	0.053642	0.000135	0.000393	0.000135	0.000135	0.000135	

La Tabla 27 presenta que todos los factores tienen diferencias significativas, excepto la corrida 2 con la corrida 9. Las corridas 2 y 9 no tienen diferencia significativa entre medias, por lo que se descarta la corrida 9. El gráfico de medias (Figura 21) muestra el comportamiento de las medias de todo el grupo; se aprecia que los dos mejores valores corresponden para las corridas (mezclas) 5 y 8, mostrando medias por encima de la corrida 2, por lo tanto, las mezclas 5 y 8 presentan los mayores valores para la resistencia a la compresión respecto a la mezcla de la corrida 2.

Figura 21

Gráfico de medias segunda etapa

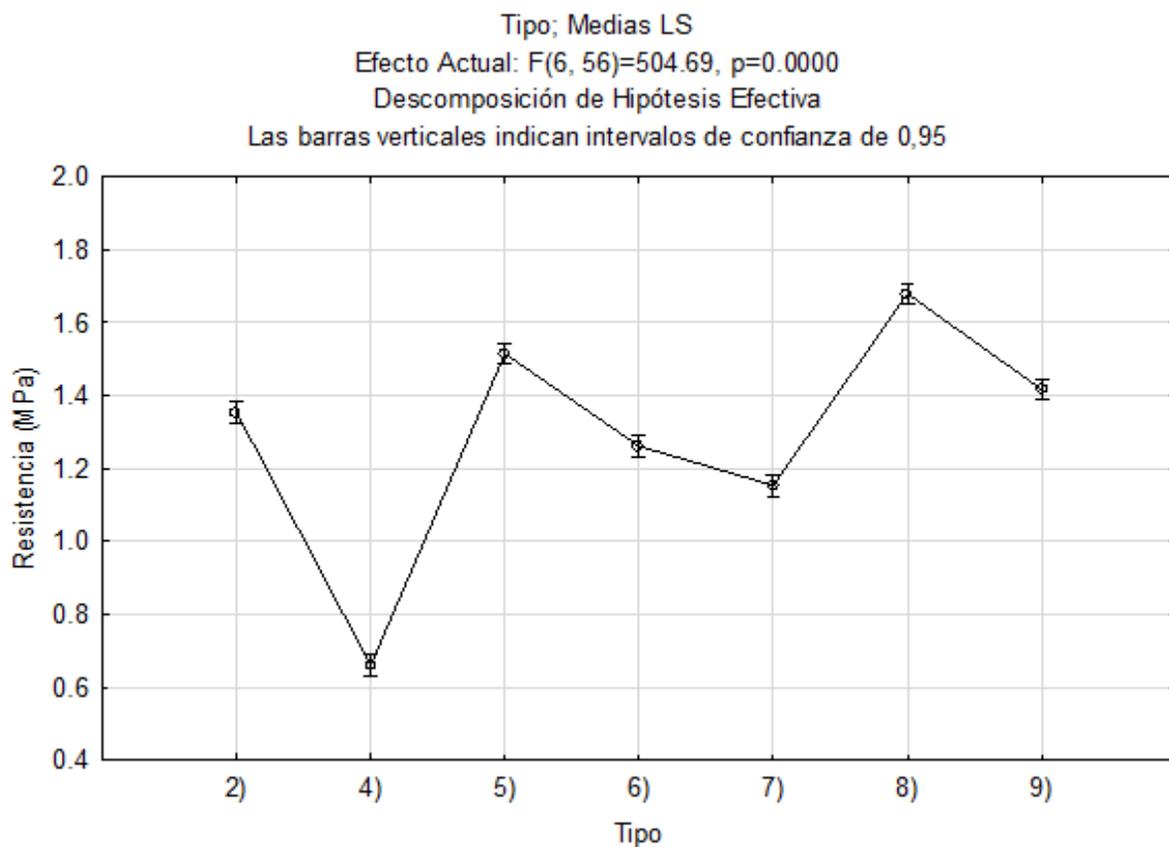
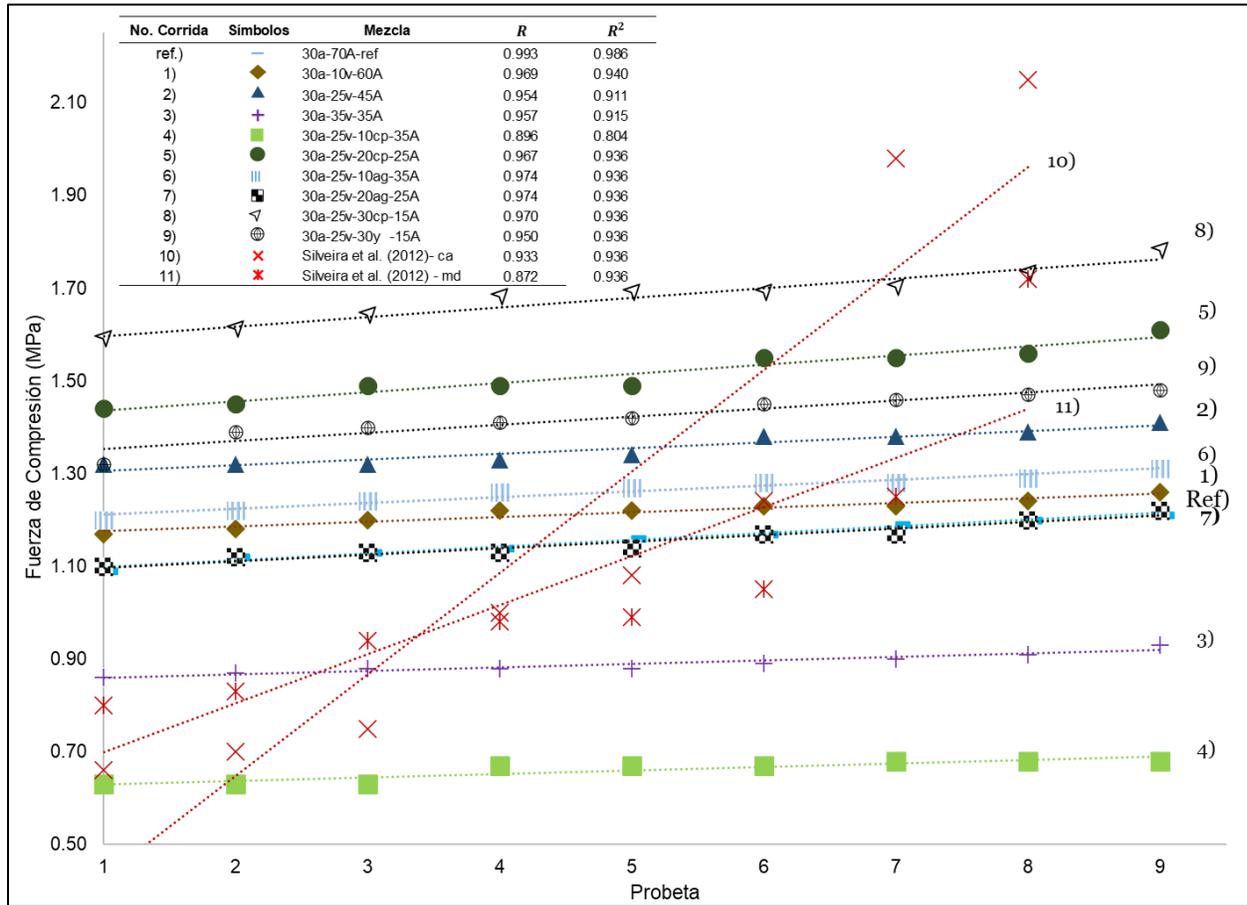


