



# ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA DE MORTERO A BASE DE CEMENTO, JAL, CAUCHO Y AGUA PARA EVALUAR SU RESISTENCIA MECÁNICA

## TESIS

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

PRESENTA:  
ARQ. JOSÉ MANUEL GUZMÁN GILETA

DIRECTOR DE TESIS:  
M. ARQ. JOSÉ FIDEL NAVARRO ARELLANO

CO-DIRECTOR:  
DR. ARQ. JOSÉ RICARDO MORENO PEÑA

VILLA DE ÁLVAREZ, COLIMA. ENERO 2022.



**ESTUDIANTE GUZMÁN GILETA JOSÉ MANUEL  
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

**"ELABORACIÓN DE UNA MEZCLA DE MORTERO A BASE DE CEMENTO, JAL, CAUCHO Y AGUA PARA  
EVALUAR SU RESISTENCIA MECÁNICA"**

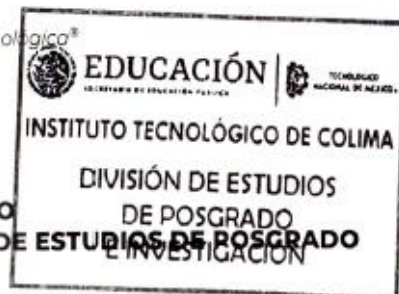
Por la opción de tesis, que para obtener el grado de Maestro en Arquitectura Sostenible y Gestión Urbana será presentado por Usted, tiene a bien concederle la **AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN** de la tesis citada.

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](mailto:posgrado@colima.tecnm.mx) [www.colima.tecnm.mx](http://www.colima.tecnm.mx)



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco primeramente a mis padres y hermanos por siempre apoyarme en todas las decisiones que he tomado, por animarme y motivarme a seguir adelante en distintas ocasiones.

Agradezco a mis amigos por aquellas reuniones que eran necesarias al término de un día pesado de clase. A mis compañeros de maestría, que siempre me alegraban los días y con los que pude formar grandes amistades.

A los maestros y a todas las personas que formaron parte de este ciclo en el cuál, pude vivir momentos únicos.

Y, por último, agradezco a Dios por permitirme seguir mis sueños y alcanzar mis metas, por brindarme una excelente familia y amigos y darme fortaleza para seguir adelante.

## RESUMEN

La tendencia del reciclaje en la reutilización de llantas de vehículos al término de su vida útil en el mundo ha ido en aumento, esto debido mayormente a los problemas medioambientales que representan los residuos no biodegradables. A causa de eso, surge una nueva aplicación para radicar, combatir y poder llevar a cabo el reciclaje del caucho procedente de neumáticos que ya no tienen un uso alternativo, implementándolo dentro del área de la construcción, siendo parte de un agregado dentro de una mezcla cementante.

A continuación, esta tesis se enfoca en el estudio de las propiedades mecánicas de una nueva mezcla basándose en materiales como el cemento, en un porcentaje del 20%, jal o piedra pómez en un 30%, caucho en un 30% y finalmente agua en un 20%, utilizando, además, una densidad en los materiales del  $1.6 \text{ g/cm}^3$ .

La elaboración de las mezclas se realizó mediante un diseño experimental factorial multinivel, utilizando variables independientes como el cemento y el caucho, obteniendo un total de 25 dosificaciones con 3 repeticiones cada una. Se elaboraron las mezclas cementantes y se colocaron en moldes para generar prototipos de  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , sometiéndolos a pruebas de compresión.

También, se generaron tablas de resultados, así como graficas en relación cemento - caucho para poder ser analizadas y conocer su comportamiento. Estos valores mostraron que, la capacidad de resistencia a la compresión, estuvo muy por debajo de lo esperado con un máximo de  $18 \text{ kg/cm}^2$ , sin embargo, la densidad del material propuesto se obtuvo con un rango de valores entre  $0.9$  y  $1.04 \text{ g/cm}^3$ , siendo estos menores al testigo cuya densidad es de  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , si bien no cumple con las características de un mortero de uso estructural, sí promete ventajas para ciertos usos en donde se requiere ligereza de los materiales.

## ABSTRACT

The recycling trend in the reuse of vehicle tires at the end of their useful life in the world has been increasing, this mainly due to the environmental problems that non-biodegradable waste represents. Because of this, a new application arises to locate, combat and be able to carry out the recycling of rubber from tires that no longer have an alternative use, implementing it within the construction area, being part of an aggregate within a mixture cementing.

Next, this thesis focuses on the study of the mechanical properties of a new mixture based on materials such as cement, in a percentage of 20%, jal or pumice stone in 30%, rubber in 30% and finally water in 20%, using, in addition, a density in the materials of  $1.6 \text{ g/cm}^3$ .

The preparation of the mixtures was carried out by means of a multilevel factorial experimental design, using independent variables such as cement and rubber, obtaining a total of 25 dosages with 3 repetitions each. The cementitious mixtures were made and placed in molds to generate prototypes of  $5\text{cm} \times 5\text{cm} \times 5\text{cm}$ , subjecting them to compression tests.

Also, tables of results were generated, as well as graphs in relation to cement - rubber to be able to be analyzed and to know their behavior. These values showed that the compressive strength capacity was much lower than expected with a maximum of  $18 \text{ kg/cm}^2$ , however, the density of the proposed material was obtained with a range of values between  $0.9$  and  $1.04 \text{ g/cm}^3$ , these being less than the control whose density is  $1.6 \text{ g/cm}^3$ , although it does not comply with the characteristics of a mortar for structural use, it does promise advantages for certain uses where lightness of the materials is required.

# I. ÍNDICE GENERAL

Oficio de impresión	1
Carta de cesión de derechos	2
Agradecimientos	3
Resumen	4
Abstract	5
I. Índice General	
II. Índice de tablas	
III. Índice de gráficas	
IV. Índice de imágenes	
1 Generalidades.	14
1.1 Planteamiento del problema.	14
1.2 Justificación del tema de investigación.	15
1.3 Pregunta de investigación.	16
1.4 Hipótesis.	16
1.5 Objetivos:	16
1.5.1 Objetivo General.	16
1.5.2 Objetivos Particulares.	17
1.6 Descripción del proceso metodológico (resumen de la metodología).	17
1.7 Alcances y limitaciones.	18
2 Estado del Arte.	19
2.1 Revisión de la literatura relacionada con el tema de investigación.	19
2.1.1 Mortero	19
2.1.2 Piedra Pómez o Jal	20
2.1.3 Caucho	21
2.1.4 Agua	22
2.1.5 Jalcreto	23
2.2 Investigaciones relacionadas con los morteros	24
	6

2.2.1	Compuestos cementantes	24
2.2.2	Morteros Egipcios	26
2.2.3	Morteros Griegos	27
2.2.4	Morteros Romanos	28
2.2.5	Morteros Modernos	29
2.2.6	Morteros Actuales	30
2.3	Aspectos referenciales	38
2.4	Aspectos normativos	38
3	Metodología	43
3.1	Enfoque y tipo de investigación	43
3.2	Área de estudio	43
3.3	Población y muestra	44
3.3.1	Obtención de la materia prima	44
3.4	Diseño experimental	51
3.4.1	Determinación de las variables	51
3.5	Técnicas de procesamiento e instrumentos para recolectar los datos	55
3.5.1	Elaboración de las mezclas	55
3.5.1.1	Preparación de probetas	55
3.5.1.2	Elaboración del molde	58
3.5.1.3	Fabricación de probetas	60
3.5.1.4	Curado y fraguado de probetas	63
3.6	Ejecución de la prueba mecánica	65
3.6.1	Prueba de compresión	65
4	Resultados y discusión	69

4.1	Resultados	69
4.1.1	Tablas de resultados	69
4.2	Discusión de resultados	78
4.2.1	Efecto de las variables sobre las propiedades de compresión	78
4.2.2	Variable dependiente: Resistencia (KN)	79
4.2.3	Variable dependiente: Deformación (mm)	81
	Conclusiones	83
	Cumplimiento de los objetivos de la investigación	83
	Aceptación o rechazo de la hipótesis	84
	Importancia de los resultados obtenidos	84
	Aportaciones	84
	Recomendaciones para continuar con la investigación en lo futuro	85
	Nuevas preguntas de investigación	86
	Referencias Bibliográficas	100
	Fuentes de información consultadas y citadas	103



## II. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Tabla comparativa del alcance de la resistencia del mortero a los 7 y 28 días de fraguado tomada de la NMX-C-021-ONNCCE-2015.	41
Tabla 2.	Base de mortero de $f'c$ 75 kg/cm <sup>2</sup> .	52
Tabla 3.	Sustitución de materiales de mortero de $f'c$ 75 kg/cm <sup>2</sup> .	52
Tabla 4.	Diseño experimental factorial multinivel.	53
Tabla 5.	Porcentaje del material a utilizar en las probetas.	54
Tabla 6.	Cálculo de material de muestras de 5cm x 5cm x 5cm.	56
Tabla 7.	Se presenta la 25 dosificaciones en gramos por probeta resultantes del diseño experimental.	57
Tabla 8.	Se muestra la cantidad de material en gramos que se ocupa por cada 3 probetas.	58
Tabla 9.	Resultados obtenidos por probeta de la prueba de resistencia a la compresión.	70
Tabla 10.	Resumen estadístico de las 75 probetas ensayadas	79
Tabla 11.	Correlaciones	79

### III. ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 50.	72
Gráfica 2.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 62.5.	73
Gráfica 3.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 75.	73
Gráfica 4.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 87.5.	74
Gráfica 5.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 100.	74
Gráfica 6.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 50.	75
Gráfica 7.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 62.5.	75
Gráfica 8.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 75.	76
Gráfica 9.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento	

	– caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 87.5.	76
Gráfica 10.	Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 100.	77
Gráfica 11.	Muestra la capacidad de resistencia (barras de colores) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento y el caucho escalan de 50 a 100.	77
Gráfica 12.	Comportamiento del caucho en relación con la resistencia. Entre menor cantidad de material de caucho en la probeta, la capacidad de resistencia aumentó.	80
Gráfica 13.	Interacciones resistencia - peso. Esta nos muestra que al utilizar la cantidad de material de cemento en un 75% con un 50% de caucho, la resistencia es similar al utilizar un porcentaje de cemento del 100% con el 62.5 de caucho.	81
Gráfica 14.	Comportamiento de la deformación en relación con el cemento. Se muestra que, en la proporción del 75% de cemento, existe una menor deformación de la probeta, inclusive por debajo de las proporciones de 87.5% y 100%.	82

#### IV. ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen 1.	Gestión Integral de los Residuos con un Enfoque de Economía Regular (Visión Nacional Hacia una Gestión Sustentable).	39
Imagen 2.	Ubicación de la distribuidora TRUPECO en calle Mariano Arista #550, colonia Centro, Colima, Colima, México. (Fuente: Google Maps).	44
Imagen 3.	Ubicación de la vulcanizadora URSUA en Parque Industrial #25 en Colima, Colima, México. (Fuente: Google Maps).	44
Imagen 4.	Cemento portland.	45
Imagen 5.	Jal o piedra pómez.	47
Imagen 6.	Caucho triturado obtenido de neumáticos	48
Imagen 7.	Maquina rayadora y extractora de caucho.	49
Imagen 8.	Proceso de rayado de neumáticos para la obtencion de caucho.	49
Imagen 9.	Almacenamiento de caucho ya extraído.	49
Imagen 10.	Agua a utilizar en las mezclas. (Fuente: el Diario Vasco)	50
Imagen 11.	Croquis empleado en el proceso del diseño del molde	59
Imagen 12.	Molde de madera (lado izquierdo). Molde de melamina (lado derecho).	59
Imagen 13.	Molde de madera que se utilizó para crear las probetas.	60
Imagen 14.	Aplicación de aceite quemado al molde de melamina.	60
Imagen 15.	Particulas de caucho y jal antes de cribar.	61
Imagen 16.	Cribado del caucho y el jal.	61
Imagen 17.	Partíulas caucho y la jal cribada despues del cribado.	61
Imagen 18.	Dosificación de los materiales.	62

Imagen 19.	Proceso de mezcla de los materiales.	62
Imagen 20.	Moldes de melamina colocados en una superficie plana y nivelada.	63
Imagen 21.	Vibrado de la mezcla dentro de los moldes.	63
Imagen 22.	Moldes después de colocar la mezcla y prensarlos.	63
Imagen 23.	Probetas después de la extracción del molde.	64
Imagen 24.	Identificación de probetas.	64
Imagen 25.	Ubicación del laboratorio de Mecatrónica dentro del Tecnológico Nacional de México, campus Colima, en Villa de Álvarez, Colima, México. (Fuente: Google Maps).	65
Imagen 26.	Maquina universal UH – 500 kNI marca SHIMADZU.	66
Imagen 27.	Pesado de probetas.	66
Imagen 28.	Probeta siendo ensayada e la prensa universal.	67
Imagen 29.	Proceso de prueba en el equipo. Probeta con carga aplicada.	67
Imagen 30.	Proceso de prueba. Datos proyectados.	68

# 1. GENERALIDADES

## 1.1 Planteamiento del problema

En vista de la problemática actual con respecto a los desechos de neumáticos vehiculares, así como las limitaciones del producto para uso alterno al final de su vida útil, ha dado gran relevancia al problema de contaminación. Los nuevos esfuerzos para la creación de productos innovadores y poder brindarle un segundo uso a este material para contrarrestar el problema no han sido suficientes.

El uso de los desechos de caucho como material reciclado es una gran aportación como método de reutilización, brindándole una segunda vida útil al material permitiendo contribuir con el cuidado del medio ambiente mediante esta acción, sin embargo, son pocas las asociaciones que se preocupan y hacen algo al respecto.

Según Elizabeth Meza Rodríguez (Rodríguez, 2018), en su publicación dentro de la revista digital el Economista *“en México se desecha 40 millones de toneladas de llantas al año, de los cuales se reciclan sólo 10%; el resto termina en vertederos, rellenos sanitarios, ríos y calles, de acuerdo con datos de la Secretaría de Medio Ambiente en México”*.

En México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), a través de la Subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental, informó de la situación actual que se vivió en el 2009, el desperdicio era de cien millones de neumáticos en tiraderos de México o depósitos ilegales (SEMARNAT, 2009).

Esto provocó acciones indebidas como la llamada “quema de llantas”, afectando la salud de las poblaciones en todo el país convirtiéndose en focos de infección, emisiones a la atmosfera como policíclicos – aromáticos, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, benceno y monóxido de carbono entre muchos más, generando altos costos en la salud pública.

Estas cifras, año tras año han ido aumentando por la gran demanda que genera la venta de vehículos por parte de las agencias automotrices y con ello el consumo necesario de neumáticos.

Este gran impacto generado por el masivo uso de llantas parece no tener una solución, terminando en las calles o tiraderos clandestinos, a las orillas de las ciudades, ríos, hasta en laderas de carreteras según la Asociación Nacional de Distribuidores de Llantas, convirtiéndose en un alto factor de generación de incendios que al mismo tiempo contribuye en la salud pública.

Actualmente se generan bastantes incendios de neumáticos, algunos de manera intencionada (clandestina) por el hecho de no tener abasto de espacio para poder almacenarlas y otros han sido de manera accidental, como el ocurrido en un local de llantas ubicado en la ciudad de México el pasado 10 de julio del 2021.

## 1.2 Justificación del tema de investigación

Estudios realizados a nivel mundial sobre la mezcla de cementantes con caucho proveniente de neumáticos, concluyen que se pueden obtener diferentes resistencias y comportamientos al momento de someterlos a pruebas mecánicas, ya que este material cuenta con un alto porcentaje de elasticidad que, en algunos casos, el comportamiento puede resultar favorable igualando o mejorando sus capacidades.

No se encontraron evidencias en tesis, artículos, revistas o libros que hablen sobre las mismas materias primas que se utilizarán de manera conjunta en este proyecto, ni del enfoque principal, que es buscar generar un material más ligero y que pueda alcanzar una resistencia similar a la de un mortero en la construcción.

