



EVALUACIÓN MECÁNICA EN MEZCLAS DE JAL, CENIZA VOLCÁNICA Y CAL HIDRATADA EN SUSTITUCIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE Y GESTION URBANA**

PRESENTA:

ARQ. CHRISTIAN MANUEL FLORES

DIRECTOR DE TESIS

M. ARQ. JOSÉ FIDEL NAVARRO ARELLANO

CODIRECTOR DE TESIS

DR. ARQ. JOSÉ RICARDO MORENO PEÑA

Villa de Álvarez, Col. Enero del 2022.





OFICIO DE IMPRESIÓN



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Colima
División de Estudios de Posgrado e Investigación

Villa de Álvarez, Colima, 25/enero/2022
Oficio No. DEPI 1.2.1/11/2022

**ESTUDIANTE CHRISTIAN MANUEL FLORES
PASANTE DE LA MAESTRÍA EN ARQUITECTURA SOSTENIBLE Y GESTIÓN URBANA
PRESENTE**

La **División de Estudios de Posgrado e Investigación** de acuerdo al procedimiento para la obtención del Título de Maestría de los Institutos Tecnológicos y habiendo cumplido todas las indicaciones que la **Comisión Revisora** hizo a su trabajo profesional

**"EVALUACIÓN FÍSICO-MECÁNICA EN MEZCLAS DE JAL, CENIZA VOLCÁNICA Y CAL HIDRATADA EN
SUSTITUCIÓN DEL CEMENTO PORTLAND"**

Por la opción de tesis, que para obtener el grado de Maestro en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana será presentado por Usted, tiene a bien concederle la **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN** de la tesis citada.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

**PETER CHUNG ALONSO
JEFE DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN**



Ccp. Archivo

PCA/*cas



Av. Tecnológico #1, C.P. 28976, Villa de Álvarez, Colima, Tel. 312 3129920 Ext: 113 y 213
Correo electrónico: posgrado@colima.tecnm.mx www.colima.tecnm.mx



2022 Flores
Año de Magón
PRELIMINAR DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido experimentar esta etapa académica que siempre deseé, por brindarme nuevos aprendizajes y logros, donde se tuvieron momentos gratos e inolvidables.

A CONACYT, por la beca otorgada para el desarrollo de este proyecto, y obtener el grado de maestro en arquitectura sustentable y gestión urbana.

Al Tecnológico Nacional de México Campus Colima, al Departamento de Posgrado e Investigación, a la Maestría en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana la carrera de Mecatrónica de la misma institución, quien facilito las instalaciones, asesoría y equipo para el desarrollo del proyecto de investigación.

También quiero agradecer al M.A José Fidel Navarro Arellano, quien fungió como mi director de Tesis, y no fue solo mi tutor, sino también un gran ejemplo a seguir, por orientarme y aconsejarme en tomar decisiones sobre el desarrollo de esta investigación, además de depositar su confianza en mí para desempeñarme en la vida profesional.

Igualmente me gustaría agradecer al Dr. Arq. José Ricardo Moreno Peña, a quien le tengo un gran respeto, cariño y admiración, por sus sabios consejos, su paciencia y disposición para aclarar todas mis dudas, que me ayudaron mucho a llevar un proceso continuo y claro de lo que podía lograr.

Al igual al Ing. Antonio Moreno encargado del laboratorio en la empresa SELAICON, quien me brindo su apoyo para esclarecer dudas durante mi investigación.

Especialmente a mi familia, amigos y compañeros que me apoyaron durante todo este proceso de investigación.

Estoy muy agradecido con los docentes que a lo largo de este camino estuvieron apoyándome

Muchas gracias a todos los que hicieron posible esta etapa tan importante en mi vida, mi más sincero agradecimiento.



RESUMEN

El aprovechamiento de materiales volcánicos es un recurso poco explotado en la industria de la construcción, pese que a lo largo de la historia del hombre fueron con los cuales llegaron a edificar grandes construcciones. Son pocos los materiales de origen volcánico que actualmente suelen ser empleados en la construcción, uno de ellos es la piedra pómez, que debido a su baja densidad es utilizada como aligerante, y las tobas empleadas para mejorar las propiedades de algunos concretos debido a su alto contenido de sílice, sin embargo, la ceniza volcánica es un recurso que no es utilizable generalmente, es catalogado como un desecho, quizás por no conocer sus propiedades físicas.

El presente trabajo busca crear un concreto aprovechando la cal hidratada que sustituirá parcialmente al cemento portland como elemento aglutinante, sustituyendo los agregados de arena y grava por ceniza volcánica y piedra pómez respectivamente.

En el diseño de mezclas se utilizó el “Sistema multinivel factorial fraccional 2”, ya que este es empleado generalmente para este tipo de estudio. La aplicación de este sistema se realizó con el programa Statgraphics, en el cual se introdujeron las variables dando como resultado 27 mezclas distintas, de las cuales se realizaron 3 repeticiones para verificar los resultados.

Para determinar el dimensionamiento de las probetas se consideró la norma N-CMT-2-01-004-02, donde especifica las medidas para pruebas a compresión. Conociendo el dimensionamiento de cada espécimen se realizó un molde metálico con capacidad para 3 elementos, facilitando la elaboración de mezcla, desmole e identificación.

En la elaboración de las mezclas, primero se trataron los materiales, pasando por cribas para definir su tamaño, así como de secado a la intemperie para reducir la mayor cantidad de humedad, teniendo el material selecto se procedió a realizar la mezcla pesando cada material según lo contemplado en el diseño, se vertió en los moldes, pasando al proceso de secado y desmolde,



posteriormente se dejaron reposar por 28 días, pasado este periodo se llevaron a cabo las pruebas de resistencia axial en una prensa universal.

Los resultados obtenidos indican que se lograron resistencias por encima de los 75 kg/cm², partiendo de que la proporción base que se empleó para el diseño de las mezclas el cemento se redujo al 50% compensando el otro 50% de este aglutinante con cal hidratada, así mismo sustituyendo los materiales pétreos comúnmente usados por ceniza volcánica y piedra pómez en distintas proporciones, la mezcla con mejor resultado alcanzó una resistencia de 95 kg/cm.

Palabras Clave: Ceniza Volcánica, Cal Hidratada, Cemento, Piedra Pómez, Concreto, Arquitectura Sostenible.



ABSTRACT

The use of volcanic materials is a resource little exploited in the construction industry, despite the fact that throughout the history of man it was with which they came to build large buildings. There are few materials of volcanic origin that are currently used in construction, one of them is pumice stone, which due to its low density is used as a lightening, and the tufts used to improve the properties of some concretes due to its high Silica content, however, volcanic ash is a resource that is not generally usable, it is classified as a waste, perhaps for not knowing its physical properties.

The present work seeks to create a concrete taking advantage of hydrated lime that will partially substitute portland cement as a binder element, substituting aggregates of sand and gravel for volcanic ash and pumice, respectively.

In the design of mixtures, the "fractional factorial system 2" was used, since it is generally used for this type of study. The application of this system was carried out with the statgraphics program, in which the variables were introduced resulting in 27 different mixtures, of which 3 repetitions were carried out to verify the results.

To determine the dimensioning of the specimens, the standard N-CMT-2-01-004-02 was considered, where it specifies the measures for compression tests. Knowing the dimensioning of each specimen, a metal mold with capacity for 3 elements was made, facilitating the preparation of the mixture, demolition and identification.

In the preparation of the mixtures, the materials were first treated, passing through sieves to define their size, as well as drying in the open to reduce the greatest amount of humidity, having the selected material, the mixture was carried out weighing each material according to what was contemplated in the design, was poured into the molds, going to the drying and demoulding process, later they were left to rest for 28 days, after this period the axial resistance tests were carried out in a universal press.

The results obtained indicate that strengths above 75 kg / cm² were achieved, based on the fact that the base proportion that was used for the design



of the mixtures, the cement was reduced to 50%, compensating the other 50% of this binder with hydrated lime. Likewise, substituting commonly used stone materials for volcanic ash and pumice stone in different proportions, the mixture with the best results reached a resistance of 95 kg / cm.

Key Words: Volcanic Ash, Hydrated Lime, Cement, Pumice Stone, Concrete, Sustainable Architecture.



CONTENIDO

I. ÍNDICE GENERAL

1. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.3 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN	4
1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	6
1.4.1 GENERAL	6
1.4.2 ESPECÍFICAS	6
1.5 HIPÓTESIS	6
1.6 OBJETIVOS	7
1.6.1. OBJETIVO GENERAL	7
1.6.2. OBJETIVOS PARTICULARES	7
1.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO METODOLÓGICO	7
1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES	8
2. ESTADO DEL ARTE	9
2.1 ANTECEDENTES	9
2.2 CONCEPTUAL	13
2.3 INVESTIGACIONES EXISTENTES	16
2.4 NORMATIVIDAD	19
3. METODOLOGÍA APLICADA	21
3.1 ENFOQUE Y TIPO DE ESTUDIO	21
3.2 ÁREA DEL ESTUDIO	22
3.3 DETERMINACION DE VARIABLES Y DISEÑO DE MEZCLAS	23
3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA	30

3.5 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	30
3.5.1 MATERIAL, HERRAMIENTA Y EQUIPO	30
3.5.2 TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES	32
3.5.3 LAS PROBETAS	35
3.5.4 PRUEBAS DE LABORATORIO	42
4. RESULTADOS OBTENIDOS	49
5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS	54
6. CONCLUSIONES	68
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	75
ANEXOS	78
Anexo 1. RESULTADOS – TABLA 7 – TABLA GENERAL DE RESULTADOS	78
Anexo 2. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 1	79
Anexo 3. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 2	79
Anexo 4. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 3	80
Anexo 6. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 5	81
Anexo 7. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 6	81
Anexo 8. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 7	82
Anexo 9. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 8	82
Anexo 10. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 9	83
Anexo 11. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 10	83
Anexo 12. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 11	84



84	Anexo 13. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 12
85	Anexo 14. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 13
85	Anexo 15. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 14
86	Anexo 16. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 15
86	Anexo 17. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 16
87	Anexo 18. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 17
87	Anexo 19. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 18
88	Anexo 20. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 19
88	Anexo 21. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 20
89	Anexo 22. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 21
89	Anexo 23. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 22
90	Anexo 24. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 23
90	Anexo 25. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 24
91	Anexo 26. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 25



Anexo 27. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 26	91
Anexo 28. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 27	92
Anexo 29. RESULTADOS PROMEDIOS	



II. ÍNDICE DE TABLAS

1.	LA CAL EN LA HISTORIA.....	09
2.	DOSIFICACIÓN BASE.....	26
3.	COMBINACIÓN DE LAS VARIABLES.....	27
4.	DOSIFICACIÓN POR ESPECÍMEN.....	28
5.	DOSIFICACIÓN TOTAL POR MEZCLA.....	29
6.	CEMENTO AL 50%.....	49
7.	CEMENTO AL 75%.....	50
8.	CEMENTO AL 100%.....	50
9.	RESUMEN DE RESULTADOS.....	55
10.	RESUMEN ESTADISTICO.....	59
11.	MEDIAS EN COMPRESIÓN.....	60
12.	MEDIAS EN DEFORMACIÓN.....	61



III. ÍNDICE DE IMAGENES

	IMAGEN 1 INDUSTRIA CEMENTERA.....	1
	IMAGEN 2. MURO DEL COLISEO ROMANO.....	2
	IMAGEN 3. VOLCÁN DE COLIMA.....	3
	IMAGEN 4. EMISIÓN DE CO2 DE LA PRODUCCIÓN DE CLÍNKER.....	4
	IMAGEN 5 ARCADAS DEL COLISEO ROMANO.....	11
	IMAGEN 6 CEMENTO PORTLAND.....	13
	IMAGEN 7 CAL HIDRATADA.....	14
15	IMAGEN 8 DEPÓSITO PIROCLASTICOS.....	
	IMAGEN 9 PIEDRA PÓMEZ/JAL.....	16
	IMAGEN 10 AUTORES DE BLOQUE DE CENIZA.....	17
	IMAGEN 11 BANCO DE CENIZA.....	
18		
	IMAGEN 12 UBICACIÓN DEL RÍO CORDOBÁN.....	
22		
	IMAGEN 13 PROGRAMA STATGRAPHICS.....	
24		
	IMAGEN 14 RESUMEN DE DISEÑO.....	
25		
	IMAGEN 15 RÍO CORDOBÁN.....	
32		
	IMAGEN 16 MUESTRA EN SITIO.....	
32		
	IMAGEN 17 CENIZA VOLCÁNICA.....	
33		
	IMAGEN 18 CRIBADO DE JAL.....	
34		
	IMAGEN 19 MOLDE MÉTALICO.....	36
	IMAGEN 20 DISEÑO DE MOLDE.....	
37		



38 IMAGEN 21 MEDICIÓN DE CEMENTO.....

38 IMAGEN 22 MEDICIÓN DE CAL HIDRATADA.....

39 IMAGEN 23 VACIADO Y MEZCLADO EN SECO.....

40 IMAGEN 24 MEZCLADO DE MATERIALES CON AGUA..... 39

40 IMAGEN 25 VACIADO DE MEZCLA EN MOLDE..... 40

40 IMAGEN 26 APLANADO DE CARA SUPERIOR.....

41 IMAGEN 27 TIEMPO DE FRAGUADO..... 41

41 IMAGEN 28 DESMOLDE DE ESPECÍMENES.....

42 IMAGEN 29 ESPECÍMENES CON 28 DIAS DE EDAD.....

42 IMAGEN 30 PRENSA UNIVERSAL.....

43 IMAGEN 31 PROGRAMACIÓN DE LA PRENSA.....

45 IMAGEN 32 ENSAYO EN ESPECÍMEN FALLIDO..... 44

45 IMAGEN 33 INICIO DE PRUEBA.....

46 IMAGEN 34 RUPTURA DE ESPECÍMEN 46

46 IMAGEN 35 AREA DE CONTROL 46

47 IMAGEN 36 REGISTRO DE ESFUERZOS.....

48 IMAGEN 37 PROBETAS ENSAYADAS 48

71 IMAGEN 38 DOSIFICACION DE CONCRETO DE F'c 100KG/CM²
..... 71



IV. ÍNDICE DE GRÁFICAS

51 GRÁFICA 1 RESUMEN DE SEGMENTO 50% CEMENTO.....

52 GRÁFICA 2 RESUMEN DE SEGMENTO 75% CEMENTO.....

52 GRÁFICA 3 RESUMEN DE SEGMENTO 100% CEMENTO.....

53 GRÁFICA 4 RESUMEN GENERAL.....

56 GRÁFICA 5 RESULTADOS PROMEDIOS CON CEMENTO AL 50%.....

57 GRÁFICA 6 RESULTADOS PROMEDIOS CON CEMENTO AL 75%.....

58 GRÁFICA 7 RESULTADOS PROMEDIOS CON CEMENTO AL 100%.....

59 GRÁFICA 8 RESUMEN DE RESULTADOS PROMEDIOS.....

62 GRÁFICA 9 INFLUENCIA DE LA CENIZA EN LAS PRUEBAS A COMPRESIÓN.....

62 GRÁFICA 10 INFLUENCIA DE LA CENIZA EN LA DEFORMACIÓN.....

63 GRÁFICA 11 INFLUENCIA DEL CEMENTO EN LAS PRUEBAS A COMPRESIÓN.....

63 GRÁFICA 12 INFLUENCIA DEL CEMENTO EN LA DEFORMACIÓN.....

64 GRÁFICA 13 MEDIA DE CAL EN LA COMPRESIÓN.....

64 GRÁFICA 14 MEDIA DE CAL EN LA DEFORMACIÓN.....

65 GRÁFICA 15 INTERACCIÓN DE CENIZA-CEMENTO EN COMPRESIÓN.....

65 GRÁFICA 16 INTERACCION DE CENIZA-CEMENTO EN DEFORMACION.....



66	GRÁFICA 17 INTERACCIÓN DE CENIZA-CAL EN COMPRESIÓN.....
66	GRÁFICA 18 INTERACCIÓN DE CENIZA-CAL EN DEFORMACIÓN.....
67	GRÁFICA 19 INTERACCIÓN DE CAL-CEMENTO EN COMPRESIÓN.....
67	GRÁFICA 20 INTERACCIÓN DE CAL-CEMENTO EN DEFORMACIÓN...

V. ABREVIATURAS

I. Generales

- | | |
|--------------|--|
| 1. No - N° | Número |
| 2. a.c. | Antes de Cristo |
| 3. d.c. | Después de cristo |
| 4. N-CMT | Norma de calidad de materiales |
| 5. CONACYT | Consejo nacional de ciencia y tecnología |
| 6. CINVESTAV | Centro de investigación y estudios avanzados |

II. Fórmulas Químicas

- | | |
|-----------------------------------|--------------------|
| 1. Al ₂ O ₃ | Alúmina |
| 2. CaO | Óxido de calcio |
| 3. CaSiO ₃ | Silicato de calcio |
| 4. CaSO ₄ | Sulfato de calcio |
| 5. CO ₂ | Dióxido de carbono |
| 6. SiO | Sílice |

III. Unidades de Medición

De longitud

- | | |
|-------|------------|
| 1. mm | Milímetro |
| 2. cm | Centímetro |
| 3. m | Metro |
| 4. km | Kilometro |

De masa

- | | |
|-------|-----------|
| 1. g | Gramo |
| 2. kg | Kilogramo |

De área

- | | |
|--------------------|---------------------|
| 1. cm ² | Centímetro cuadrado |
| 2. m ² | Metro cuadrado |

De Volumen

- | | |
|--------------------|-------------------|
| 1. cm ³ | Centímetro cúbico |
| 2. m ³ | Metro cúbico |

De temperatura

- | | |
|-------|----------------------------|
| 1. c° | Grado centígrado o Celsius |
|-------|----------------------------|

De Fuerza

- | | |
|--------|------------------------------------|
| 1. kgf | Kilogramo fuerza |
| 2. N | Newton |
| 3. KN | Kilo Newton |
| 4. f'c | Resistencia/fuerza a la compresión |

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente uno de los mayores productos empleados en el ramo de la construcción es el cemento portland. Este es empleado en distintas actividades tales como la realización de tabiques, morteros, concretos y otras mezclas. Sin embargo, este producto es resultado de calcinar hasta fusión parcial a una temperatura de 1450°C, por un proceso de síntesis en estado sólido, mezclas homogéneas de caliza y arcilla del cual se obtiene el Clinker, constituido principalmente por silicatos y aluminatos anhidros de calcio, que se muelen con yeso para obtener finalmente el cemento. Este proceso de síntesis en estado sólido a alta temperatura hace que la industria del cemento sea responsable del 5 al 7% de las emisiones antropogénicas globales de CO₂ a la atmósfera. (Juan Restrepo, 2013). Ver Imagen 1

Imagen 1. Industria Cementera. Imagen obtenida de: <https://ganar-ganar.mx/2020/09/28/cemex-y-carbon-clean-se-unen-para-soluciones-de-captura-de-carbono/>



Desde el punto de vista empresarial, el sector industrial ha percibido que los aspectos ambientales bien administrados pueden generar valor económico corporativo, bien sea por la reducción del riesgo, la reducción de los costos totales de producción, el aumento de los ingresos y la buena imagen pública de la empresa. (Aura Navas, 2015)

Las emisiones de CO₂ sobre el planeta ha ocasionado que el calentamiento global genere grandes estragos climáticos, por lo que el buscar reducir el aumento

de estas emisiones es importante. Como se puede percatar, la industria cementera es una de las que produce dicha emisión de gases, por lo que la búsqueda de materiales alternativos con características cementantes es valioso.

Actualmente se realizan una gran cantidad de investigaciones que mejoran el comportamiento del cemento, sin embargo, son pocas las que buscan reducir su consumo. Si bien ya se utilizan una gran variedad de escorias generadas por otras industrias para mejorar las características del cemento dándole una utilidad a esos desperdicios, hay otros de origen natural que pudieran actuar como reemplazo parcial del cemento, como lo es la ceniza volcánica, ya en la historia de la humanidad se ha observado el implemento de este material, los romanos llegaron a emplearla junto con la cal y otros agregados para generar sus morteros, construyendo edificaciones que hasta hoy en día se encuentran en pie. Uno de los grandes ejemplos es el Coliseo Romano; En la Imagen 2, se puede apreciar que está construido de ladrillos aparentemente, pero estos solo actúan como un encofrado para el concreto romano, mezclando cal con puzolanas para erigir los edificios.



Imagen 2. Muro del Coliseo Romano. Imagen de https://www.archdaily.mx/mx/02-304525/el-concreto-romano-seria-mucho-mas-sustentable-que-el-concreto-que-fabricamos-hoy?ad_medium=gallery

Imagen 3. Volcán de Colima. Obtenido de: <https://www.udg.mx/es/noticia/prevalece-la-actividad-sismica-del-volcan-colima>

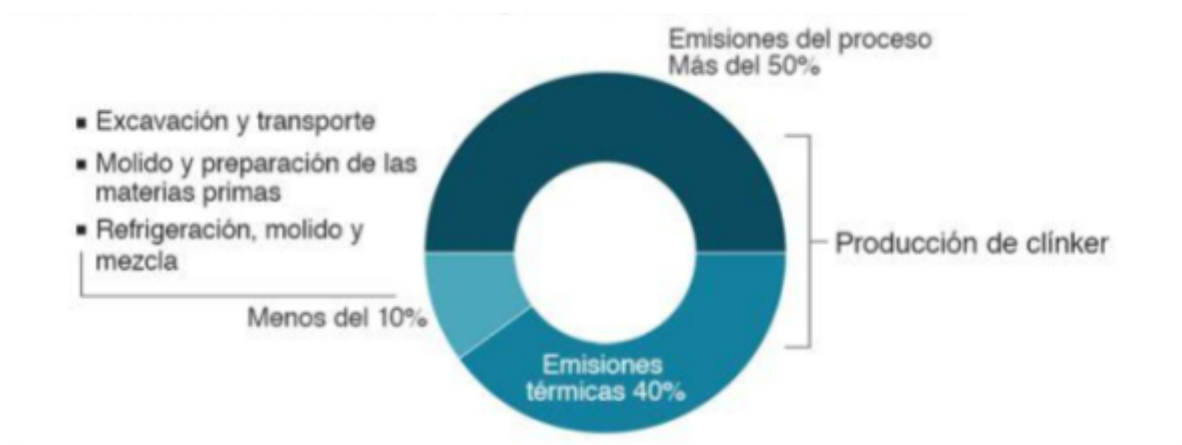
En la imagen 3, se observa el Volcán de Colima, el cual se encuentra ubicado en el sector sudoccidental de la Faja Neovolcánica Transmexicana en las coordenadas $19^{\circ}30'45''N, 103^{\circ}37'W$. y con base en su historia eruptiva, es

considerado como el volcán más activo de México (Rodríguez, 1995), constantemente realiza emisiones donde nos encontramos con cenizas volcánicas esparcidas en las cercanías al cono que lo conforma, este material natural es considerado como desecho, además de que puede causar problemas de salud si llega a ser inhalado.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el mundo actual, la toma de conciencia en el tema ambiental tiene una gran relevancia, incitando a participar a las áreas de desarrollo, tecnológica, informática, construcción y demás disciplinas, con el fin de innovar productos que no contribuyan más al desgaste ambiental del planeta.

El cemento como ahora se conoce, es el producto fabricado por el hombre más usado a nivel mundial, siendo uno de los actores responsables de las emisiones de CO₂, en la Imagen 4, se observa su proceso de producción, siendo el “clínker” el componente clave del cemento, formándose de calizar y arcilla, lo que emite la mayor cantidad de CO₂ en su fabricación, por lo que en la industria de los materiales se presenta la oportunidad de investigar y desarrollar productos alternativos con un menor impacto ambiental.



Fuente: Chatham House

BBC

Imagen 4. Emisiones de CO₂ de la producción de cemento. Imagen obtenida de <https://www.bbc.com/tecnologia/articulos/46504789>

“ MEJORAMIENTO DEL ADOBE, INTEGRANDO ÓXIDO DE CALCIO Y FIBRA DE COCO; PARA EVALUAR SUS RESISTENCIAS: DE COMPRESIÓN, TÉRMICA Y ABSORCIÓN DE HUMEDAD ”

De acuerdo a lo mencionado anteriormente, la producción de cemento Portland, no solo implica la extracción de piedra en canteras, lo que contamina el aire por la emisión de polvo, sino que también demanda el uso de enormes hornos, que consumen grandes cantidades de energía (Rodgers, 2018).

Mencionado lo anterior, es importante buscar alternativas en los materiales de construcción que contribuyan a disminuir el impacto ambiental. Con el fin de aprovechar los recursos naturales de origen volcánico disponibles en la región de Colima y mostrar una alternativa de materiales para disminuir el empleo de cemento portland, logrando obtener una mezcla estable y respetuosa con el medio ambiente.

1.3 JUSTIFICACIÓN DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

Desde el punto de vista empresarial, el sector industrial ha percibido que los aspectos ambientales bien administrados pueden generar valor económico corporativo, bien sea por la reducción del riesgo, la reducción de los costos totales de producción, el aumento de los ingresos y la buena imagen pública de la empresa. (Aura Navas, 2015)

En la producción del cemento, las emisiones de CO₂ se deben principalmente a la descomposición, en óxidos, de los carbonatos presentes en la piedra caliza. Para reducir las emisiones de CO₂, la industria cementera ha tomado diversas medidas para reducir el contenido de Clinker, entre las que se encuentra su reemplazo por materiales residuales como el sílica activa, ceniza volante o escoria de alto horno, y su uso como materia prima alternativa. (Izquierdo, 2018)

Además, el producir cemento es un proceso costoso, pues involucra un gran requerimiento energético y alta demanda de materiales provenientes de la minería.

Con el fin de reducir costos en la producción de los cementos, así como de ser ambientalmente sostenibles, hoy en día la mayoría de los cementos se constituyen de una mezcla entre Clínker, yeso y aditivos o puzolanas, que pueden clasificarse según su origen en, puzolanas naturales y puzolanas artificiales; entre las primeras se encuentran las cenizas volcánicas, tobas volcánicas, zeolitas, tierras de diatomeas (diatomitas), en las segundas se destacan las cenizas volantes, arcillas activadas térmicamente, micro sílice (humo de sílice), cenizas de cáscara de arroz y escoria de Alto Horno o de fundición. (Arenas, 2018)

Ante la huella de carbono que genera la producción de cemento portland, es tema de interés el reducir los estragos ambientales producidos por este material, buscando disminuir el uso de este, recurriendo a otros materiales conglomerantes como lo es la cal hidratada, la cual para su producción requiere una menor cantidad de energía. (Franco, 2013)

Con el historial eruptivo del Volcán de Colima y el poco aprovechamiento de todo el material puzolánico que se ha acumulado a lo largo de los años y que se encuentra esparcido en los alrededores de los estados de Colima y Jalisco, se busca crear una mezcla que pueda ser tan resistente como el concreto, reemplazando los materiales comúnmente empleados por los de origen volcánico, cabe mencionar que la mineralogía de estos materiales son altos en silicatos aluminosos, que en combinación con la cal hidratada puede generar una reacción química similar a la del cemento al entrar en contacto con el agua.

1.4 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

1.4.1 GENERAL

¿Podría desarrollarse una mezcla capaz de cumplir e incluso mejore las características mecánicas respecto a la del concreto de $f'c$ 75 kg/cm²?

1.4.2 ESPECÍFICAS

¿Qué materiales podrán ser sustituto del cemento portland?

¿Qué capacidad mecánica tendrá este nuevo material con respecto a la del concreto?

¿La ceniza volcánica en conjunto a la cal hidratada será un buen material que reduzca significativamente el empleo del cemento?

¿Cuál es la proporción óptima de estos materiales para ser empleada en una mezcla estructural?