Figura 22

Datos de la resistencia a la compresión del proyecto de tesis y datos obtenidos por Silveira et al. (2012).



Nota. La Figura 22 muestra los datos obtenidos de la resistencia a la compresión de las probetas ensayadas en el presente trabajo de tesis, con adición de datos registrados en el artículo Mechanical Properties of Adobe Bricks in Ancient Constructions, por D. Silveira, H. Varum, A. Costa, T. Martins, H. Pereira y J. Almeida (2012), donde se ensayaron 8 casas y 8 muros divisorios en el distrito de Aveiro, Portugal.

CAPÍTULO 5. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Discusión

Considerando que el adobe tradicional, está constituido por 70% arena y 30% arcilla, según la literatura indagada y, que éste, presenta 1.72 MPa de resistencia a la compresión, según la norma estadounidense 14.7.4 NMAC 2009 New Mexico Earthen Building Materials Code; los valores reportados por D. Silveira, 1.2 y 1.07 MPa, entre otras. México carece de una norma que estandarice el valor de la resistencia a la compresión para construcciones de adobe, por lo menos, oficialmente. La hipótesis planteada fue elaborar mezclas de adobe en las que se sustituyó la arena por vidrio de desecho a diferentes porcentajes, además, reforzar el efecto cementante de la arcilla con agregados de cemento Portland y ceniza de bagazo de agave, con el objetivo de estudiar si estos factores incrementan o no la resistencia a la compresión. A estas mezclas se les denominó “adobe compuesto”.

La Figura 13 presenta los resultados de la primera etapa que consistió en determinar el porcentaje de vidrio con el que se obtuvo el mayor valor de la resistencia a la compresión. El mayor valor lo presenta la mezcla que integró 30% arcilla, 25% vidrio y 45% arena (30a-25v-45A), esto es, de 1.32 a 1.41 MPa (Tabla 16). Su valor promedio es 1.35 MPa. Esta mezcla, la 30a-25v-45A se tomó como base o referencia para agregarle diferentes cantidades de cemento Portland (CP), ceniza de bagazo de agave (CBA) y yeso, con el propósito de reforzar el efecto de la arcilla. La Tabla 17 muestra que los valores más altos para la resistencia a la compresión se obtuvieron para la mezcla constituida por 15% arena, 30% cemento Portland, 25% vidrio de desecho y 30% arcilla (15A-

30cp-25v-30a) que corresponde a la corrida número 8. Los valores presentan un rango desde un valor mínimo de 1.59 MPa hasta el valor más alto alcanzado en este trabajo de investigación, 1.78 MPa. Destacan dos valores (1.73 y 1.78 MPa) por encima del valor de 1.72 MPa tomado como referencia en este trabajo de investigación y postulado por la Norma estadounidense 14.7.4 NMAC 2009 New Mexico Earthen Building Materials Code, ya que en México no se tiene una norma que rija la construcción con adobe. Se observa de las Tablas 3 y 4, se presentan diversos valores para la resistencia a la compresión de acuerdo a si se trata de la construcción para casas o para muros divisorios o, según el país. No hay un estándar internacional que decrete un valor específico de referencia. Las casas de adobe de la localidad de Aveiro, Portugal, que D. Silveira reporta en su artículo, presentan una resistencia a la compresión de un valor promedio de 1.2 MPa, mientras que los muros divisorios, un valor promedio de 1.07 MPa. Los valores de las resistencias a la compresión de las mezclas 2, 5, 6, 8 y 9 de este trabajo de investigación, superan los valores reportados por D. Silveira para casas y muros divisorios. Así mismo, D. Silveira reporta dos datos relacionados a construcciones realizadas en México, cuyos valores son: 1.18 y 1.57 MPa y extraída la primera del artículo escrito por Gavrilovic P, del Proceeding of the 11th European Conference on earthquake engineering, Rotterdam, Netherland; September 6-11, 1998 y la segunda del artículo escrito por Meli R, del Proceeding of SismoAdobe2005, Lima, Peru; May 16-19, 2005. Estos valores reportados, también son superados por los valores de la resistencia a la compresión de las mezclas 2, 5, 6, 8 y 9.

El coeficiente de correlación (R) para los datos de la primera y segunda etapas son cercanos a 1, evidenciando un muy buen ajuste a una línea imaginaria trazada entre los datos, lo que se interpreta como poca variabilidad de los datos obtenidos entre las muestras de cada corrida o mezcla. El

coeficiente de determinación (R^2) de los datos de la primera y segunda etapas son cercanos a 1 lo que indica un excelente ajuste de la variable estudiada interpretándose que los resultados obtenidos gozan de fiabilidad. En el caso del ANOVA, una vez cumplidos los requisitos de normalidad y homocedasticidad y comprobada la distribución normal para las primera y segunda etapas, la información obtenida del estadístico p es que no hay parentesco entre las medias de las poblaciones de datos estudiadas, permitiendo la elección de las mezclas con los más altos valores para la resistencia a la compresión.