Esta iniciativa de integrar el caucho de llanta triturada a la mezcla, nos permitirá brindarle un uso alternativo, siendo una acción de suma importancia para el desarrollo sostenible y la contribución con el medio ambiente.

Como lo menciona el Ing. Cristhian Román Peñaloza Garzón en su documento de titulación: *“Debido a la cultura de consumo, la sociedad cada vez*

*exige mayor explotación de recursos naturales a la vez que contamina, por ejemplo; el volumen de neumáticos desechados anualmente es alto y su correcta eliminación como biodegradación muy lenta, una de las formas de mitigar este impacto, es encontrando como aprovechar estos residuos". (Peñaloza, 2015. Pág. 17).* La reutilización del caucho que se desecha es sumamente importante, es por eso la relevancia de esta investigación proponiendo realizar una mezcla para uso constructivo, similar al mortero, utilizando cemento, jal, agua y caucho, a manera de fibras procedentes de los neumáticos tratando de brindarle un uso alternativo a estos desperdicios contaminantes.

### 1.3 Preguntas de investigación

- ¿La elaboración de la mezcla con agregados de jal y caucho proveniente de llantas, podrá generar un material más resistente y ligero para su uso en la construcción?

### 1.4 Hipótesis

Al considerar la densidad y la proporción de cemento - arena de un mortero de  $f'c$  75 kg/cm<sup>2</sup> y sustituir en la mezcla la arena por caucho triturado reciclado de neumáticos, así como de jal, se obtendrá un nuevo mortero más ligero y con características de resistencia similares. De esta manera, contribuimos con el reciclado y el cuidado del medio ambiente, obteniendo un material de uso constructivo.

### 1.5 Objetivos

#### 1.5.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño mecánico del nuevo mortero compuesto por cemento, jal, caucho y agua, mediante probetas producidas con las mezclas diseñadas con



diversas proporciones que resultaron del diseño experimental para aplicarles cargas y poder analizar su resistencia a la compresión.

### 1.5.2 Objetivos particulares

- Diseñar probetas con diferente dosificación de materiales para la realización pruebas mecánicas.
- Pesar y comparar las probetas diseñadas para pruebas con una probeta testigo, con una densidad de  $1.6/\text{cm}^3$
- Aplicar pruebas de resistencia a la compresión a las probetas diseñadas.
- Generar tablas de estadísticas para la comparación de datos obtenidos.
- Analizar las propiedades resultantes del nuevo material elaborado.

### 1.6 Descripción del proceso metodológico

Para la elaboración de las pruebas de compresión es necesario dividir las etapas. La primera, se trata de identificar el tipo de diseño experimental a utilizar, ya que este fundamentará nuestro trabajo con la intención de lograr prototipos de alta calidad y así poder lograr un mayor rendimiento en el proceso.

La segunda etapa se trata de atestiguar nuestro alcance y poder compararlo con la mezcla de mortero. Para este experimento, se tomarán como testigo la Norma Técnica Complementaria de un mortero de  $f'c = 75 \text{ kg/cm}^2$  (donde  $f'c$  significa resistencia a la compresión), ya que se busca lograr un material similar o mejor a su comportamiento y que a su vez, pueda reducir el impacto ecológico en el medio ambiente mediante la implementación del caucho, además de buscar aligerar el peso del material resultante.

Después se realizará el diseño de mezclas y se recolectará el material que se necesita para las probetas, los cuales deben de permanecer en su estado puro, sin ningún tratado o alteración. Esta sería la cuarta etapa, muy importante para un

correcto desarrollo y funcionamiento del material final que dependerá mucho de su rendimiento al momento de la prueba.

Para la cuarta etapa, es necesario crear los moldes correspondientes para la elaboración de cubos. Las medidas a utilizar se tomarán de los reglamentos que rigen el uso del mortero  $f'c = 75 \text{ kg/cm}^2$  (NMX C 061-ONNCCE) y así lograr hacer probetas de igual dimensión a las utilizadas dentro de esta normativa.

Posteriormente viene la elaboración de las mezclas, estas se realizarán con diferentes proporciones para lograr probetas adecuadas que deberán de cumplir con la norma NMX-C-282-ONNCE-2004 (Normas Mexicanas de la Industria de la Construcción) que se refiere al secado del material durante un periodo de 28 días. Esta sería la quinta etapa de la experimentación.

Para la sexta etapa, corresponde a la realización de pruebas en laboratorio para determinar la capacidad de resistencia que genera cada probeta con su distinta dosificación.

Por último, la séptima etapa consiste en capturar los datos arrojados en las pruebas a manera de tablas y gráficos, para poder realizar el análisis y comparación comparativo y poder llegar a las conclusiones finales de este experimento.

## 1.7 Alcances y limitaciones

La presente investigación pretende ser conocida a nivel mundial, apoyando al desarrollo tecnológico de materiales constructivos y de investigación, así como también el progreso de la ecología y sustentabilidad, brindado así, alternativas de uso.

Una de las posibles limitantes expuestas, es que no existen muchos establecimientos que realicen el proceso para la obtención de caucho triturado a manera de fibras como lo hacen algunas vulcanizadoras en Colima, donde se obtienen grandes cantidades de fibras de caucho que son distribuidas a diferentes estados dentro del país, para la realización de nuevos productos derivados de este material.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Revisión relacionada con el tema de investigación

Hoy en día, el mortero es uno de los materiales básicos utilizados en la construcción, la mezcla se hace con arena fina, cemento y agua, componentes necesarios para lograr una mezcla homogénea, de docilidad controlada, resultando un material moldeable y manejable, con excelentes propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a compresión.

En su preparación existe una fase plástica, que inicia en el mezclado y continua hasta el fraguado o unión de los materiales.

#### 2.1.1 Mortero

Los morteros son mezclas plásticas obtenidas con un aglutinante, arena y agua, y que, según la Gaceta Oficial de la Ciudad de México, en su apartado 2.5 Morteros (Juan Castorena, 2020), su función es permitir la unión y sobre posición de objetos, piezas o materiales, formando un conjunto de capacidades ligantes fuertes y de gran durabilidad. Algunas de sus propiedades más considerables son: la adherencia con las piezas, la alta resistencia a la compresión y tensión, la manejabilidad que tiene, así como la contracción y la capacidad de retener el agua.

Existen varios tipos de morteros actualmente según su material aglutinante:

- Mortero de yeso
- Mortero de cal
- Mortero de cemento

Sin embargo, las mezclas más usadas dentro del ramo de la construcción son:

- El mortero de cemento y arena

- El mortero de cal y arena
- El mortero de cemento, cal y arena

El mortero de cemento y arena se obtiene de la mezcla de materiales como cemento, arena y agua. Cabe mencionar que no siempre se obtiene el mismo resultado ya que dependerá de los porcentajes empleados en cuanto a la arena y cemento, sirviendo para enjarres, detalles en cuanto a la albañilería, pegado de bloques y pendientes pluviales.

Por otro lado, el mortero de cal y arena, es la unión de la cal, arena y agua, resultando un material con una gran plasticidad que es ideal para realizar trabajos artesanales.

Este mortero tiene la ventaja de poder obtener terminaciones flexibles, resistentes y muy duraderas que no afectan el aspecto visual de la construcción. Es muy útil para revestimientos en muros de ladrillo y mampostería dependiendo de las dosificaciones de la mezcla de los materiales.

A diferencia de los morteros anteriores, el mortero de cemento, cal y agua, es el más fácil de usar y tiende a ser más flexible, aunque se endurece con mayor lentitud.

### 2.1.2 Piedra Pómez o Jal

La piedra pómez, pumicita, pumita o también conocida como jal, es una materia prima mineral de origen volcánico (piroclastos), con una composición en la cual interviene mayoritariamente la sílice y la alúmina según lo menciona el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) en su apartado “Producción Minera, Reservas y Recursos” en el Panorama Nacional, con porcentajes aproximados del: 70% de SiO<sub>2</sub> (sílice) y 13% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alúmina) (Gobierno de España, 2019). Este tipo de material tiende a ser una roca muy porosa, ligera, (su densidad está entre 0,4 a 0,9 g/cm<sup>3</sup>) y con grandes propiedades de aislamiento térmico y que se puede utilizar dentro del ámbito de la construcción, teniendo como referencia los bloques

de piedra que se utilizaron en EEUU (mencionados en el punto 2, Panorama Mundial, del IGME), así como para la fabricación de cemento y áridos.

Lo anterior, indica la factibilidad del uso de piedra pómez en distintos tipos de materiales, pudiendo obtener cierta ligereza del material resultante por las características que posee en sustitución de la grava, por ejemplo, que se llega a utilizar en estas mezclas cementantes. Este tipo de material se forma durante un enfriamiento muy rápido de magma ascendente de alta viscosidad, siendo muy característicos de vulcanitas claras y ácidas, de color blanco grisáceo y raramente de color café y gris, (Gobierno de España, 2019).

Por tener ese origen volcánico, la piedra pómez tiene como característica principal una multitud de poros y células generando una solidez en su estructura. Además, permite absorber y retener agua manteniendo su ligereza. Esta piedra es tan suave que puede ser tallada, torneada y grabada con gran facilidad para poder ser utilizada como adorno, tiene la capacidad de flotar sobre el agua es resistente al frío, al fuego y a cualquier tipo de clima en el que se encuentre.

### 2.1.3 Caucho

El caucho es un material que se obtiene de las secreciones lechosas producidas por el árbol del caucho. Esta resina que se extrae de manera natural en el árbol es tratada con un proceso químico para obtener el látex que comúnmente conocemos.

Los elastómeros o cauchos son materiales poliméricos con diferentes capacidades elásticas que se llegan a deformar si son sometidos a algún tipo de esfuerzo, pero también regresan a su forma original cuando esta fuerza es retirada (Guillermo Castro, 2008).

Actualmente se fabrican gran cantidad de productos derivados de este material, como lo son artículos impermeables, aislantes y neumáticos, por su gran consumo en el mercado.

Otra de las características principales de este material es que es repelente al agua, aislante de la temperatura y de la electricidad. Además, tiende a mezclarse con azufre o selenio mediante procesos químicos para mejorar su resistencia a las variaciones de temperatura y elasticidad. Este proceso se llama proceso de vulcanización, del cual, se deslindan productos como los que conocemos actualmente, dentro ellos los neumáticos o llantas, que son utilizados para la movilización de los vehículos por sus propiedades de alta resistencia elástica y la durabilidad que pueden llegar a tener.

#### 2.1.4 Agua

Es un compuesto con características únicas e importantes para la vida, además, es uno de los recursos de mayor importancia que existen en el planeta tierra.

La humanidad depende no solo del consumo doméstico, sino también es utilizado para el funcionamiento y continuidad de diversas actividades como lo son las agrícolas e industriales, (CONAGUA, 2011).

Según la CONAGUA, se estima que, en México, alrededor del 76% del agua se utiliza para la agricultura (riego de cultivos), la industria (empresas que toman agua directamente de lagos, arroyos, ríos, etc.) y las termoeléctricas (para producir electricidad) absorben un consumo del 10% y el 14% restante es absorbido por el abastecimiento diario de las personas (este es distribuido a través de redes de agua potable a domicilios, industrias, etc.), (CONAGUA, 2011).

Centroamérica cuenta con una reserva de agua de 802 km<sup>3</sup> de agua según el Sistema de Información sobre el uso de agua en la agricultura y el medio rural de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura).

Por otro lado, a nivel mundial, el acceso al agua potable se ha incrementado en la mayoría de los países durante las últimas décadas y se estima que una quinta parte de los países en desarrollo se quedará sin agua para 2030. En estos países,

es imperativo reducir el uso de agua para la agricultura mediante la modernización de los sistemas de riego, (CONAGUA, 2011).

### 2.1.5 Jalcreto

Según ACEP Concretos, (2021), empresa originaria de Aguascalientes dedicada a la fabricación de concretos premezclados, el Jalcreto es un concreto de bajo peso volumétrico generalmente menor de 1,400 kg/cm<sup>3</sup>. Este material es necesario cuando se pretende reducir cargas sobre la estructura de la edificación, mediante la ligereza de un material que conlleva cemento.

Gracias a sus propiedades constructivas, este material se utiliza para nivelar losas y entrepisos o terrenos, además, se pueden fabricar bloques, viguetas y bovedillas. El jalcreto es ideal para sustituir algunos rellenos que conllevan materiales granulares.

Algunas de sus principales ventajas son que permiten reducir el peso en las cargas muertas dentro de la estructura. Debido a la fluidez que tiene, también se puede colocar en muros muy estrechos además de que puede adaptarse a cualquier clima evitando problemas constructivos, (Diario oficial de la Federación, 2005).

Según la ficha técnica del Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. NMX-C-155-ONNCCE-2004, cuenta con características técnicas únicas, tales como:

- Tiene una resistencia de  $f'c$  50 kg/cm<sup>2</sup>.
- Es resistente a la compresión a una edad de 28 días de secado.
- El revenimiento que tiene es de 14 y 18 cm, lo cual está dentro del margen de variación que indica la NMX-C-155-ONCCEE-2004, (Diario oficial de la Federación, 2005).
- La masa volumétrica: entre 1,200 a 1,300 kg/cm<sup>3</sup>.
- Este tipo de concreto tiene un diseño especialmente para ser bombeado o para tiro directo dependiendo de lo que se requiera.

## 2.2 Investigaciones relacionadas con los morteros

### 2.2.1 Compuestos cementantes

En la actualidad, las mezclas cementantes son materiales utilizados en la construcción, siendo el cemento uno de los más importantes a nivel mundial.

Como lo menciona Carpio López Et. al. (2018) en su documento relacionado con materiales cementantes compuestos nos dice que “El estudio y uso de los compuesto cementantes para la construcción, según fuentes históricas, data desde el año 5600 años, con la construcción más antigua realizada con conglomerado que corresponde al piso de una cabaña en Lepensky Vir (Serbia) (IECA, s.f.). Posteriormente, civilizaciones tales como las de Egipto, Grecia, y Creta emplearon morteros en diversas construcciones”.

El descubrimiento de las propiedades físicas es tema de importancia. Con anterioridad, autores renuncian a datar los morteros de cal, mientras que otros lo sitúan muy al comienzo de la historia de la humanidad, cuando empezaban a utilizar fuego para calentarse mientras en cuevas de calizas o preparaban comida en hogares construidos con dicho material, (Carpio López Et. al., 2018). La caliza cuando entra en contacto con el agua, se lleva a cabo el proceso de disolución, mediante el cual se disuelve el carbonato de calcio, proporcionándole dureza y color al material que puede ser comprobada relativamente la comprobación de su resistencia al ser rayada, el cual se mide utilizando la escala de Mohs (es una prueba que sirve para medir la resistencia al rayado de los materiales del 1 al 10, donde 1 es talco y 10 es diamante) (Héctor Moreno, 2018). Además, la caliza calcinada al entrar en contacto con el agua obtiene propiedades ligantes.

“Una de las primeras aplicaciones de la cal apagada fue como tinte en pinturas en cuevas” (Malinowski, 1991). Menciona que en la villa neolítica de Çatal Hüyük, Turquía el "enyesado" utilizado para recubrir muros y pisos, y que sirve como base para la utilización de la pintura y moldeado de animales en aquellas edificaciones, es una especie de material arcilloso y blanco de origen nativo aplicado



de manera natural; en cuanto al mortero de tierra utilizado para construir los muros, de color negro y rico en cenizas y restos óseos, todavía no existía un ligante real.

Los conocimientos de ese entonces eran muy avanzados para las civilizaciones que se situaban cerca del Oriente y en Mesopotamia en esa época. Estos avances se relacionaban con el saber de los materiales y técnicas de construcción.