1.5 HIPÓTESIS

Dado que el cemento portland es necesario para crear concretos y su huella de carbón es nociva para el medio ambiente, se busca desarrollar mezclas de materiales que adicionados al cemento como la cal hidratada, reduzca su consumo y que en conjunto con la ceniza volcánica y piedra pómez como sustitutos de la arena y grava, produzcan concretos con características similares o mejores a los de uno de resistencia $f'c$ 75 kg/cm², siendo aptos para su utilización en la construcción.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1. OBJETIVO GENERAL

Medir y evaluar la capacidad mecánica en diferentes proporciones de mezclas compuestas por ceniza volcánica, cal hidratada y piedra pómez, buscando sustituir el cemento portland parcialmente, con la finalidad de reducir el uso del cemento y obtener un comportamiento igual o mejor a la del concreto de $f'c$ 75 kg/cm², además de contribuir al desarrollo de nuevos materiales con escorias de origen volcánico y un menor impacto ambiental.

1.6.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Diseñar las proporciones de las mezclas, que permita analizar su comportamiento de acuerdo con su composición.
- Realizar los especímenes de prueba según el diseño de mezclas.
- Evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas
- Evidenciar los resultados obtenidos mediante tablas de contenido y gráficos, que permitan un mejor análisis e interpretación de los resultados.
- Exponer resultados y recomendaciones de la investigación.

1.7 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO METODOLÓGICO

Las variables en el desarrollo de la investigación recaen en los materiales cementantes, siendo estos los que varían de porcentaje en la mezcla, principalmente los de la ceniza volcánica y cemento, por otro lado, la cal se mantendrá en 3 proporciones distintas durante el diseño de proporciones. En el diseño de mezclas se usó el “sistema multinivel factorial fraccional 2”, arrojando un total de 27 mezclas distintas, con las cuales se realizaron 3 repeticiones para aumentar el grado de certeza y confirmación de los resultados.

Con la finalidad de evaluar sus características mecánicas, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión con una Máquina Universal UH – 500 kNI.

1.8 ALCANCES Y LIMITACIONES

ALCANCES:

La presente investigación pretende apoyar al desarrollo tecnológico y materiales con menor impacto ambiental, explorando la factibilidad del uso de materiales volcánicos de la región de Colima, como la piedra pómez y ceniza, junto con cal hidratada para disminuir el consumo del cemento portland para elaboración de mezclas útiles en la construcción.

LIMITACIONES:

El abasto de ceniza volcánica, al no encontrarse la materia prima de forma fina, se recolecta en forma de arena, pasando por una serie de procesos, iniciando por el secado, cribado y trituración, dejando las partículas limpias de impurezas y de menor tamaño.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 ANTECEDENTES

Hoy en día, la industria de la construcción utiliza una gran variedad de mezclas con distintos usos, algunas son empleadas en acabados y otras para uso estructural. La principal mezcla utilizada en la edificación es el concreto, la cual también es una de los principales contaminantes a nivel mundial, siendo responsable del 8% de emisiones de CO₂, debido a la fabricación del concreto y su reacción química al entrar en contacto con el agua. Por tanto, la búsqueda de materiales que reduzcan los estragos de la fabricación y uso del cemento es un tema de interés, la sustitución de materiales cementantes que sustituyan al cemento es muy reducido, sin embargo, existen antecedentes en la historia donde utilizaban materiales puzolánicos mezclados con cal para generar sus aglomerantes.

El empleo de la ceniza volcánica para generar aglomerantes es quizás un tema olvidado, pues bien, ya en la antigüedad era empleada, sin embargo, se tienen que analizar las propiedades de los minerales de origen volcánico, pues cada volcán, varía en su composición.

En la Tabla 1 se observa el uso de la Cal en distintos lugares, siendo un material que su empleo data desde la antigüedad, utilizada por una gran cantidad de civilizaciones a lo largo de la historia del hombre, manipulada en varios ámbitos, tanto en la construcción hasta la

<i>Egipto</i>	Se usó en enlucidos, pintura al fresco, juntas de piedras, en canalizaciones, mezclada con arcilla, de las pirámides y en las tumbas faraónicas de más de 8 mil años de antigüedad.
<i>Palestina</i>	Se encontraron restos de cal en la ciudad de Jericó con 10 mil años de antigüedad.
<i>Mesopotamia</i>	Se usó para revestimiento de muros, canalizaciones de agua, baños y aljibes de templos, tumbas o viviendas.
<i>Turquía</i>	Se encontró el fresco más antiguo conocido de 8 mil 200 años de antigüedad.
<i>Grecia y Roma</i>	Se usó de manera masiva en las edificaciones para el asentamiento de piedras de sillería, juntas, revestimiento de muros con morteros y frescos de variados coloridos, en cimentaciones mezcladas con cascajo, en baños, aljibes y canalizaciones.
<i>Árabes y Mozárabes</i>	La usaron de igual forma, y particularmente en sus tan bien logradas decoraciones mediante acabados finos.

Tabla1. La cal en la historia, Imagen obtenida de: <https://oxical.mx/manual-de-uso.pdf>

producción de alimentos. (Soledad, y otros, 2017)

La cal ha sido un material esencial en el avance tecnológico y constructivo históricamente, se ha empleado desde la antigüedad en sorprendentes edificaciones alrededor del mundo, conocida por su resistencia y solidez a lo largo del tiempo, encontrándonos claros ejemplos como:

1. Las Pirámides de Guiza, donde se utilizó un conglomerante a base de piedra caliza, y como recubrimiento para realizar pinturas. (Arcontes Pascual, 2015)
2. La Vía de Apia, que fue una de las más importantes calzadas de la antigua roma, utilizando capas de piedra, puzolanas y cemento de cal.
3. El Coliseo Romano, donde la cal fue utilizado como mortero para pegar los ladrillos, y además como relleno dentro de ellos.
4. La Gran Muralla China, se manejó piedra caliza, ladrillos cocidos, y otros materiales, pero el mortero que utilizaban estaba compuesto por harina de arroz mezclada con arcilla y cal, dando una gran resistencia.
5. Pirámides de Teotihuacan, donde la cal fue empleada para recubrimientos
6. Construcciones en Hispanoamérica, aquí durante la época colonial, la cal tuvo un papel importante, usándose como mortero para levantar importantes construcciones, empleada para recubrimientos, acabados y conglomerante.

Retomando el empleo de la ceniza en la antigüedad, los griegos y romanos, fueron los primeros en utilizar la cal y los materiales volcánicos para realizar sus mezclas, quizás por razones de azar geográfico y geológico, llegaron a desarrollar una "tecnología avanzada" para sus tiempos, aunque las ideas de agregar estas escorias volcánicas a la cal se consideraron como simple áridos y serian inertes,

como en la generalidad de ellos. Estas escorias después serían llamadas, por su origen, "puzolanas".

La observación hizo el resto, naciendo los primeros "conglomerantes" o, si se prefiere, "cementos puzolánicos", a base de cal y escorias volcánicas, surgiendo después los primeros "conglomerantes" o "cementos siderúrgicos", constituidos por cal y escoria.

Probablemente, desde esa época y a partir de ese hecho, por tradición, se viene arrastrando, bien que, modificada y ampliada por el tiempo y el progreso, la definición clásica de puzolana: material natural de origen volcánico, capaz de combinarse con la cal a temperatura ordinaria y en presencia de agua, dando lugar a compuestos con propiedades hidráulicas conglomerantes. (Calleja, 1977).

Los Romanos continuaron innovando en la construcción y se cree que el hormigón liviano se originó por primera vez durante el Imperio Romano año (25 a.c), siendo el resultado de mezclar piedra pómez con limos calcinados como material cementante, así lo aseveran las ruinas de templos importantes como la cúpula del panteón de Agripa en Roma, el acueducto Pont du Grand. En la imagen 5 se observa la arcada superior del Coliseo Romano (70 d.c), con luces que superan los 25 metros. (Varela, 2006).



Imagen 5. Arcada del Coliseo Romano. Imagen de José Tomás Franco, mayo 2013. Tomada de: https://www.archdaily.mx/mx/02-304525/el-concreto-romano-seria-mucho-mas-sustentable-que-el-concreto-que-fabricamos-hoy?ad_medium=gallery



Los morteros que llegaron a desarrollar los Romanos a base de cal con puzolanas cambio la naturaleza de la construcción en sus tiempos. Pues bien, los romanos observaron que el “cementum” compuesto por cal apagada con ceniza volcánica fraguaba mucho más rápido que el mortero de cal con arena y siendo varias veces más fuerte. En esta mezcla observaron además tenía una propiedad casi mágica, pues poseía la capacidad de fraguar incluso cuando estaba completamente sumergida en agua. permitiéndoles construir puertos y aumentar su control marítimo. (Aguasain, 2017)

Sin embargo, este conocimiento sobre los cementos elaborados por ellos se perdió con la caída del imperio romano. Ninguna fuente medieval menciona el cemento y las grandes catedrales que se construyeron usando morteros de cal con puzolanas.

Sin duda la historia del desarrollo de los materiales cementantes ha desempeñado un papel fundamental a lo largo de las creaciones del ser humano, permitiendo edificar construcciones que en su momento parecían imposibles de construir. Hasta en la actualidad la industria cementera sigue creando nuevos productos que permiten una gran versatilidad en los diseños para construcción.

Así el cemento, al ser mezclado con agua se hidrata; dando partida a complejas reacciones químicas que lo convierten en una pasta moldeable con buenas propiedades de adherencia. Dicha mezcla al fraguar en pocas horas comienza a endurecer progresivamente, aumentando con el tiempo su capacidad de carga y adquiriendo una consistencia pétreo. Esta característica, sin duda, es el principal atractivo que lo convirtió en el conglomerante más económico y versátil del ramo de la construcción actual, siendo hoy en día el material más usado. (E, 2013)

2.2 CONCEPTUAL

Para esclarecer los materiales utilizados a lo largo de la investigación, se definen los conceptos.

En la Imagen 6 se observa el Cemento Portland, que según la norma N-CMT-2-02-001/0, lo define como un conglomerante hidráulico que al ser hidratado se solidifica y endurece. Obteniéndose mediante un proceso industrial, pulverizando a un grado de finura resultando una mezcla fría de arcilla y materiales calcáreos, que anteriormente pasar por un proceso de cocción, conocido como Clinker, la cual se le suma sulfato de calcio como anhidrita (CaSO_4), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o hemihidrato ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), para regular el tiempo de fraguado.



Imagen 6. Cemento Portland Gris. Imagen obtenida de: <https://www.arqhys.com/construccion/portland-cemento.html>

También se le pueden incorporar otros materiales o aditivos según las propiedades que se requieran, hoy en día existen una gran variedad de cementos, entre los que encontramos los siguientes:

Cemento tipo I: Uso general

Es el cemento que se utiliza regularmente, siendo apropiado prácticamente para todos los usos

Cemento tipo II: Moderada Resistencia a sulfatos y al calor de hidratación

Este tipo se suele emplear cuando las estructuras están expuestas a suelos o agua subterránea poseen concentraciones de sulfatos más altos de lo normal.

Cemento tipo III: Altas Resistencias Iniciales

Este tipo es prácticamente como la del tipo I, a diferencia que este posee aditivos que aceleran su resistencia a corto tiempo, se suele requerir cuando se desea remover la cimbra lo más rápido posible.

Cemento tipo IV: Para lograr bajo calor de hidratación

A contrario del tipo III, este contiene aditivos que hacen el desarrollo de la resistencia sea a una tasa más lenta, estos se presentan en cierto tipo de circunstancias donde las condiciones climáticas y el calor generado por el concreto debe ser minimizado.

Cemento tipo V: Alta Resistencia a Sulfatos

Por último, este es similar al tipo II, solo que este tiene más resistencia a los sulfatos.

En la imagen 7 se observa la Cal Hidratada, donde la Norma N-CMT-4-03-001/02, la define como un producto cementante seco, hidratado, obtenido de calcinar calizas que contienen sílice (SiO) y alúmina (Al_2O_3) a una temperatura cercana a la de fusión incipiente, de tal forma que se obtiene suficiente óxido de calcio (CaO) para permitir la hidratación, dejando suficientes silicatos de calcio (CaSiO_3) sin hidratar, con lo que resulta un polvo seco, que cumple con las propiedades hidráulicas requeridas en algunas aplicaciones, destacando la propiedad de fraguar y endurecer, aun bajo el agua.



Imagen 7. Cal Hidratada. Imagen obtenida de: <https://www.flexicon.es/Materiales-Manejados/Cal-Hidratada.html>

Existen otras variedades de cal, entre las que encontramos para aplicaciones en la construcción la siguientes:

Cal Viva, esta es obtenida de la calcinación de la piedra caliza y se le suele conocer como cal en piedra, en trozo o terrón.

Cal Apagada, es la que se obtiene del proceso en el cual la cal viva es sumergida en agua. Este tipo de cal también es conocido como cal en pasta, esta mejora sus propiedades pasando por un proceso de añejamiento manteniendo un espejo de agua, entre más tiempo pase, mejor será su desempeño a la hora de usarse.

Cal de Alta Pureza, es la que contiene un elevado porcentaje de óxido de calcio en su composición, hasta un 96%. Es considerada como el mejor y más versátil cementante tradicional del mundo, pues es fue el aglutinante más utilizado en la historia de la construcción de edificios. (Velázquez Vertti & Cuan Alarcón, 2019)

La ceniza volcánica, es la escoria que cae lentamente desde alturas considerables, y está formada de fragmentos piroclásticos muy pequeños, producto de la fragmentación extrema de lava fresca. Generalmente tiene un diámetro entre 1/16 mm y 2 mm, aunque también se puede encontrar más fina con un diámetro menor de 1/16 mm. Además, en ocasiones,



Imagen 8. Depósitos piroclásticos. Imagen obtenida de: <https://portal.ucol.mx/cueiv/Volcan-colima.htm>

cuando el magma contiene numerosos cristales, los sólidos se separan del líquido para formar ceniza cristalizada. En la Imagen 8, se muestra un ejemplo de estos depósitos, encontrándose sobre la barranca de Montegrando, una gran cantidad de flujos piroclásticos.

La ceniza volcánica al caer llega a formar depósitos, creando capas de ceniza, que al consolidarse se llaman tobas. Estas cenizas frescas, frecuentemente contienen grandes fragmentos, por lo que también pueden llamarse ceniza-lapilli; en caso de contener moderado o abundante lapilli se le denomina toba-lapilli; si contienen bloques de roca, entonces será toba-brecha y si contiene bombas volcánicas será toba aglomerado. (Mexicano, 2017)

Las cenizas y rocas del Complejo Volcánico de Colima están compuestas en general, de andesitas básicas calco alcalinas a andesitas silíceas con presencia de anfíboles. Una tendencia al decremento en contenido de sílice en las lavas eruptivas de norte a sur y es correlacionada con una tendencia al incremento en la tasa de erupción. (Komorowski & Navarro, 2019)

En la imagen 9 se muestra la Piedra Pómez o Jal, como comúnmente es reconocida en el Estado de Colima, donde se recibe este nombre dado que es suministrada del Estado de Jalisco, Este material es una roca ígnea volcánica vítrea, con una baja densidad y muy porosa de color blanco, amarillo o gris,



Imagen 9. Piedra Pómez. "Jal"

posee características que la hacen resistente al frío, al fuego, a la intemperie y libre de sales solubles en agua. (Castro, 2010)

2.3 INVESTIGACIONES EXISTENTES

En la actualidad se busca el desarrollo de materiales que sean sostenibles, uno de los principales productos y mayormente usados a nivel global es el cemento, causante de emitir dióxido de carbono (CO₂) y afectar directamente el calentamiento

global y efecto invernadero, de aquí la importancia de buscar nuevos materiales que puedan sustituir este producto.

El empleo de ceniza Volcánica para elaborar materiales de construcción se ha visto presente en los últimos años, y ha estado jugando un rol importante y prometedor para lograr ser un producto que, en combinación con otros elementos como la cal hidratada, puede lograr mezclas útiles en la construcción, ejemplo de esto, son los siguientes casos:

La primera investigación ya obtuvo resultados prácticos, por parte de la Universidad de Rio Negro en Argentina, donde se desarrolló un bloque con ceniza volcánica, cal y cemento, la investigación fue por parte de los arquitectos Marianela Romero Hamsa y Álvaro del Villar. En la Imagen 10, se aprecia a los arquitectos con el prototipo desarrollado.



Imagen 10. Autores del Bloque de ceniza. Imagen obtenida de: <https://argentear.com/ecoladrillo/>

El proyecto surgió como parte del programa de emergencia volcánica, la ceniza utilizada proviene del complejo Volcánico Puyehue. Nadie contemplaba que las cenizas volcánicas podían convertirse en material de construcción, en este caso en particular a un ladrillo que permite construir estructuras resistentes y eficientes. Son bloques ecológicos que aprovechan las escorias, además de que no pasas por un proceso de cocción, siendo esto uno de los motivos que contamina el medio ambiente.

Los arquitectos desarrollaron su investigación con los siguientes materiales: ceniza volcánica, cemento y cal. El bloque fue fabricado con

maquinaria y secado al natural, su diseño brinda un fácil montaje y rapidez en mano la obra. (Unrn.edu.ar, 2015)

Otra investigación se presenta en México, mostrando una inquietud sobre el aprovechamiento de las cenizas volcánicas, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, Unidad Saltillo, desarrolla una investigación donde se propone hacer uso de las cenizas volcánicas para crear un cemento ecológico con características similares a las del cemento portland, el cual es utilizado en la elaboración de concretos. En la Imagen 11, se muestran un banco de ceniza para la elaboración del cemento.

Dicho proyecto se encuentra a cargo de José Iván Escalante García y financiado por el Programa Fronteras de la Ciencia del CONACYT, forma parte de una serie de alternativas que emplea materiales reciclados, desechos y materias primas naturales alternativas para obtener nuevos cementos, en donde el proceso de fabricación refleje un menor impacto ambiental.



Imagen 11. Banco de Ceniza. Imagen obtenida de: <https://vanguardia.com.mx/articulo/usan-saltillenses-ceniza-volcanica-para-cemento>

En el caso del uso de ceniza volcánica, el investigador del Cinvestav señaló que se consideró ese material debido a la abundancia, bajo costo, composición química y carácter amorfo de su estructura atómica.

Las propuestas de los nuevos cementos contienen hasta 80 por ciento de material volcánico, sin que sea necesario emplear hornos de altos grados durante el proceso.

En cuanto a las características, el cemento basado en cenizas volcánicas no sólo es más barato en términos de producción, sino que en las pruebas realizadas ha verificado su funcionalidad, mostrando características mecánicas semejantes a la del cemento portland, incluso visualmente siendo idénticos. (Cinvestav, 2019)

2.4 NORMATIVIDAD

Es importante conocer el marco normativo, para conocer las especificaciones de los materiales que conforma el tema de investigación, brindando de un sustento legal que da un mayor soporte y firmeza en las pruebas realizadas, así como de certeza a los resultados.

Este sustento se consigue mediante un conjunto de normas, que especifican las calidades de los materiales, métodos e instrumentos para la realización de pruebas, tiempos de fraguado entre otras características, por lo que servirá como apoyo para el desarrollo experimental en base en un sustento normado.

La industria de los materiales en los últimos años busca reducir los impactos ambientales en el desarrollo de sus materiales, ya sea por fines económicos y/o imagen pública. Dicho esto, en el desarrollo de nuestro material también debemos considerar estos impactos, por lo que se consultó la ley general de cambio climático que trata en su artículo 34 sobre la promoción y empleo de materiales ecológicos y de sustentabilidad energética, y dado que el objetivo del trabajo es generar un material que ayude a reducir el consumo del cemento portland, buscando reducir la emisión de gases contaminantes se recurre a este artículo para ver el aprovechamiento que se le puede encontrar.

Para la elaboración de los prototipos se utilizó como referencia la *N-CMT-2-01-004-02*, la cual indica el diseño de probetas para ser sometidas a esfuerzos de compresión, debido al enfoque de desarrollo de un nuevo material, involucra realizar pruebas de este tipo, teniéndola a la mano para consulta, pues

además menciona los requisitos de calidad que deben de contener los morteros empleados en trabajos de albañilería, en caso de que este fuera un uso aplicable.

Continuando con el contenido de materiales de la mezcla a elaborar, debemos tener en cuenta las características de los agregados, consultando así la norma *NMX-C-282-ONNCCE-2004*, la cual trata sobre los agregados en el concreto, cambio de volumen de combinaciones cemento-agregado y métodos de prueba. Debido a este contenido fue importante tenerlo como material de apoyo en el diseño de las mezclas realizadas y teniendo un sustento normado.

Por último, considerando que se busca sustituir el cemento por la cal hidratada con ceniza volcánica para el desarrollo del material debemos de entender la calidad y especificaciones del cemento portland en pruebas estructurales, esta información se obtuvo de la *ASTM C 75*, norma que cuyo contenido brinda datos de comparación de uso estructural, así mismo también como complemento se revisó la *NMX-C-021-ONNCCE-2015*, norma donde se encuentran especificaciones para la calidad del cemento para la albañilería (mortero), donde establece en una tabla los alcances según el tiempo de fraguado del mortero, tomando como consideración a 7 y 28 días de edad.

3. METODOLOGÍA APLICADA

3.1 ENFOQUE Y TIPO DE ESTUDIO

Esta investigación va dirigida principalmente a la industria de la construcción, así como al ramo educativo donde se tenga la inquietud por la innovación en materiales.

El carácter de la investigación es de tipo exploratorio, debido a que el tema del presente trabajo no se ha abordado antes, también es cuantitativo, dado a la variabilidad de los materiales empleados, integrándose de manera definida mediante dosificaciones derivadas de un diseño experimental factorial multinivel, generando diferentes mezclas, de las cuales, se obtuvieron resultados de los esfuerzos axiales, los cuales después de realizar un análisis e interpretación de los datos obtenidos, determinar las conclusiones correspondientes.

Los tipos de investigación que se desarrollaron fue documental, pues se llevo acabo una recopilación de información para el desenvolvimiento del tema; analítico ya que se tiene que interpretar las variables de estudio y experimental de carácter cuantitativo, ya que se analizaron cada una de las mezclas para llevar a cabo la prueba de laboratorio, permitiendo obtner los valores del comportamiento al someterlo a esfuerzo a la compresion cada mezcla, siendo fundamental en la investigacion pues de esta se desprendieron los datos científicos respaldando los resultados y conclusiones.

3.2 ÁREA DEL ESTUDIO

La investigación se enfocó en el desarrollo de nuevos materiales en la industria de la construcción. Logrando dar un aprovechamiento a los materiales de origen volcánico, en especial a la ceniza y la piedra pómez. Buscando reducir el uso del cemento portland al sustituir arena por ceniza volcánica, jal o piedra pómez por grava y cal hidratada sustituyendo al cemento en un 50%, generando un aglomerante lo suficientemente fuerte como para sustituir parcialmente el uso del cemento en concretos.

El tema se desarrolló en el municipio de Villa de Álvarez, Colima. Dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de México Campus Colima. El suministro de los materiales se llevó a cabo de negocios de materiales cercanos al campus a excepción de la ceniza volcánica, en la imagen 12 se muestra la ubicación de la depresión Cordobán (Río Cordobán), ubicado en la comunidad de la Becerrera, sitio donde se realizó la recolecta de cenizas esparcidas.

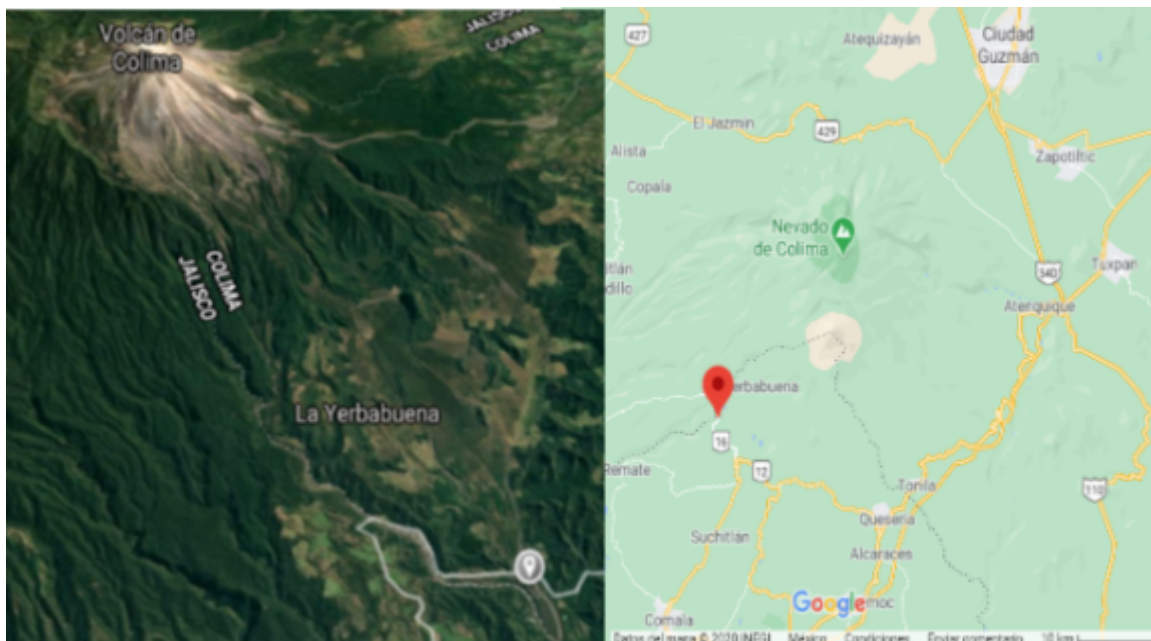


Imagen 12. Ubicación del Río Cordobán. Imagen extraída de Google Maps.



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

3.3 DETERMINACION DE VARIABLES Y DISEÑO DE MEZCLAS

Las variables consideradas en esta investigación van enfocadas a los materiales cementantes que buscan remplazar el uso del cemento, así como la resistencia que pueden lograr, siendo las siguientes:

Independientes. - Porcentaje de Ceniza, Cal y Cemento

Es importante que se consideren la obtención de los materiales de origen volcánico, enfatizando la ceniza, pues a pesar de que el volcán de Colima se encuentra activamente, sus emanaciones de ceniza fina suelen caer a grandes distancias dependiendo las condiciones del viento. Como menciona (Komorowski & Navarro, 2019), la composición mineral de la ceniza está compuesta principalmente por andesitas silíceas calcoalcalinas, siendo una roca bastante suave, contiene pequeñas variaciones en el contenido de óxido de silicio, además de la granulometría en la que se encuentra esparcida es muy variada, por lo que se tiene que pasar por un proceso de limpieza, selección y molienda para obtener un grado fino del material.

En cuanto a la Cal hidratada, como se ha descrito anteriormente es un hidróxido de calcio, el cual es comúnmente utilizado en el ramo constructivo para la elaboración de morteros a base de cal, acabados finos y gruesos, repellos, para aglomerante para pegado de ladrillos, entre otros usos. La marca que utilizo es Calidra, una marca comercial de fácil adquisición y de buena calidad.

El cemento es el aglutinante por excelencia, sin embargo, este material es el que se busca reducir. La marca utilizada de cemento fue Tolteca.

Dependientes. - Resistencia a la compresión

El esfuerzo a resistencia a la compresión fue seleccionado ya que se tiene la hipótesis de que las mezclas con los materiales mencionados pueden tener la misma o mejor resistencia lograda con menor cantidad de cemento en mezclas de concreto. Analizando la resistencia de cada espécimen y grado de deformación hasta su ruptura.

El diseño de mezclas se realizó tomando en cuenta un “sistema multinivel factorial fraccional 2⁴”; En este sistema se pueden realizar los experimentos de la forma más adecuada para conocer simultáneamente qué efecto tienen determinado número de factores sobre una respuesta y descubrir su interacción entre ellos. Además, en este tipo de diseño se realizan todas las combinaciones posibles entre los efectos, creando una matriz de diseño.