5.2 Conclusiones

- ⇒ El valor de la resistencia a la compresión (1.16 MPa) de la mezcla de referencia de este trabajo de investigación supera el valor de la resistencia a la compresión para los muros divisorios de Aveiro, Portugal (1.07 MPa).
- ⇒ Los valores de la resistencia a la compresión de las mezclas 1 (1.22 MPa) y 2 (1.35 MPa) de la primera etapa, rebasa los valores de resistencia a la compresión reportados para las casas y muros divisorios (Tabla 3 y Figura 22) de Aveiro, Portugal (1.2 y 1.07 MPa correspondientemente). Las mezclas 1 y 2, también exceden el valor (1.18 MPa) reportado indirectamente para construcciones de adobe en México por D. Silveira.
- ⇒ Los valores de la resistencia a la compresión de las mezclas 2, 5, 6, 8 y 9 (1.35, 1.51, 1.26, 1.68 y 1.42 MPa) de la segunda etapa, superan los valores de resistencia a la compresión reportados para las casas y muros divisorios (Tabla 3 y Figura 22) de Aveiro, Portugal (1.2 y 1.07 MPa correspondientemente). Las mezclas 2, 5, 6, 8 y 9 también exceden el valor (1.18 MPa) reportados indirectamente para construcciones de adobe en México por D.

Silveira. La mezcla 8 (promedio 1.68 MPa) rebasa el otro valor reportado por D. Silveira para construcciones de adobe en México (1.57 MPa).

- ⇒ De las diez mezclas ensayadas en este trabajo de investigación, la que presenta los más altos valores de resistencia a la compresión es la 8, cuyos valores están en el rango de 1.59 a 1.78 MPa. Esta mezcla tiene 15% arena, 30% cemento Portland, 25% vidrio y 30% arcilla. El mecanismo por el que incrementó la resistencia a la compresión escapa a este trabajo de investigación, pero, lo que sí compete es la evidencia que la norma estadounidense 14.7.4 NMAC 2009 New Mexico Earthen Building Materials Code fue superada (1.78 MPa > 1.72 MPa).
- ⇒ La sustitución de arena por vidrio de desecho (25%) demostró es viable para mejorar la resistencia a la compresión y, probable, económicamente también.
- ⇒ El reforzamiento de la arcilla con el 30% de CP muestra los mayores valores para la resistencia a la compresión, por lo que, de ser posible económicamente, se recomienda.

5.3 Trabajos Futuros

Para trabajos futuros se recomienda:

- Estudiar el proceso de compactación o prensado de la mezcla 30a-25v-30cp-15a (corrida 8) para explorar si se logra incrementar el valor de la resistencia a la compresión.
- Calcular los costos de los materiales y producción realizadas en el trabajo, en especial la mezcla 30a-25v-30cp-15a (corrida 8).

REFERENCIAS

- Aguilar, M. I., Cruces, E. y Díaz, B. (01 de octubre de 2015). Universidad de Málaga. Departamento de Economía Aplicada: <https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/10372/15%20PIE%20ANOVA.pdf?sequence=1>
- Albarrán Fernández, J. V. (2001). Colas orgánicas de origen animal. Deposito de Investigación Universidad de Sevilla.
- American Society for Testing and Materials. (2021). ASTM C1697-21. Standard Specification for Blended Supplementary Cementitious Materials. United States.
- Calatan, G., Mircea, C., Hegyi, A. y Dico, C. (2016). Determining the Optimum Addition of Vegetable Materials in Adobe Bricks. 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering (INTER-ENG 2015) (págs. 259 - 265). Tirgu-Mures: Procedia Technology. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.077>
- Calatan, G., Szilagyi, H., Hegyi, A. y Dico, C. (2019). Opportunities Regarding the Use of Adobe-bricks within Contemporary Architecture. 13th International Conference Interdisciplinary in Engineering (INTER-ENG 2019) (págs. 150 - 157). Procedia Manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.03.023>
- Cámara Nacional de la Industria Tequilera. (s.f.). Tequila, Regalo de México Para el Mundo. Retrieved 16 de febrero de 2023, from ¿Qué es el Tequila?: <https://www.tequileros.org/>