Malinowski (1982 y 1991), hace referencia a estas primeras técnicas y culturas. El uso de morteros sólo uso de cal se le conoció como Máscara de Jérico, una calavera revestida con una capa de cal pulida, haciendo referencia al año 7000 a de C. Se han encontrado casas hechas con ladrillos y con suelos de mortero de cal con acabados pulidos en las superficies (los llamados “enlucidos”).

Esto hace referencia de que se debió utilizar gran cantidad de cal para realizar este tipo de construcciones, además de la calidad con la que fue realizada, permitiendo que en la actualidad puedan apreciarse de manera intacta en algunos ejemplares. La tecnología empleada en la construcción, la calcinación de la caliza, el apagado de la cal, la mezcla, la aplicación y el acabado en la superficie era algo muy conocido por los constructores neolíticos.

Actualmente no existen datos que nos permitan conocer las técnicas que utilizaban en esos tiempos, a pesar de existir varios ejemplares del uso del mortero de cal. Sin embargo, existen restos de un presunto horno empleado en ese tiempo (Garfinkel, 1987).

Existen suelos compuestos de bases verdaderamente compactadas, en el asentamiento neolítico de Yiftah El, en Galilea, siendo pavimentos duro de mortero de cal con superficies perfectamente pulidas como acabado final. Estos sistemas constructivos, actualmente se llevan a cabo en la arquitectura actual, empleando técnicas mejoradas con sistemas y equipos actuales, (Garfinkel, 1987).

La “cal neolítica” probablemente por la poca cantidad empleada de agua en la mezcla, requería un mayor grado de compactación, ya que la resistencia generada en cualquier tipo de cementante es el agua, y probablemente estas mezclas no contaban con el agua suficiente para alcanzar el acabado.

Han aparecido ejemplares distintos mezclados en los materiales, como la arcilla, refiriendo un material sencillo, mientras que en otros se pudieron encontrar restos de paja o ramas, siendo más resistentes y que posiblemente se utilizaban para reforzar estructuras. Todos estos fragmentos se encontraron en los revestimientos de los hornos neolíticos.

Los constructores prehistóricos utilizaban la arcilla cruda, con la que cubrían los suelos y las paredes edificaciones hechas de tablas de madera y encañado o caña, según afirma Furlan (1975) en su documento “Historia de los Morteros”, afirmando que en Europa Central no existen ejemplares algunos con el uso de la cal en la época prehistórica.

### 2.2.2 Morteros Egipcios

Según Furlan (1975) menciona que la cultura egipcia fue de las primeras civilizaciones en utilizar materiales distintos como el “Yeso” para el mamposteo de los bloques de la pirámide de Keops (hacia 2600 a de C.). En Egipto fue donde se logró mayor concentración de uso de este material, ya que no existen muchos ejemplares en los cuales se utilizó esta técnica, y era de esperarse, ya que los egipcios contaban con un gran conocimiento sobre el uso de yeso, su preparación y aplicación, además de utilizar por primera vez el yeso con mortero o mortero de yeso (base de yeso, arena y agua).

Las características de las construcciones permiten sostener suposiciones sobre los materiales ligantes empleados, y que claro está, el yeso sostiene una gran importancia en la edificación de esta civilización. En lo referente a los enlucidos, en el Antiguo Egipto, las capas de yeso que utilizaban, eran para plasmar sobre ellas la decoración pintoresca que conocemos hoy en día, donde reflejan sus historias de vida cotidiana, así como los rituales empleados para los sacrificios humanos, proyecciones de antiguos reyes y faraones.

El mortero de cal en las construcciones no existía relativamente en esta época egipcia y eso de cierta manera sorprende, ya que los depósitos de caliza eran

amplios en ese entonces, aunque el apoderamiento y dominio del yeso no permitía que se siguiera explotando este recurso, pero también puede explicarse y con justa razón, debido a las altas temperaturas que se necesitaban para la calcinación estando en un lugar en el cual la madera era notoriamente escasa (Martinet, 1992). Se empleó una nueva técnica constructiva indudablemente, mejorando quizá el sistema aquella época.

### 2.2.3 Morteros Griegos

Existen aún varios aspectos en relación con el mortero de cal por descifrar pese al esfuerzo que se ha logrado para identificar la preparación de la misma mezcla.

Puede ser una afirmación que el uso de cal como ligante da inicio en la época neolítica y que el uso y descubrimiento del mortero de cal corresponde a los griegos y romanos (Malinowski, 1991) y claro está, gracias a los descubrimientos de las excavaciones realizadas durante el paso de los años y su estudio, atestiguando que estas técnicas de ligantes ya eran conocidas desde periodos pasados.

Según Furlan, (1975), a finales del siglo II o principios del siglo I a. de C. la utilización de mortero de cal en Grecia se corrobora, ya que, en anteriores constricciones, y según los descubrimientos y estudios realizados en los ejemplares, las piedras se unían simplemente con arcilla y tierra en su totalidad.

De manera generalizada, los morteros están hechos a base de cal y arena fina, así como la cal utilizada para el yeso y consecuentemente los estucos. Pero las necesidades iban en aumento día con día por la innovación en los diseños arquitectónicos, es por eso que se añadían materiales nuevos en esa época o aditivos para hacer del mortero un material más duro y resistente y así poder brindarle diferentes usos en la construcción.

Otro material innovador dentro de estos cementantes fue la roca volcánica, que, según Teresa Guerrero, (2017) en la revista digital “El Mundo” que se introducía en la mezcla de cal-arena para conseguir mejores propiedades físicas.

Este material, se encontraba en la cercanía de volcanes que frecuentemente estaban activos, y así podrían abastecerse con mayor frecuencia de él. La mezcla del mortero fue estable al entrar en contacto con el agua y pudiera considerarse un mortero innovador marcando así probablemente el inicio de los concretos hidráulicos actuales. Aunado a eso, Christian Flores, Et. al, (2020), menciona en su documento “Comportamiento térmico en mezclas de cal hidratada, ceniza y roca volcánica (piedra pómez), en sustitución del cemento Portland” que este tipo de roca volcánica se componen en general, de andesitas básicas calcoalcalinas (rocas ricas en calcio) a andesitas silíceas (roca ígnea volcánica de composición intermedia) con presencia de anfíboles (conjunto de minerales de la clase de los silicatos).

El momento crucial dentro de la historia del mortero fue la adición a la mezcla de nuevos materiales que pudieran mejorar las propiedades y favorecer a las características mismas, innovando día con día el sistema constructivo. Ciertamente el comienzo y la implementación fueron indispensables, la combinación de materiales naturales y después artificiales que al momento de unirse con la cal y el agua brindan mayor dureza y estabilidad al mortero, (Flores, 2020).

#### 2.2.4 Morteros Romanos

Antonio Pizzo, (2010) en su documento “Propuesta para la documentación y clasificación de las técnicas constructivas romanas”, el estudio de las técnicas constructivas de esta época cobra mucha atención, siendo los herederos de la tecnología griega y la implementación del mortero de cal. El análisis de estas técnicas permitió a los romanos generar acueductos para conducir el agua con métodos, por ejemplo, como el pulimento para facilitar el traslado y poder abastecer de agua las ciudades.

La tradición de los estudios sobre la arquitectura romana ha intentado con el paso de los años asociar los parámetros externos y la capacidad de los constructores y la regularidad de la estética arquitectónica, que distinguió los periodos mediante la mejora de técnicas constructivas que ya existían (Pizzo, 2010).

Con el objetivo de innovar y mejorar la arquitectura empleada de la época, los romanos también pudieron heredar la habilidad e ingenio de utilizar las mezclas existentes para combinarlas con otros materiales con el fin de favorecer al mortero. Por ejemplo, con frecuencia añadían lava como agregado en distintos ejemplares de mortero hallados en Pompeya, los cuales utilizaban para las calzadas, muros y acabados en la arquitectura en algunos casos, obteniendo esta esencia rocosa de color negro que representa auténtica lava al momento de enfriar y cristalizar.

Se han realizado pruebas comparativas de la calidad de los morteros actuales con los de aquella época y la evidencia es notoria, la consistencia y durabilidad sobrepasa por mucho a los morteros que conocemos hoy en día. Edificios como el Coliseo Romano, el Partenón y otros demuestran que la calidad del material a pesar de tener más de cientos de años, se sigue conservando de manera sorprendente.

Todo indica que la elaboración del mortero fue hecha de manera minuciosa y detallada, eligiendo los mejores materiales, siendo precisos en la calidad, además de tener agregados esenciales como aceites o la albúmina y caseína aditivos. Pero quizá existieron otros secretos que aún no son descubiertos, los cuales ayudaron a obtener una gran calidad de este material.

### 2.2.5 Morteros Modernos

Se puede decir que las funciones constructivas modernas respecto al mortero no han cambiado mucho desde su creación en la antigüedad. Los morteros se emplearon como materiales de agarre y unión de distintos tipos de construcción y edificación, de decoración, o simplemente como revestimiento para las protecciones de elementos, etc.

Hasta el siglo XVIII no se iniciaba la fabricación de materiales aglutinantes hidráulicos, capaz de endurecer bajo del agua. Los griegos crearon los morteros resistentes al agua mediante el uso de materiales como tierra de Santorini y el tejo.

Por otro lado, con el paso del tiempo, en la época romana, lograron generalizar el uso de mortero de cal y puzolana (Rodrigo Cid, 2017).

Ahora, yace la intriga de lograr que el mortero pueda resistir al agua del mar, agua salada, lo que dio inicio a realizar pruebas, logrando así resultados favorables, demostrando mediante los análisis químicos que la arcilla en la caliza era el material principal y el determinante de la hidraulicidad.

Finalmente, la nueva textura del mortero hidráulico resultó ser muy compacta y tener poca permeabilidad del agua del mar y a los gases. Además, la disminución de porosidad de la matriz del mortero se debió a la formación de nuevos componentes hidratados.

## 2.2.6 Morteros Actuales

Según Rodrigo Cid, 2017, en su documento “Efectos de la caseína como aditivo en las resistencias mecánicas para el desarrollo de morteros”, los morteros realizados a partir de esta época, datada en los años 1850 fueron realizados con métodos modernos, utilizando arcilla y cal en molinos húmedos, calcinándolo a altas temperaturas. La piedra caliza se convierte en cal viva a través de este proceso y se combina químicamente con arcilla para formar un Clinker (el producto del proceso de calcinación) de cemento Portland. Después, se repite el proceso de moler y calcinar para poder dejarlo enfriar y añadir una pequeña cantidad de yeso prolongando el tiempo de fraguado (Rodrigo Cid, 2017).

Cid menciona que, en la actualidad, el mortero es un compuesto de materiales homogéneos de uso común en proyectos de construcción, elaborado con una cantidad de aglomerantes, áridos y agua como componente importante para la obtención de la variación de resistencia.

Los principios generales de la producción de cemento Portland hoy en día no han cambiado ni un ápice desde 1850. Según Cid, la verdadera innovación es el desarrollo técnico y científico, con la gran cantidad de ligantes y que, aplicado a

diferentes situaciones de construcción, abre un enorme portal para investigar esos materiales.

Desde finales del siglo XIX, la forma en que se produce el cemento Portland no ha cambiado mucho, y los principios generales de su producción también han cambiado en lo más mínimo. Sin embargo, se han producido avances científicos y tecnológicos muy importantes que han llevado al desarrollo de adhesivos adaptados a situaciones muy concretas, lo que ha abierto un vasto campo para el estudio de los adhesivos, este componente. Esto ha permitido a investigadores estudiar y ensayar el cemento Portland con diferentes materiales a medida que se necesite. Por ejemplo, el calentamiento global es un tema que nos invade día con día y los cambios climáticos afectan en todo el mundo, alcanzando altas temperaturas. Es por eso que esa necesidad nos obliga a desarrollar nuevas formas de acaparar la problemática, como lo es realizando nuevas mezclas de materiales, nuevos sistemas, y nuevas formas de implementación del mortero para poder conllevar la confortabilidad dentro de los espacios en las construcciones, (Cid, 2017).

Por otro lado, tratan de crear morteros a base de materiales ecológicos (cal, hidráulica natural, cal grasa, etc.), reduciendo el impacto ambiental. Otros lo hacen mediante el reciclaje de productos desechados, como lo son plásticos, cartón, etc., tratando de favorecer tanto al medio ambiente como a la creación de un nuevo material con mejores características, y aun mejor, amigable con el ambiente.

Hoy en día, la elaboración de mezclas cementantes ha ido incrementando mediante las innovaciones relacionadas con la aleación de materiales nuevos, algunas investigaciones como la de Irene Urrua (2006), Cristian Peñaloza (2015) o Andrés Alquicira, (2015), afirman de realizar concreto estructural sustituyendo los áridos (material granulado que se utiliza como materia prima en la construcción) por fibras de caucho reciclado en su elaboración.

Es así como el paso del tiempo ha conllevado al fomento de la investigación sobre este tipo de agregados. Tal es el caso de Yheison J. Guzmán y Esthefany L. Guzmán (2015) que, a través de la universidad de Nuevo Chimbote, Perú, realizaron también, un nuevo proyecto de investigación sobre un cementante estructural,

donde comprobaron que la sustitución parcial de los áridos en un C5%-FCR-G concreto con un 5% del peso de la grava sustituida por fibras de caucho reciclado (donde “C” es concreto, “FCR” es fibra de caucho reciclado, “G” es la grava y “F” es la arena gruesa) y C5%-FCR-F concreto con un 5% del peso de la arena gruesa sustituida por fibras de caucho reciclado mejoró algunas propiedades físico – mecánicas del concreto en temas de elasticidad, resultando un comportamiento aceptable y recomendable para sustitución de los áridos en estos porcentajes señalados. Por otro lado, si estos porcentajes incrementaban a C15%-FCR y C25%-FCR, la resistencia del concreto disminuía, llegando al grado de no poder utilizarse como sustitución para que la mezcla pueda ser utilizada en la construcción. Siendo estos resultados favorables para la tecnología de los cementantes, teniendo resultados dentro de los parámetros límites que especifican las normas.

Aunado a esto, la densidad de los materiales es importante al momento de la elaboración de mezclas, ya que afecta de manera directa a en la absorción y porosidad, tema que puede ser factor fundamental de estudio. Asimismo, Yheison J. Guzmán y Esthefany L. Guzmán (2015) mencionan que la densidad seca del concreto con FCR-F (arena sustituida por fibras de caucho reciclado) y FCR-G (grava sustituida por fibras de caucho reciclado) disminuye, ya que el caucho tiene una densidad mucho menor que la densidad de los áridos y, en el caso de la absorción y porosidad, aumenta progresivamente conforme se le aumente la sustitución del caucho por los áridos. Esto quiere decir que mientras más caucho reciclado tenga la mezcla cementante, tiende a adquirir más vacíos de aire al interior, aumentando la capacidad de retención de agua, y que, además, permite atrapar el agua y evitar la pérdida de la misma al momento de ser curado.

Además de las pruebas físicas realizadas dentro de la investigación de Yheison y Esthefany Guzmán también fueron empleadas pruebas térmicas como la exposición al fuego en donde concluyeron que el caucho expuesto se deformaba, y la prueba de microestructura, donde observaron que el concreto no se une de manera correcta a las fibras gruesas de caucho, conllevando a una disminución de resistencia estructural.



En Chile se han realizado varias investigaciones en las que involucran hormigón con agregados de caucho, en busca de poder brindarle una mayor elasticidad a este cementante y de brindarle más resistencia al material para su uso constructivo. Irene Urrua (2006) a través de su documento de tesis “Hormigón con Caucho: Determinación del Módulo de Elasticidad”, realizado en Universidad Austral de Valdivia, Chile, menciona que “Se puede observar que el caucho reciclado de neumáticos tiene muchas aplicaciones en la construcción, una de las cuales es que se puede utilizar como elemento modificador del asfalto, mejorando su vida útil de un 80% a 100%, además de reducir la formación de baches y grietas. También, logra generar menor ruido al momento del rodaje de vehículos, es más permeable y resistente al deterioro causado por el agua y cuestiones como cambios de temperatura. En conclusión, su desempeño y durabilidad es mayor.