En la imagen 13 se observa el programa “StatGraphics”, la versión utilizada de este fue centurión XVII para un sistema operativo de 64 bit, para más información se puede consultar el manual de usuario, encontrándose el enlace en las referencias de este documento (STATGRAPHICS, 2022). Este es una herramienta de análisis de datos de gran alcance que combina una amplia gama de procedimientos con gráficos interactivos que proporcionan un entorno integrado de análisis de datos. Este programa puede realizar el diseño de mezclas con el sistema multinivel mencionado, en el cual se insertó la información de las Variables Independientes, siendo en este caso en particular, los porcentajes de cal hidratada, ceniza volcánica y cemento, así como la variable dependiente siendo el módulo de resistencia buscado. Vaciada la información, se ejecutó el análisis, arrojando el resultado de las corridas con las dosificaciones de las mezclas prototipos y cantidad de estos.



Imagen 13. Programa Statgraphics XVII

Para la utilización de este programa se contó con el apoyo del M.A. Fidel Navarro, el cual facilitó su equipo con el programa para realizar el análisis, esto debido al uso de licencia del programa.

En la imagen 14, se muestra el resultado arrojado por el programa, producto del análisis, donde se contempló una repetición de 3 especímenes por diseño de mezcla para aumentar el grado de confiabilidad a un 95%, este grado lo determino el programa mediante un análisis que realiza al ir insertando los datos, en el cual se solicita insertar el número de repeticiones y en base a esto aumenta o disminuye el grado de certeza, para efectos de esta investigación se decidió realizar 3 repeticiones. Con esta información el programa arrojó un diseño con la cantidad de 27 mezclas prototipo resultantes, dando una totalidad de 81 elementos a ensayar.

Teniendo los materiales preparados, cantidad de prototipos, y definido el diseño multinivel factorial fraccional, se realiza una sustitución de materiales del concreto con los materiales propuestos.

MATERIAL	PORCENTAJE %	GRAMOS g	DENSIDAD g/cm ³	PESO REQUERIDO g
Ceniza volcánica	30	77.62	1.8	225
Cemento	10	25.87	DESPERDICIO %	PESO NETO g
Cal hidratada	10	25.87	15	258.75
Piedra pómez	30	77.62		
Agua	20	51.75		
Total	100	258.75		

Considerando como punto de partida la densidad del concreto siendo de 1.8 g/cm³, densidad obtenida del manual del constructor de Cemex. Sacando una relación de masa necesaria para cada espécimen, multiplicando las dimensiones del molde por la densidad mencionada dando una masa de 225 gramos por cada uno, donde se contempló un desperdicio del 15%, dando una masa neta de 258.75 gramos, esta cantidad se sustituirá en una proporción basada en un concreto de f'c de 75 kg/cm², donde la ceniza volcánica sustituirá a la arena, el jal a la grava, mientras que la cantidad del cemento requerido se contempló reducirlo por mitad, adicionando la cal hidratada para a completar la cantidad requerida de material cementante. En la tabla 2 se muestran los porcentajes de los materiales de la mezcla base, de la cual se busca sustituir aún más la cantidad de cemento.

De acuerdo al resumen del diseño de las mezclas, la combinación de las variables en las 27 mezclas resultó como se muestra en la tabla 3.



Tabla 3. Combinaciones de las variables

POCENTAJE DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES			
No. DE MEZCLA	PORCENTAJE DE MATERIAL		
	2	75	50
3	100	50	50

“ MEJORAMIENTO DEL ADOBE, INTEGRANDO ÓXIDO DE CALCIO Y FIBRA DE COCO; PARA EVALUAR SUS RESISTENCIAS: DE COMPRESIÓN, TÉRMICA Y ABSORCIÓN DE HUMEDAD ”



Los porcentajes de la tabla 3, se sustituyeron con los valores de la tabla 2, dando por resultado la cantidad de gramos de cada material para cada mezcla, la diferencia resultante se restó a la cantidad neta inicial (258.75 gramos) sumándose al agregado pétreo, en este caso el jal, posteriormente se multiplicó por tres para tener la cantidad necesaria de los 3 especímenes correspondiente a cada mezcla, tal cual se muestra en las tablas 4 y 5.

N° DE MEZCLA	MATERIAL POR ESPECIMEN					TOTAL Gramos
	CENIZA	CEMENTO	CAL	JAL	AGUA	
	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	
1	38.81	12.94	12.94	142.31	51.75	258.75
2	58.22	12.94	12.94	122.91	51.75	258.75
3	77.63	12.94	12.94	103.50	51.75	258.75
4	38.81	19.41	12.94	135.84	51.75	258.75
5	58.22	19.41	12.94	116.44	51.75	258.75
6	77.63	19.41	12.94	97.03	51.75	258.75
7	38.81	25.88	12.94	129.38	51.75	258.75
8	58.22	25.88	12.94	109.97	51.75	258.75
9	77.63	25.88	12.94	90.56	51.75	258.75
10	38.81	12.94	19.41	135.84	51.75	258.75
11	58.22	12.94	19.41	116.44	51.75	258.75
12	77.63	12.94	19.41	97.03	51.75	258.75
13	38.81	19.41	19.41	129.38	51.75	258.75
14	58.22	19.41	19.41	109.97	51.75	258.75
15	77.63	19.41	19.41	90.56	51.75	258.75
16	38.81	25.88	19.41	122.91	51.75	258.75
17	58.22	25.88	19.41	103.50	51.75	258.75
18	77.63	25.88	19.41	84.09	51.75	258.75
19	38.81	12.94	25.88	129.38	51.75	258.75
20	58.22	12.94	25.88	109.97	51.75	258.75
21	77.63	12.94	25.88	90.56	51.75	258.75
22	38.81	19.41	25.88	122.91	51.75	258.75
23	58.22	19.41	25.88	103.50	51.75	258.75
24	77.63	19.41	25.88	84.09	51.75	258.75
25	38.81	25.88	25.88	116.44	51.75	258.75
26	58.22	25.88	25.88	97.03	51.75	258.75
27	77.63	25.88	25.88	77.63	51.75	258.75

Tabla 4. Dosificación por espécimen.



N° DE MEZCLA	MATERIALES PARA 3 ESPECIMENES					TOTAL
	CENIZA	CEMENTO	CAL	JAL	AGUA	
	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos	Gramos
1	116.4375	38.8125	38.8125	426.9375	155.25	776.25
2	174.65625	38.8125	38.8125	368.71875	155.25	776.25
3	232.875	38.8125	38.8125	310.5	155.25	776.25
4	116.4375	58.21875	38.8125	407.53125	155.25	776.25
5	174.65625	58.21875	38.8125	349.3125	155.25	776.25
6	232.875	58.21875	38.8125	291.09375	155.25	776.25
7	116.4375	77.625	38.8125	388.125	155.25	776.25
8	174.65625	77.625	38.8125	329.90625	155.25	776.25
9	232.875	77.625	38.8125	271.6875	155.25	776.25
10	116.4375	38.8125	58.21875	407.53125	155.25	776.25
11	174.65625	38.8125	58.21875	349.3125	155.25	776.25
12	232.875	38.8125	58.21875	291.09375	155.25	776.25
13	116.4375	58.21875	58.21875	388.125	155.25	776.25
14	174.65625	58.21875	58.21875	329.90625	155.25	776.25
15	232.875	58.21875	58.21875	271.6875	155.25	776.25
16	116.4375	77.625	58.21875	368.71875	155.25	776.25
17	174.65625	77.625	58.21875	310.5	155.25	776.25
18	232.875	77.625	58.21875	252.28125	155.25	776.25
19	116.4375	38.8125	77.625	388.125	155.25	776.25
20	174.65625	38.8125	77.625	329.90625	155.25	776.25
21	232.875	38.8125	77.625	271.6875	155.25	776.25
22	116.4375	58.21875	77.625	368.71875	155.25	776.25
23	174.65625	58.21875	77.625	310.5	155.25	776.25
24	232.875	58.21875	77.625	252.28125	155.25	776.25
25	116.4375	77.625	77.625	349.3125	155.25	776.25
26	174.65625	77.625	77.625	291.09375	155.25	776.25
27	232.875	77.625	77.625	232.875	155.25	776.25

Tabla 5. Dosificación total por mezcla

3.4 POBLACIÓN Y MUESTRA

Con el diseño de mezclas resultado de las variables contempladas en el sistema multinivel factorial fraccional, y manejando un 95% de certeza en los resultados se realizarán 3 especímenes de cada prototipo establecido.

Como se observó en el análisis realizado con anterioridad en la tabla 3, salieron 27 tipos de mezclas resultantes y una totalidad de 81 especímenes, partiendo como elemento rector el porcentual en el cemento, siendo 3 segmentos con 9 tipos de mezclas cada uno, con la siguiente dosificación respectivamente de cemento: 50%, 75% y 100%.

3.5 INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

3.5.1 MATERIAL, HERRAMIENTA Y EQUIPO

Obtenida la información de las cantidades de cada material por cada mezcla prototipo, nos haremos de los equipos y herramientas que se requieren para comenzar a realizar los especímenes, así como para la medición y evaluación de las pruebas.

Equipos y herramientas para la elaboración de mezclas:

- Báscula digital, la cual se utilizó para medir lo más exacto posible la cantidad de los materiales para realizar las mezclas, así como obtener el peso de cada espécimen antes de realizar la prueba a compresión.
- Cuchara de albañilería para detalles, por el tamaño es más práctica el tomar los materiales, mezclarlos, verter la mezcla una vez este homogénea y además de dar un acabado liso a la cara superior sobre el molde.
- Recipientes de plástico, se utilizaron 8, siendo los necesarios para tener un orden de los materiales, así como para medir y mezclar, uno fue



utilizado para guarecer la ceniza que previamente se trató y protegerla de humedad y no se contamine con algún otro material, otro para contener el jal cribado, dos para el agua, uno de abastecimiento y otro para dispensar, uno más que servirá para pesar cada uno de los materiales y por último una cubeta donde se realizan las mezclas. En cuanto al Cemento y la Cal, no se requirieron de un recipiente en especial pues estaban contenidas en bolsas de 5 kg, de las cuales se fue tomando lo requerido.

- Base de madera, la cual deberá estar aceitada para prevenir que se deforme por hinchazón, esta tabla debe estar lisa y recta, pues en ella se coloca el molde y se verterán las mezclas realizadas.
- Moldes, se realizaron 5 moldes metálicos con solera de 3mm de espesor con capacidad para 3 especímenes cada uno.

Equipos y herramientas para la medición en las pruebas de los especímenes:

- Maquina Universal marca SHIMADZU corporation, modelo UH-500 kNI, número de serie I21054500193, con capacidad de hasta 500 KN, en la cual se realizarán las pruebas a esfuerzos a la compresión, el manual del usuario se puede encontrar en su sitio web, la referencia de este se puede encontrar en las fuentes de investigación de este documento (SHIMADZU, 2022).
- Un celular con cámara de video, con la cual se tomará evidencia y bitácora del proceso durante las pruebas.
- Computadora y libreta, en las cuales se podrán ir vaciando y anotaciones de las mediciones.

3.5.2 TRATAMIENTO DE LOS MATERIALES

Ceniza Volcánica:

En la Imagen 15, se observa la depresión Cordobán (Río Cordobán), del cual se realizó el suministro de las cenizas volcánicas, encontrándose depósitos que descienden de las partes más altas del volcán por su flanco sudoccidental, hasta llegar al poblado de La Becerrera. Sitio viable para la recolección según la literatura consultada. (Rodríguez Elizarrarás, 1995).



Imagen 15. Río Cordobán.

Además de las fuentes literarias consultadas donde nos hace mención del sitio donde se puede encontrar la ceniza, el Geógrafo Juan Gavilán, quien ha trabajado en el área de Vulcanología del Estado de Colima, concuerda también que en dicho sitio es recomendable para tomar muestras. En la imagen 16 se muestra un ejemplo de cenizas encontradas en el sitio. El geógrafo explicó que la ceniza viene incluida en los flujos piroclásticos que descienden del volcán por la superficie a 100-200 km/h, igual en las avalanchas gigantes que pueden llegar hasta Coquimatlán y por supuesto en los lahares y en la lluvia de ceniza. En este último caso lo más grueso se precipita



Imagen 16. Muestras encontradas en sitio.

primero a tierra (arena muy gruesa), cayendo cerca del cráter, y lo más fino se lo lleva el viento hasta a 1000 km de distancia.

Realizada la recolección del material volcánico, se realizó un proceso de secado a la intemperie, extendiendo la ceniza y dejándola expuesta al sol por un día entero, con el propósito de eliminar el mayor porcentaje de humedad y tener un material seco, facilitando los procesos posteriores de cribado y triturado.

Retirada la humedad de la ceniza, el siguiente paso fue realizar un cribado, utilizando una malla del número 1 (5 hilos por pulgada), permitiendo retirar el material orgánico y otras partículas ajenas, obtenido el material limpio y seco se realiza una molienda de este, apoyados de un molino manual con el propósito de dejar el material lo más fino posible terminando como se aprecia en la Imagen 17, finamente el material se almacena listo para la realización de las mezclas.

IMAGEN 17. Ceniza volcánica



“ MEJORAMIENTO DEL ADOBE, INTEGRANDO ÓXIDO DE CALCIO Y FIBRA DE COCO; PARA EVALUAR SUS RESISTENCIAS: DE COMPRESIÓN, TÉRMICA Y ABSORCIÓN DE HUMEDAD ”

En cuanto la Piedra Pómez o “Jal”, en la imagen 18 se muestra el proceso de cribado, donde se utilizó una malla del número 2, con el fin de mantener una granulometría uniforme en el material, teniendo ya el material seleccionado se almaceno para su posterior uso.



IMAGEN 18. Cribado de Jal

En cuanto los materiales cementantes empleados tanto el Cemento Portland como la Cal Hidratada se adquieren de negocios locales del municipio de Villa de Álvarez, Colima. El cemento que se utilizó fue de la marca Tolteca, mientras que la Cal fue de la marca Calidra, esto fue por la disponibilidad en el local.

El dato obtenido de la ceniza volcánica fue del Libro Volcanes Activos del Mundo: Volcán de Colima, cabe acotar que la ceniza volcánica húmeda puede llegar a aumentar entre un 50-100% su peso (Varley, Charles B, & Komorowski, 2019). El resto de las características se obtuvo del Manual del Constructor de Cemex, en la sección de los materiales. (Cemex)

Para la elaboración de las probetas con las distintas mezclas y proporciones de agregados propuestos para el caso de estudio en esta investigación, se expone de manera detallada los pasos y recomendaciones

pertinentes necesarios para tener en cuenta si se desea replicar el modelo, en cuanto al diseño de mezclas se utilizó el sistema multinivel fraccional factorial 2.

3.5.3 LAS PROBETAS

El diseño de las probetas para esfuerzos a compresión se encuentra basado en la norma N-CMT-2-01-004-02, en la cual se establece las dimensiones de las probetas para someterlas a esfuerzos de compresión, las cuales forman un prisma cuadrangular de 5 cm por lado (Garcia, 2022).

El molde propuesto se elaboró en metal con las dimensiones mencionadas, el porqué de la utilización de metal y no madera, pues dentro del planteamiento de cómo se diseñaría el molde lo primero que se idealizó fue un molde para un solo espécimen, en este se realizaron 2 versiones con las mismas dimensiones, uno siendo de metal y otro de madera, en el de metal la mezcla se observó que el material se podía deslizar pasando un tiempo prudente en lo que la consistencia de la mezcla se solidificaba a un punto de que aun presentaba cierto grado de hidratación sin comprometer su forma, además de que su limpieza es bastante rápida usando algo de agua y alguna tela que se tenga a la mano. Por otro lado, el molde de madera se tenía que armar y ajustar para recibir la mezcla, después desarmar una de sus caras para el desmolde del espécimen, pues la mezcla en esta el material se fijaba con mayor facilidad que con el metal, comprometiendo después la calidad del molde por los ajustes en la madera.

De acuerdo a lo anterior entonces el diseño del molde se elaboró de metal, además, se consideró ampliarlo de tal forma de poder realizar 3 especímenes simultáneos, agilizando la producción, además se anexaron dos elementos más alargados para facilitar el desmolde por gravedad, permitiendo deslizarse lentamente los especímenes, esto pasando un tiempo aproximado de entre 4 y 5 horas. Una vez pasado su tiempo de fraguado y observar que la consistencia ya solidificado lo suficiente, solo se voltea el molde con las extensiones hacia abajo para que los especímenes comiencen a caer lentamente, en caso de que no bajar, se lubrica un poco a los especímenes con agua y se empuja con poca fuerza para el desmolde y recibirlos con la mano cuidadosamente para que no se lleguen a

golpear y pierdan su forma. Otro motivo de realizarlo en metal es que dicho material no se deforma, permitiendo sacar cubos íntegros.

Para agilizar la tarea de producción de los especímenes se realizaron un total de 5 moldes, con el fin de realizar 15 especímenes sin necesidad de esperar a desocupar otro molde. En la imagen 19 se muestra el ejemplo del molde



Imagen 19. Molde metálico.

empleado.

Apoyados de la norma, y contemplando lo descrito anteriormente el diseño de los moldes se ideó para crear tres especímenes de cada mezcla prototipo, con el propósito de ofrecer una mayor confiabilidad en los resultados, además de agilizar el proceso de vaciado, desmolde y etiquetado de cada probeta. En la Imagen 20 se observan las dimensiones del diseño del molde, el cual consiste en un rectángulo de 16.2 cm de largo x 5.6 cm de ancho x 5 cm de alto. Estas medidas son considerando el material de las soleras con un espesor de 3mm, dejando las dimensiones internas de 5 cm por arista.

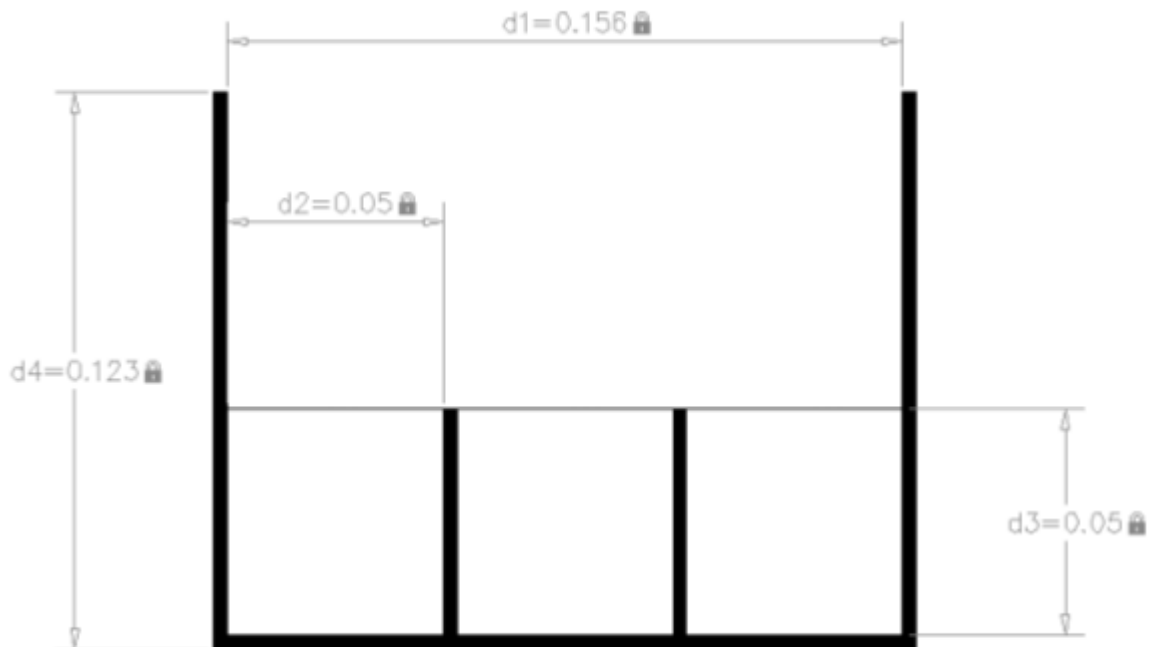


Imagen 20. Diseño del molde.

Una vez ordenado cada material, listo el equipo y herramienta necesario, se procedió la elaboración de las mezclas. Puntualizando que se realizó de forma ordenada para ir identificando el tipo de mezcla.

En las Imágenes 21 y 22 se observa que en el primer paso se pesó el material con ayuda de la báscula digital, de acuerdo con la información obtenida en la tabla 5, la cual nos muestra la cantidad necesaria para los 3 especímenes en cada mezcla.



Imagen 21. Medición de cemento



Imagen 22. Medición de Cal hidratada

Una vez pesados los materiales, se incorporaron los materiales en un recipiente para mezclado, como se aprecia en la Imagen 23, los materiales se mezclaron hasta homogenizar el material en seco, acto seguido se agregó el agua y se mezcló hasta tener una consistencia pastosa y manejable como se aprecia en la imagen 24.



Imagen 23. Vaciado y mezclado de materiales en seco.



Imagen 24. Mezclado de materiales con agua.

Alcanzada la consistencia en el material, como se observa en la imagen 25 y 26, se incorpora la mezcla en el molde debidamente acotado con la ayuda de cinta y un plumón, identificando el tipo de mezcla de los especímenes; lleno el molde, se utilizó un tenedor para asentar la mezcla, con el objeto de liberar el aire atrapado entre el molde y la mezcla, evitando porosidades en el material, por último, con la cuchara de albañilería se retiró el exceso de mezcla y se alisa la cara superior.



Imagen 25. Vaciado de mezcla en el molde.



Imagen 26. Aplanado sobre la cara superior.

En la imagen 27 se observan los moldes llenos con la mezcla correspondiente, dando un tiempo de espera para el desmolde de entre 6 a 8 horas, tiempo en la que la mezcla alcanzó una consistencia lo suficientemente sólida para no perder su forma y contar con la suficiente humectación aún para poder deslizarse por gravedad, mientras que en la imagen 28 se observan ya los especímenes desmoldados.



Imagen 27. Tiempo de fraguado.



Imagen 28. Desmolde de los especímenes.

Los especímenes una vez desmoldados durante los primeros 14 días pasaron por un proceso de humectando con agua para el curado de las mezclas.

3.5.4 PRUEBAS DE LABORATORIO

En la imagen 29 se muestran ya los especímenes con 28 días de edad, a los cuales se les retiró la cinta con la que se identificaban, marcándose con un plumón el número de prototipo que le corresponde, para llevar un control e identificación.

La edad manejada en cada espécimen fue de 28 días, tiempo indicado por la norma NMX-C-021-ONNCCE-2015 (Marina, 2022), en la que se menciona que las mezclas habrán alcanzado la mayor parte de su resistencia; Alcanzado el plazo se realizó una medición de peso de cada espécimen.



Las pruebas de laboratorio se llevaron a cabo dentro de las instalaciones del Instituto Tecnológico de México Campus Colima, ubicado en Villa de Álvarez, Colima, en el laboratorio del área de Ingeniería en Mecatrónica, el cual cuenta con Máquina Universal UH – 500 kNI marca SHIMADZU, la cual cuenta con un sistema hidráulico universal de la serie UH con una capacidad del marco de 100 KN a 500 KN (Ver Imagen 30). Su unidad de medida está en “KN” kilo Newton. Esta medida se determinará con la establecida en las unidades, tomando en cuenta que 9.8 kilo Newton es igual a un kilogramo fuerza.



Imagen 30. Prensa Universal

La operatividad del equipo no es complicada, en la imagen 31 se aprecia a el responsable del laboratorio el Ing. Carlos Torres, quien se encargó de

programar a la prensa universal el tipo de esfuerzo a realizar, en este caso esfuerzo axial, así como la capacidad límite para proteger al equipo.



En la

Imagen 31. Programación de la prensa

imagen 32 se muestra a modo de ensayo la forma en la que se opera la máquina, para proceder a realizar las pruebas, realizando una prueba con un espécimen fallido.



Se organizaron los especímenes para tener control y nota al momento de realizar la prueba en cada uno, además se registró el de peso de cada espécimen con la ayuda de una báscula electrónica, registrando así la información de forma escrita y digital.

Para dar comienzo a la prueba en la prensa, la probeta a examinar es colocada al centro de la base de la prensa donde se ejercerá la fuerza aplastante, como se muestra en las Imágenes 33 y 34, colocado el espécimen se da partida la prueba en la máquina, comenzando a ejercer presión, controlando la velocidad en la que el cilindro de la prensa comienza a comprimir el objeto de estudio, mientras esto sucede, en la pantalla del control de la prensa se observa que mientras está realizando presión la prensa la maquina a la par está registrando un gráfico del comportamiento que se está generando, indica el punto de quiebre y deformación del espécimen en la prueba, en el área de control a lado izquierdo se encuentran los botones de inicio, para levantar o bajar el brazo de la prensa, al

centro se encuentra la pantalla, donde se muestra el gráfico del comportamiento del espécimen, en la misma pantalla en la parte superior izquierda muestra la fuerza ejercida, y en lado derecho superior la deformación, a lado derecho de la pantalla está el control de velocidad y el alto de emergencia como se aprecia en la Imagen 35.



Imagen 33. Inicio de prueba



Imagen 34. Ruptura el espécimen.



Imagen 35. Área de control

En la imagen 36 observamos que los datos obtenidos se registraron en una libreta y en una ventana del laboratorio con un plumón, documentándose además con video durante todo el experimento para corroborar la información registrada, pues a pesar de que en la máquina se puede apreciar los datos, estos siguen corriendo hasta parar la máquina, por lo que se debe de estar atento al punto de quiebre del espécimen. Mientras que en la Imagen 37 se observan restos de probetas ya ensayadas, como se puede apreciar algunas si fueron mayormente afectadas al esfuerzo axial, quedando casi destruidas en su totalidad mientras que otras lograron mantener mayor solidez en su estructura,

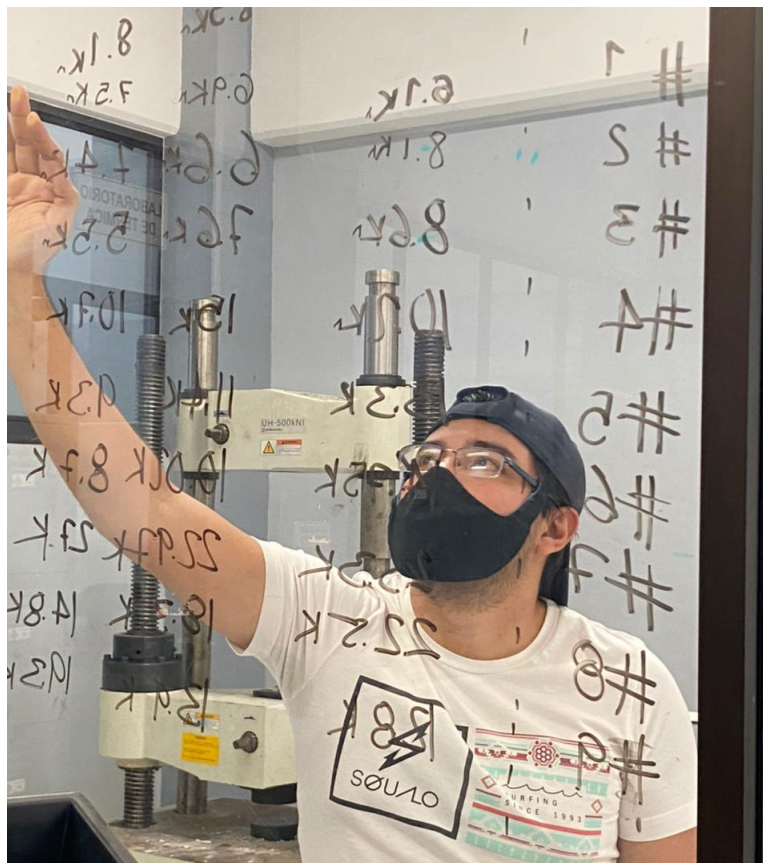


Imagen 36. Registro de esfuerzos.