- Cechin, L., Maotski, A., Miranda de Lima, A., Monique, A. y Basso, R. (2018). Efecto de los tratamientos sobre la compatibilidad entre el bambú moso y el cemento Portland de alta resistencia inicial. *Revista Ingeniería de Construcción*. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732018000200127>
- CEMEX. (19 de junio de 2019). Artículos de Construcción. Hablando de Cementos Portland: <https://www.cemex.com.pe/-/hablando-de-cementos-portland#:~:text=El%20cemento%20portland%20es%20un,se%20le%20conoce%20como%20hidrataci%C3%B3n>.
- Comercio Mexicano Regulador de la Calidad del Mezcal, A.C. (2022). Informe Estadístico 2022. COMERCAM.
- Devore, J. L. (2008). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (Séptima ed.). México: Cengage Learning.
- Dormohamadi, M. y Rahimnia, R. (2020). Combined effect of compaction and clay content on the mechanical properties of adobe brick. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00402>
- Equipo editorial Etecé. (23 de enero de 2023). Concepto de vidrio. Vidrio: <https://humanidades.com/vidrio/>
- Faghih Khorasani, F. y Zaman Zabir, M. (2022). Experimental study on the effectiveness of short fiber reinforced clay mortars and plasters on the mechanical behavior of adobe masonry walls. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00918>

- Feiz, R., Ammenberg, J., Baas, L., Eklund, M., Helgstrand, A. y Marshall, R. (2015). Improving the CO₂ performance of cement, part I: Utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*, 98, 272 - 281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.083>
- Ferrex. (2022). Materiales de Construcción. Arena Para Cosntrucción: <https://www.materialesparaconstruccion.com.mx/productos/agregados/arena/>
- García Ubaque, C. A., García Vaca, M. C. y Vaca Bohórquez, M. L. (2013). Resistencia mecánica de ladrillos prearados con mezclas de arcilla y lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales. *Tecnura*, 17(30), 68-81.
- Gendrop, P. (1997). *Diccionario de Arquitectura*. México: TRILLAS.
- Gobierno de México. (07 de febrero de 2020). Representación AGRICULTURA Guerrero . Guerrero, y su tradicional bebida el Mezcal, Segundo Lugar en Producción: <https://www.gob.mx/agricultura/guerrero/articulos/guerrero-y-su-tradicional-bebida-el-mezcal-segundo-lugar-en-produccion?idiom=es#:~:text=Oaxaca%20es%20el%20principal%20productor,65%25%20de%20la%20producci%C3%B3n%20nacional.>
- González-López, J., Ramos-Lara, J., Zaldivar-Cadena, A., Chávez-Guerrero, L., Magallanes-Rivera, R. y Burciaga-Díaz, O. (2015). Small addition effect of agave biomass ashes in cement mortars. *Fuel Processing Technology*, 35-42.
- Gutiérrez Pulido, H. y de la Vara Salazar, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos (Segunda ed.)*. México: MCGRAW-HILL.

- Hadji Ms, F., Ihaddadene, N., Ihaddadene, R., Betga, A., Charick, A. y Logerais, P. (2020). Thermal conductivity of two kinds of earthen building materials formerly used in Algeria. *Journal of Building Engineering*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101823>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). México: MCGRAW-HILL.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta ed.). México: MCGRAW-HILL.
- Hernández, E. (1984). *El adobe, ventajas y características térmicas*. México: COMESCAL.
- Howlader, A. K. (2022). PE Civil Exam. Shear strength: https://pecivilexam.com/Study_Documents/Geotech-Materials-Online/Shear-strength.pdf
- Hoz-Zavala, M. E. y Nava-Diguero, P. (2017). Los residuos de Agave como factor de corrosión del suelo donde se vierte. *Revista del Desarrollo Tecnológico*, 1(2), 11-24.
- Hussain, M., Levacher, D., Leblanc, N., Zmamou, H., Djeran-Maigre, I., Razakamanantsoa, A. y Saouti, L. (2022). Reuse of harbour and river dredged sediments in adobe bricks. *Journal of Clear Materials*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2022.100046>
- Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. (2017). *El Cemento. Proceso de Fabricación*: <https://www.ieca.es/proceso-de-fabricacion/>
- Ladrillera Mecanizada. (2021). *El Origen de la Arcilla*. <https://www.ladrillramecanizada.com/blog/el-origen-de-la->