La investigación tuvo como objetivo estudiar la deformación de la mezcla con agregado de caucho bajo una prueba de compresión aplicándole una carga puntual. Por ello, se trazaron las curvas referentes a tensión y deformación, y se determinó el módulo elástico de cada mezcla en base a estas curvas.

Este tipo de mezclas con caucho mencionado con anterioridad fue aplicado en carreteras y caminos para la circulación de vehículos, siendo cargas con compresiones bajas, logrando ser un material resistente a un 70% de su capacidad.

Por otro lado, asegura que mientras más caucho agrega al cementante, mayor es la reducción de resistencia y mayor deformación presenta el hormigón. Concluyendo que puede ser factible la utilización en caminos y carreteras con circulación de vehículos ligeros.

Irene Urrua (2006) concluye también que en un inicio consideró utilizar los mismos porcentajes de caucho en el estudio realizado por la señorita Cadagan, pero al momento de revisar el análisis de sus resultados se percató que solo de las probetas con 20% de agregado de caucho se obtuvieron datos con resistencias factibles, mientras que las dosificaciones con agregados del 40% a 100% de caucho no resultaron tan efectivas. Esto porque el problema del hormigón con agregado de caucho no es tan elástico. Así pues, una vez analizado el agregado del 20% en el

volumen, por eficiencia y trabajabilidad en cuanto a sus propiedades físico – mecánicas, recomienda utilizar dosificaciones entre 5 y 10% de caucho en la mezcla del hormigón.

Cuando Urrua consideró los resultados de la Señorita Cadagan obtenidos de las pruebas físico – mecánicas de las probetas, observó que las cantidades de caucho pueden variar de manera en que sean límites razonables y que en su actual trabajo se establecieron entre 5% y 10%.

Finalmente, su trabajo demuestra una variabilidad del agregado de caucho proveniente de neumáticos mezcladas con el hormigón, considerando una nueva variable elástica.

Es tanto el esfuerzo de reducir el impacto ambiental que producen los neumáticos que los estudios van incrementando cada vez más. Tal es el caso de la universidad de Bogotá, Colombia, donde se analiza el comportamiento mecánico del concreto estructural con el remplazo de agregado fino, pero esta vez en un 10% y 30%, buscando la viabilidad del material, pero ahora en aplicación a los asfaltos como material alterno.

Este tipo de mezclas actuales buscan una solución ecológica, en donde se incorporen materiales nocivos para el medio ambiente, pero que, al tratarlos y reutilizarlos, puedan ser parte de la construcción dando un giro de 180 grados y puedan ser beneficiosos.

Como lo menciona Cristian Peñaloza (2015), en su documento de investigación titulado comportamiento mecánico de una mezcla para concreto reciclado usando neumáticos triturados como reemplazo del 10% y 30% del volumen del agregado fino para un concreto con fines de uso estructural, estudio realizado en Bogotá, Colombia, que nos dice que; *“En base al desarrollo de este trabajo, se concluye generalmente; que la mezcla de concreto que busca la sustitución del 10% de agregado fino con GCR (grano de caucho reciclado), logra alcanzar la resistencia a la compresión de diseño de 23,37 MPa a la edad de 28 días de acuerdo con los resultados encontrados las diferencias con el concreto convencional en cuanto a resistencia están por debajo del 3% para esa edad; en*

*cuanto a la resistencia a la compresión requerida se puede proponer como agregado de reemplazo pero se recomienda profundizar en la investigación con otros estudios.*

*De manera homóloga se determinó para la mezcla que busca el cambio del 30% de agregado fino con GCR (grano de caucho reciclado), que su resistencia máxima a la compresión de 18,83 MPa está por debajo de la requerida a la edad de 28 días, con una diferencia cercana al 20%, siendo esta última la mezcla que menor comportamiento de resistencia a la compresión mostró y que por lo tanto no llega a satisfacer las especificaciones requeridas por la normatividad en cuanto a resistencia a la compresión, debido a esto, no se recomienda este volumen de sustitución para el diseño de mezclas de concreto.”*

El estudio arrojó una disminución de resistencia en el hormigón, mencionando que la afectación del material se debió a la densidad del agregado artificial (caucho), textura, geometría y posible incompatibilidad química. Por ello, es claro un posible seguimiento del tema para descartar toda posibilidad de la falta de resistencia, abriendo camino nuevas investigaciones.

El desarrollo de estos cementantes logra ser un avance en el ramo de la construcción, siendo utilizadas en estructuras, enjarres y pisos principalmente.

La tecnología del concreto y sus agregados de caucho proveniente de neumáticos reciclados siguen revolucionando el mundo de la construcción llevándolo a niveles de aplicaciones bastante prometedores como los concretos reforzados, cementantes con alta gama de resistencia, buscando siempre la aleación correcta para la utilización en la construcción.

Se han realizado estudios para lograr mejorar la tecnología de las mezclas cementantes, dentro del campo de ingeniería civil, en el cual Andrés Alquicira (2016) a través de su documento de investigación, Estudio del Comportamiento del Concreto Reforzado con Fibras Obtenidas del Reciclado de Llantas, fabricando tres probetas, una con fin de tener un testigo como mezcla pura del concreto reforzado y las otras dos donde mezcla las fibras de acero provenientes de las llantas mencionando que *“La trabajabilidad del concreto desciende considerablemente al*

*añadir fibras de acero, es recomendable utilizar superfluidificantes para mantener el revenimiento deseado.”* También menciona que es recomendable compactar la mezcla de forma mecánica, ya que, al realizarlo manualmente, las fibras tienden a desalinearse, modificando la estructuración previa al momento de la elaboración.

Este proyecto se realizó mediante especímenes fabricados de forma cilíndrica para realizar las pruebas experimentales, basándose en la normativa correspondiente del concreto reforzado. También, da paso a seguir la investigación, mediante los resultados y recomendaciones.

La industria de la construcción es una actividad que influye a gran medida el desarrollo económico del mundo, generando a la par, un gran impacto medioambiental. Por ello, el tratar de desarrollar nuevos materiales alternos constructivos ha sido indispensable para contrarrestar el daño ocasionado al planeta. Tal es el caso del de proyectos que sustituyen parcialmente los agregados con materiales plásticos como el caucho.

Herwin Eraso, Natalia Ramos (2015) realizaron un estudio sobre el comportamiento mecánico del concreto en el cual, sustituyeron escasamente el agregado fino por caucho molido con una capa envolvente de polvo calcáreo en donde confirman que:

- *El concreto con reemplazo molido por agregado fino, obtuvo como resultado un mayor aislamiento en su estado fresco debido a la poca capacidad de absorción que tiene el caucho haciendo que la pasta tenga más fluidez. Es decir que entre más porcentaje de caucho tenga la mezcla mayor es su asentamiento.*
- *La resistencia a compresión disminuyó significativamente respecto al concreto patrón, esto debido a la poca glutinosidad que hay entre la pasta y el caucho y que ambas poseen características mecánicas diferentes, en otras palabras, el caucho cuando es sometido a unas determinadas cargas tiende a deformarse por sus propiedades elásticas a diferencia de la pasta que lo envuelve.*

- *La resistencia a la tracción directa se vio afectada igualmente con la adición del caucho molido, aunque el caucho tratado con polvo calcáreo se comportó de mejor manera, esto puede deberse a una mejora en la adherencia entre pasta y caucho. Al igual los especímenes con remplazos de agrado fino presentaron fracturas al momento de ser ensayados, pero no se separaron, debido a las propiedades de ductilidad del caucho y su gran capacidad para concentrar energía.*
- *El módulo de elasticidad disminuyó a medida que aumentaba el porcentaje de caucho molido dentro de la mezcla, debido a la disminución de la resistencia de compresión ocasionada por el aumento de caucho.*
- *Se observó en las curvas de Resistencia vs Deformación unitaria, que la deformación del concreto con caucho era mayor a la deformación del concreto patrón con respecto a una misma carga aplicada, suministrando una capacidad adicional de absorción de energía.*
- *Aunque sean altas las resistencias a compresión de los concretos modificados, estos experimentan una mayor deformación lo cual abre la posibilidad de nuevas investigaciones sobre ese tema y sus posibles usos.*
- *La mezcla que presentó mejor comportamiento referente a la resistencia a compresión fue la C5 la cual corresponde a la mezcla tratada con polvo calcáreo y remplazo del 5% de caucho molido, ya que esta mezcla cumple con la resistencia de referencia de 15 MPa.*

Dentro del documento también recomienda realizar estudios sobre costo benéfico y poder hacer una evaluación del aporte que este genera. Además, nos dice que es de suma importancia ajustar las cantidades de agua utilizada, en especial cuando el caucho es tratado con otros materiales.

### 2.3 Aspectos referenciales

La implementación de mezclas cementantes con caucho reciclado ha tenido un avance con el transcurso de los años, extendiéndose por todo el mundo como

una estrategia de reutilización del material y a su vez poder encontrar un mejor desempeño que permita realizar estructuras más ligeras.

Este desarrollo ha permitido crear materiales innovadores que son base en la reconstrucción de varios países, siendo México uno de ellos, por eso la importancia de los trabajos de investigación que aporten soluciones a múltiples problemáticas y así garantizar un mejor funcionamiento en las edificaciones. Entre los beneficios a partir de la modificación estas mezclas se encuentran: Mayor aislamiento térmico, mayor Flexibilidad al momento de aplicar una carga puntual, así como también mayor aislamiento de sonido, entre otras.

## 2.4 Aspectos normativos

En base a las especificaciones de los materiales a utilizar en el desarrollo de esta investigación, se requieren ciertas leyes y normativas para la correcta aplicación al momento de su funcionamiento.

El mortero es un material que es utilizado en la construcción, siendo un elemento destinado para distintos usos como estructurales y no estructurales. Cabe mencionar que la Ley de Vivienda publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de junio del 2006, habla sobre la vivienda digna para toda persona, haciendo énfasis en el respeto hacia el entorno ecológico y a la preservación, constituyendo a un factor de sustentabilidad ambiental (Ley de Vivienda, 2006). Por eso mismo, es importante contribuir al desarrollo de esta investigación con una solución a la problemática mundial generada por los desechos de neumáticos que ya no tienen un segundo uso, terminando en basureros, ríos, etc.

La “Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente” en su artículo 1º nos menciona que se debe de garantizar el derecho de toda persona a vivir en un ambiente sano para su desarrollo, salud y bienestar, así como la prevención y control de la contaminación del aire, agua y suelo. Así pues, el uso de los desechos de neumáticos en unión con una mezcla de mortero a fin de ser

utilizados en la construcción puede ser una línea de salida hacia una posible solución.

Para que esto se conlleve de la mejor manera, la investigación será guiada por organismos, reglamentación y normatividades que le darán dirección hacia una correcta parte legal.

La Visión Nacional Hacia una Gestión Sustentable: Cero Residuos en su agenda 2030 maneja una gestión integral de los residuos con un enfoque de economía circular (ver Imagen 1), teniendo un manejo especial para conllevar los diferentes procesos planteados (Agenda 2030, 2015).

## AGENDA 2030

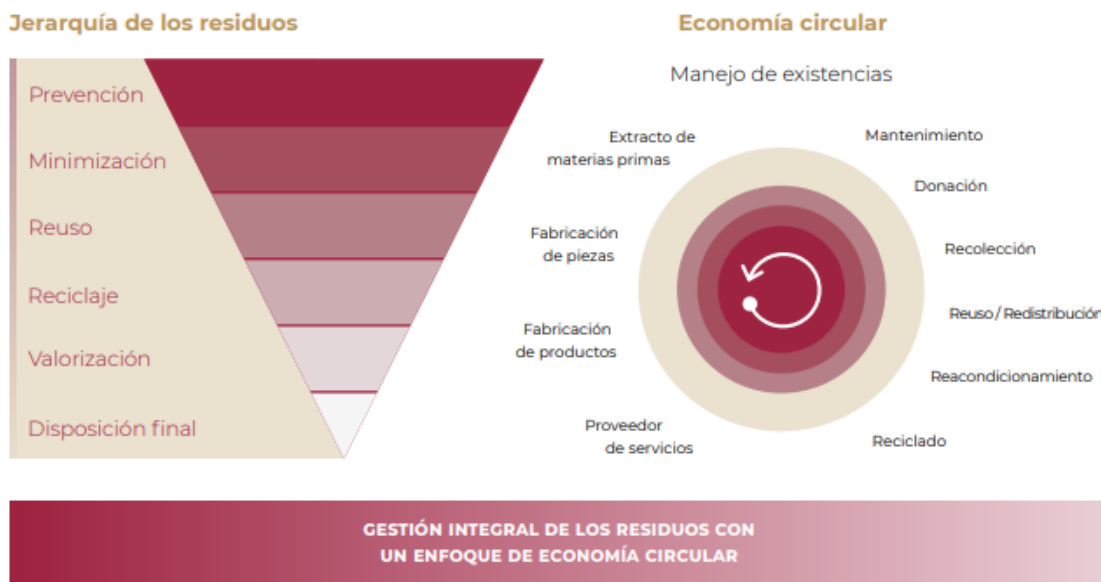


Imagen 1. Gestión Integral de los Residuos con un Enfoque de Economía Regular (Visión Nacional Hacia una Gestión Sustentable).

Por otro lado, la “Ley General de Cambio Climático” en su artículo Art. 34 nos dice que para reducir las emisiones, de dependencias y entidades de la administración pública federal, de las Entidades Federativas y los Municipios promoverán el diseño y la elaboración de políticas y acciones de mitigación en relación a 3 sectores relacionados a la edificación, pero principalmente el sector de generación y uso de la energía, que habla sobre expedir disposiciones jurídicas y elaborar políticas para la construcción de edificaciones sustentables, incluyendo el

uso de materiales ecológicos y la eficacia y sustentabilidad energética (Ley General del Cambio Climático, 2012).

Además, la “Ley General de Vivienda” Art. 6 establece los lineamientos de la Política Nacional de Vivienda y así mismo, los mecanismos para que la edificación de residencias tienda a respetar el entorno ecológico, la preservación y el correcto uso eficaz de los recursos naturales, así como también encaminar a que las condiciones de vivienda constituyan un factor de sustentabilidad ambiental, disposición territorial y desarrollo urbano.

Existen planes en los que se pueden referenciar cuestiones específicas como el uso del reciclaje por ejemplo el “Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso” (2017 – 2024, Parlamento de la Unión Europea y Consejo), esta normativa promulgada por el Parlamento de la Unión Europea y Consejo nos estipula que se debe reciclar el 25% en peso de los neumáticos y recauchar un 20%.

Es necesario tener una referencia al momento de la creación de un material innovador, como lo es en esta investigación, por ejemplo, la norma N-CMT-2-01-004-02 contiene los requisitos de calidad de los morteros que se utilizan en trabajos de albañilería, como lo son juntas, aplanados, firmes, entre otros. Además de establecer las dimensiones de las probetas al momento de someterlas a pruebas de compresión, permitiendo tener parámetros para determinar alcances de este nuevo material.

En comparativa con la norma anterior, la ASTM C 150 (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales) habla sobre la calidad y especificaciones del Cemento Portland para la utilización de pruebas estructurales, la cual mediante esta norma se puede determinar el alcance del material, y su uso en obra.

Es importante mencionar que la resistencia de los morteros se determina mediante la cantidad de agua utilizada en la mezcla, por ejemplo, la norma N-CMT-2-02-003 “Calidad del Agua para Concreto Hidráulico” habla sobre la calidad del agua y sus características para la aleación de las mezclas, siendo parte importante al momento de la unificación de materiales.



Hay muchos parámetros para determinar el fraguado de los cementantes, el secado de las mezclas de mortero para poder realizar una prueba se establece en la NMX-C-021-ONNCCE-2015, norma donde existen especificaciones para caracterizar la calidad del cemento para albañilería (mortero) están establecidas en la Tabla 1 y que habla del alcance valorado obtenido a los 7 y 28 días del fraguado del mortero. Todo esto para tener una comparativa al momento de la realización de las pruebas de compresión con el nuevo material con el agregado de caucho.