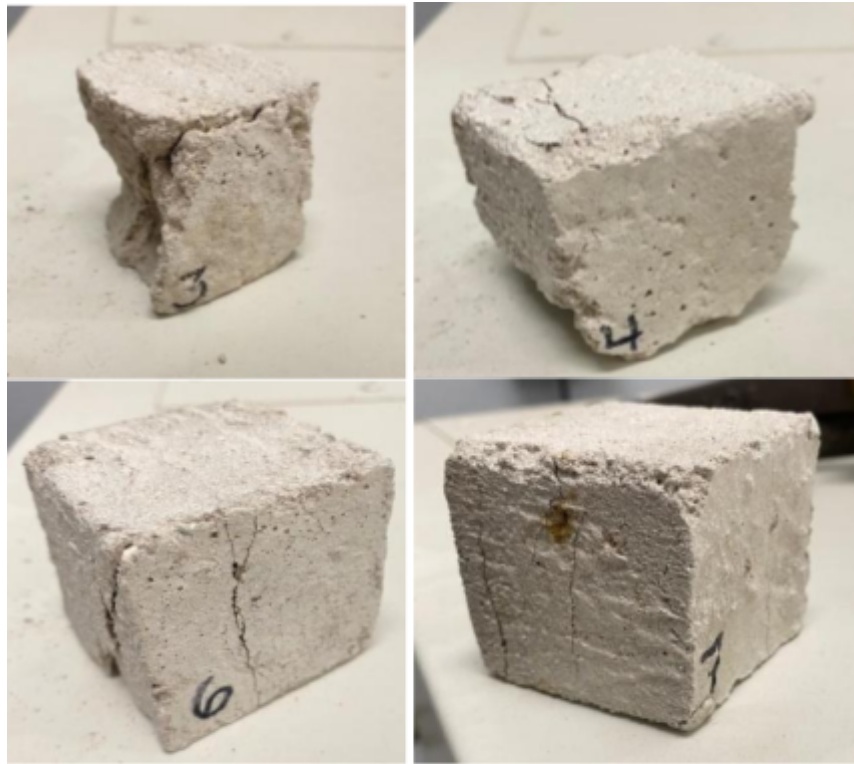


Imagen 37. Probetas ensayadas.

Concluida la tarea de evaluación de todos los especímenes y registro correspondiente, se continuará con el análisis de los resultados, exponiendo la información mediante tablas de contenido y gráficas que apoyen a la interpretación de los datos obtenidos.

Finalmente, se expondrán las conclusiones a las que se llegó, así como las recomendaciones y temas de discusión.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

La prueba se realizó a las 3 unidades experimentales de cada dosificación; en la cual se ensayaron a esfuerzos axiales en la maquina universal mencionada con anterioridad, el área de contacto de la carga es una placa cilíndrica de 4 pulgadas de diámetro, cubriendo totalmente la dimensión de las probetas.

En las siguientes tablas, se expone el concentrado de los resultados y promedios de los 81 especímenes, dividida en tres segmentos 50, 75 y 100, siendo estos los porcentajes de cemento en la mezcla. (ver tablas 6, 7 y 8 respectivamente). Donde se aprecia la dosificación por mezcla de las variables, el peso registrado en gramos, la carga máxima aplicada en Kilo Newton y la deformación alcanzada en milímetros de cada probeta. Permittiéndonos realizar una rápida comparativa de los resultados.

MEZCLAS CON 50% DE CEMENTO							
DOSIFICACION	PROBETA	PESO g	PROMEDIO g	CARGA MAXIMA KN	PROMEDIO KN	DEFORMACION mm	PROMEDIO mm
Cen50Cal50	A	250.99	251.62	6.7	7.03	2.3	2.30
	B	252.24		6.9		2.1	
	C	251.61		7.5		2.5	
Cen75Cal50	A	252.93	253.56	8.15	7.73	3.3	3.20
	B	254.19		7.65		3	
	C	253.56		7.4		3.3	
Cen100Cal50	A	254.87	255.51	8.6	7.92	1.7	1.67
	B	256.14		7.6		1.5	
	C	255.51		7.55		1.8	
Cen50Cal75	A	252.28	252.91	11.05	11.12	1.9	1.60
	B	253.54		11.03		1.5	
	C	252.91		11.27		1.4	
Cen75Cal75	A	254.22	254.86	5.75	5.90	1.8	1.63
	B	255.49		5.92		1.6	
	C	254.86		6.02		1.5	
Cen100Cal75	A	256.16	256.80	9.95	9.87	1.6	1.70
	B	257.44		9.02		1.7	
	C	256.8		10.65		1.8	
Cen50Cal100	A	253.58	254.21	9.35	9.38	2	2.03
	B	254.84		9.2		2.1	
	C	254.21		9.6		2	
Cen75Cal100	A	255.52	256.15	8.2	8.27	1.6	1.60
	B	256.79		8.5		1.4	
	C	256.15		8.1		1.8	
Cen100Cal100	A	257.46	258.10	7.8	7.82	1.8	1.63
	B	258.74		8		1.5	
	C	258.1		7.67		1.6	

TABLA 6 Cemento al 50%



MEZCLAS CON 75% DE CEMENTO							
DOSIFICACION	PROBETA	PESO g	PROMEDIO g	CARGA MAXIMA KN	PROMEDIO KN	DEFORMACION mm	PROMEDIO mm
Cen50Cal50	A	254.48		10.2		0.9	
	B	255.75	255.12	10.5	10.47	1.5	1.33
	C	255.12		10.7		1.6	
Cen75Cal50	A	256.42		12.3		1.5	
	B	257.7	257.06	11.4	11.67	1.5	1.53
	C	257.06		11.3		1.6	
Cen100Cal50	A	258.36		14.75		1.9	
	B	259.65	259.01	12.02	13.21	2	1.90
	C	259.01		12.87		1.8	
Cen50Cal75	A	255.77		11.15		1.9	
	B	257.05	256.41	10.5	10.78	1.9	1.87
	C	256.41		10.7		1.8	
Cen75Cal75	A	257.72		10.03		1.7	
	B	259	258.36	9.97	10.33	1.9	1.90
	C	258.36		11		2.1	
Cen100Cal75	A	259.66		12.5		1.4	
	B	260.95	260.30	11.92	11.92	1.9	1.77
	C	260.3		11.35		2	
Cen50Cal100	A	257.07		18.2		1.5	
	B	258.35	257.71	16.67	17.17	1.6	1.53
	C	257.71		16.65		1.5	
Cen75Cal100	A	259.01		13.2		2.6	
	B	260.3	262.99	13.62	13.54	2.1	2.20
	C	269.66		13.8		1.9	
Cen100Cal100	A	260.95		15.9		2.3	
	B	262.25	261.60	16	15.83	1.7	1.97
	C	261.6		15.6		1.9	

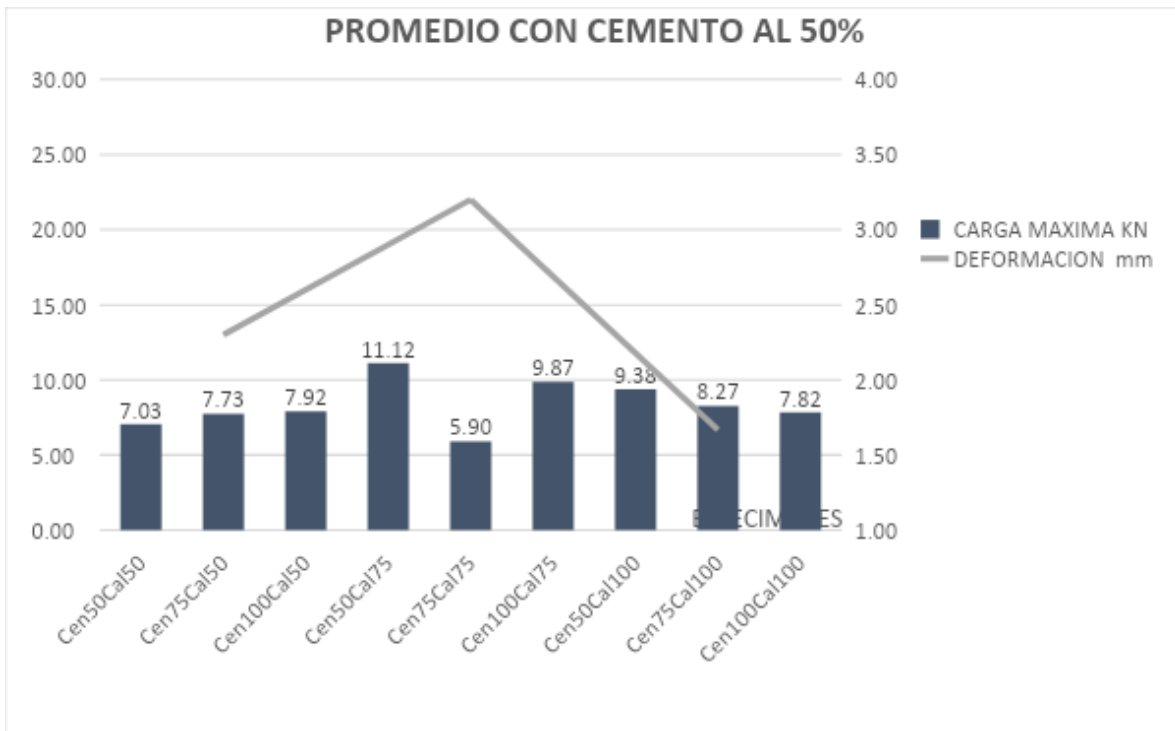
TABLA 7 Cemento al 75%

MEZCLAS CON 100% DE CEMENTO							
DOSIFICACION	PROBETA	PESO g	PROMEDIO g	CARGA MAXIMA KN	PROMEDIO KN	DEFORMACION mm	PROMEDIO mm
Cen50Cal50	A	257.97		23.3		1.3	
	B	259.26	258.62	22.97	23.32	1.2	1.50
	C	258.62		23.7		2	
Cen75Cal50	A	259.91		20.5		1.9	
	B	261.21	260.56	18.3	19.53	1.6	1.77
	C	260.56		19.8		1.8	
Cen100Cal50	A	261.86		12.8		2.5	
	B	263.16	262.51	13.9	13.20	2.2	2.27
	C	262.51		12.9		2.1	
Cen50Cal75	A	259.27		16.95		1.5	
	B	260.56	259.92	17.05	17.23	1.9	1.70
	C	259.92		17.7		1.7	
Cen75Cal75	A	261.21		16.5		2.1	
	B	262.51	261.86	16.35	16.17	2.1	2.13
	C	261.86		15.65		2.2	
Cen100Cal75	A	263.15		17.12		2	
	B	264.46	263.81	17.67	17.28	1.7	1.90
	C	263.81		17.04		2	
Cen50Cal100	A	260.56		22.2		2.1	
	B	261.86	261.21	2.45	15.67	2.2	2.03
	C	261.21		22.35		1.8	
Cen75Cal100	A	262.5		19.75		2.1	
	B	263.81	263.16	19.05	19.32	2.3	2.20
	C	263.16		19.17		2.2	
Cen100Cal100	A	264.44		20.25		1.9	
	B	265.76	264.10	21.7	20.83	1.8	1.80
	C	262.1		20.55		1.7	

TABLA 8 Cemento al 100%

A continuación, se muestran los resultados gráficos de los datos obtenidos en la prueba a compresión, exponiendo con barras las cargas máximas aplicadas y con línea la deformación alcanzada de cada segmento mencionado, además de un gráfico resumen de los tres segmentos. Las unidades manejadas en las gráficas en las cargas máximas son Kilo Newtons (KN) y la deformación en milímetros (mm).

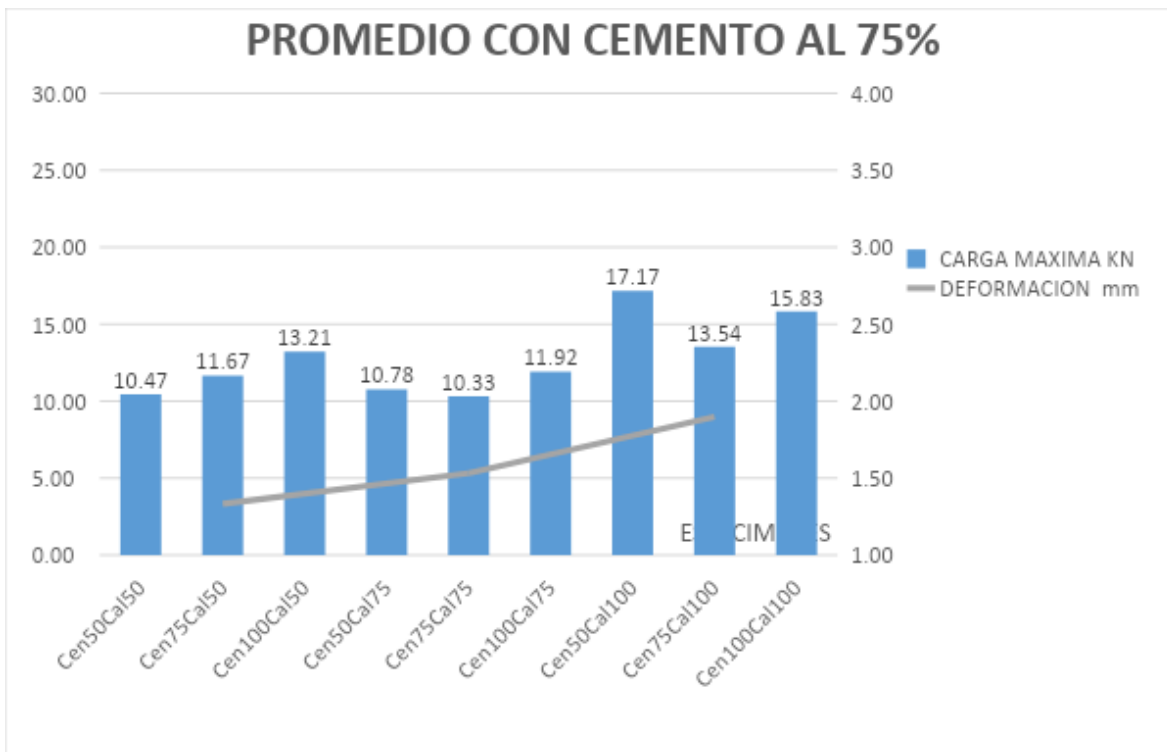
La gráfica 1, muestra los resultados del segmento con dosificación en cemento al 50% de la mezcla base.



Gráfica 1. Resumen Segmento 50% cemento

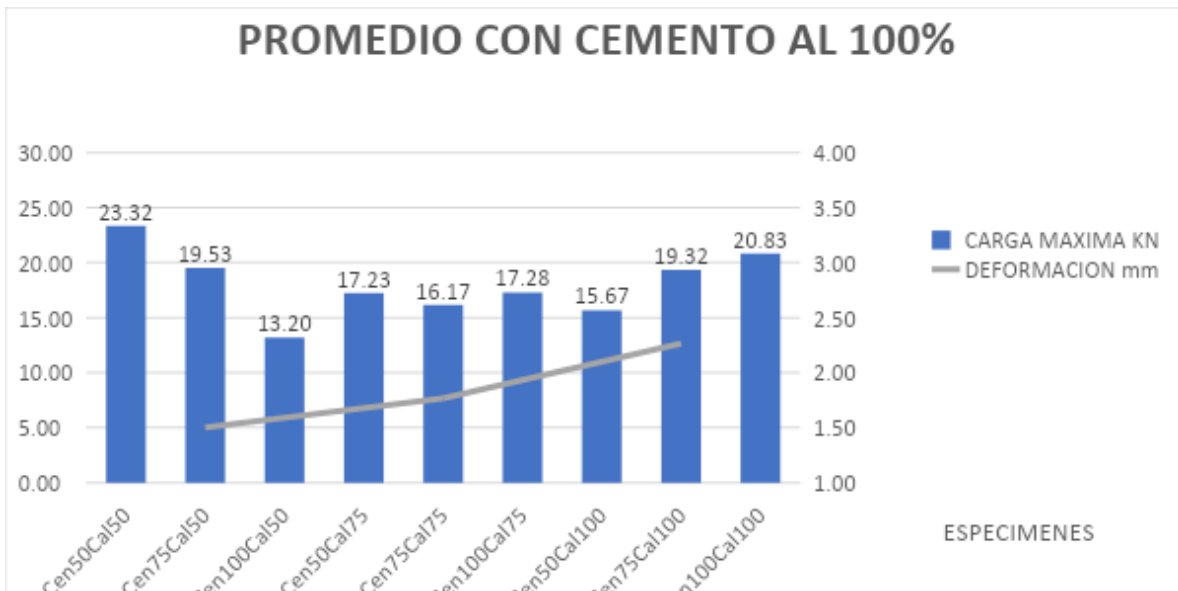
Continuando con la gráfica 2, correspondiente al segundo segmento, siendo la de dosificación con cemento al 75%.

Gráfica 2. Resumen Segmento 75% cemento



Por último, la gráfica 3, correspondiente al segmento con dosificación de cemento al 100%.

Gráfica 3. Resumen Segmento 100% cemento



En la gráfica 4, se observa un resumen de los resultados de los segmentos, distinguidos cada uno con un color, como se observó en su grafica correspondiente, siendo representada de igual manera las cargas máximas en

forma de barras y la de deformación con una línea continua. Esta permite ver el panorama del ejercicio práctico de la prueba realizada en cada segmento.



Gráfica 4. Resumen general

5. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos corresponden, como se ha mencionado anteriormente a la resistencia axial aplicada, sin embargo, como se planteó originalmente en el objetivo del proyecto se busca obtener el comportamiento mecánico de las mezclas específicamente el esfuerzo máximo a la compresión, por lo que se realizó la siguiente conversión.

Para obtener el esfuerzo a la compresión, fue necesario conocer cómo es que se determina, partiendo de la formula $\sigma = P/A$, donde “ σ ” es el esfuerzo a la compresión, “P” es la fuerza axial en kg y “A” es el área de la sección transversal o de contacto, en este caso es de 25 cm², pues cada arista del prototipo era de 5 cm.

Al momento de realizar las pruebas y someter a un esfuerzo axial a los especímenes, los resultados arrojados por la prensa universal los registra en KN (kilo newtons), por lo que fue necesario hacer la equivalencia a kg, unidades manejadas comúnmente en el país. En dicha conversión se tomó la referencia de que 1KN es equivalente a 101.97 kg, dato obtenido del libro de termodinámica de Yunes A. Cengel en el apartado “Factores de conversión”. Por lo que entendida la formula mencionada anteriormente se tomará la resistencia registrada por la maquina universal, multiplicándola por la equivalencia, el producto se divide entre el área de contacto, dándonos la resistencia. En términos comunes la resistencia a la compresión es la fuerza que genera el objeto como respuesta a la fuerza aplicada sobre su cara transversal

$$\sigma = (\text{KN} \times 101.97) / \text{cm}^2 = \text{kg/cm}^2$$

Ejemplo de conversión se realizó en la probeta con 50cem-50cen-50cal, en la cual se registró una carga máxima de 6.7 KN quedando de la siguiente forma:

$$\sigma = (6.7 \times 101.97) / 25 = 27.32 \text{ kg/cm}^2$$

También se realizó el cálculo de la densidad de todos los especímenes, con la finalidad de realizar una comparación con la del concreto tomado en

consideración, teniendo en cuenta que la densidad es obtenida de dividir la masa entre el volumen.

La masa se tiene registrada en gramos, pues fue la medida usada en la báscula electrónica empleada para medir a los especímenes, mientras que el volumen al tener un cubo, resulta de elevar a la tercera potencia la longitud de un lado de 5³, dándonos un volumen de 125 cm³.

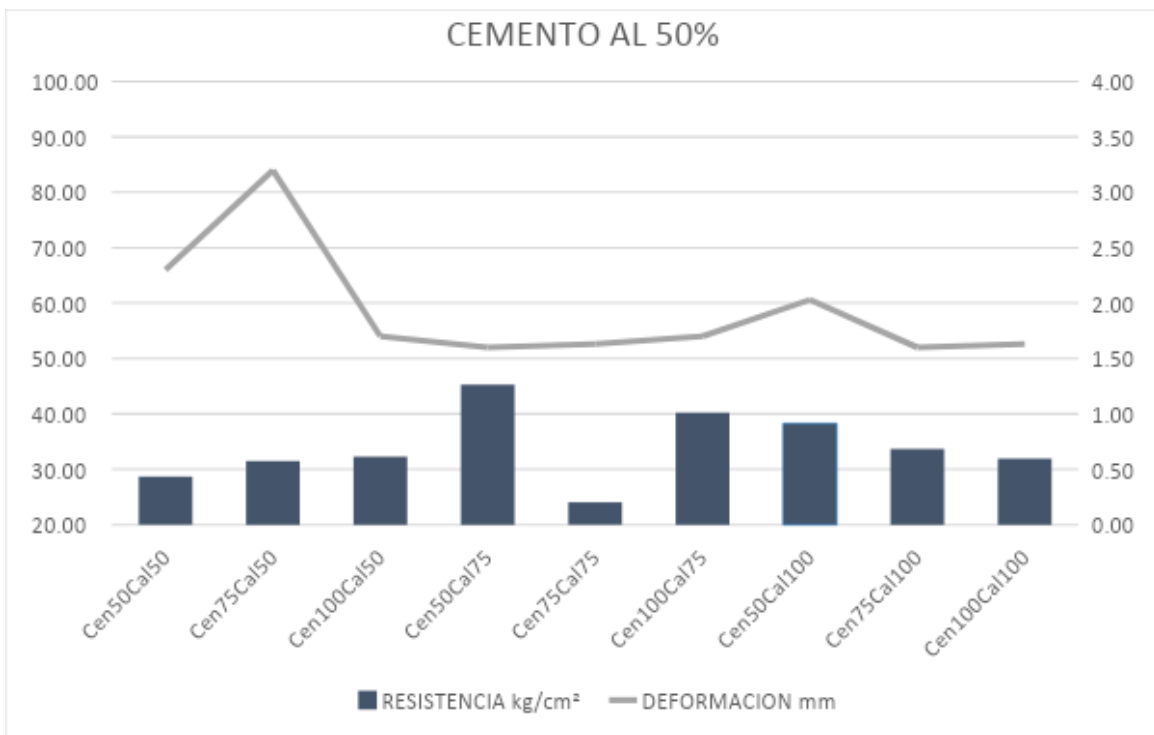
En la tabla 9, se observa el resumen de los promedios de cada mezcla en los tres segmentos, partiendo de la densidad del material en g/cm³, la resistencia a la compresión en kg/cm² y la deformación en milímetros, producto de las conversiones realizadas.

SEGMENTO	DOSIFICACION	DENSIDAD g/cm ³	RESISTENCIA A COMPRESION Kg/cm ²	DEFORMACION mm
CEMENTO 50%	Cen50Cal50	2.01	28.68	2.30
	Cen75Cal50	2.03	31.53	3.20
	Cen100Cal50	2.04	32.28	1.67
	Cen50Cal75	2.02	45.33	1.60
	Cen75Cal75	2.04	24.04	1.63
	Cen100Cal75	2.05	40.26	1.70
	Cen50Cal100	2.03	38.26	2.03
	Cen75Cal100	2.05	33.71	1.60
	Cen100Cal100	2.06	31.90	1.63
CEMENTO 75%	Cen50Cal50	2.04	42.68	1.33
	Cen75Cal50	2.06	47.57	1.53
	Cen100Cal50	2.07	53.88	1.90
	Cen50Cal75	2.05	43.97	1.87
	Cen75Cal75	2.07	42.13	1.90
	Cen100Cal75	2.08	48.62	1.77
	Cen50Cal100	2.06	70.02	1.53
	Cen75Cal100	2.08	55.21	2.20
	Cen100Cal100	2.09	64.56	1.97
CEMENTO 100%	Cen50Cal50	2.07	95.10	1.50
	Cen75Cal50	2.08	79.65	1.77
	Cen100Cal50	2.10	53.82	2.27
	Cen50Cal75	2.08	70.27	1.70
	Cen75Cal75	2.09	65.92	2.13
	Cen100Cal75	2.11	70.45	1.90
	Cen50Cal100	2.09	91.06	2.03
	Cen75Cal100	2.11	78.79	2.20
	Cen100Cal100	2.12	84.95	1.80

TABLA 9. Resumen de resultados

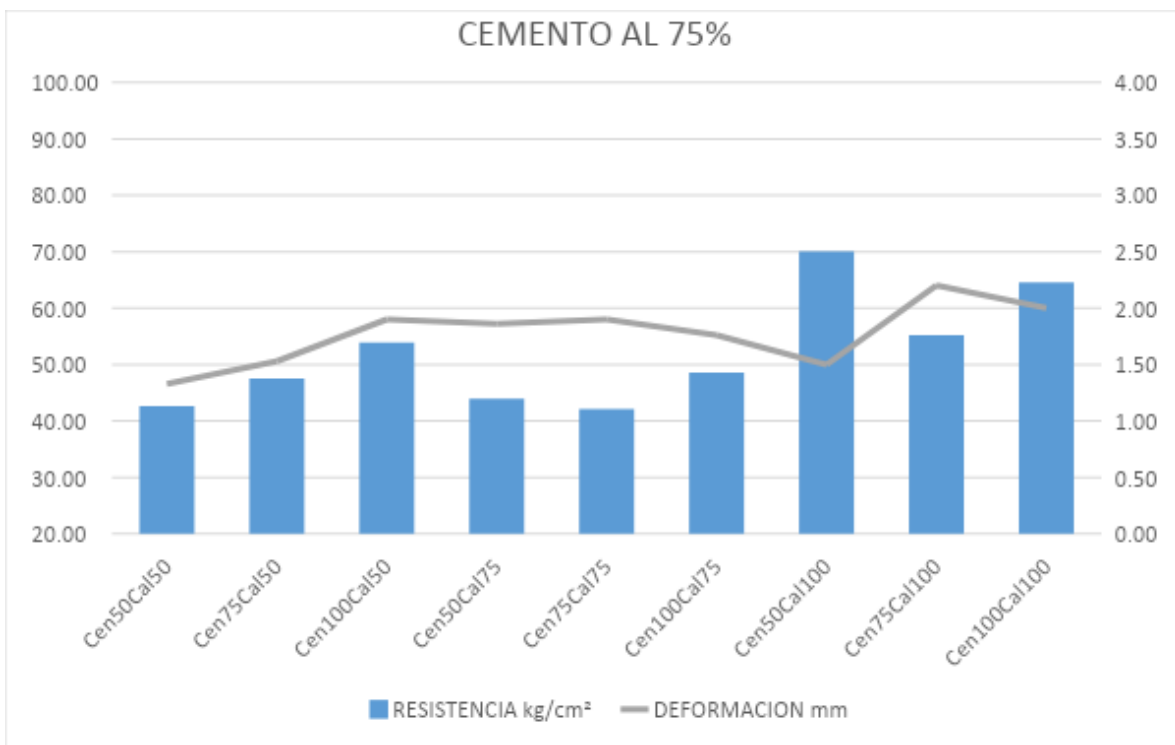
En base a los resultados de la tabla 9, se hicieron los gráficos correspondientes, ahora mostrando la resistencia a la compresión representado en barras y la deformación con una línea continua de cada segmento en milímetros.

En la gráfica 5, correspondiente a el segmento de dosificación con cemento al 50%, se observa el promedio de cada dosificación y el comportamiento obtenido, se puede apreciar en este gráfico que las primeras tres mezclas alcanzaron mayores deformaciones en un rango de 1.7 a 3.2 mm, sin embargo, las resistencias alcanzadas se encuentran por debajo de los 50 kg/cm².