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2017). E.080. Diseño y construcción con tierra reforzada. Perú.
- Montgomery, D. y Runger, G. (2003). Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería (Segunda ed.). México: LIMUSA WILEY.
- Morsy, M. I., Alakeel, K. A., Ahmed, A. E., Abbas, A. M., Omara, A. I., Abdelsalam, N. R. y Emaish, H. H. (2022). Recycling rice straw ash to produce low thermal conductivity and moisture-resistant geopolymer adobe bricks. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 29, 3759 – 3771. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2022.02.046>
- Muciño Vélez, A. y Santa Ana Lozada, P. (junio de 2017). Práctica 8: Granulometría de la Arena. México, UNAM, Facultad de Arquitectura.
- Muñoz, P., Letelier, V., Muñoz, L. y Bustamante, M. (2020). Adobe bricks reinforced with paper & pulp wastes improving thermal and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 254. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.11931>
- New Mexico Administrative Code. (2015). 14.7.4 NMAC. New Mexico Earthen Building Materials Code. United States.
- Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2012). NMX-C-404-ONNCCE-2012. En *Industria de la Construcción*.
- Perea, J. (12 de 06 de 2021). Análisis de experimentos. Universidad de Córdoba: http://www.uco.es/zootecniaygestion/img/pictorex/27_12_06_21.pdf

- RAE. (23 de Noviembre de 2020). Real Academia Española. Arcilla:
<https://dle.rae.es/arcilla?m=form>
- Ramón-Álvarez, I., Marugán-Cruz, C., Enríquez, E., Sánchez-Delgado, S. y Torres-Carrasco, M. (2021). Alkali-activated and hybrid materials: Alternative to Portland cement as a storage media for solar thermal energy. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*.
<https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2021.11.006>
- Rethwisch, D. G. y Callister, W. D. (2018). *Materials Science and Engineering an Introduction*. United States of America: WILEY.
- Reyes Montero, Y. (2012). Eliminación de hierro de una arcilla caolinítica por medio de lixiviación acida inversa. Cuba: (Tesis de Ingeniería) Ministerio de Educación Superior.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002). N CMT 2 02 001/02. En *Características de los Materiales*. México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002b). N CMT 2 02 002/02. En *Características de los Materiales*. México.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2002c). N CMT 2 01 001/02. En *Características de los Materiales*. México.
- Servicio Geológico Mexicano. (29 de 03 de 2022). Museo Virtual. Rocas Sedimentarias:
<https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-sedimentarias.html>

- Shehata, N., Taha-Sayed, E. y Ali-Abdelkareem, M. (2021). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of The Total Environment*, 762, 23-73. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>
- Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H. y Almeida, J. (2012). Mechanical Properties of Adobe Bricks in Ancient Constructions. *Construction and Building Materials*, 28, 36 - 44. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.046>
- Standards New Zealand. (1998). NZS 4298:1998. Materials and workmanship for earth buildings. New Zealand.
- Subsecretaría de Minería. (2017). Perfil de Mercado del Yeso. En Secretaría de Economía. México: Dirección General de Desarrollo Minero.
- Varum, H., Costa, A., Fonseca, J. y Furtado, A. (2015). Behaviour characterization and rehabilitation of adobe construction. 1st International Conference on Structural Integrity (págs. 714 - 721). Portugal: Procedia Engineering. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.015>
- Yanguatin Botina, H. G. (2018). Evaluación y mejoramiento del desempeño como material cementante suplementario de un residuo de construcción y demolición (finos de excavación). Bogotá: (Tesis Doctoral) Universidad Nacional de Colombia.
- Yesera Monterrey. (12 de enero de 2021). Noticias. ¿Cómo se produce el yeso construcción?: <https://yeseramonterrey.com/noticias/?p=126>

APÉNDICE A

Cálculos realizados para el ANOVA de la primer etapa:

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^9 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \\
 &= (1.09)^2 + (1.12)^2 + (1.13)^2 + (1.14)^2 + (1.16)^2 + (1.17)^2 + (1.19)^2 + (1.20)^2 + (1.21)^2 \\
 &\quad + (1.17)^2 + (1.18)^2 + (1.20)^2 + (1.22)^2 + (1.22)^2 + (1.22)^2 + (1.23)^2 \\
 &\quad + (1.24)^2 + (1.26)^2 + (1.32)^2 + (1.32)^2 + (1.32)^2 + (1.33)^2 + (1.34)^2 \\
 &\quad + (1.34)^2 + (1.38)^2 + (1.39)^2 + (1.41)^2 + (0.86)^2 + (0.87)^2 + (0.88)^2 \\
 &\quad + (0.88)^2 + (0.88)^2 + (0.89)^2 + (0.90)^2 + (0.91)^2 + (0.93)^2 - \frac{(41.55)^2}{36} \\
 &= 49.02 - \frac{(41.55)^2}{36} \\
 &\approx 1.063 = 1.06268
 \end{aligned}$$