Determinación	Unidad	Condición	Especificación
Sanidad (expansión en autoclave)	%	máximo	1,0
Tiempo de fraguado inicial	min	mínimo	90
Tiempo de fraguado final	min	máximo	1 080
Resistencia a la compresión a los 7 días	N/mm <sup>2</sup>	mínimo	4,4
Resistencia a la compresión a los 28 días	N/mm <sup>2</sup>	mínimo	7,8
Contenido de aire	%	máximo	22
Retención de agua	%	mínimo	60

Tabla 1. Tabla comparativa del alcance de la resistencia del mortero a los 7 y 28 días de fraguado tomada de la NMX-C-021-ONNCCE-2015.

La NMX-C-282-ONNCCE-2004, también habla sobre los agregados para concreto, su cambio de volumen de combinaciones con agregados y sus métodos de prueba, necesarios para realizar un correcto desempeño y tener un proceso similar y poder así comparar los materiales existentes de los innovadores.

También nos especifica las condiciones en las que debe de estar expuesto el material, la preparación de moldes, y la temperatura que son determinantes para no presentar anomalías en el proceso de preparación.

La Gaceta Oficial de la ciudad de México en su apartado 2.5 sobre Morteros y 2.5.1 Resistencia a compresión, especifica que se obtendrán como mínimo 3 muestras cúbicas de cada dosificación empleada siguiendo la norma NMX C 061-ONNCCE de la ciudad de México, (Gaceta Oficial de la ciudad de México, 2020). Además, en su apartado 2.5.2 Clasificación, menciona que los morteros de clasifican por su resistencia de diseño de compresión  $f'_{c}$ , en los siguientes tipos:

- Tipo I: con resistencia a compresión mayor o igual que 12.5 MPa (megapascal) (igual a 125 kg/cm<sup>2</sup>).
- Tipo II: con resistencia a compresión menor a la del Tipo I y mayor o igual que 7.5 MPa (75 kg/cm<sup>2</sup>).

### **3. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Enfoque y tipo de investigación**

Esta investigación está enfocada a la industria de la construcción, orientándose a la elaboración de nuevos materiales constructivos en áreas específicas como la arquitectura sostenible o bioconstrucción.

La presente investigación es de carácter cuantitativo, debido a la variabilidad de los materiales utilizados, integrándolos de manera definida mediante dosificaciones obtenidas de un diseño experimental factorial multinivel, generando diferentes mezclas, de las cuales, se obtuvieron resultados de las pruebas aplicadas, siendo analizados para determinar conclusiones.

El proyecto contiene los siguientes tipos de investigación: documental, ya que se recopiló información relacionada al tema de estudio; prospectivo, esto por la planeación de los datos utilizados; analítico, porque se tienen que analizar las variables de interés; experimental, porque que existe una intervención en el manejo de variables; y longitudinal, puesto que la variable de estudio se mide más dos veces.

#### **3.2 Área de estudio**

La recopilación de materiales utilizados para la elaboración de las mezclas, se centró en dos negocios locales de la ciudad de Colima, Colima. El cemento y el jal se obtuvieron de TRUPECO, una distribuidora de materiales de construcción ubicada en la calle Mariano Arista #550, Centro (ver Imagen 2). Por otro lado, el caucho triturado proveniente de neumáticos, se obtuvo de la vulcanizadora URSUA, ubicada en Parque Industrial #25 (ver Imagen 3).

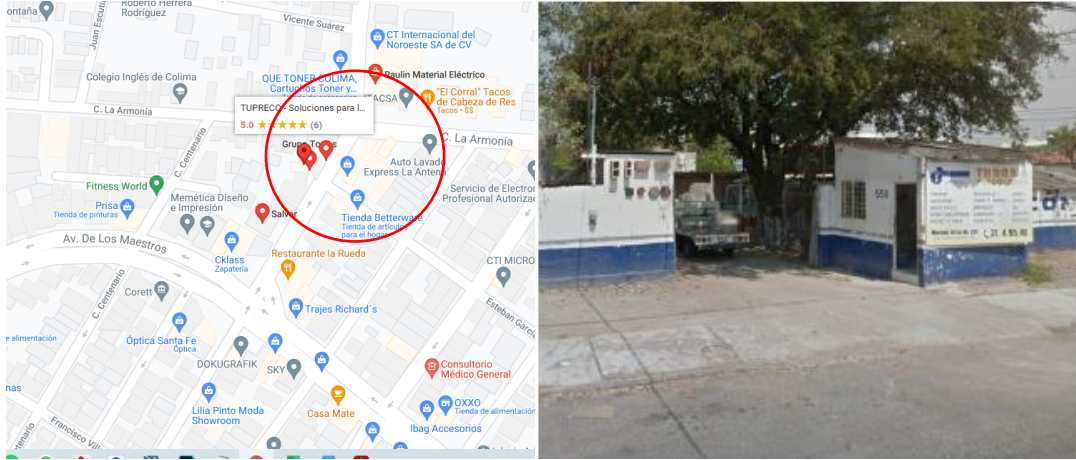


Imagen 2. Ubicación de la distribuidora TRUPECO en calle Mariano Arista #550, colonia Centro, Colima, Colima, México. (Fuente: Google Maps)

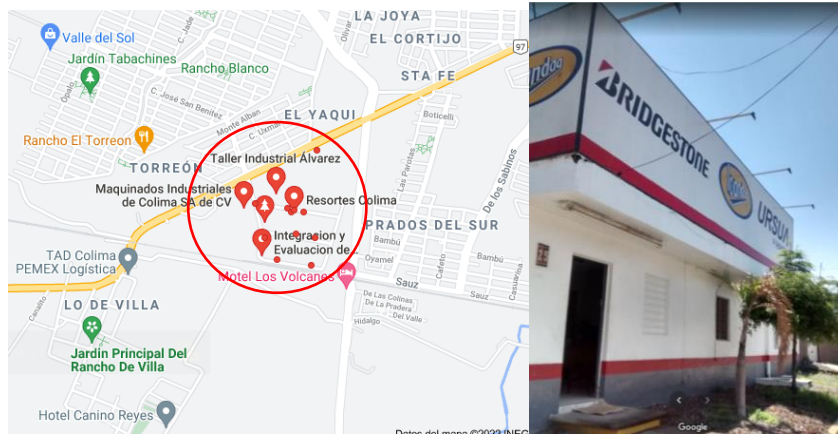


Imagen 3. Ubicación de la vulcanizadora URSUA en Parque Industrial #25 en Colima, Colima, México. (Fuente: Google Maps)

### 3.3 Población y muestra

#### 3.3.1 Obtención de la materia prima

El primer material fue el cemento portland (ver Imagen 4), siendo un cementante de calidad de acuerdo con la norma ASTM C 150 (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales).



Imagen 4. Cemento Portland.

Este material es un cementante que funciona como aglutinante hidráulico, es decir, un material inorgánico que es finamente molido hasta convertirse en polvo que, al mezclarse con agua, forma una especie de pasta. Además, al momento de fraguar se endurece, conservando una gran resistencia y estabilidad, incluso debajo del agua.

Cuando a este material se mezcla con otro tipo de agregados como arena y grava, piedra triturada u otros materiales granulares, actúa como aglutinante y los combina para formar hormigón y materiales de construcción incluso adaptables a circunstancias más desafiantes en cuanto a las condiciones geográficas que se presenten.

Actualmente se fabrican diferentes tipos de cemento Portland. Estos se producen bajo la normatividad para poder alcanzar mayor resistencia (CEMEX, 2019).

- Cemento tipo I: Uso General
  - o Este es apropiado para todo tipo de uso en donde no se necesite propiedades específicas de otros cementos. Se emplea concretamente en pavimentos, pisos, tanques, tuberías, mampostería y productos prefabricados.

- Cemento Tipo II y Tipo II (MH): Moderada resistencia a sulfatos y al calor de hidratación
  - Este tipo de cemento se puede utilizar en estructuras normales y miembros que se exponen a todo tipo de suelos y al agua subterránea donde mayormente se juntan los sulfatos.
  
- Cemento Tipo III: Altas resistencias iniciales
  - Este tipo de material ofrece altas resistencias a edades tempranas cuando el fraguado ronda en la primera semana de su elaboración.
  
- Cemento Tipo IV: Para lograr bajo calor de hidratación
  - Este tipo de cementante, generalmente se usa en donde se deba minimizar la tasa y cantidad de calor generado por la hidratación. Por lo tanto, genera una resistencia dentro de un periodo más lento desde su elaboración a comparación de otros tipos.
  
- Cemento Tipo V: Alta resistencia a sulfatos
  - Este tipo de cemento se utiliza cuando el material está expuesto a la acción severa de sulfatos, principalmente del suelo y el agua subterránea con una gran concentración de estos.

El siguiente material es el Jal o piedra pómez (ver imagen 5), esta tiene origen volcánico, dándole ciertas características a este material, brindándole gran solidez en su porosidad. Además, este tipo de texturizado, tiene como ventaja, absorber y retener agua, haciendo de la piedra, una piedra ligera, suave al tacto y además puede ser tallada, torneada y grabada con gran facilidad.

Dentro de sus características físicas se encuentra de igual manera su color blanco, dándole una gran vistosidad y así poder ser utilizada en la decoración de

espacios. No obstante, es adaptable a cualquier tipo de clima, teniendo una resistencia increíble ante el frío, al fuego y al momento de estar expuesta a la intemperie, además de poder flotar sobre el agua.

Esta roca cuenta con una particularidad en su forma, predominando las figuras alargadas y angulosas. Sus poros cerrados, hace que obtenga baja densidad, por lo que el comportamiento al impacto es bastante ligero.

Uno de sus múltiples usos dentro de la industria de la construcción, es usarlo como filtro, también como aereador de suelos dentro de la agricultura, además de la elaboración de polvos abrasivos para uso cosmético, odontológico y diversidad de procesos químicos. También, la piedra pómez se utiliza para la horticultura, empleado en diversos cultivos, invernaderos, campos de golf, paisajismo, jardinería, etc.

Es material muy liviano, y áspero. Puede utilizarse para la limpieza del hogar, ya sea en forma de piedra para realizar alguna exfoliación en la piel y en algunos casos hasta para lavar trastes.



Imagen 5. Jal o piedra pómez.

La piedra pómez debe de mantenerse seca para no afectar el porcentaje de dosificación al momento de agregar agua.

El material subsecuente es el caucho (ver imagen 6), un polímero que surge como un material de apariencia viscosa y que es conocido como látex en la savia



de diferentes tipos de plantas, pero también es un material que puede ser manejado y confeccionado de forma sintética.

En la actualidad encontramos diversas aplicaciones y usos para este material, como lo son en artículos prefabricados, principalmente en la elaboración de llantas, neumáticos, artículos aislantes e impermeables. Una de las grandes ventajas es que es repelente al agua, aislante de electricidad y temperatura, y además cuenta con una gran elasticidad.

El caucho que se utilizó, se obtuvo de neumáticos procedentes de la vulcanizadora URZUA, esta empresa tritura y moldea toda clase de neumáticos. Este se obtiene a manera de fibras por el proceso que se le da dentro de la vulcanizadora.



Imagen 6. Caucho triturado obtenido de neumáticos.

El primer paso fue colocar la llanta en una máquina, haciendo que gire para poder rallarla y a su vez poder absorber la fibra que se va desprendiendo mediante un extractor (ver Imágenes 7 y 8). Después, el caucho es llevado por medio de ductos a un almacenamiento interno (ver Imagen 9).



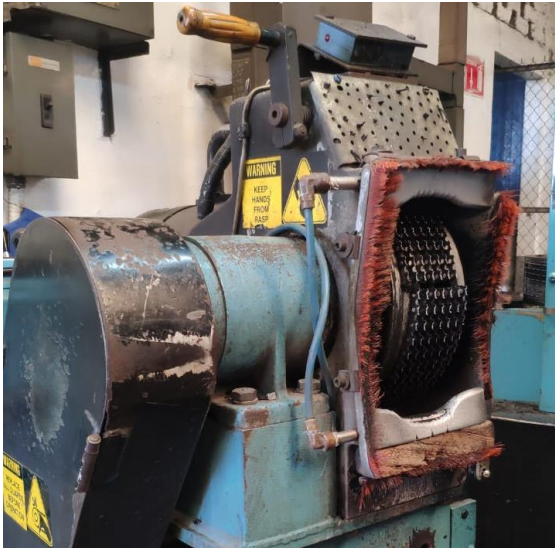


Imagen 7. Máquina rayadora y extractora de caucho



Imagen 8. Proceso de rayado de neumáticos para la obtención de caucho.



Imagen 9. Almacenamiento de caucho ya extraído.

Finalmente, se utilizó agua (ver Imagen 10), este material tiene características químicas, físicas y o biológicas y se puede caracterizar en tipos diferente como lo es el agua dulce, el agua salada, blanda, dura, etc.

El agua contiene una densidad de  $1 \text{ g/cm}^3$  y es la sustancia con mayor calor específico ( $4.180 \text{ J/Kg/}^\circ\text{C}$ ) que varía según a la temperatura que se encuentre. Además, la tensión superficial del agua tiende a ser muy alta y puede ser detectada dentro de parámetros de calidad mediante su color, turbidez y la conductividad que esta pueda tener.

Los tres estados del agua en la que se le puede observar son; líquida, sólida y gaseosa. El 97% es perteneciente a los océanos y por tanto es agua salada, mientras que el resto es solamente agua dulce, que se representa mediante ríos, lagos, manantiales, depósitos acuíferos, humedad del suelo y glaciares.

El agua dulce se obtiene mediante la precipitación que cae en forma de lluvia, esto debido a la evaporación del agua de mar que, al realizar su ciclo de transformación, cae como agua dulce.

El agua a utilizar durante esta investigación es agua dulce, que se obtendrá de la llave de agua pluvial que se obtiene dentro del hogar donde resido. Este proceso se explicará a detalle más adelante dentro de la elaboración de probetas. Esta debe cumplir con lo establecido en la Norma N-CMT-2-02-003 de Calidad del Agua, (CMT. Características de los Materiales, 2002).



Imagen 10. Agua a utilizar en las mezclas. (Fuente: El Diario Vasco)

## 3.4 Diseño experimental

### 3.4.1 Determinación de las variables

Con la finalidad de elaborar probetas para su evaluación mecánica se llevó a cabo la aplicación del Diseño Experimental Factorial Multinivel de Cochran-Cox (1983), este arreglo permitió relacionar variables, y analizar el efecto de estas mismas con la posibilidad de hacer rectificaciones. Al aplicarlo, aumentó el grado de confiabilidad en la elaboración de las probetas, así como también, se redujo la variabilidad de los datos obteniendo un mayor acercamiento con los alcances proyectados.

Existen dos tipos de variables dentro del diseño factorial multinivel, una es la independiente, la cual no depende de otras y la otra la dependiente, que sí dependen de otras variables.

#### **Variables independientes**

1. Cantidad de cemento
2. Cantidad de caucho

#### **Variables dependientes**

1. Resistencia a la compresión

Se denomina densidad a la relación entre la masa y el volumen de un material ( $\rho = m/v$ ). Además, la norma DIN 1306 indica como densidad de un material al cociente de la masa  $m$  (g) con el volumen  $v$  ( $cm^3$ )  $=g/cm^3$  (ABC Portland Cement Company, 1984). La densidad que se consideró fue de  $1.6 g/cm^3$  y se determinó mediante el análisis de diseños experimentales realizados en otras investigaciones como la de Magarinos, Arias y Lucca (2014), Urrua (2006) y Peñaloza (2015).