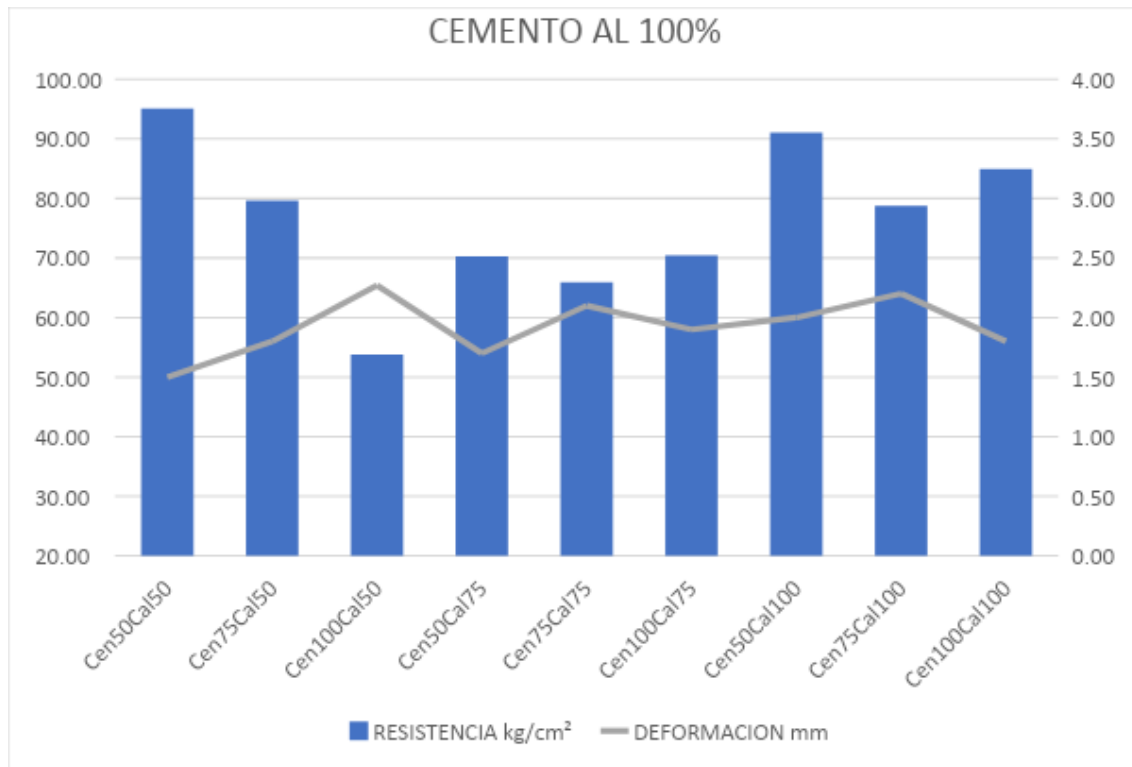
Gráfica 5. Resultados promedios con cemento al 50%

En la gráfica 6, correspondiente al segmento con dosificaciones de cemento al 75%, se observa el comportamiento alcanzado. Aquí se observa rápidamente que los cambios en la deformación no fueron tan abruptos como con la dosificación al 50% de cemento, sin embargo, las resistencias alcanzadas son mayores, enfatizando a dos, pasando arriba de los 60 kg/cm², con una dosificación de 100% en cal y con una variante de ceniza con un 50 y 100% de esta, siendo mayor la que empleo menos cantidad de ceniza. El segmento maneja un rango de 1.4 a 2.3 mm en la deformación.



Gráfica 6. Resultados promedios con cemento al 75%

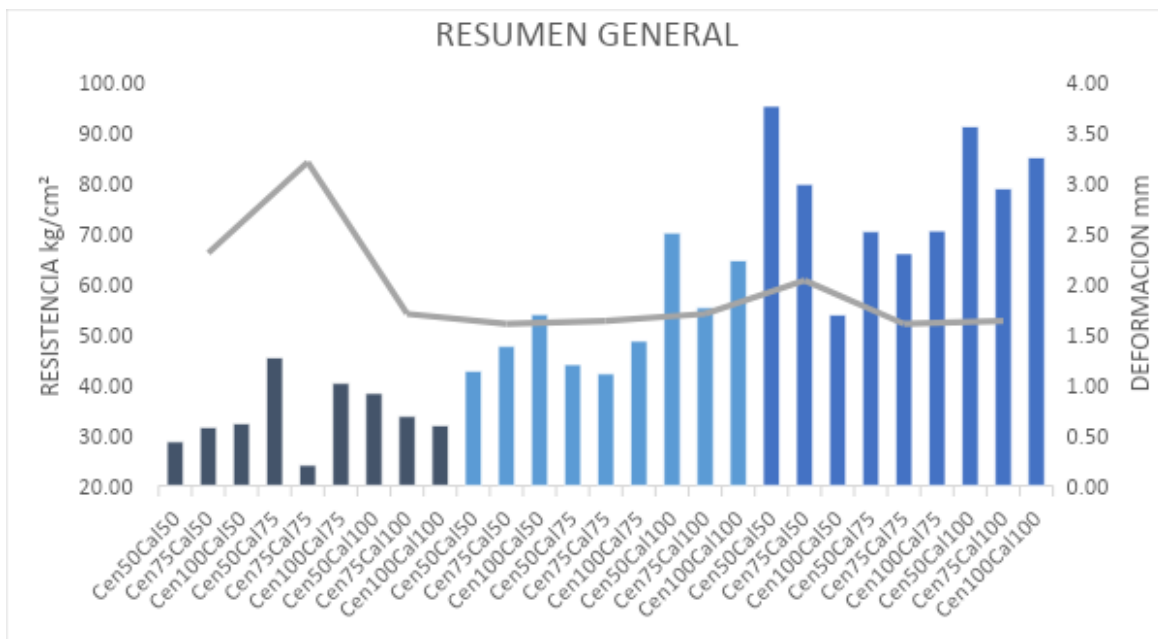
Continuando con la gráfica 7, siendo esta la del segmento con dosificación de cemento al 100%, se aprecia rápidamente que cuatro combinaciones de las mezclas alcanzaron valores superiores a los planteados en la hipótesis, resaltando 2, siendo mayor a los 90 kg/cm², por otro lado, el comportamiento en la deformación osciló entre 1.5 a 2.2 mm.



Gráfica 7. Resultados promedio con cemento al 100%

Por último, en la gráfica 8, se muestra el concentrado de todas las dosificaciones promedio, apreciándose a simple vista una tendencia ascendente en la resistencia a la compresión con el aumento del cemento, y un comportamiento variado en la deformación, sobre todo en las primeras dosificaciones, en donde también se aprecia que la menor resistencia alcanzada fue en el segmento de 50% de cemento con una resistencia menor a los 25 kg/cm² y en el segmento con 100% de cemento la mayor con un valor de 95 kg/cm².

Gráfica 8. Resumen promedio de resultados



Además de los gráficos por segmentos y concentrado, se realizó un resumen estadístico, en el cual se aprecia los resultados de cada una de las variables. Partiendo en primera línea con el número total de especímenes, y continuando con el promedio general en cada una de las mediciones, después la desviación estándar la cual ayuda a estimar la variación general de los resultados

con respecto a la media, consiguientemente el coeficiente de variación nos sirve para comparar el conjunto de los datos de las medidas de compresión, deformación y peso, por ultimo los valores mínimos y máximos obtenidos de todos los especímenes. (Ver tabla 10)

	COMPRESION	DEFORMACION	PESO
Recuento	81	81	81
Promedio	54.24	1.87	262.81
Desviación Estándar	20.12	0.40	4.042
Coeficiente de Variación	37.09%	21.37%	1.53%
Mínimo	23.45	0.9	253.95
Máximo	96.64	3.3	271.72

Las

Tabla 10. Resumen estadístico

tablas 11 y 12 contienen las medias por mínimos cuadrados en compresión y deformación respectivamente. Ambas tablas muestran las medias para cada uno de los niveles de los factores, así como los errores estándar de cada media, siendo una medida de la variabilidad en los muestreos. Los límites inferiores y superiores indican los valores de varianza permitida con respecto a la media, indicando que dentro de ese rango las mediciones se pueden tomar como correctas.



Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	81	54.2454			
CENIZA					
50	27	58.3733	0.440503	57.4902	59.2565
75	27	50.9511	0.440503	50.068	51.8343
100	27	53.4119	0.440503	52.5287	54.295
CEMENTO					
50	27	33.9981	0.440503	33.115	34.8813
75	27	52.0704	0.440503	51.1872	52.9535
100	27	76.6678	0.440503	75.7846	77.5509
CAL					
50	27	51.687	0.440503	50.8039	52.5702
75	27	50.1093	0.440503	49.2261	50.9924
100	27	60.94	0.440503	60.0568	61.8232
CENIZA por CEMENTO					
50,50	9	37.42	0.762974	35.8903	38.9497
50,75	9	52.2222	0.762974	50.6925	53.7519
50,100	9	85.4778	0.762974	83.9481	87.0075
75,50	9	29.7622	0.762974	28.2325	31.2919
75,75	9	48.3044	0.762974	46.7748	49.8341
75,100	9	74.7867	0.762974	73.257	76.3163
100,50	9	34.8122	0.762974	33.2825	36.3419
100,75	9	55.6844	0.762974	54.1548	57.2141
100,100	9	69.7389	0.762974	68.2092	71.2686
CENIZA por CAL					
50,50	9	55.4856	0.762974	53.9559	57.0152
50,75	9	53.1867	0.762974	51.657	54.7163
50,100	9	66.4478	0.762974	64.9181	67.9775
75,50	9	52.9156	0.762974	51.3859	54.4452
75,75	9	44.0333	0.762974	42.5037	45.563
75,100	9	55.9044	0.762974	54.3748	57.4341
100,50	9	46.66	0.762974	45.1303	48.1897
100,75	9	53.1078	0.762974	51.5781	54.6375
100,100	9	60.4678	0.762974	58.9381	61.9975
CEMENTO por CAL					
50,50	9	30.8289	0.762974	29.2992	32.3586
50,75	9	36.5444	0.762974	35.0148	38.0741
50,100	9	34.6211	0.762974	33.0914	36.1508
75,50	9	48.0411	0.762974	46.5114	49.5708
75,75	9	44.9056	0.762974	43.3759	46.4352
75,100	9	63.2644	0.762974	61.7348	64.7941
100,50	9	76.1911	0.762974	74.6614	77.7208
100,75	9	68.8778	0.762974	67.3481	70.4075
100,100	9	84.9344	0.762974	83.4048	86.4641

Tabla 11, Medias en compresión

Nivel	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
MEDIA GLOBAL	81	1.87654			
CENIZA					
50	27	1.76667	0.040346	1.68578	1.84756
75	27	2.01852	0.040346	1.93763	2.09941
100	27	1.84444	0.040346	1.76356	1.92533
CEMENTO					
50	27	1.92963	0.040346	1.84874	2.01052
75	27	1.77778	0.040346	1.69689	1.85867
100	27	1.92222	0.040346	1.84133	2.00311
CAL					
50	27	1.94074	0.040346	1.85985	2.02163
75	27	1.8	0.040346	1.71911	1.88089
100	27	1.88889	0.040346	1.808	1.96978
CENIZA por CEMENTO					
50,50	9	1.97778	0.0698813	1.83767	2.11788
50,75	9	1.57778	0.0698813	1.43767	1.71788
50,100	9	1.74444	0.0698813	1.60434	1.88455
75,50	9	2.14444	0.0698813	2.00434	2.28455
75,75	9	1.87778	0.0698813	1.73767	2.01788
75,100	9	2.03333	0.0698813	1.89323	2.17344
100,50	9	1.66667	0.0698813	1.52656	1.80677
100,75	9	1.87778	0.0698813	1.73767	2.01788
100,100	9	1.98889	0.0698813	1.84878	2.12899
CENIZA por CAL					
50,50	9	1.71111	0.0698813	1.57101	1.85122
50,75	9	1.72222	0.0698813	1.58212	1.86233
50,100	9	1.86667	0.0698813	1.72656	2.00677
75,50	9	2.16667	0.0698813	2.02656	2.30677
75,75	9	1.88889	0.0698813	1.74878	2.02899
75,100	9	2.0	0.0698813	1.8599	2.1401
100,50	9	1.94444	0.0698813	1.80434	2.08455
100,75	9	1.78889	0.0698813	1.64878	1.92899
100,100	9	1.8	0.0698813	1.6599	1.9401
CEMENTO por CAL					
50,50	9	2.38889	0.0698813	2.24878	2.52899
50,75	9	1.64444	0.0698813	1.50434	1.78455
50,100	9	1.75556	0.0698813	1.61545	1.89566
75,50	9	1.58889	0.0698813	1.44878	1.72899
75,75	9	1.84444	0.0698813	1.70434	1.98455
75,100	9	1.9	0.0698813	1.7599	2.0401
100,50	9	1.84444	0.0698813	1.70434	1.98455
100,75	9	1.91111	0.0698813	1.77101	2.05122
100,100	9	2.01111	0.0698813	1.87101	2.15122

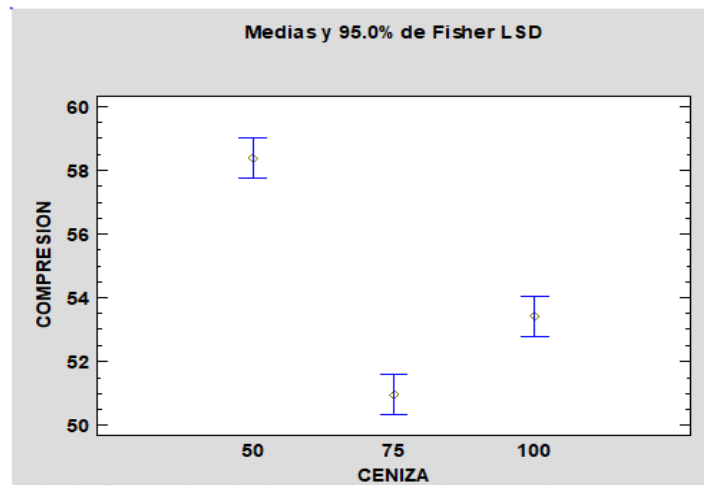
Tabla 12 Medias en deformación

Con la ayuda del programa StatGraphics, se realizaron una serie de gráficas, producto de la información obtenida en los resultados, para observar cómo es que influyeron los materiales individualmente, así como las interacciones entre ellos en los desempeños de resistencia a la compresión y la deformación.

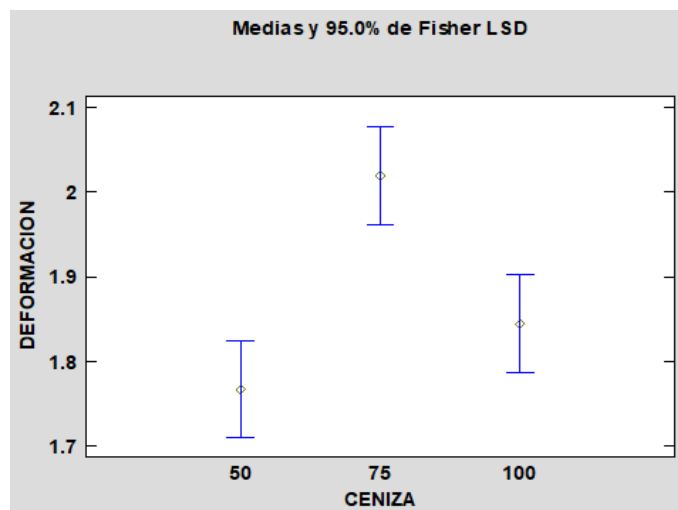
El programa utiliza el método de la diferencia menos significativa (LSD) de Fisher, este utiliza el análisis de varianza para crear intervalos de confianza para

todas las diferencias en parejas entre las medias de los niveles de los factores, controlando al mismo tiempo la tasa de error individual en un nivel especificado.

Las gráficas 9 y 10, muestran el desempeño de la ceniza volcánica en la prueba a compresión y la capacidad de deformación según los resultados obtenidos de las medias, indicando cual es el porcentaje óptimo para lograr una mayor resistencia y/o deformación. Con base en los resultados, la gráfica indica que aquellas mezclas que utilizaron la ceniza volcánica en un 50% alcanzaron mayores resistencias, estando en una media de 58 a 59 kg/cm². Pero si se busca mayor ductilidad o deformación del material, las mezclas con 75% de este material alcanzarán índices en un rango entre 1.9 a 2.9 mm.

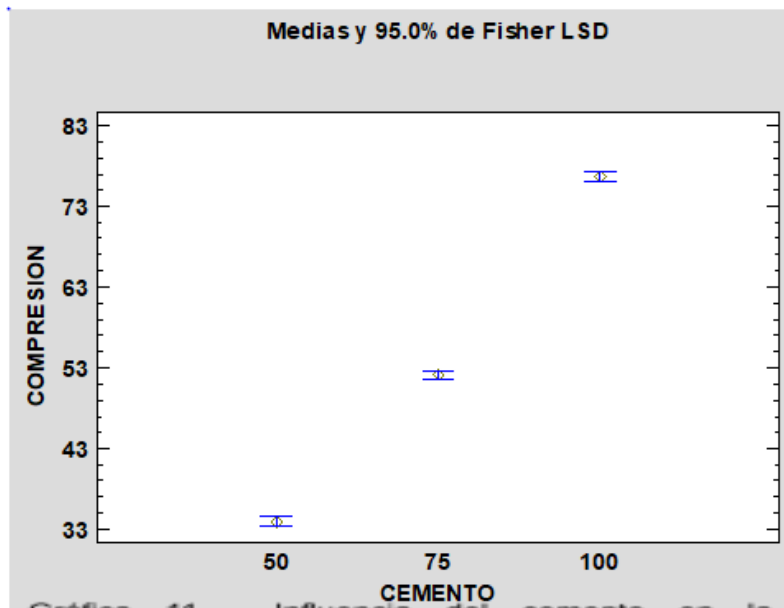


Gráfica 9. Influencia de la ceniza en la prueba a compresión

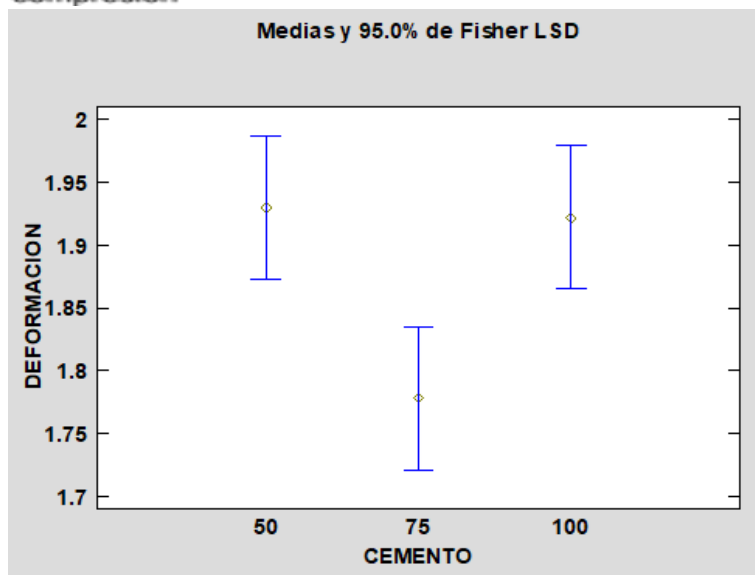


Gráfica 10. Influencia de la ceniza en el índice de deformación.

En el caso del cemento, la gráfica 11, muestra las medias obtenidas en el desempeño alcanzado en los esfuerzos de compresión, marcando el porcentaje de cemento empleado, indicando que ante mayor cantidad de cemento mayor será la resistencia de la mezcla, sin embargo, en gráfica 12. observamos los resultados de las medias obtenidas en la deformaciones alcanzadas, mostrando un comportamiento distintos, ya que en las mezclas con porcentajes de 50 y 100 se alcanzaran resultados muy similares en un rango de 1.86 a 1.99 mm.

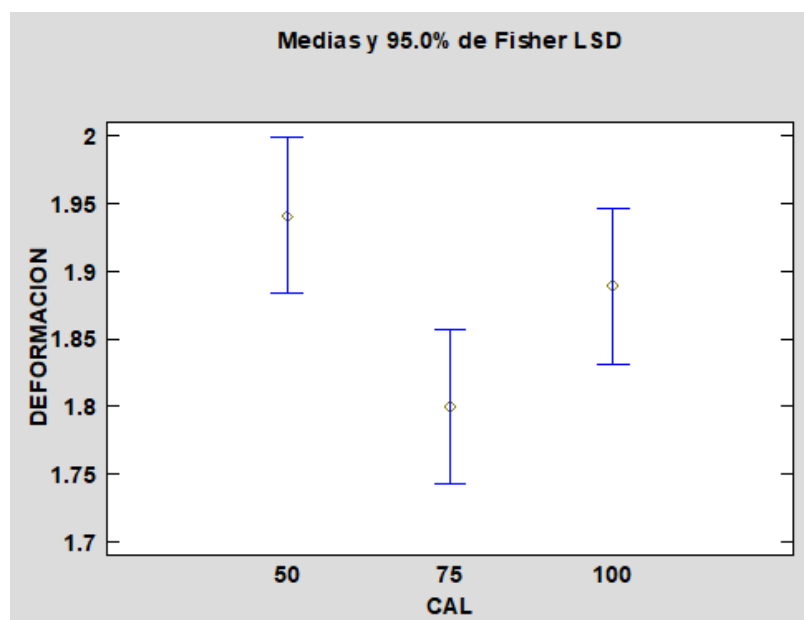
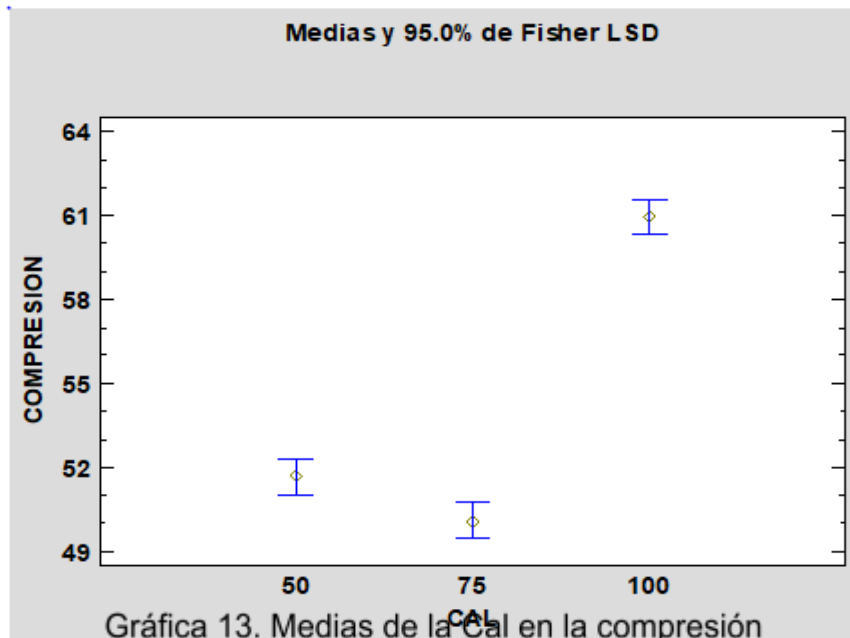


Gráfica 11. Influencia del cemento en la compresión



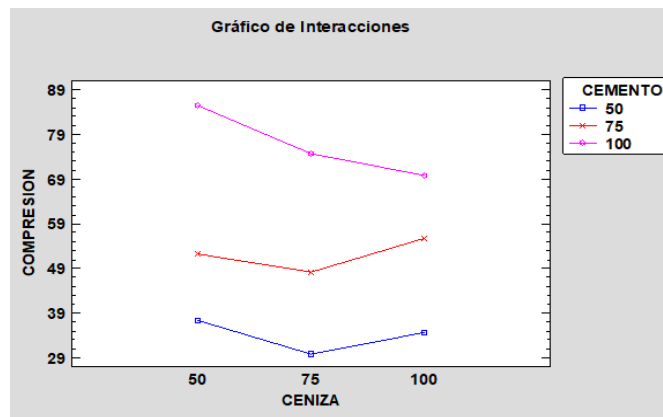
Gráfica 12. Influencia del cemento en la deformación

En el caso de la Cal, la gráfica 13, muestra las medias obtenidas en los esfuerzos de compresión, marcando el porcentaje de Cal empleada, indicando que el porcentaje optimo es el de 100%, sin embargo, en la gráfica 14, observamos los resultados de las medias obtenidas en las deformaciones, indicando que con porcentajes de 50 y 100 se alcanzaran resultados parejos, en un rango de 1.85 a 1.94 mm.

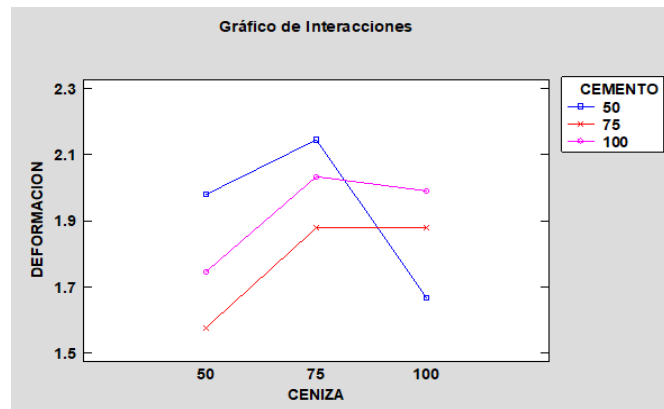


Las gráficas de interacción que se exponen a continuación, muestran la resistencia y deformación media versus el porcentaje empleado de cada material. Las líneas no paralelas en la gráfica de interacción indican los efectos de interacción entre los porcentajes empleados de los materiales. Este efecto de interacción indica la relación entre los porcentajes de los materiales con el alcance logrado en compresión y deformación.

La gráfica 15, muestra el comportamiento de estos dos materiales en cuanto resistencia a la compresión, indicando que los mejores resultados se obtuvieron el 50% de ceniza y un 100% de cemento. En la gráfica 16 se muestra el comportamiento a la deformación indicando que los mejores índices se presentaron usando 75% de ceniza con un 50% de cemento, sin embargo, también hay otras dos combinaciones con índices similares en una media de 2 mm, manejando ya se el 100% de estos dos materiales o un 50%.

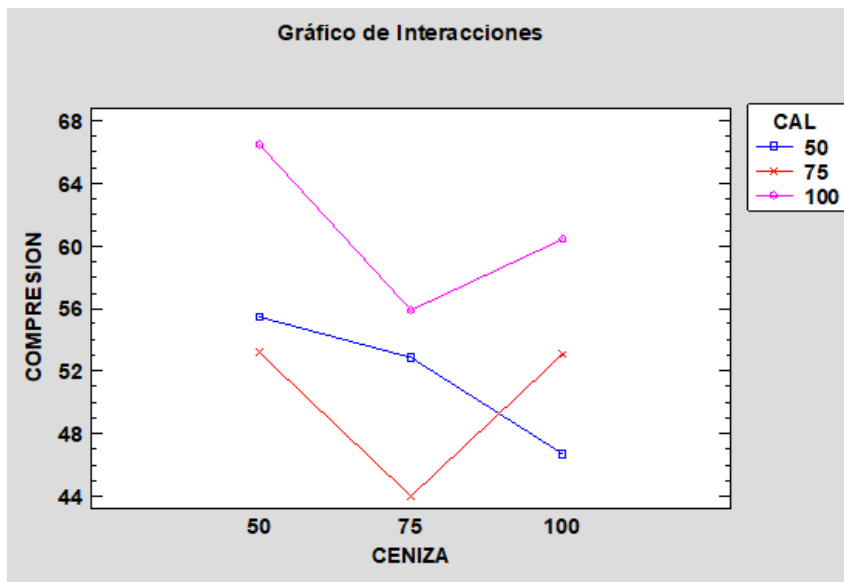


Gráfica 15. Interacción de ceniza con cemento en la prueba a compresión.