$$SS_{Tratamientos} = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$\sum_{i=1}^4 \frac{y_i^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$\frac{(10.41)^2 + (10.95)^2 + (12.19)^2 + (8.0)^2}{9} - \frac{(41.55)^2}{36}$$

$$\frac{440.87}{9} - \frac{(41.55)^2}{36}$$

$$= 1.02956 \approx 1.030$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$$

$$= 1.06288 - 1.02956$$

$$= 0.033111 \approx 0.033$$

Puesto que $f_{\alpha, a-1, a(n-1)}$ con: $\alpha = 0.01, a = 4, n = 9$

$$= f_{0.01, 3, 32} = 4.31$$

$$F_0 = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E}$$

$$= \frac{\frac{SS_{Tratamientos}}{a-1}}{\frac{SS_E}{a(n-1)}}$$

$$= \frac{\frac{1.02956}{4-1}}{\frac{0.033111}{4(9-1)}}$$

$$= \frac{0.3432}{0.001}$$

$$= 331.67160 \approx 331.67$$

APÉNDICE B

Cálculos realizados para el ANOVA de la segunda etapa:

$$\begin{aligned}
 SS_T &= \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} = \sum_{i=1}^7 \sum_{j=1}^9 y_{ij}^2 - \frac{y_{..}^2}{N} \\
 &= (1.32)^2 + (1.32)^2 + (1.32)^2 + (1.33)^2 + (1.34)^2 + (1.38)^2 + (1.38)^2 + (1.39)^2 + (1.41)^2 \\
 &\quad + (0.63)^2 + (0.63)^2 + (0.63)^2 + (0.67)^2 + (0.67)^2 + (0.67)^2 + (0.68)^2 \\
 &\quad + (0.68)^2 + (0.68)^2 + (1.44)^2 + (1.45)^2 + (1.49)^2 + (1.49)^2 + (1.49)^2 \\
 &\quad + (1.55)^2 + (1.55)^2 + (1.56)^2 + (1.61)^2 + (1.20)^2 + (1.22)^2 + (1.24)^2 \\
 &\quad + (1.26)^2 + (1.27)^2 + (1.28)^2 + (1.28)^2 + (1.29)^2 + (1.31)^2 + (1.10)^2 \\
 &\quad + (1.12)^2 + (1.13)^2 + (1.13)^2 + (1.14)^2 + (1.17)^2 + (1.17)^2 + (1.20)^2 \\
 &\quad + (1.22)^2 + (1.59)^2 + (1.61)^2 + (1.64)^2 + (1.68)^2 + (1.69)^2 + (1.69)^2 \\
 &\quad + (1.70)^2 + (1.73)^2 + (1.78)^2 + (1.32)^2 + (1.39)^2 + (1.39)^2 + (1.41)^2 \\
 &\quad + (1.42)^2 + (1.45)^2 + (1.45)^2 + (1.46)^2 + (1.46)^2 - \frac{(81.35)^2}{63} \\
 &= 110.8949 - \frac{(81.35)^2}{63} \\
 &\approx 5.85009 = 5.850
 \end{aligned}$$

$$SS_{Tratamientos} = \sum_{i=1}^a \frac{y_i^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$\sum_{i=1}^7 \frac{y_i^2}{n} - \frac{y_{..}^2}{N}$$

$$\frac{(12.19)^2 + (5.94)^2 + (13.63)^2 + (11.35)^2 + (10.38)^2 + (15.11)^2 + (12.75)^2}{9} - \frac{(81.35)^2}{63}$$

$$\frac{997.0981}{9} - \frac{(81.35)^2}{63}$$

$$= 5.743876 \approx 5.744$$

$$SS_E = SS_T - SS_{Tratamientos}$$

$$= 5.850098 - 5.743876$$

$$= 0.106222 \approx 0.106$$

Puesto que $f_{\alpha, a-1, a(n-1)}$ con: $\alpha = 0.01, a = 7, n = 9$

$$= f_{0.01, 6, 56} = 3.12$$

$$F_0 = \frac{MS_{Tratamientos}}{MS_E} = \frac{\frac{SS_{Tratamientos}}{a-1}}{\frac{SS_E}{a(n-1)}}$$

$$= \frac{\frac{5.743876}{7-1}}{\frac{0.106222}{7(9-1)}}$$

$$= \frac{0.957313}{0.001897}$$

$$= 504.69205 \approx 504.692$$