La combinación se realiza mediante un Diseño Experimental Factorial Multinivel (diseño obtenido del libro “Diseño de Experimentos”), que permitió valorar el efecto de cada variable individual sobre las propiedades de las probetas realizadas. Para este proceso, se tomó como base un mortero tipo I de  $f'c$  75 kg/cm<sup>2</sup> (ver Tabla 2). La Gaceta Oficial del la Ciudad de México menciona por cada parte de cemento hidráulico, se agregan tres partes de arena (agregados petreos). Estas proporciones se consideraron para la dosificación de los materiales de esta investigación (ver Tabla 3).

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena <sup>2</sup>
I	1	0	0 a ¼	3
	1	½	0	4 ½
II	1	0	0 a ½	4 ½
	1	1	0	6

Tabla 2. Base de mortero de  $f'c$  75 kg/cm<sup>2</sup>.

Materiales	Dosificación
	Partes
Cemento	1
Jal	1.5
Caucho	1.5

Tabla 3. Sustitución de materiales de un mortero tipo I de  $f'c$  75 kg/cm<sup>2</sup>.

El diseño de mezclas se realizó en Statgraphics (ver Tabla 4), un programa que permite someter las variables independientes para generar las combinaciones de acuerdo al diseño experimental en el cual se obtiene un grado de fiabilidad (Certeza en los resultados) del 95%. Este programa está diseñado para facilitar el análisis estadístico, el análisis predictivo y la visualización de datos, cubriendo una gama de técnicas de estudio muy extensa.

Unas de las ventajas que existen al utilizar este programa son:

- Es específico para desarrollar productos nuevos
- Eleva el grado de confiabilidad de resultados
- Es un diseño ya utilizado
- Cuenta con experiencia en el tipo de campo

### Resumen de diseño de mezclas

Resumen de diseño				
<b>Clase de diseño: Factorial multinivel</b>				
Comentario: CAUCHO-CEMENTO				
<b>Diseño base</b>				
Número de factores experimentales: 2 Número de bloques: 3				
Número de respuestas: 1				
Número de corridas: 75 Grado confiabilidad: 95				
Aleatorizado: No				
<b>Factores Niveles Bajos Altos Unidades</b>				
FACTORES:	bajo	alto	niveles	unidades
CAUCHO	50,0	100	0 5	%
CEMENTO	50,0	100	0 5	%
<b>Unidades de respuestas</b>				
R COMPRESIÓN N				

Tabla 4. Diseño experimental factorial multinivel.

La Tabla anterior muestra el diseño factorial multinivel, esta consta del cálculo de 25 dosificaciones de caucho y cemento con factores de niveles bajos (50%) y altos (100%) para después determinar los porcentajes correspondientes al jal y el agua (Tabla 5).

El diseño anterior se ejecutó en 3 bloques, siendo un total de 75 probetas. El orden de los experimentos no ha sido aleatorizado.

**Tabla de dosificación por probeta.**

Probeta	Caucho	Cemento	Jal	Agua	TOTAL
N°	%	%	%	%	%
1	15.00	10.00	50.00	25.00	100.00
2	18.75	10.00	46.25	25.00	100.00
3	22.50	10.00	42.50	25.00	100.00
4	26.25	10.00	38.75	25.00	100.00
5	30.00	10.00	35.00	25.00	100.00
6	15.00	12.50	47.50	25.00	100.00
7	18.75	12.50	43.75	25.00	100.00
8	22.50	12.50	40.00	25.00	100.00
9	26.25	12.50	36.25	25.00	100.00
10	30.00	12.50	32.50	25.00	100.00
11	15.00	15.00	45.00	25.00	100.00
12	18.75	15.00	41.25	25.00	100.00
13	22.50	15.00	37.50	25.00	100.00
14	26.25	15.00	33.75	25.00	100.00
15	30.00	15.00	30.00	25.00	100.00
16	15.00	17.50	42.50	25.00	100.00
17	18.75	17.50	38.75	25.00	100.00
18	22.50	17.50	35.00	25.00	100.00
19	26.25	17.50	31.25	25.00	100.00
20	30.00	17.50	27.50	25.00	100.00
21	15.00	20.00	40.00	25.00	100.00
22	18.75	20.00	36.25	25.00	100.00
23	22.50	20.00	32.50	25.00	100.00
24	26.25	20.00	28.75	25.00	100.00
25	30.00	20.00	25.00	25.00	100.00

Tabla 5. Porcentaje de material a utilizar en las probetas.

### 3.5 Técnicas de procesamiento e instrumentos para recolectar los datos

A continuación, se presenta de manera detallada la elaboración de las mezclas y dosificaciones de los materiales que se obtuvieron del diseño experimental factorial multinivel, explicando de manera detallada los pasos y recomendaciones a seguir.

#### 3.5.1 Elaboración de mezclas

##### 3.5.1.1 Preparación de probetas

Se elaboraron muestras de 5cm x 5cm x 5cm, considerándose, además, un porcentaje extra del 15% para generar mermas en la elaboración de las muestras (ver tabla 6).

El porcentaje para el agua de la mezcla fue del 25% en relación al aglutinante (cemento), quedando de 57.5 mililitros (57.5 gramos) por mezcla.

El porcentaje de peso estimado se calculó utilizando las siguientes fórmulas:

Ecuación: (1)

$$v = l \times a \times h$$

Ecuación: (2)

$$m = d \times v$$

En donde “v” es igual al volumen, “m” es igual a la masa, “d” es igual a la densidad, “l” es igual al lado, “a” es igual al ancho y “h” es igual a la altura.

Por lo tanto:

$$m = 1.6 \text{ g/cm}^3 \times 125 \text{ cm}^3 = 200 \text{ g}$$

El resultado nos revela que una probeta de 5cm x 5cm x 5cm x 1.6 g/cm<sup>3</sup> pesa 200 g con la densidad propuesta.

Densidad	Volumen cubo	Masa	Extra	Masa total
g/ cm <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup>	g	g	g
1.6	125	200	30	230

Tabla 6. Cálculo de material de muestras de 5cm x 5cm x 5cm.

Para la conversión porcentual del material que componen las probetas presentas en la tabla 5, se realizó el cálculo que determinó el peso del caucho, cemento, jal, agua y el material extra correspondientes al 100% de la masa proporcional de 230 g (ver Tabla 7). De cada arreglo, se realizaron 3 probetas, sumando un total de 75 muestras que fueron sometidas a las pruebas mecánicas. El cálculo en gramos se refleja en la Tabla 8.



**Tabla de dosificaciones por probeta**

Probeta	Block	Caucho	Cemento	Jal	Agua	Total
N°	B	g	g	g	g	g
1	1	34.50	23.00	115.00	57.50	230.00
2	1	43.13	23.00	106.38	57.50	230.00
3	1	51.75	23.00	97.75	57.50	230.00
4	1	60.38	23.00	89.13	57.50	230.00
5	1	69.00	23.00	80.50	57.50	230.00
6	1	34.50	28.75	109.25	57.50	230.00
7	1	43.13	28.75	100.63	57.50	230.00
8	1	51.75	28.75	92.00	57.50	230.00
9	1	60.38	28.75	83.38	57.50	230.00
10	1	69.00	28.75	74.75	57.50	230.00
11	1	34.50	34.50	103.50	57.50	230.00
12	1	43.13	34.50	94.88	57.50	230.00
13	1	51.75	34.50	86.25	57.50	230.00
14	1	60.38	34.50	77.63	57.50	230.00
15	1	69.00	34.50	69.00	57.50	230.00
16	1	34.50	40.25	97.75	57.50	230.00
17	1	43.13	40.25	89.13	57.50	230.00
18	1	51.75	40.25	80.50	57.50	230.00
19	1	60.38	40.25	71.88	57.50	230.00
20	1	69.00	40.25	63.25	57.50	230.00
21	1	34.50	46.00	92.00	57.50	230.00
22	1	43.13	46.00	83.38	57.50	230.00
23	1	51.75	46.00	74.75	57.50	230.00
24	1	60.38	46.00	66.13	57.50	230.00
25	1	69.00	46.00	57.50	57.50	230.00

Tabla 7. Se presenta la 25 dosificaciones en gramos por probeta resultantes del diseño experimental.

### Tabla en gramos por dosificación.

Dosificación para 3 probetas	Caucho	Cemento	Jal	Agua
N°	g	g	g	g
1	103.50	69.00	345.00	172.50
2	129.38	69.00	319.13	172.50
3	155.25	69.00	293.25	172.50
4	181.13	69.00	267.38	172.50
5	207.00	69.00	241.50	172.50
6	103.50	86.25	327.75	172.50
7	129.38	86.25	301.88	172.50
8	155.25	86.25	276.00	172.50
9	181.13	86.25	250.13	172.50
10	207.00	86.25	224.25	172.50
11	103.50	103.50	310.50	172.50
12	129.38	103.50	284.63	172.50
13	155.25	103.50	258.75	172.50
14	181.13	103.50	232.88	172.50
15	207.00	103.50	207.00	172.50
16	103.50	120.75	293.25	172.50
17	129.38	120.75	267.38	172.50
18	155.25	120.75	241.50	172.50
19	181.13	120.75	215.63	172.50
20	207.00	120.75	189.75	172.50
21	103.50	138.00	276.00	172.50
22	129.38	138.00	250.13	172.50
23	155.25	138.00	224.25	172.50
24	181.13	138.00	198.38	172.50
25	207.00	138.00	172.50	172.50

Tabla 8. Se muestra la cantidad de material en gramos que se ocupa por cada 3 probetas.

### 3.5.1.2 Elaboración del molde

La elaboración de los moldes se hizo bajo la normativa N-CMT-2-01-004-02. Esta norma contiene los requisitos de calidad de los morteros que se utilizan en

trabajos de albañilería, como lo son juntas, aplanados, firmes, entre otros, siendo especificaciones importantes para la prueba a realizar.

Se diseñaron y realizaron moldes previos con dimensiones de 5cm x 5cm x 5cm (ver Imagen 11). El primer material fue madera de pino y el segundo, melamina (ver Imagen 12).

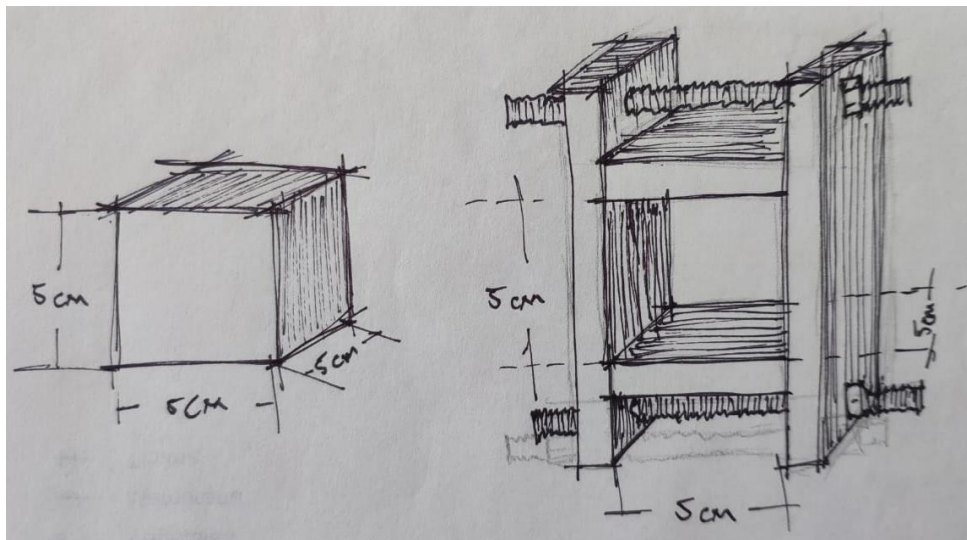


Imagen 11. Croquis empleado en el proceso del diseño del molde.

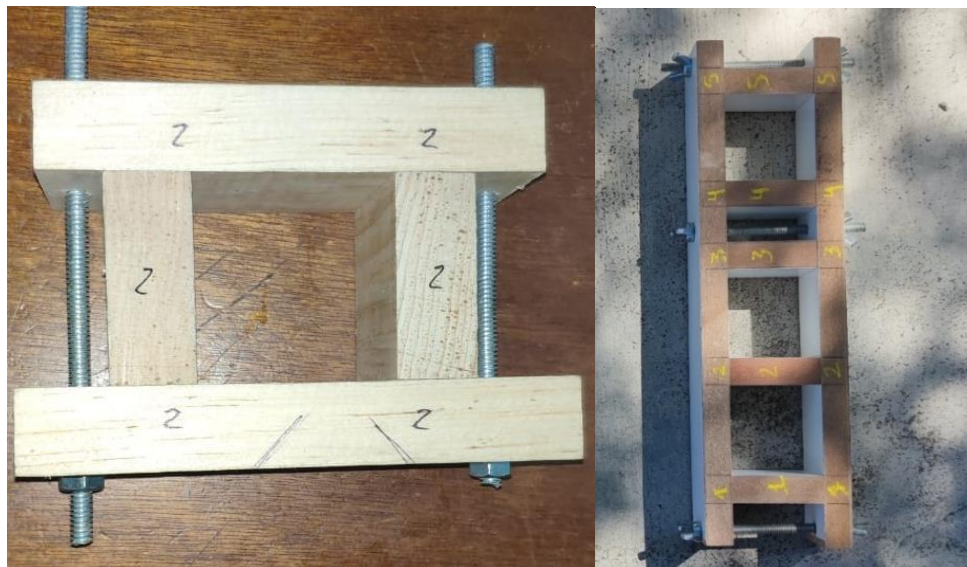


Imagen 12. Molde de madera (lado izquierdo). Molde de melamina ( lado derecho).

Finalmente se utilizaron tablillas de melamina de 1.5 cm unidas con pijas (tornillos), permitiendo armar y desarmar el molde con facilidad ya que este material mejoró la extracción las probetas (ver Imagen 13).

Cada molde se fabricó con tres espacios. Estos se cubrieron con aceite quemado para impedir que la madera se hinche y se pegue al contacto con la mezcla (ver Imagen 14).



Imagen 13. Molde de madera que se utilizó para crear las probetas.

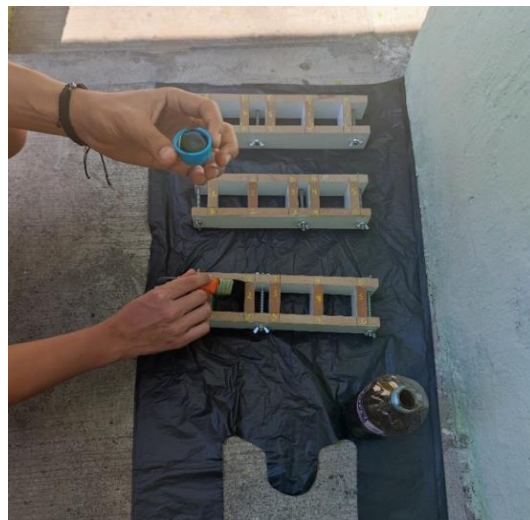


Imagen 14. Aplicación de aceite quemado al molde de melamina.

### 3.5.1.3 Fabricación de probetas

La preparación de las mezclas dio inicio con el cribado del caucho y el jal para utilizar partículas no mayores a de 6 mm (ver Imágenes 15 y 16). Por tanto, la criba utilizada fue del #6 (ver Imagen 17).





Imagen 15. Partículas de caucho y jal antes de cribar.



Imagen 16. Cribado del caucho y el jal.



Imagen 17. Partículas de caucho y jal despues del cribado.

Consecuentemente, se dosificaron los materiales para mezclarlos dentro de un recipiente y lograr una composición homogénea (ver Imagen 18 y 19). El agua se agregó como parte final y se repitió el proceso.

Para esta etapa de elaboración de probetas se obtuvo asesoría del ingeniero Antonio Martínez Moreno procedente de la empresa “Servicios de Laboratorio de la Industria de la Construcción” (SELAINCON). Esta empresa se dedica a la realización de pruebas de ensayo de materiales y se ubica en la calle Hidalgo #66 la ciudad de Colima, Colima, México.