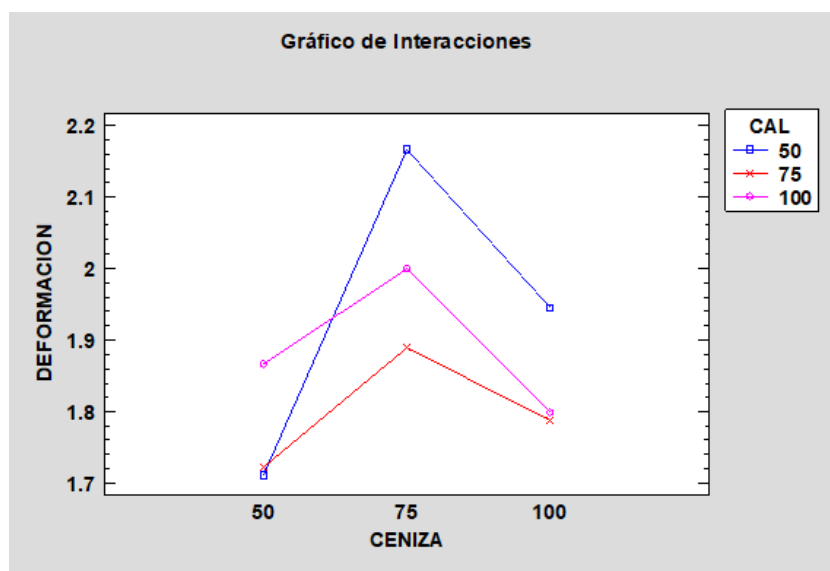


Gráfica 16. Interacción de ceniza con cemento en la deformación.

La siguiente interacción se ejemplifica en la gráfica 17, donde se muestra el comportamiento de la ceniza con la cal, indicando que el uso de 100% de cal con un 50% de ceniza se obtuvieron los mejores resultados. Por otro lado, la gráfica 18, muestra que la deformación mayor se presentó con un 50% y un 75% de ceniza logra alcanzar una mayor deformación, otro dato que se observa es que se presentan picos de crecimiento en la deformación con el empleo del 75% de ceniza junto con las tres proporciones de cal.

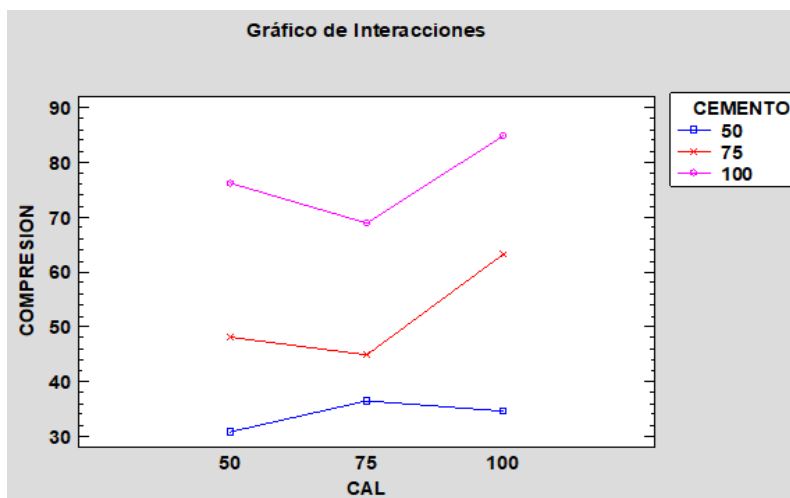


Gráfica 17. Interacción de ceniza con cal en la prueba a compresión.

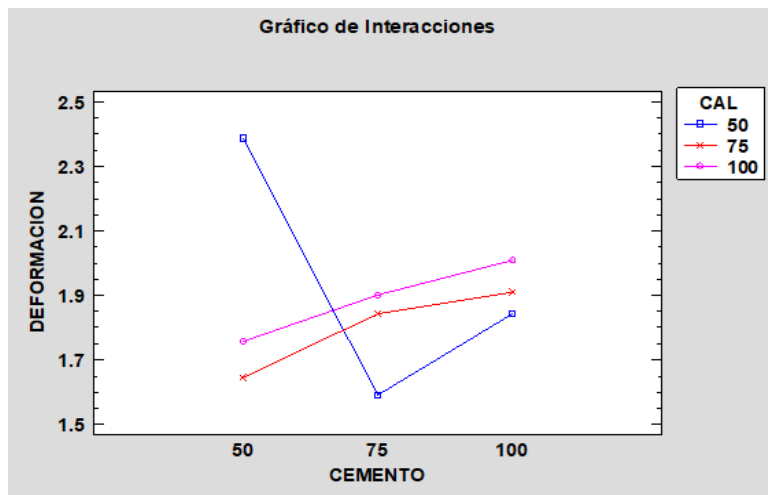


Gráfica 18. Interacción de ceniza con cal en la deformación.

Por último, la Gráfica 19, nos muestra el comportamiento obtenido en la prueba a compresión resultado de la interacción entre cemento y cal, donde nos demuestra que la utilización del 100% de ambos materiales en las mezclas dará resistencias arriba de los 85 kg/cm², sin embargo, una reducción del 50% en la cal, podría conseguir una resistencia muy cercana a los 80 kg/cm², si es que se busca una mezcla con menor resistencia se puede reducir en la cantidad de los materiales. En la Gráfica 20, se muestra la gráfica de la relación de estos dos materiales con respecto a la deformación alcanzada en el experimento, indicando que, las deformaciones promedio de utilizar el cemento al 100% y la cal en los 3 porcentajes de varianza contemplados, se alcanzan deformaciones en el rango de 1.8 a 2mm.



Gráfica 19. Interacción de cal con cemento en la prueba a compresión.



6. CONCLUSIONES

En la presente investigación se cumplió con el objetivo principal, donde se midió y evaluó la capacidad mecánica de mezclas compuestas por ceniza volcánica, cal hidratada y piedra pómez, logrando sustituir una porción del cemento portland para la elaboración de concretos con una resistencia a la compresión de 75 kg/cm².

De igual forma los objetivos particulares fueron cumplidos, al realizar un diseño de mezclas mediante un diseño experimental.

Se aplicaron pruebas de resistencia a la compresión a las probetas diseñadas. Concluyendo el diseño experimental que arrojó como resultado 27 diferentes mezclas y 81 probetas realizadas y ensayadas, obteniendo las cargas máximas aplicadas y deformación formada por la misma.

Se realizaron tablas de estadísticas para evidenciar los resultados obtenidos de los esfuerzos axiales a los especímenes, permitiendo sacar la resistencia a la compresión y la deformación de estos, además de realizar un análisis y comparaciones de las mezclas de forma eficiente, así como una serie de graficas de apoyo para una mejor interpretación, tales como las gráficas de medias, en las cuales se observó el comportamiento de los materiales cementantes de forma aislada, permitiendo ver qué porcentaje de estos es mejor emplear en una mezcla para alcanzar mayor resistencia o deformación; Además de permitir en un futuro como determinar la cantidad de material para lograr cierta resistencia al menor costo. Mientras que las gráficas de interacciones mostraron la relación entre los cementantes, donde se observó que las mezclas con mayor porcentaje con cal y cemento alcanzaron mayor resistencia a la compresión, pero menor capacidad de deformación. Mientras que la ceniza volcánica parece ofrecer mayor plasticidad al emplearse en un 75%, sin embargo, si se busca mayor resistencia a la compresión la dosificación idónea es emplearla al 50%.

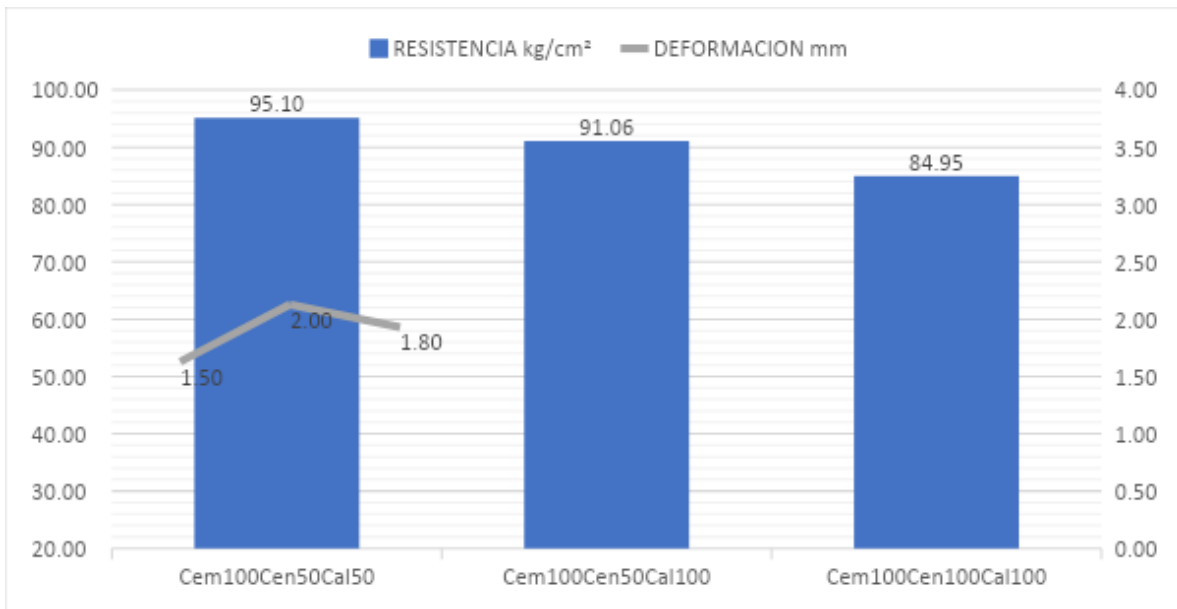


TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MEXICO

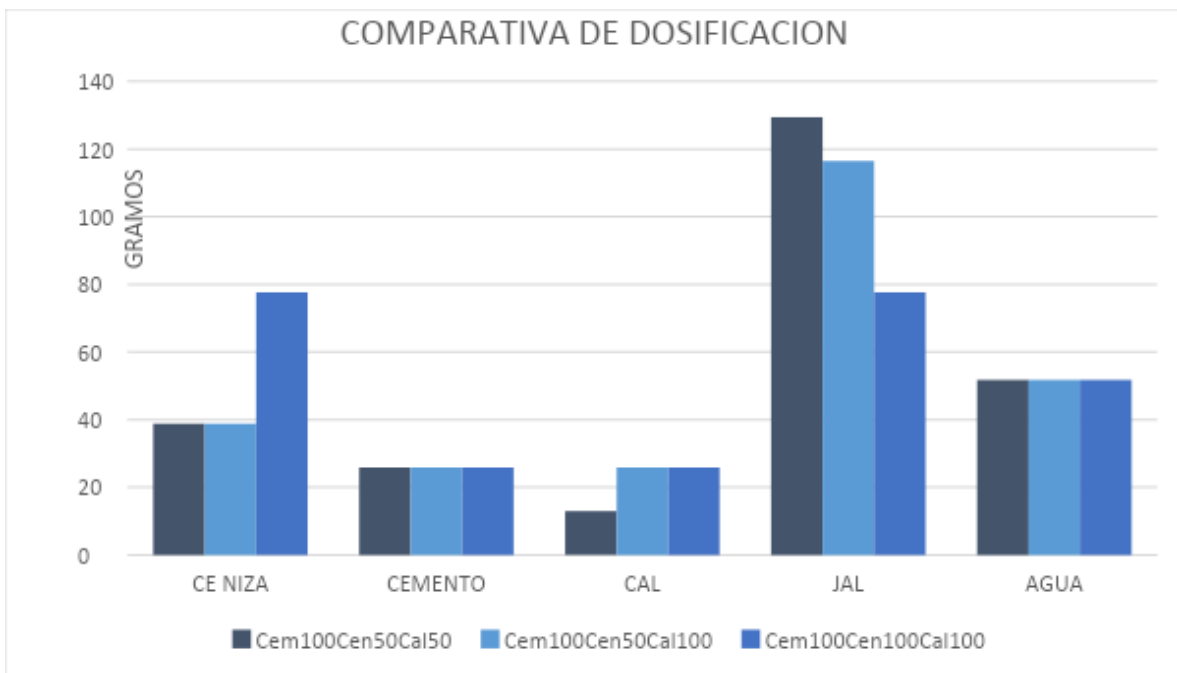
Mientras que la hipótesis de este trabajo menciona que “Dado que el cemento portland es necesario para crear concretos y su huella de carbón es nociva para el medio ambiente, se busca desarrollar mezclas de materiales que adicionados al cemento como la cal hidratada, reduzca su consumo y que en conjunto con la ceniza volcánica y piedra pómez como sustitutos de la arena y grava, produzcan concretos con características similares o mejores a los de uno de resistencia $f'c$ 75 kg/cm², siendo aptos para su utilización en la construcción”. De acuerdo con la información obtenida del experimento, y al haber analizado la estadística presentada, se concluye que la hipótesis se cumple, con un grado de confiabilidad del 95% en el diseño del experimento, donde el nuevo material creado cumple al haber obtenido una similar y mayor resistencia a la compresión, aunque aumentando su nivel de densidad.

Cabe destacar que cuando se menciona la cantidad de cemento en los segmentos, debemos entender que éste equivale al 50% del 100% del cemento requerido para realizar un concreto descrito anteriormente, que fue la base de la dosificación que se utilizó en el diseño experimental, siendo el otro 50% sustituido por cal hidratada, debido a que en la hipótesis se buscó reducir el consumo del cemento.

En la gráfica 21, se observan las mezclas con los valores con mayor $f'c$, siendo estos de 95.1, 91.06 y 84.95 kg/cm², con unas deformaciones de 1.5, 2 y 1.8 mm respectivamente., mientras que en la gráfica 22, se aprecia la composición de estas mezclas.



Gráfica 21. Mejores mezclas



Gráfica 22. Dosificaciones

El material creado posee una buena resistencia a la compresión, superando las expectativas de la hipótesis, sin embargo, es un material frágil al mostrar una ductilidad baja, manejándose en un rango de 1.5 a 2 mm.

Los resultados obtenidos son de importancia, pues se logró crear un nuevo material con una mayor resistencia de la planteada, logrando reducir por mitad la cantidad del cemento requerido en las mezclas para un concreto de $f'c$ 75 kg/cm², pudiendo tener aplicaciones como un concreto pobre, apto para plantillas y otros usos de albañilería, como la creación de banquetas, mobiliario, tabiques, entre otros usos.

En cuanto al costo de fabricación de este tipo de material sería algo precipitado, pues en la actualidad no hay un proveedor encargado de suministrar la ceniza volcánica tratada, claro está que también se podría recolectar ceniza volante, la cual ya tiene un grado de finura muy similar a la del cemento, pero para esto se ocuparía tener zonas de recolección y tener suerte de que el aire traslade estas cenizas a las zonas de recolección, por otro lado el resto de materiales sí factible realizar un presupuesto al ser comerciales, donde si se quisiera fabricar un metro cubico de éste material con la mezcla optima de los resultados obtenidos, siendo la mezcla con una dosificación de Cem100Cen50Cal50 con una resistencia de 95.1 kg/cm², y contemplando que la ceniza se consiguiera a un costo de \$1,500.00 que es el precio de arena en Colima por 6m³, el saco de 50 kg de cemento a \$180.00, el saco de Cal de 25 kg a \$65.00, el metro cúbico de Jal a \$360.00 y el metro cúbico de agua a \$15.00, los costos quedarían de la siguiente forma, dando un total de \$987.40, sin considerar mano de obra, herramienta y maquinaria.

Materiales	Volumen	Costo
Ceniza Volcánica	0.17 m ³	\$ 45.00
Cemento	180 kg (3.6 bultos)	\$ 648.00
Cal hidratada	90 kg (3.6 bultos)	\$ 234.00
Jal	0.14 m ³	\$ 55.00
Agua	0.36m ³	\$ 5.40
Total		\$ 987.40

Comparando el precio por metro cúbico de concreto de una resistencia de 100 kg/cm², siguiendo la dosificación propuesta por cemex, como se aprecia en la Imagen 38, y tomando en cuenta lo siguientes costos de material; 6 m³ de arena \$750.00, 6 m³ de grava \$1200.00, saco de cemento \$180.00 y \$15.00 el agua, los costos de los materiales necesarios quedarían de la siguiente forma:



Imagen 38. Dosificación de concreto de una f'c 100 kg/cm²

Materiales	Volumen	Costo
Arena	0.58 m ³	\$ 154.70
Cemento	225 kg (4.5 bultos)	\$ 810.00
Grava	0.66 m ³	\$ 303.00
Agua	0.235m ³	\$ 03.50
Total		\$ 1,271.20

Por tanto, la mezcla propuesta en la investigación con una resistencia de 95.1 kg/cm², tendría un costo en materiales de \$987.40, y la de un concreto de 100 kg/cm² en 1271.20, siendo más económica por \$283.80.

Los resultados obtenidos indican que algunas de estas mezclas que lograron una resistencia superior a los 60 kg/cm², pueden ser viables para su aprovechamiento en la construcción, además de apreciar que la ceniza volcánica ya no sería un desecho. Las aplicaciones de estas mezclas pudieran ser empleadas en:

1. Fabricación de banquetas y firmes
2. Elaboración de mobiliario
3. Recubrimientos exteriores
4. Elaboración de tabiques para muros
5. Adoquines y celosías

En general, los resultados son interesantes, pudiéndose mejorar aún los resultados obtenidos, pudiendo emplear Cal de alta pureza y/o apagada, cales que como se mencionó en la literatura consultada, en la antigüedad fueron empleadas para la fabricación de sus conglomerados, además de buscar un método más efectivo para la molienda de la ceniza volcánica, pudiendo obtener un producto refinado.

Además, se puede ampliar la investigación sometiendo las mezclas a otros tipos de pruebas, como de flexión, carbonatación y térmico, de hecho, a la par de esta investigación se realizó un artículo, donde a modo exploratorio se sometieron 5 mezclas a pruebas térmicas obteniendo resultados llamativos, pero no concluyentes, valiendo la pena retomar el tema y llevarlo a desarrollar por completo.

Finalmente, la investigación presente se expone como avance exploratorio del material, siendo necesario complementar los aspectos recomendados para conocer las demás propiedades, permitiendo generar nuevas preguntas de investigación tales como:

- ¿Se podrá reducir aún más el empleo del cemento en la mezcla?
- ¿Se podrá conseguir una mayor resistencia a la compresión?
- ¿Qué características térmicas posee el nuevo material?
- ¿La ceniza más fina con cal viva, podrá mejorar los resultados obtenidos?

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aquasain. (Noviembre de 2017). *aquasain.com*. Obtenido de <http://aquasain.com/blog/la-cal-sirve-algo-solo-existe-romperme-las-cosas-casa/>
- Arcontes Pascual, G. (2015). Tesis Doctoral. *Desarrollo de conglomerantes basados en hipótesis constructivas de pirámides egipcias del reino antiguo*. Madrid, España.
- Arenas, C. A. (2018). Elaboración de cemento gris, usando como adición el retal cerámico, residuo proveniente de la industria cerámica. *Universidad Militar Nueva Granada*. Obtenido de <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/17786>
- Aura Navas, R. R. (09 de 12 de 2015). Impactos ambientales asociados con el proceso de producción. *Enfoque UTE*, 6(4), 67-80. doi:e-ISSN: 1390-6542 / p-ISSN: 1390-9363
- Cabrera-Madrid, J. A.-G.-B. (2016). Resistencia a la compresión de concretos con escoria de alto horno. Estado del arte re-visitado. *ALCONPAT*, 6(1), 64-83. Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352016000100064
- Calleja, J. (1977). Cementos Puzolánicos. *Consejo Superior de Investigaciones Científicas*, 615-659.
- Castro, D. C. (2010). Obtención y caracterización de geopolímeros, sintetizados a partir de ceniza volante y piedra pómez, utilizados para el desarrollo y mejoramiento del concreto. doi:10.1558/jsrnc.v4il.24
- Cemex. (s.f.). *Cemex Concretos*. Obtenido de Manual del constructor: <https://www.cemexmexico.com/documents/27057941/45587277/aplicacione>

s-manual-construccion-general.pdf/772d227d-d168-efc4-a2e3-86ba78c80cb
4

Cinvestav. (5 de Junio de 2019). <https://conexion.cinvestav.mx/>. Obtenido de <https://conexion.cinvestav.mx/Publicaciones/emplean-material-volc225nico-para-cemento-sustentable>

E, V. (28 de Octubre de 2013). De la historia del cemento. *CYT, Construccion y Tecnologia* , 20-23. Recuperado el 16 de Diciembre de 2020, de <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/ingenieria/60-de-la-historia-del-cemento>

Franco, J. T. (28 de Octubre de 2013). *El concreto Romano sería más sustentable que el concreto que fabricamos hoy*. Obtenido de ArchDaily México: <https://www.archdaily.mx/mx/02-304525/el-concreto-romano-seria-mucho-mas-sustentable-que-el-concreto-que-fabricamos-hoy>

Hernandez, M. (2019). *ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO, FÍSICO Y MICROESTRUCTURAL DE MORTEROS GEOPOLIMÉRICOS OBTENIDOS A PARTIR DE CENIZA VOLCÁNICA Y MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND DE USO TRADICIONAL*. Recuperado el 12 de Septiembre de 2019

Izquierdo, I. S. (2018). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento. *Revista ingeniería de construcción*, 33(3), 229-240. doi:<https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732018000300229>

Juan Restrepo, O. R. (2013). Reducción de CO2 en la industria cementera por medio de procesos de síntesis química. *Revista Colombiana de Materiales*, 54-60.

Komorowski, J., & Navarro, C. (1 de Octubre de 2019). *Petrología y Geoquímica*. Obtenido de <https://portal.uco.mx/cueiv/Volcan-colima.htm#Volcan-colima>

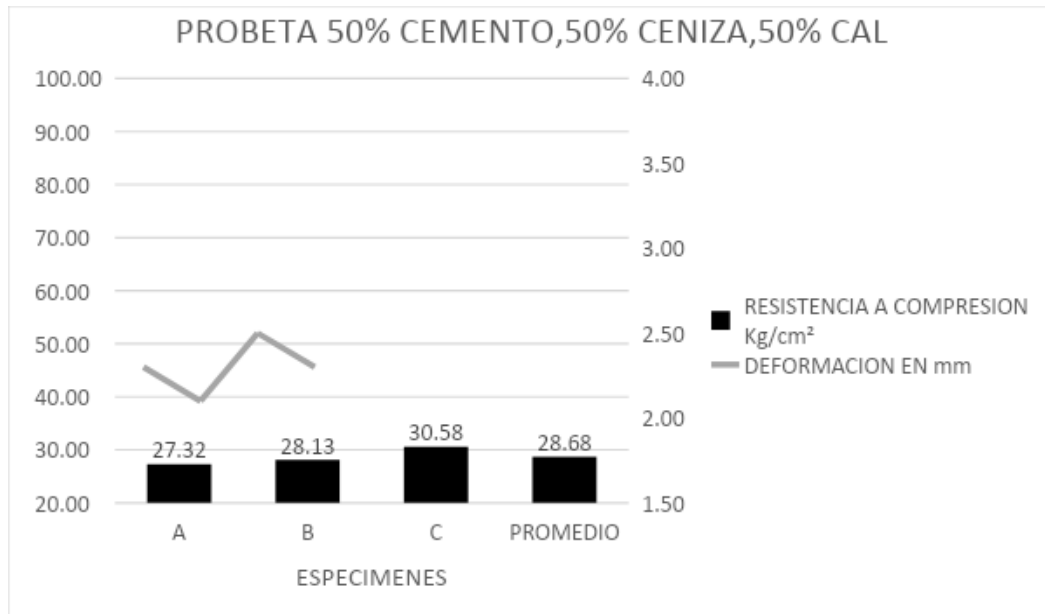
- Mexicano, S. G. (22 de 03 de 2017). *Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Depositos-piroclasticos-y-rocas.html>
- Rodgers, L. (17 de Diciembre de 2018). *BBC NEWS*. Obtenido de La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías: <https://www.bbc.com/mundo/noticias-46594783>
- Rodríguez, S. R. (1995). Estratigrafía y estructura del volcán de Colima, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12(1), 22-46.
- Soledad, M., Castilla, C., Cuan Rojas, M., Osorio, R., Cuan Alarcón, M., & Xochitemo, G. (2017). *Oxical*. Recuperado el 17 de 10 de 2020, de La cal de alta pureza en la conservación: oxical.mx/manual-de-uso.pdf
- Unrn.edu.ar. (21 de Mayo de 2015). <https://ecoinventos.com/>. Obtenido de <https://ecoinventos.com/cenizas-del-volcan-puyehue-convertidas-en-ladrillos/>
- Varela, C. (2006). *Materiales de Construcción* (Primera ed.). Guayaquil, Guayas, Ecuador: ESPOL.
- Varley, N., Charles B, C., & Komorowski, J. C. (2019). *Active Volcanoes of the world: Volcán de Colima*. París, Francia: Springer. doi:10.1007/978-3-642-25911-1
- Velázquez Vertti, C., & Cuan Alarcón, M. (2019). *Tesaurus: Cal* (Primera ed.). (L. G. Flores Rivera, Ed.) Puebla, Puebla, México: Oxical. Recuperado el 23 de 9 de 2020, de <http://www.oxical.mx/tesauro.pdf>