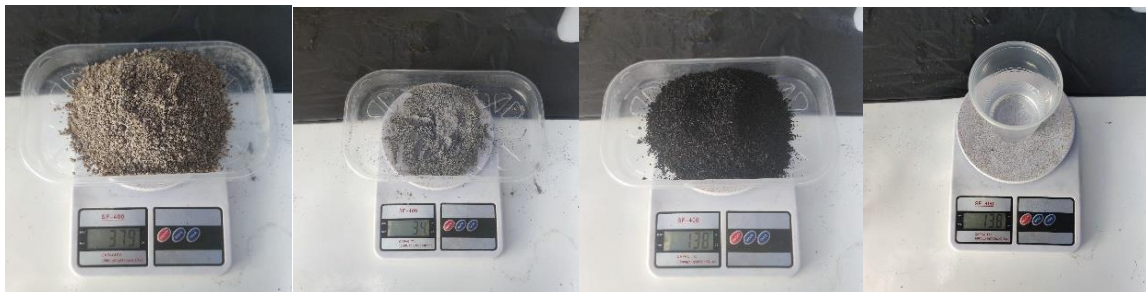


Imagen 18. Dosificación de de los materiales.



Imagen 19. Proceso de mezcla de los materiales.

El siguiente paso consistió en colocar los moldes sobre una superficie plana y nivelada para verter la mezcla (ver Imagen 20). Esta se colocó con la ayuda de una pala de plástico, golpeando levemente el molde para vibrarla y extraer el aire y evitar oquedades (ver Imágenes 21 y 22). Finalmente, la mezcla fue prensada.





Imagen 20. Moldes colocados en una superficie plana y nivelada.

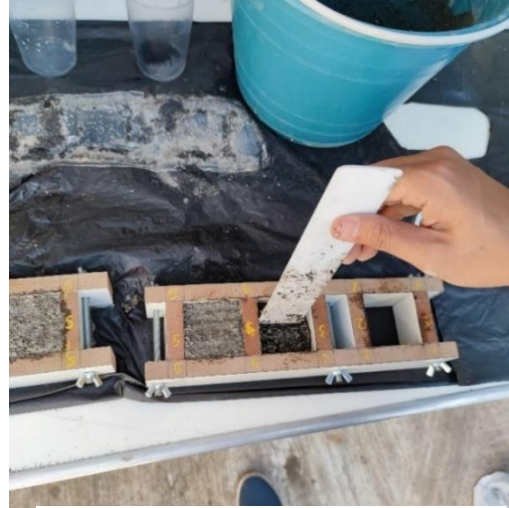


Imagen 21. Vibrado de la mezcla dentro de los moldes.



Imagen 22. Moldes después de colocar de la mezcla y prensarlos.

#### 3.5.1.4 Curado y fraguado de probetas

Después de haber transcurrido 24 horas, se retiraron las probetas de manera cuidadosa, corroborando que no tuvieran anomalías (ver Imagen 23). Estas se dejaron secar por 28 días según la especificación emitida por la NMX-C-021-ONNCCE-2015, en su apartado de especificaciones para caracterización de la calidad del cemento para albañilería.



Imagen 23. Probetas después de la extracción del molde.

El proceso del curado se realizó durante los primeros 14 días con un rociador de agua para mantener la humedad en la probeta y una temperatura no mayor a 11 °C. Este método es sencillo de aplicar, cabe destacar que el agua debe de ser pura y estar libre de contaminantes, según la norma de amasado para concreto de (ASTM C-59). Posteriormente se marcaron para identificarlas (ver Imagen 24).



Imagen 24. Identificación de probetas.



## 3.6 EJECUCIÓN DE PRUEBA MECÁNICA

### 3.6.1 Prueba de compresión

La ejecución de la prueba de compresión se llevó a cabo en el laboratorio de Mecatrónica dentro del Tecnológico Nacional de México, campus Colima, México, ubicado en Villa de Álvarez, Colima (ver Imagen 25), bajo la supervisión del Ing. Carlos Torres Martínez.

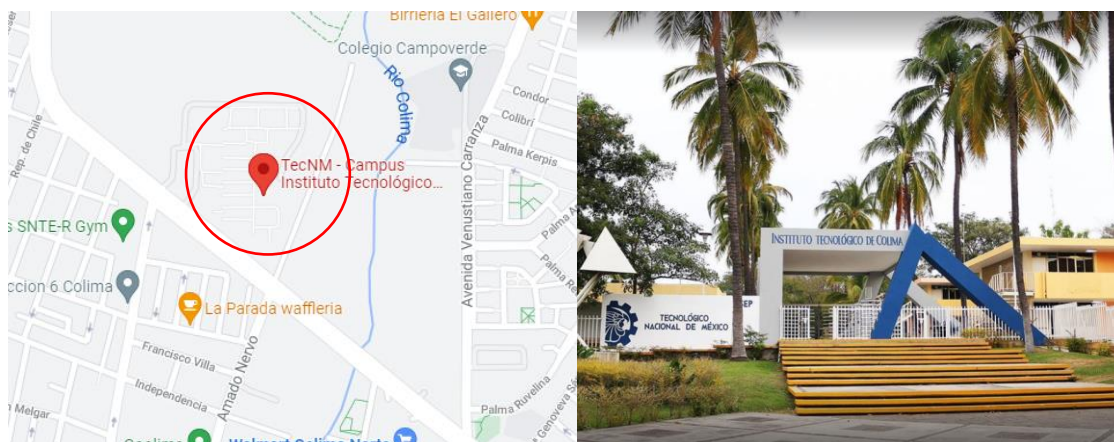


Imagen 25. Ubicación del laboratorio de Mecatrónica dentro del Tecnológico Nacional de México, campus Colima, en Villa de Álvarez, Colima, México.

La máquina que se utilizó fue una UH – 500 kNI marca SHIMADZU (ver Imagen 26), la cual, tiene un sistema hidráulico universal de la serie UH. La unidad de medida de la carga aplicada fue KN (Kilo Newton).

Cabe mencionar que 1 KN es igual a 101.97 kilogramos según el libro de Termodinámica de Yunes A. Cengel en su apartado “Factores de Conversión”.



Imagen 26. Maquina universal UH – 500 kNI marca SHIMADZU.

Las probetas fueron pesadas antes de iniciar con la prueba de compresión (ver Imagen 27).



Imagen 27. Pesado de probetas.

No fue necesario colocar cabeceos (bases para para nivelación) sobre las probetas, el diseño de los moldes permitió generar caras con pocas deformidades, permitiendo cubrir uniformemente el área donde la polea ejercía presión (ver Imagen 28).



Imagen 28. Probeta siendo ensayada en la prensa universal.

El funcionamiento de la prensa universal UH – 500 kNI fue simple, esta se preparó previamente, calibrando la velocidad de la polea al momento de bajar y ejercer presión sobre la probeta (ver Imagen 29). Los datos de este proceso de prueba se fueron capturando automáticamente en la pantalla (ver Imagen 30).



Imagen 29. Proceso de prueba en el equipo. Probeta con carga aplicada.

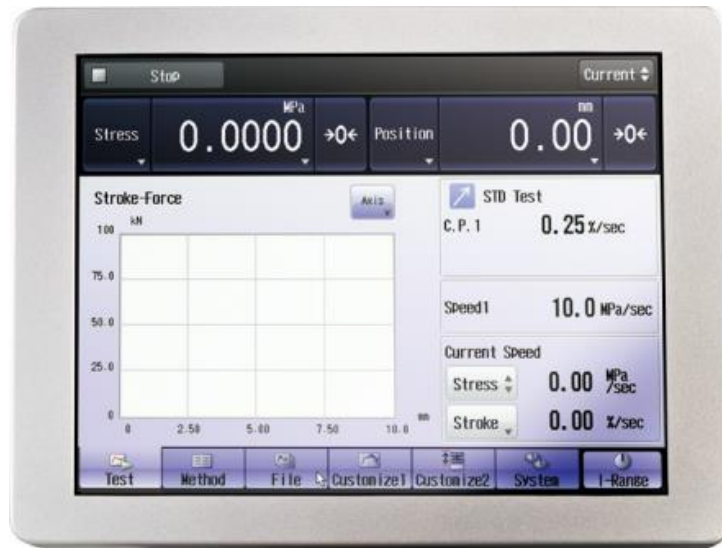


Imagen 30. Proceso de recolección de información. (Fuente: ssi.shimadzu.com)

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Resultados

#### 4.1.1 Tablas de resultados

Dentro del siguiente capítulo se muestran los resultados obtenidos de las pruebas de compresión de las 75 probetas (ver Tabla 9), reflejando datos como peso, deformación, resistencia en KN y su conversión a kg, para posteriormente ser aplicados para obtener el esfuerzo de compresión de cada probeta.

Para la conversión de resultados de Kilo Newtons (KN) a kilogramos (kg) se realizó lo siguiente; en este caso, tomando en cuenta que 1 KN es igual a 101.9716 kg, se multiplicó 101.9716 por la resistencia en Kilo Newton que se obtuvo de las probetas, para el cálculo del esfuerzo de compresión según Robert W. Fitzgerald en su libro de Mecánica de Materiales, en su apartado 2.11 Esfuerzo de compresión, se puede determinar mediante la fórmula:  $\sigma = P/A$ , donde “ $\sigma$ ” es el esfuerzo de compresión, “P” es la fuerza axial en kg y “A” es el área de la sección transversal del cubo (25 cm<sup>2</sup>).

Ejemplo de conversión del resultado de la capacidad de resistencia de la probeta número 1:

Por lo tanto:

$$\sigma = 1.7 \text{ KN} \times 101.97 \text{ kg} / 25 \text{ cm} = 6.93 \text{ kg/cm}^2.$$

El resultado nos revela que la capacidad de resistencia de la probeta número 1, es igual a 6.93 kg/cm<sup>2</sup>.

### Resultados de la resistencia de las 75 probetas

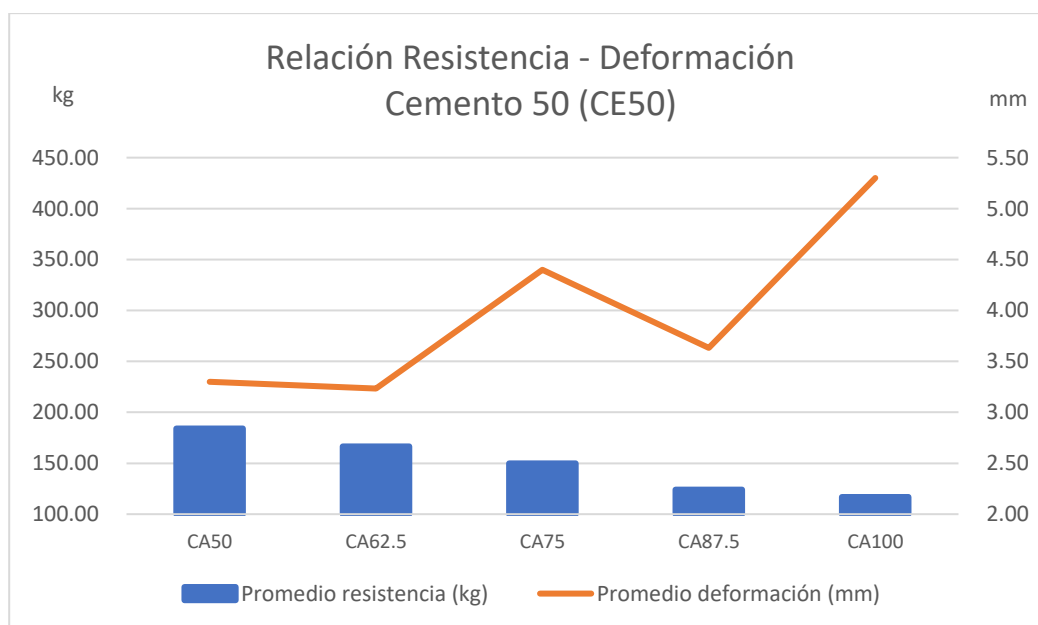
Probeta	Block	Peso	Densidad	Deformación	Carga máxima aplicada	Resistencia a compresión
N°	B	g	g/cm <sup>3</sup>	mm	KN	kg/cm <sup>2</sup>
1	1	120	0.96	3.8	1.7	6.93
2	1	120	0.96	2.9	1.65	6.73
3	1	120	0.96	4.8	1.47	6
4	1	110	0.88	2.6	1.3	5.3
5	1	110	0.88	5.3	1.22	4.98
6	1	120	0.96	2.8	2.37	9.67
7	1	110	0.88	4	2.15	8.77
8	1	110	0.88	2	2.02	8.24
9	1	110	0.88	4.5	1.72	7.02
10	1	110	0.88	4.9	1.45	5.91
11	1	130	1.04	3	3.52	14.36
12	1	120	0.96	2.6	2.75	11.22
13	1	120	0.96	3.5	2.55	10.4
14	1	120	0.96	4.3	2.3	9.38
15	1	110	0.88	3.5	1.75	7.14
16	1	130	1.04	3.9	3.97	16.19
17	1	130	1.04	2.7	3.22	13.13
18	1	120	0.96	3.7	2.57	10.48
19	1	120	0.96	3.2	2.1	8.57
20	1	120	0.96	3.6	2.22	9.06
21	1	130	1.04	2.3	4.5	18.35
22	1	120	0.96	2.4	3.6	14.68
23	1	120	0.96	3.5	3.1	12.64
24	1	120	0.96	3.7	2.77	11.3
25	1	120	0.96	5.1	2.72	11.09
26	2	120	0.96	2.8	1.87	7.63
27	2	120	0.96	3.6	1.6	6.53
28	2	110	0.88	4.5	1.52	6.2
29	2	110	0.88	3.6	1.2	4.89
30	2	110	0.88	5.2	1.07	4.36

31	2	120	0.96	2.6	2.42	9.87
32	2	120	0.96	4	2.25	9.18
33	2	120	0.96	3.2	2.02	8.24
34	2	110	0.88	3	1.75	7.14
35	2	120	0.96	4.3	1.55	6.32
36	2	120	0.96	1.4	3.75	15.3
37	2	120	0.96	4.1	3	12.24
38	2	120	0.96	2.9	2.6	10.61
39	2	120	0.96	3.6	2.32	9.46
40	2	120	0.96	3.8	1.97	8.04
41	2	130	1.04	3.1	4.07	16.6
42	2	130	1.04	2.5	3.25	13.26
43	2	120	0.96	3.2	2.67	10.89
44	2	120	0.96	2.8	2.2	8.97
45	2	120	0.96	4.5	2.4	9.79
46	2	120	0.96	2.4	4	16.32
47	2	120	0.96	3.9	3.62	14.77
48	2	130	1.04	3.4	3.17	12.93
49	2	120	0.96	4.5	2.7	11.01
50	2	120	0.96	5.2	2.32	9.46
51	3	120	0.96	3.3	1.85	7.55
52	3	120	0.96	3.2	1.65	6.73
53	3	110	0.88	3.9	1.42	5.79
54	3	110	0.88	4.7	1.15	4.69
55	3	110	0.88	5.4	1.15	4.69
56	3	120	0.96	2.5	1.37	5.59
57	3	110	0.88	4.1	1.82	7.42
58	3	120	0.96	3.6	2.17	8.85
59	3	110	0.88	3.2	1.82	7.42
60	3	110	0.88	5.7	1.35	5.51
61	3	130	1.04	3.1	3.52	14.36
62	3	120	0.96	2.5	2.52	10.28
63	3	120	0.96	3.4	2.42	9.87
64	3	120	0.96	4.8	2.12	8.65
65	3	110	0.88	4.3	1.77	7.22
66	3	120	0.96	3.7	3.72	15.17
67	3	130	1.04	3	3.27	13.34

68	3	120	0.96	3.6	2.75	11.22
69	3	120	0.96	4.9	2.22	9.06
70	3	120	0.96	3.4	2.15	8.77
71	3	130	1.04	2.6	4.37	17.82
72	3	120	0.96	2.8	3.65	14.89
73	3	130	1.04	3.5	3.17	12.93
74	3	120	0.96	5.2	2.45	9.99
75	3	120	0.96	4.6	2.65	10.81

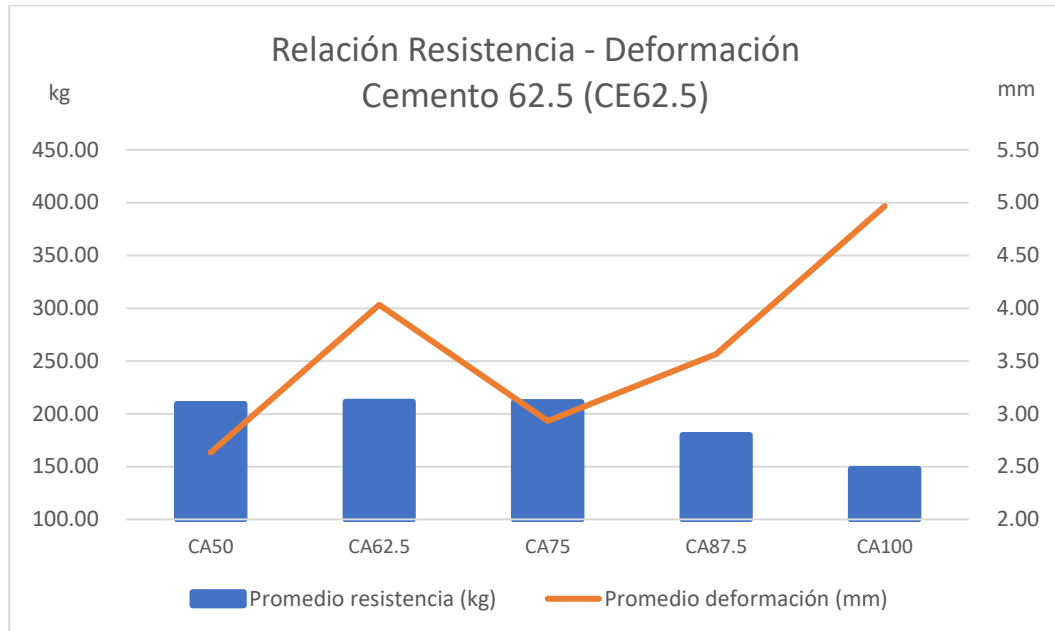
Tabla 9. Resultados obtenidos por probeta de la prueba de resistencia a la compresión.