ANEXOS

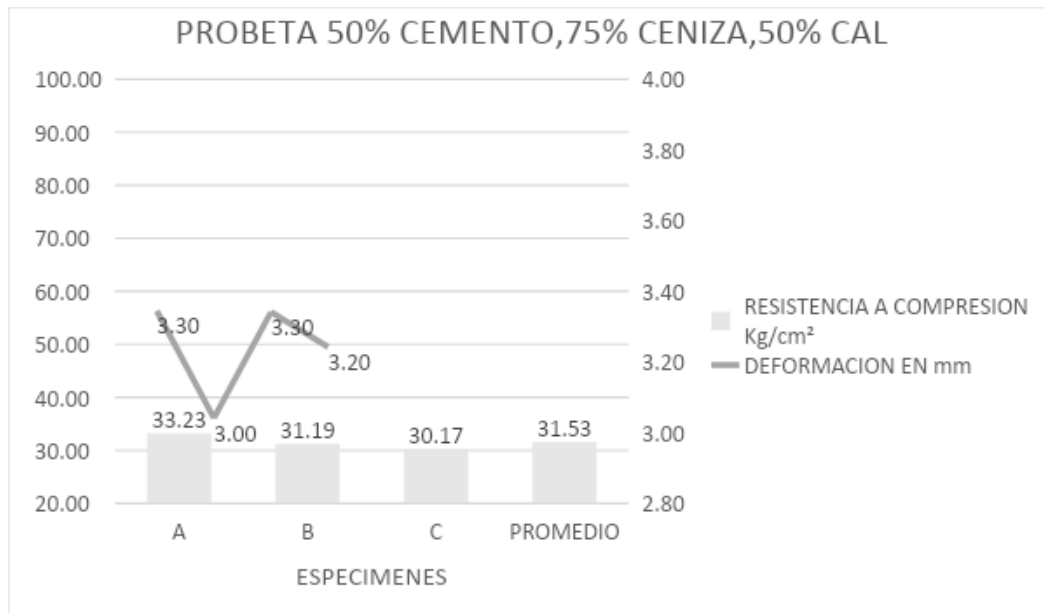
ANEXO 1. RESULTADOS – TABLA 7 – TABLA GENERAL DE RESULTADOS

MEZCLA PROTOTIPO	PORCENTAJE DE MATERIAL				PESO DE PROTOTIPOS			PRUEBA A COMPRESION			DEFORMACION		
	MATERIAL				ESPECIMEN 1	ESPECIMEN 2	ESPECIMEN 3	ESPECIMEN 1	ESPECIMEN 2	ESPECIMEN 3	ESPECIMEN 1	ESPECIMEN 2	ESPECIMEN 3
	CENIZA	CEMENTO	CAL	P. POMEZ	g	g	g	Kg/cm ²	Kg/cm ²	Kg/cm ²	mm	mm	mm
1	50	50	50	183	253.95	255.22	254.59	27.32	28.13	30.58	2.30	2.10	2.50
2	75	50	50	158	256.73	258.01	257.37	33.23	31.19	30.17	3.30	3.00	3.30
3	100	50	50	133	259.50	260.80	260.15	35.07	30.99	30.78	1.70	1.50	1.80
4	50	75	50	175	257.44	258.73	258.09	41.59	42.81	43.63	0.90	1.50	1.60
5	75	75	50	150	260.22	261.52	260.87	50.15	46.48	46.08	1.50	1.50	1.60
6	100	75	50	125	262.99	264.31	263.65	60.14	49.01	52.48	1.90	2.00	1.80
7	50	100	50	167	260.94	262.24	261.59	95.01	93.66	96.64	1.30	1.20	2.00
8	75	100	50	142	263.71	265.03	264.37	83.59	74.62	80.73	1.90	1.60	1.80
9	100	100	50	117	266.49	267.82	267.15	52.19	56.68	52.6	2.50	2.20	2.10
10	50	50	75	175	255.89	257.17	256.53	45.06	44.97	45.95	1.90	1.50	1.40
11	75	50	75	150	258.67	259.96	259.31	23.45	24.14	24.55	1.80	1.60	1.50
12	100	50	75	125	261.44	262.75	262.09	40.57	36.78	43.43	1.60	1.70	1.80
13	50	75	75	167	259.38	260.68	260.03	45.46	42.81	43.46	1.90	1.90	1.80
14	75	75	75	142	262.16	263.47	262.81	40.9	40.65	44.85	1.70	1.90	2.10
15	100	75	75	117	264.93	266.26	265.60	50.97	48.6	46.28	1.40	1.90	2.00
16	50	100	75	158	262.88	264.19	263.53	69.11	69.52	72.17	1.50	1.90	1.70
17	75	100	75	133	265.65	266.98	266.32	67.28	66.67	63.81	2.10	2.10	2.20
18	100	100	75	108	268.43	269.77	269.10	69.81	72.05	69.48	2.00	1.70	2.00
19	50	50	100	167	257.83	259.12	258.48	38.12	37.51	39.14	2.00	2.10	2.00
20	75	50	100	142	260.61	261.91	261.26	33.44	34.66	33.03	1.60	1.40	1.80
21	100	50	100	117	263.38	264.70	264.04	31.8	32.62	31.27	1.80	1.50	1.60
22	50	75	100	158	261.32	262.63	261.98	74.21	67.97	67.89	1.50	1.60	1.50
23	75	75	100	133	264.10	265.42	264.76	53.82	55.54	56.27	2.60	2.10	1.90
24	100	75	100	108	266.87	268.21	267.54	64.83	65.24	63.61	2.30	1.70	1.90
25	50	100	100	150	264.82	266.14	265.48	90.52	91.54	91.13	2.10	2.20	1.80
26	75	100	100	125	267.59	268.93	268.26	80.53	77.68	78.17	2.10	2.30	2.20
27	100	100	100	100	270.37	271.72	271.04	82.57	88.48	83.79	1.90	1.80	1.70

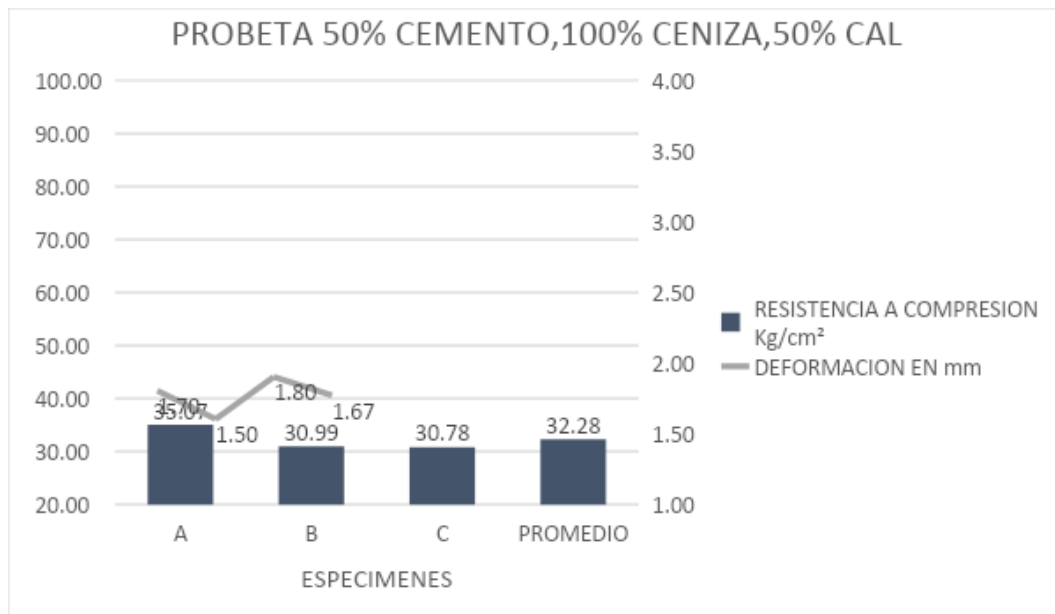
ANEXO 2. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 1



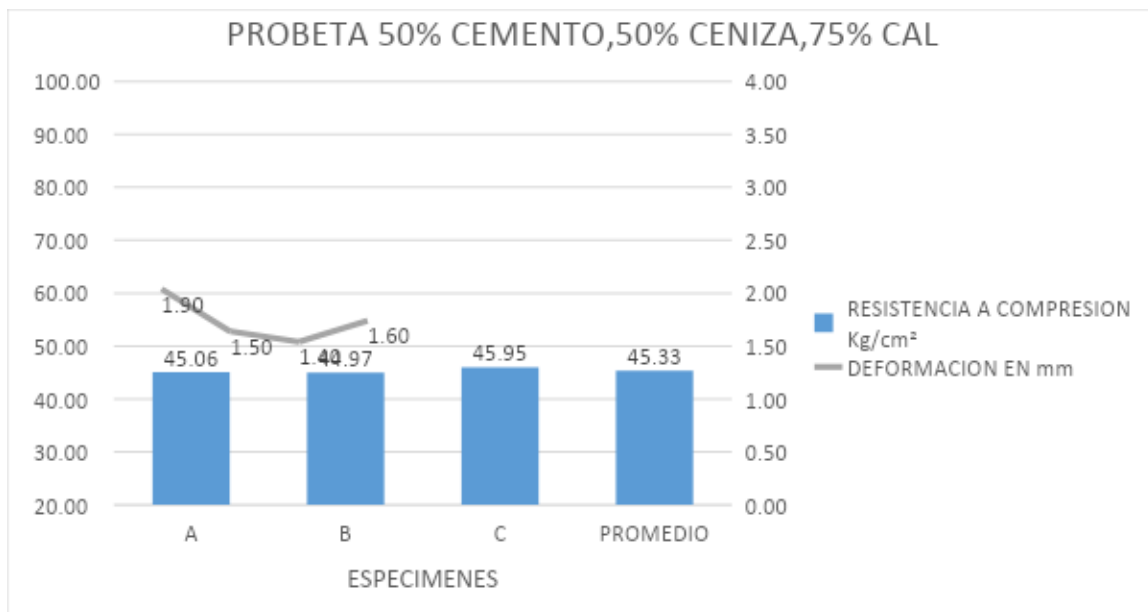
ANEXO 3. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 2



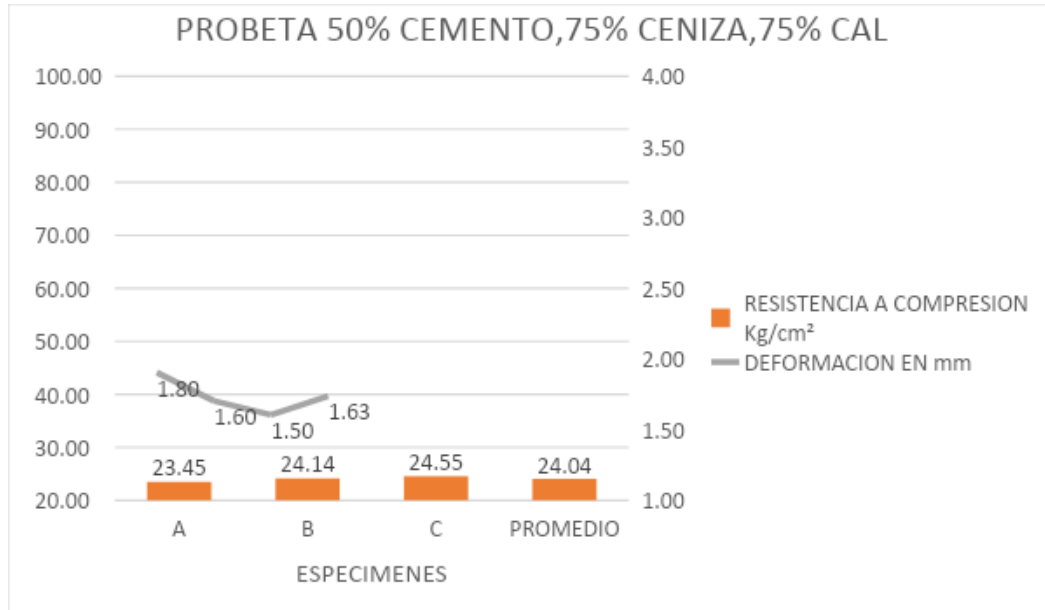
ANEXO 4. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 3



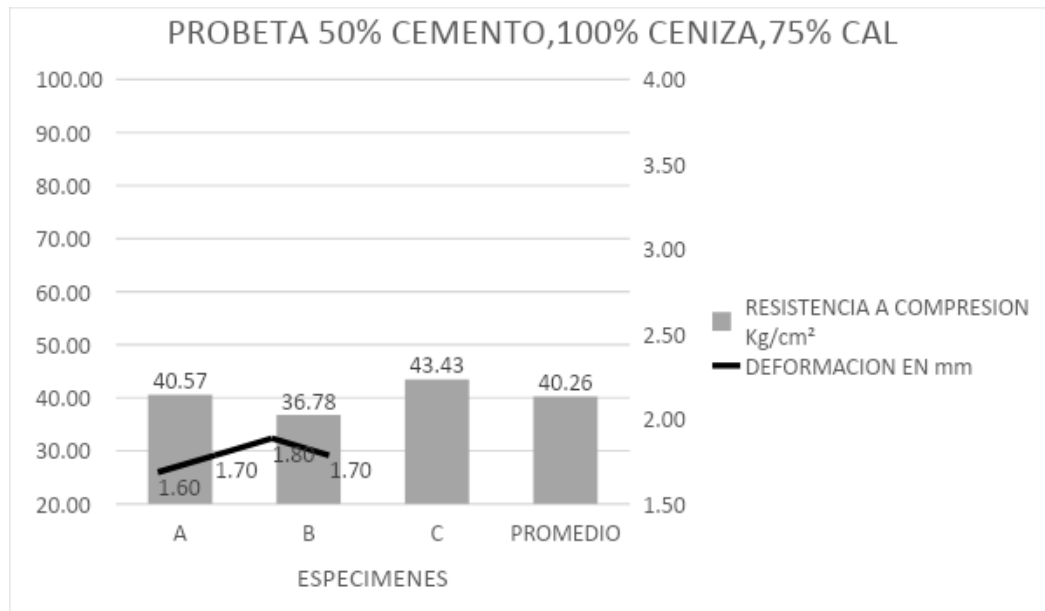
Anexo 5. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 4



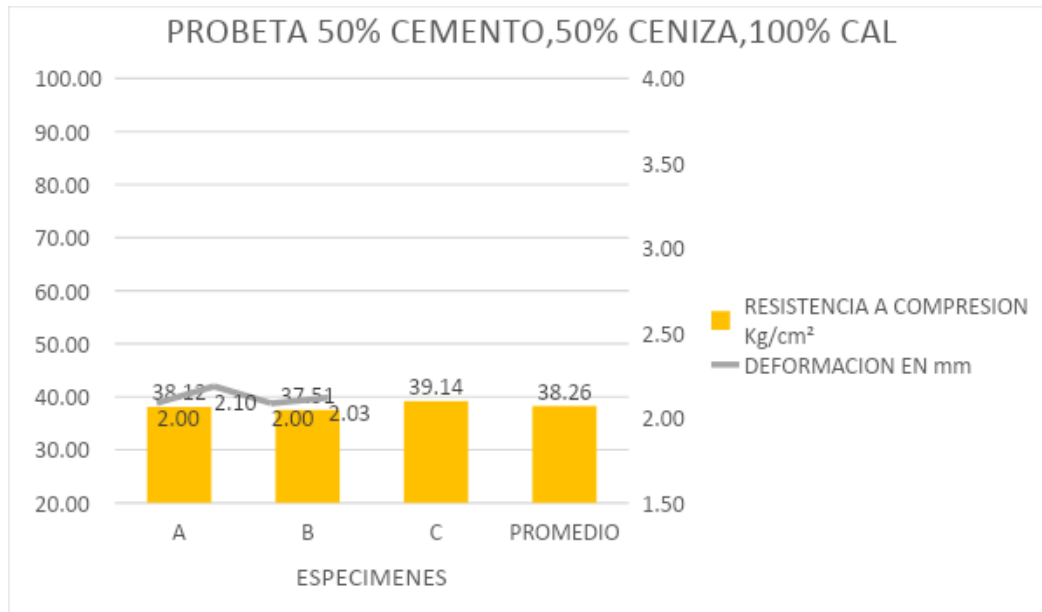
ANEXO 6. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 5



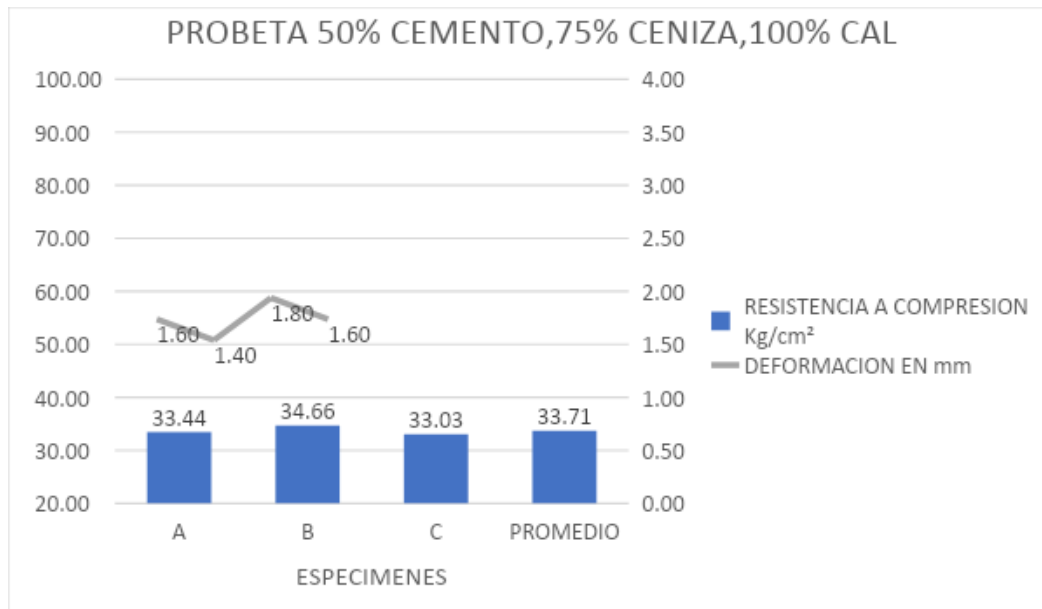
ANEXO 7. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 6



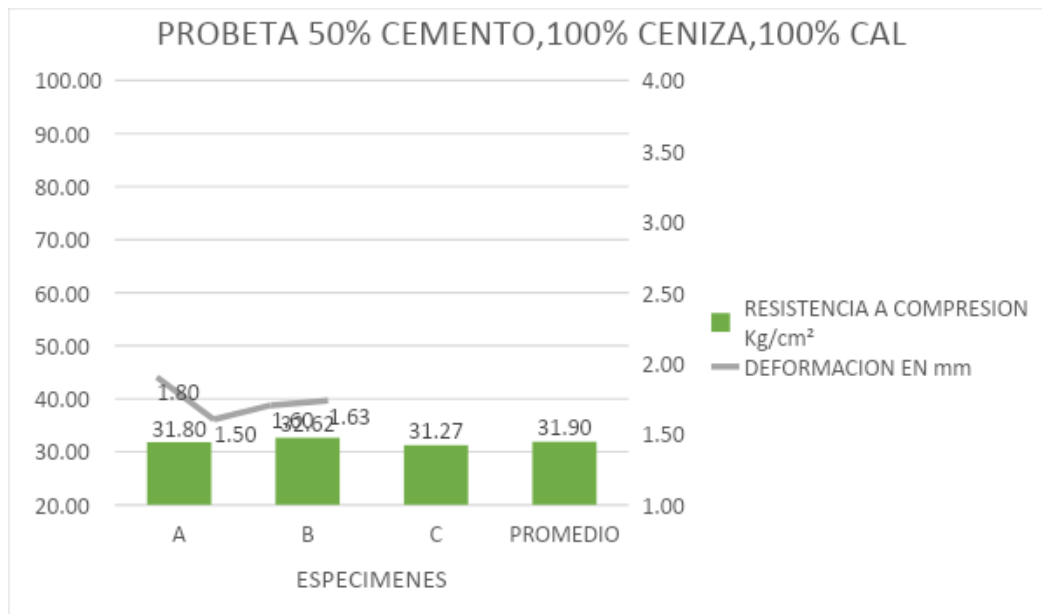
ANEXO 8. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 7



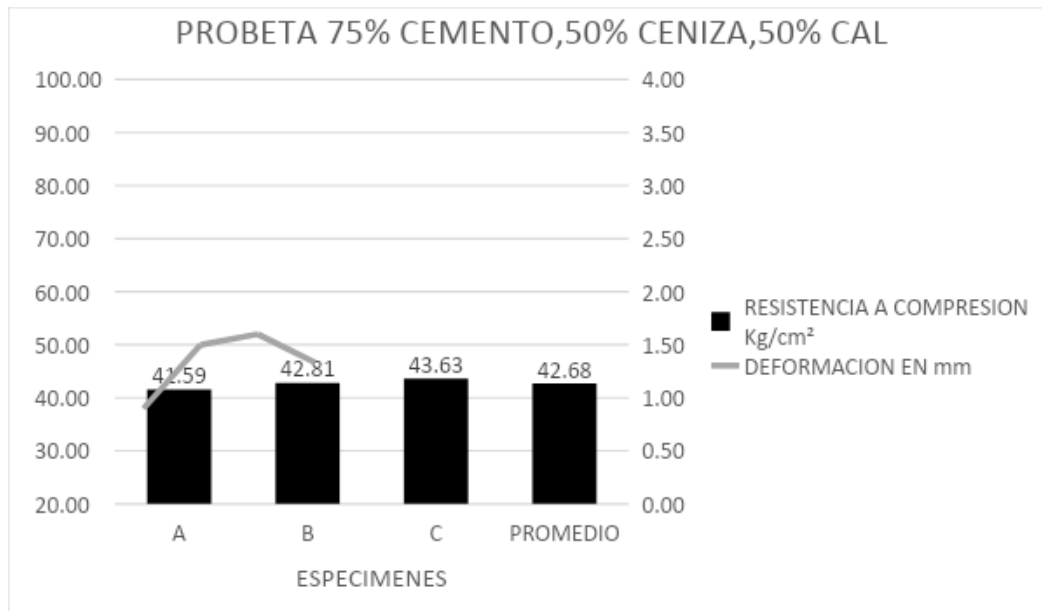
ANEXO 9. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 8



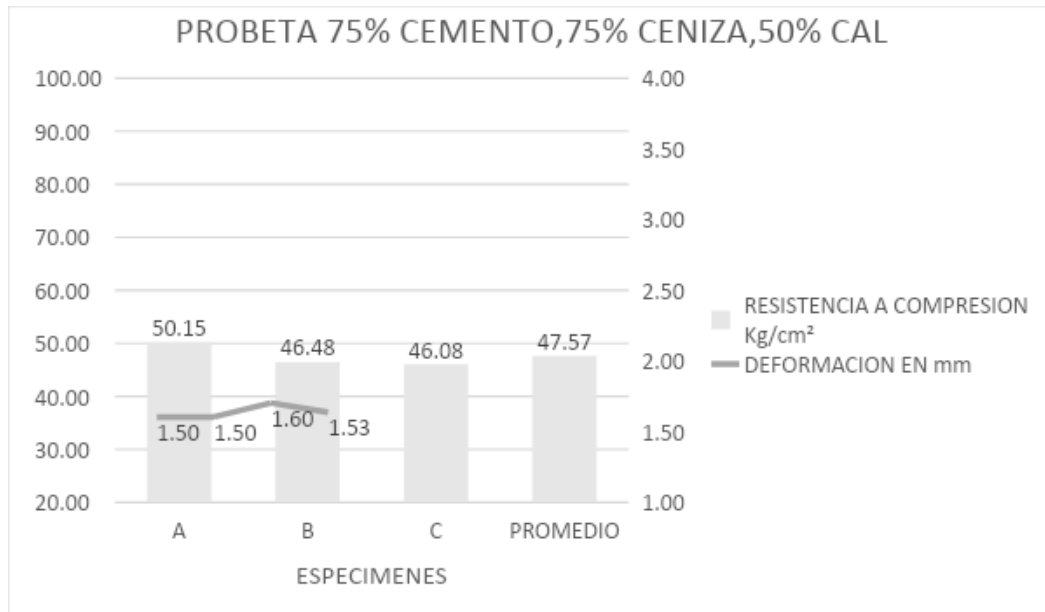
ANEXO 10. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 9



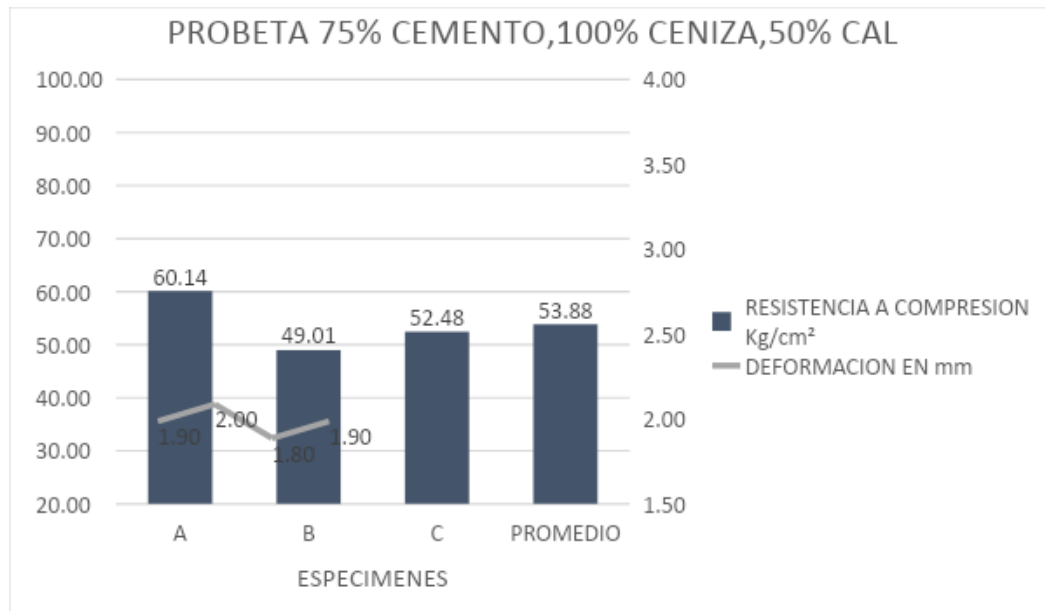
ANEXO 11. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 10



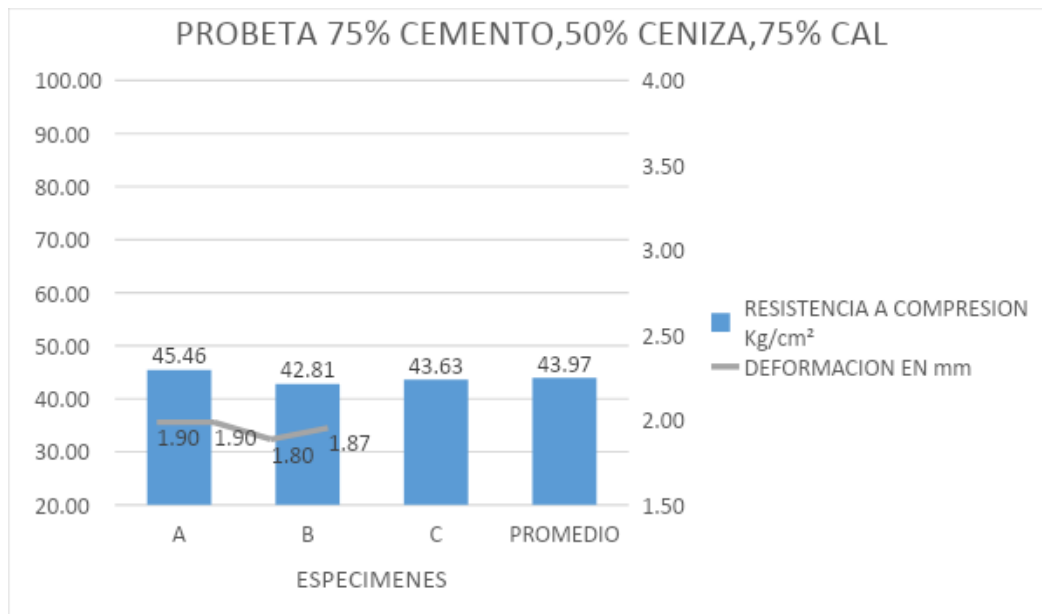
ANEXO 12. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 11



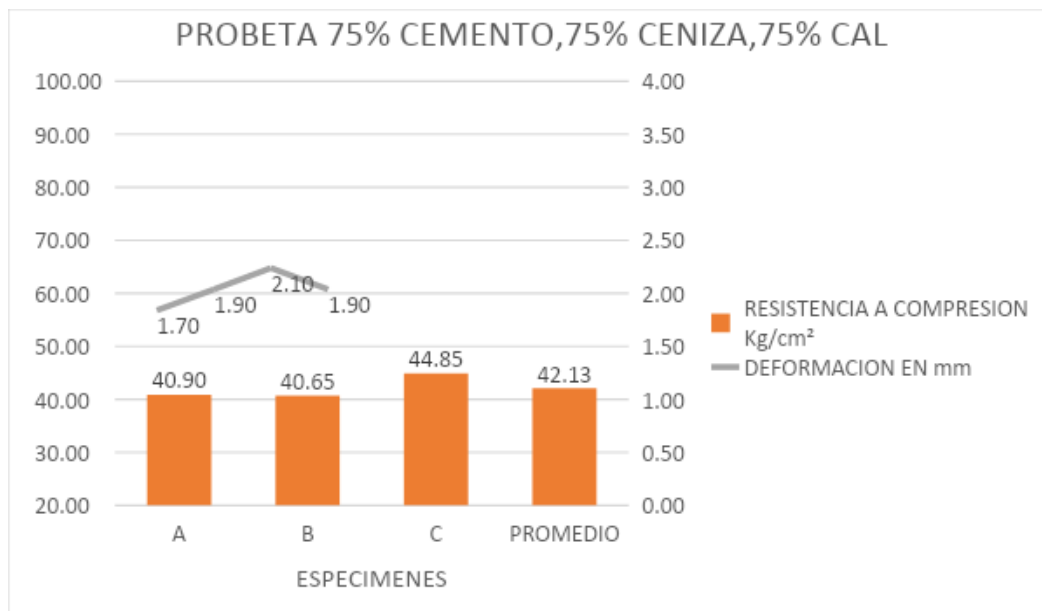
ANEXO 13. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 12



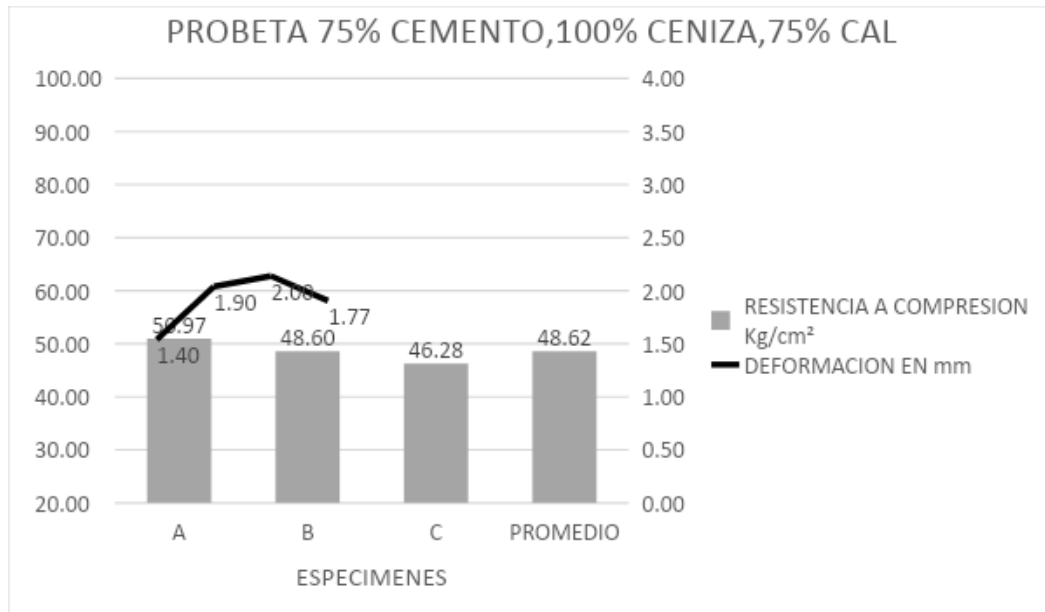
ANEXO 14. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 13



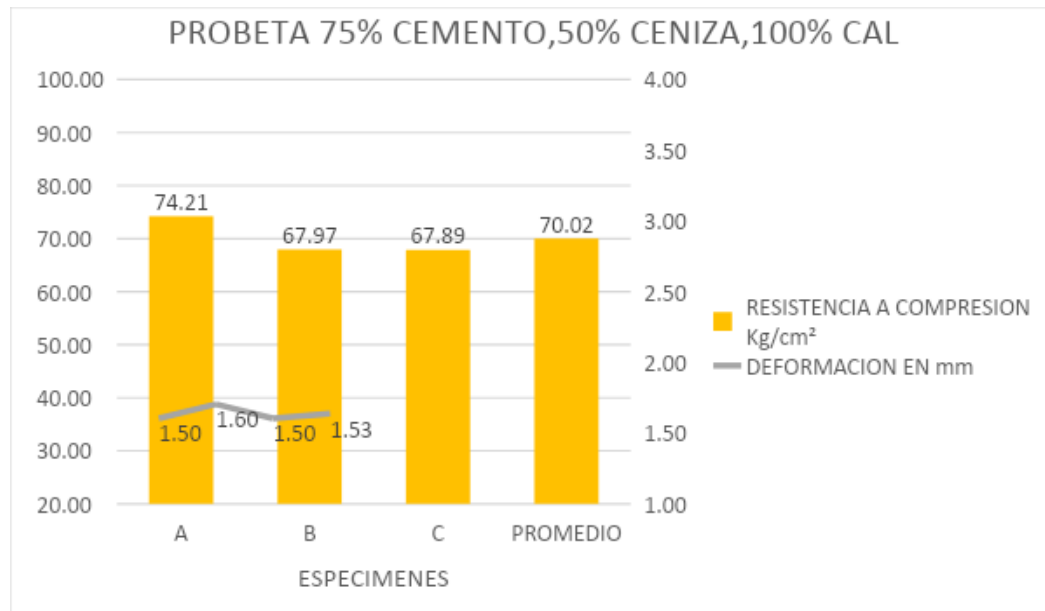
ANEXO 15. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 14



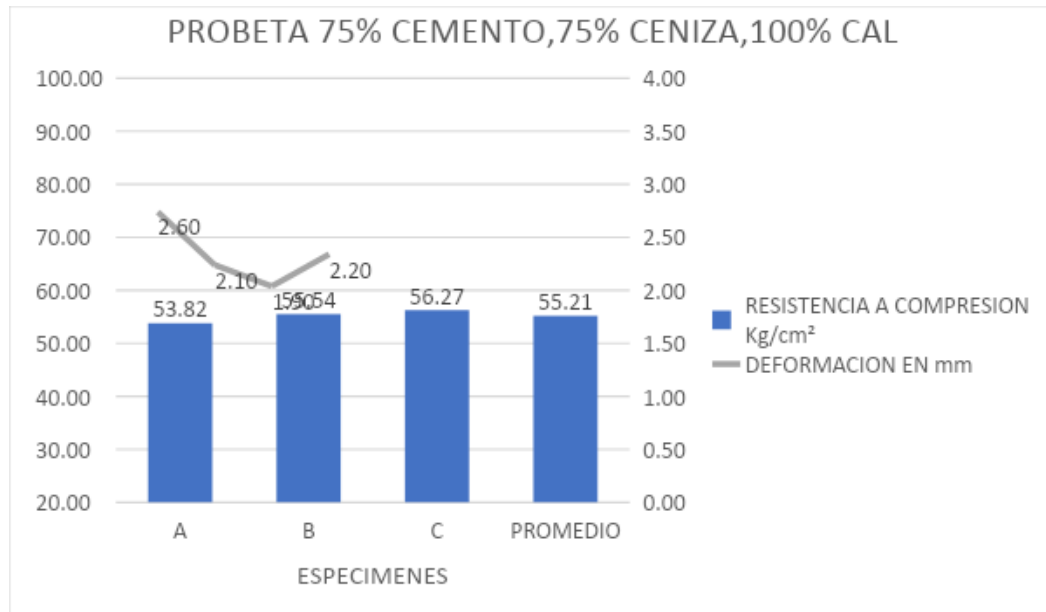
ANEXO 16. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 15



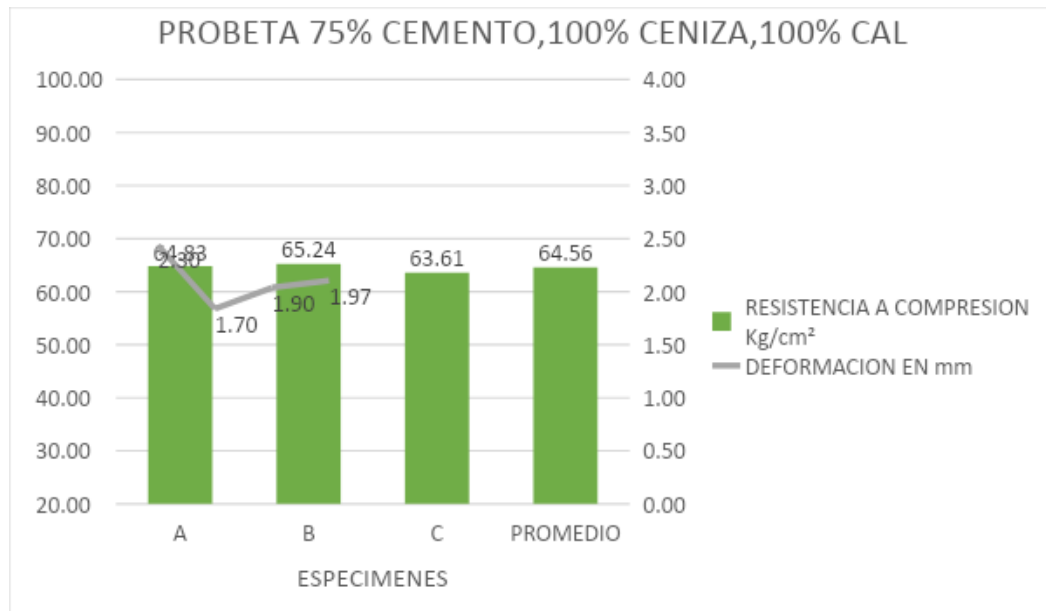
ANEXO 17. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 16



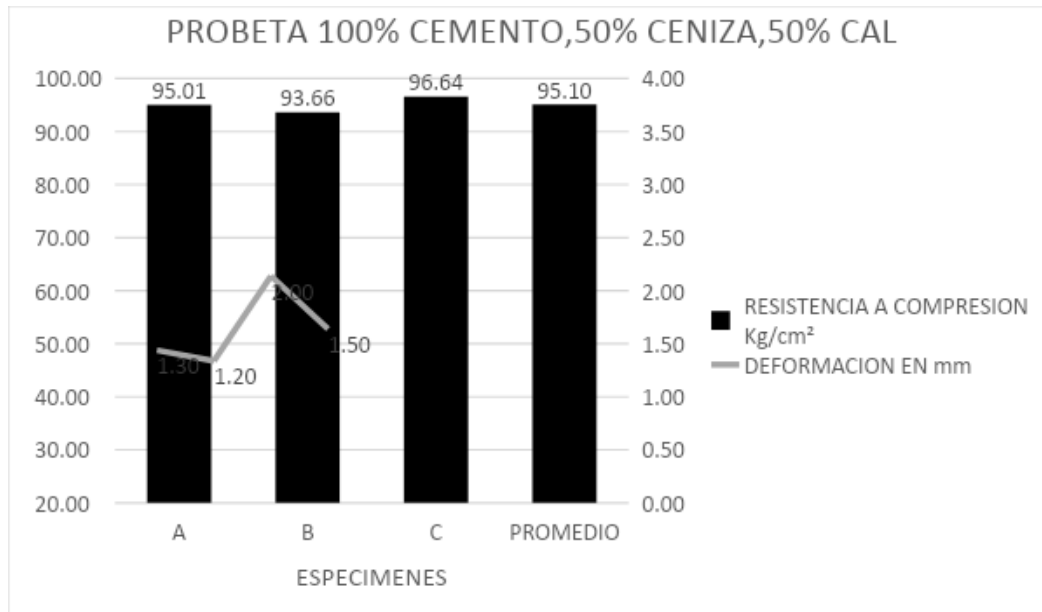
ANEXO 18. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 17



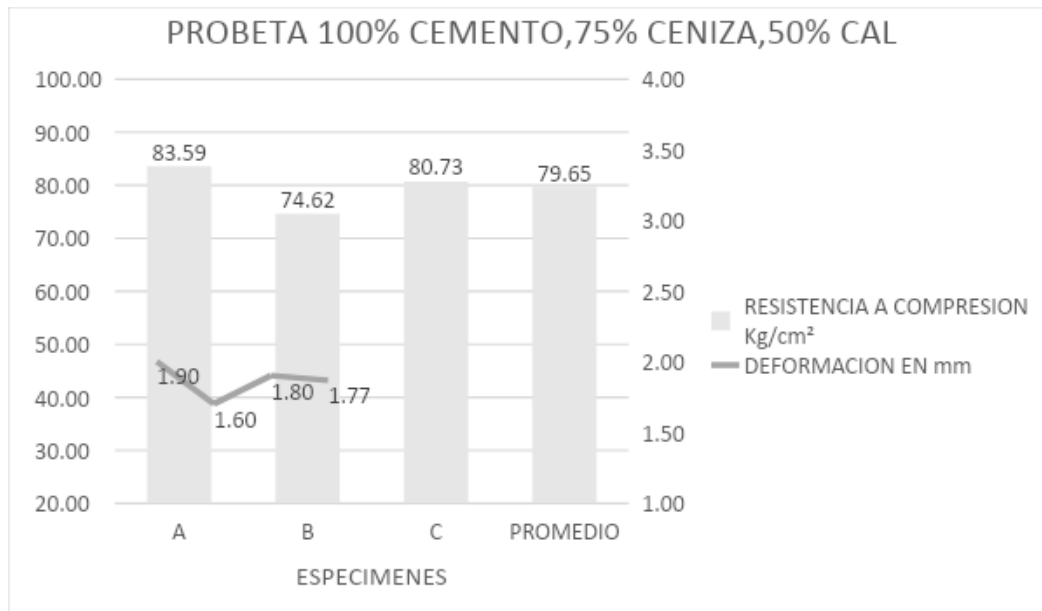
ANEXO 19. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 18



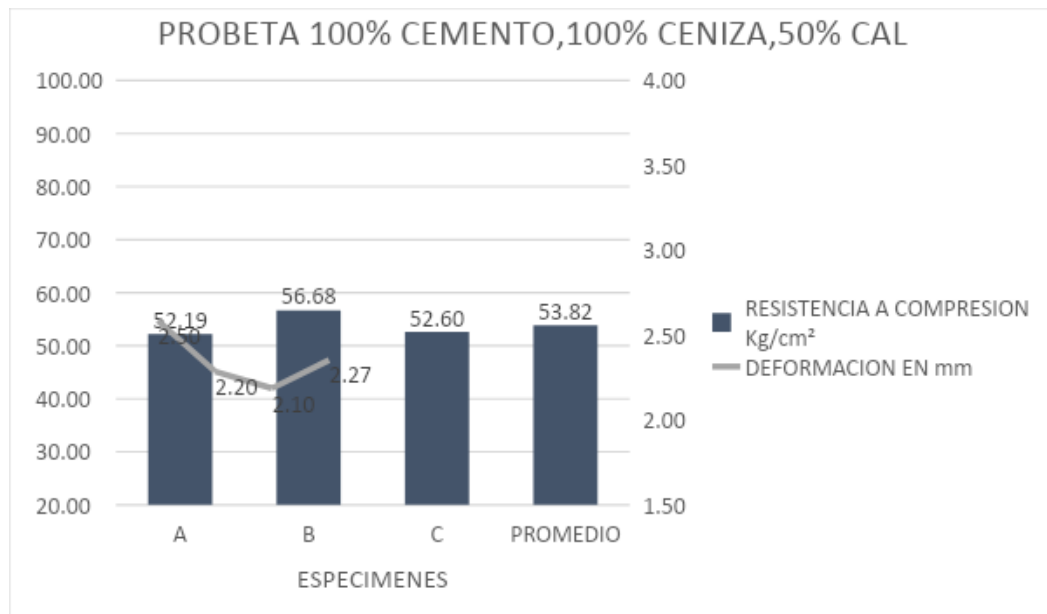
ANEXO 20. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 19



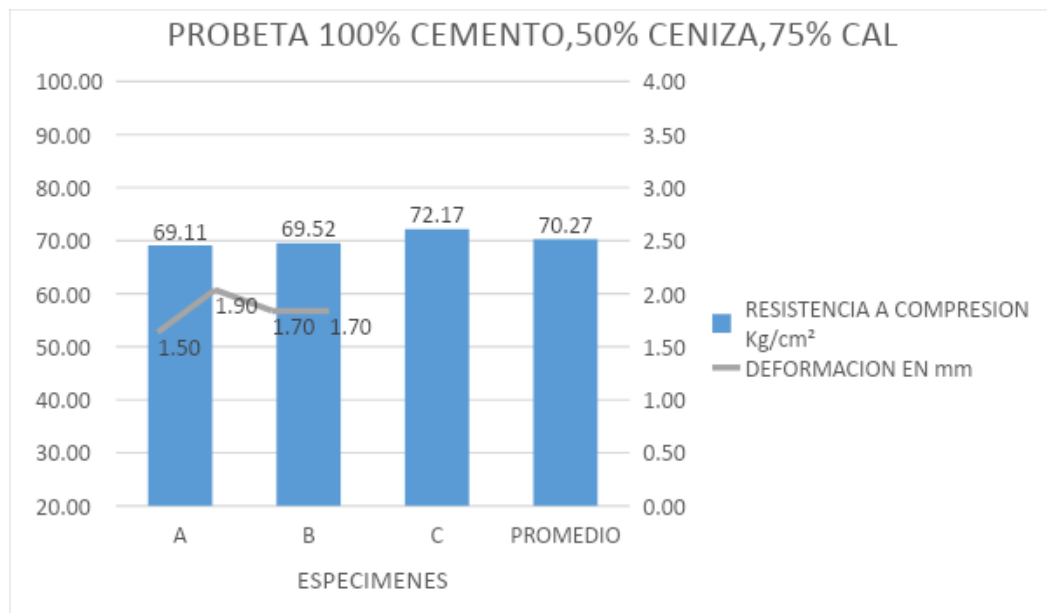
ANEXO 21. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 20



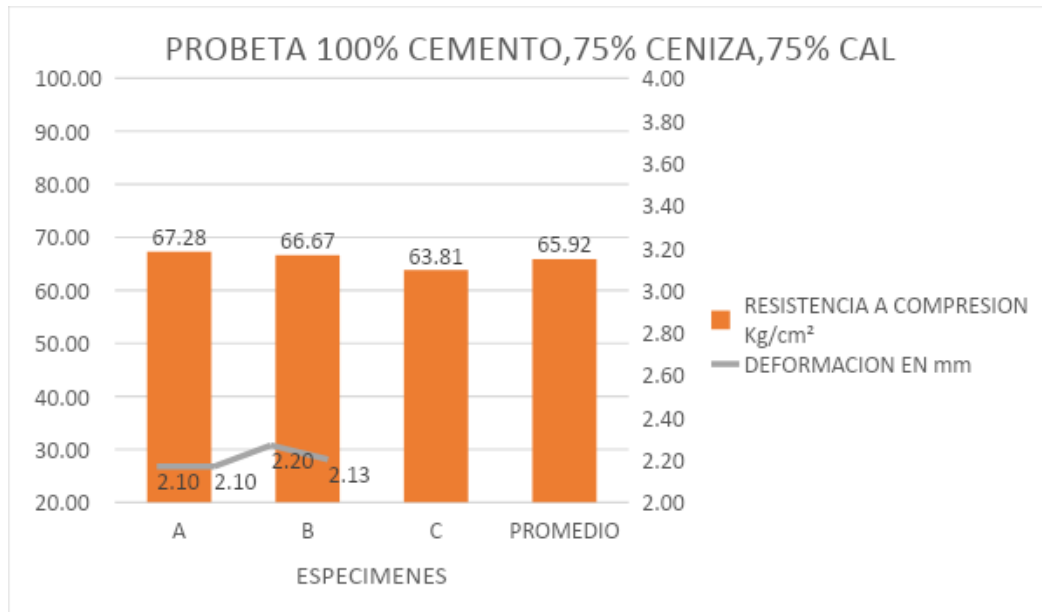
ANEXO 22. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 21



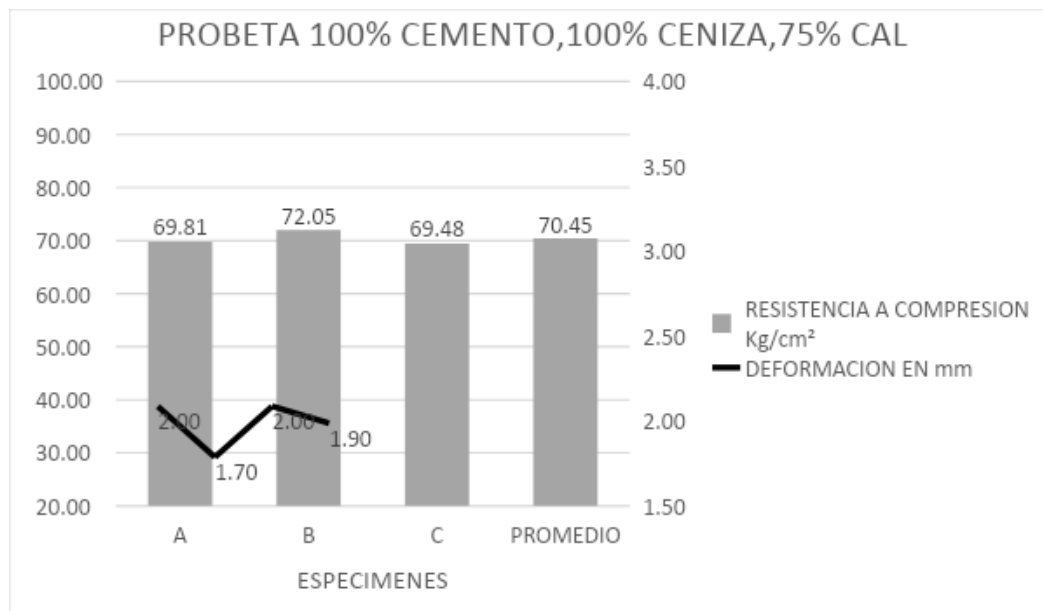
ANEXO 23. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 22



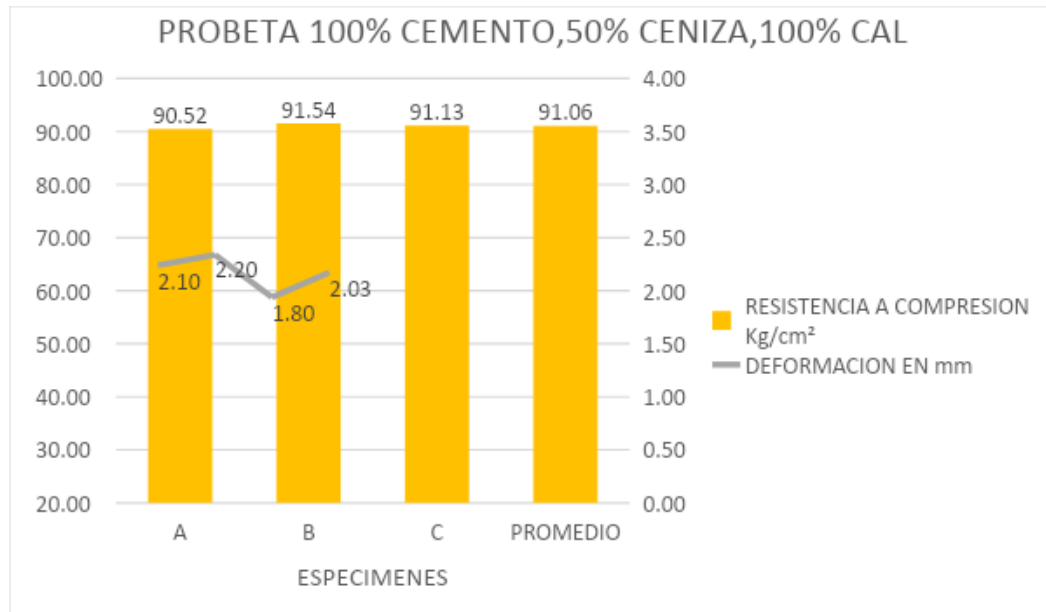
ANEXO 24. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 23



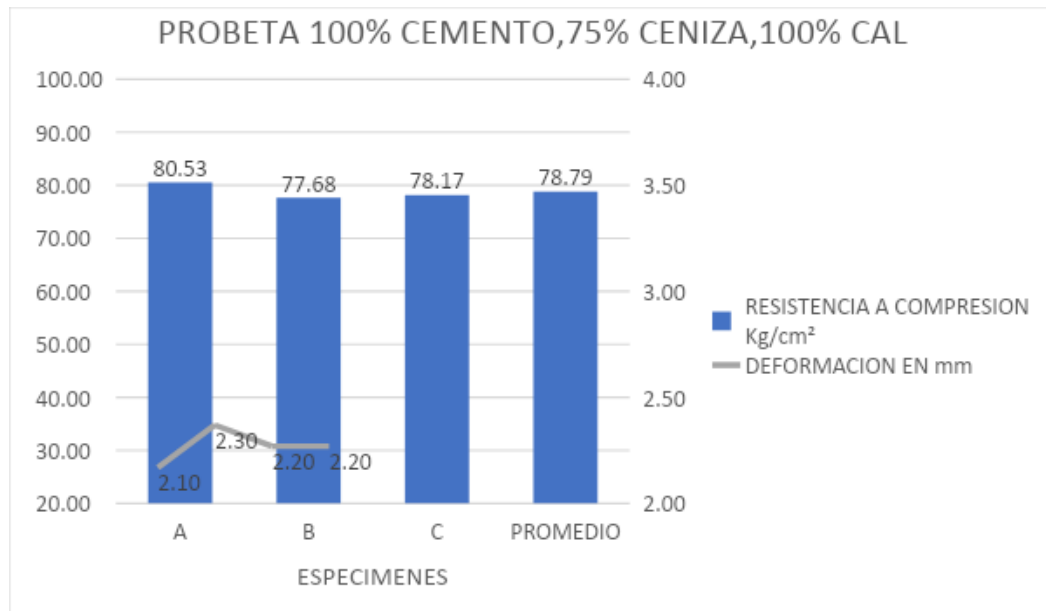
ANEXO 25. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 24



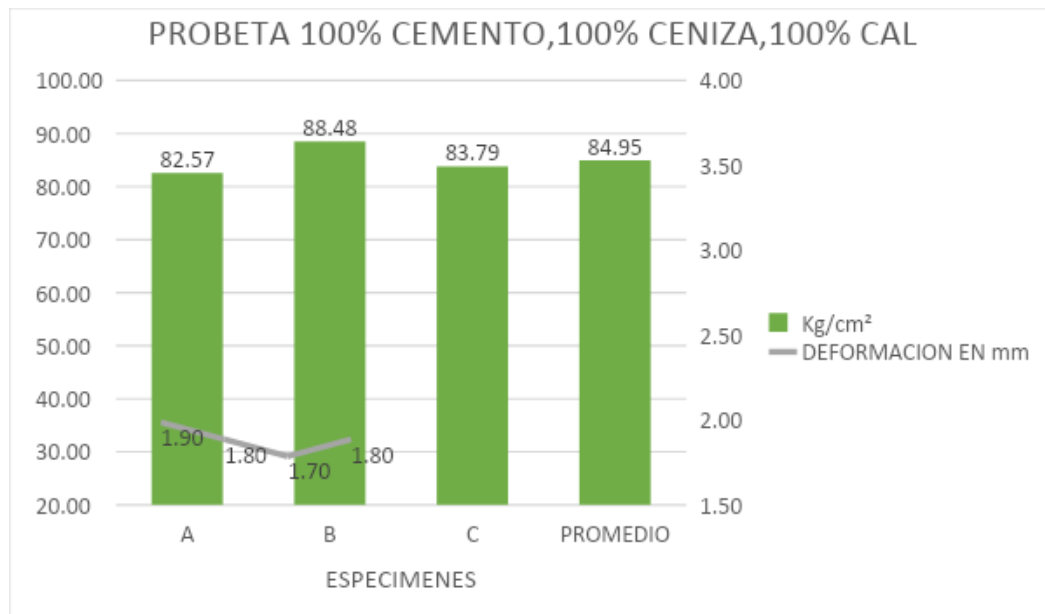
ANEXO 26. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 25



ANEXO 27. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 26



ANEXO 28. RESULTADOS – RESUMEN DE ESPECIMENES - MEZCLA 27



ANEXO 29. RESULTADOS PROMEDIOS