Se graficaron los resultados de las pruebas de compresión de las 25 dosificaciones, estos datos proyectados están en relación al diseño de mezclas “cemento – caucho”, donde las barras determinan su resistencia en kg y la línea la deformación en mm (ver Gráfica 1 a 11). Las gráficas individuales se muestran en los anexos (ver Anexos 1 al 26).

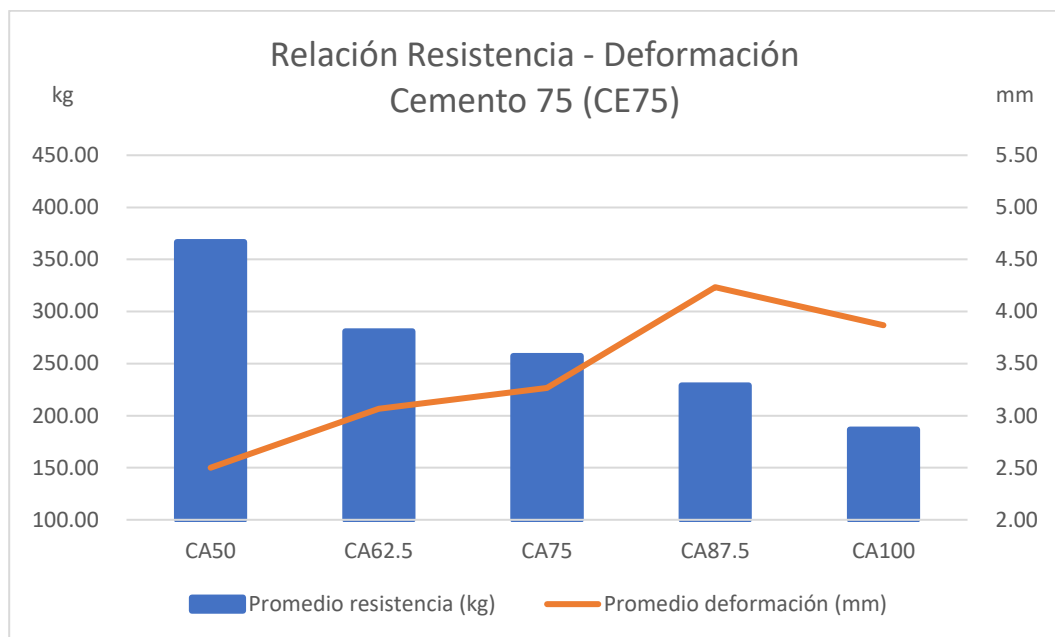


Gráfica 1. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 50.

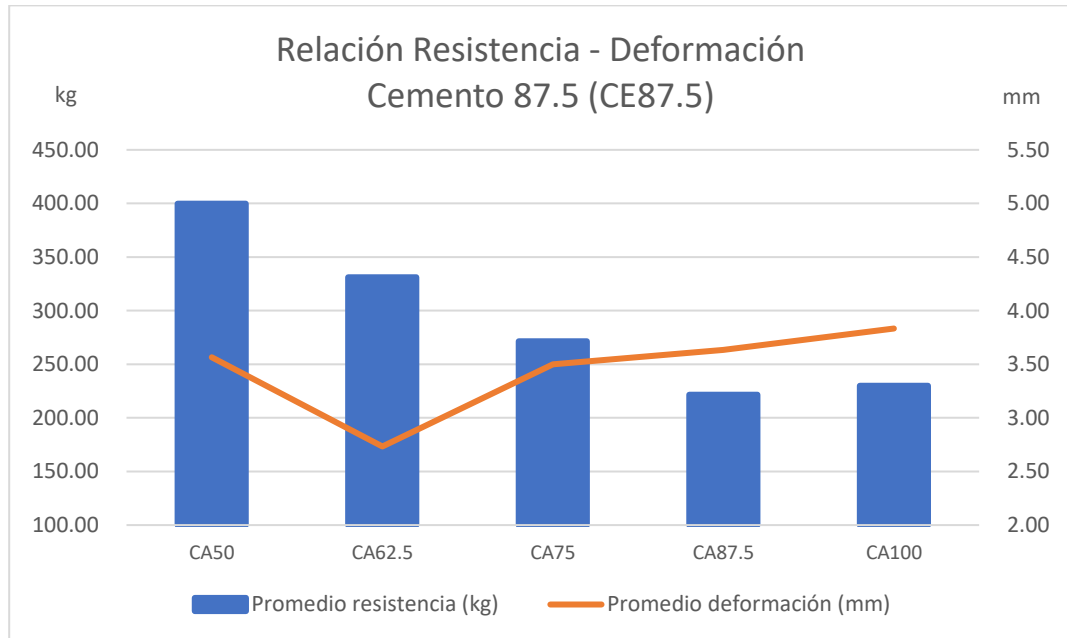




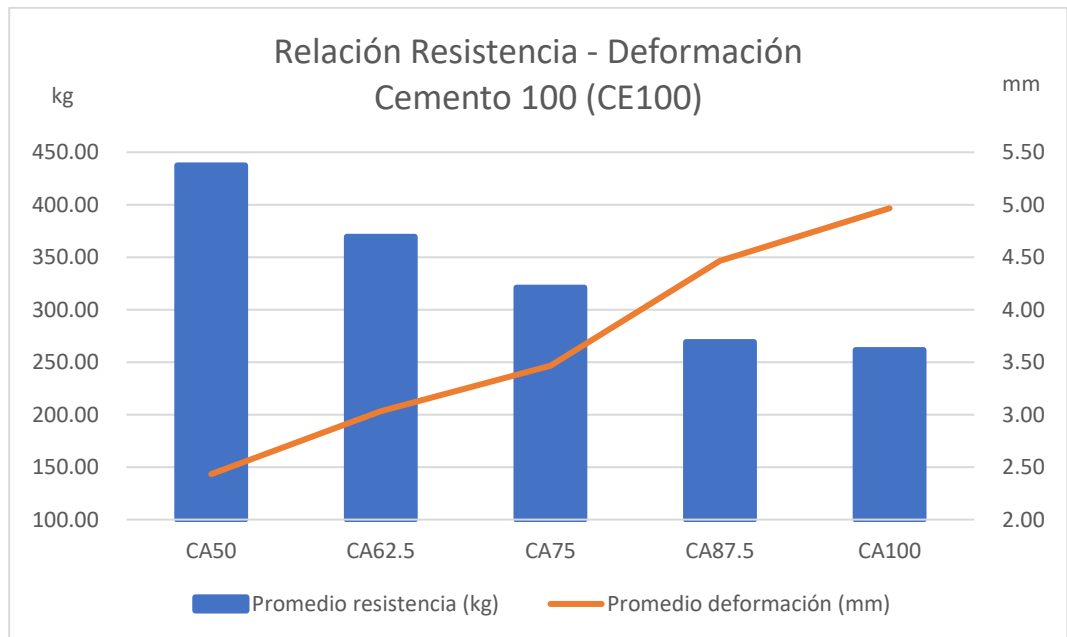
Gráfica 2. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 62.5.



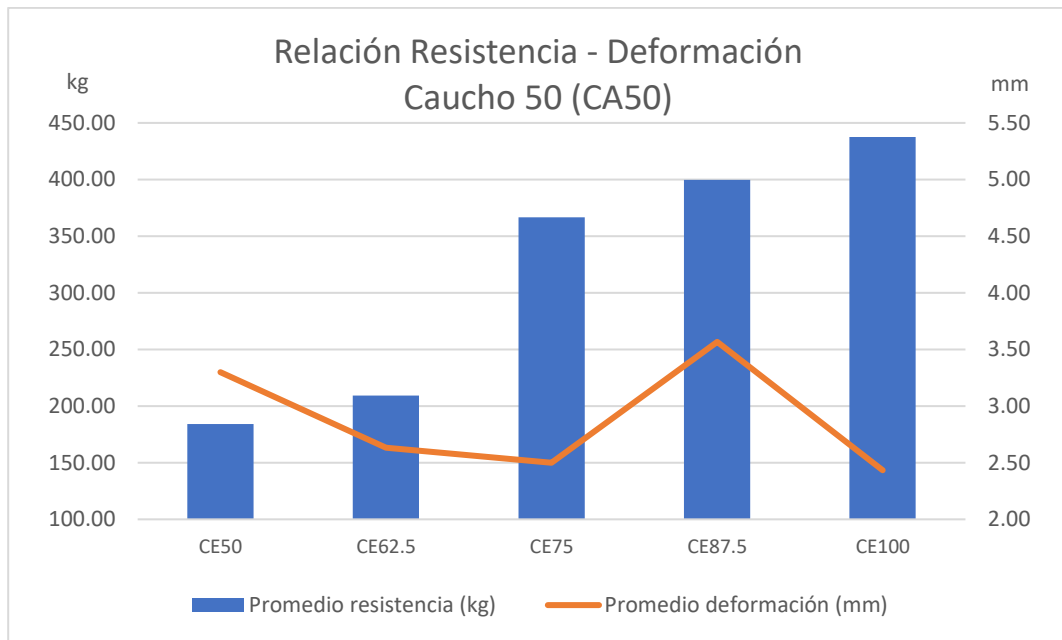
Gráfica 3. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 75.



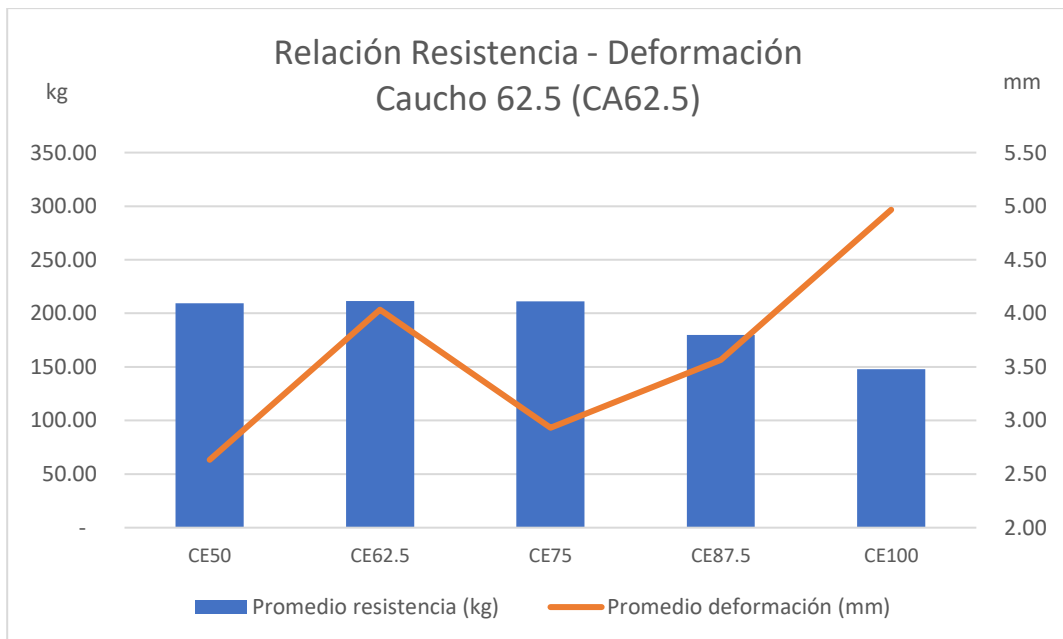
Gráfica 4. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 87.5.



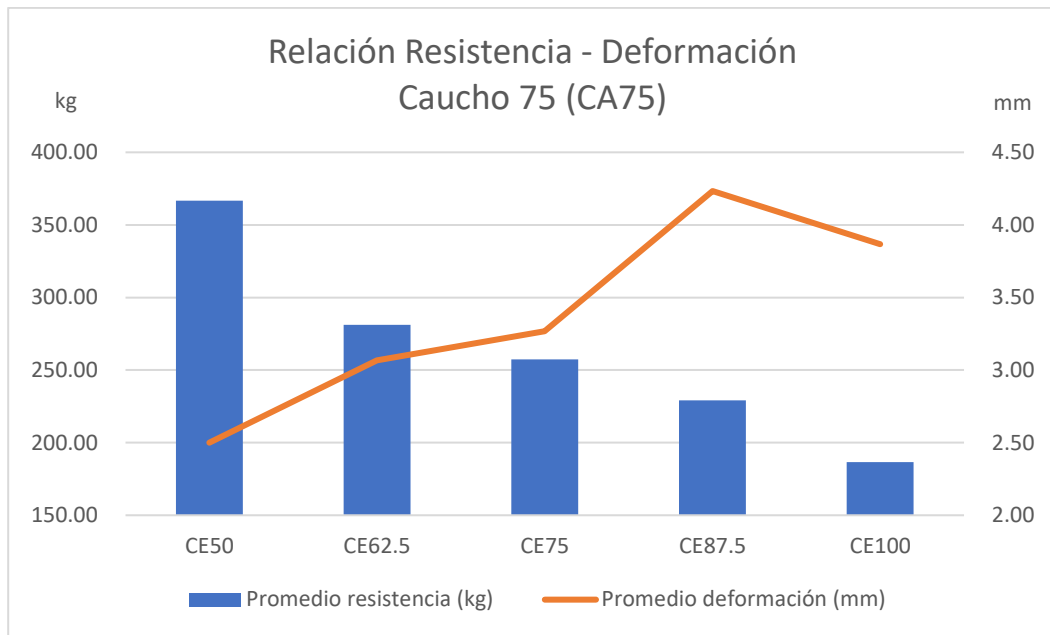
Gráfica 5. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el caucho escala de 50 a 100 y el cemento se mantiene en 100.



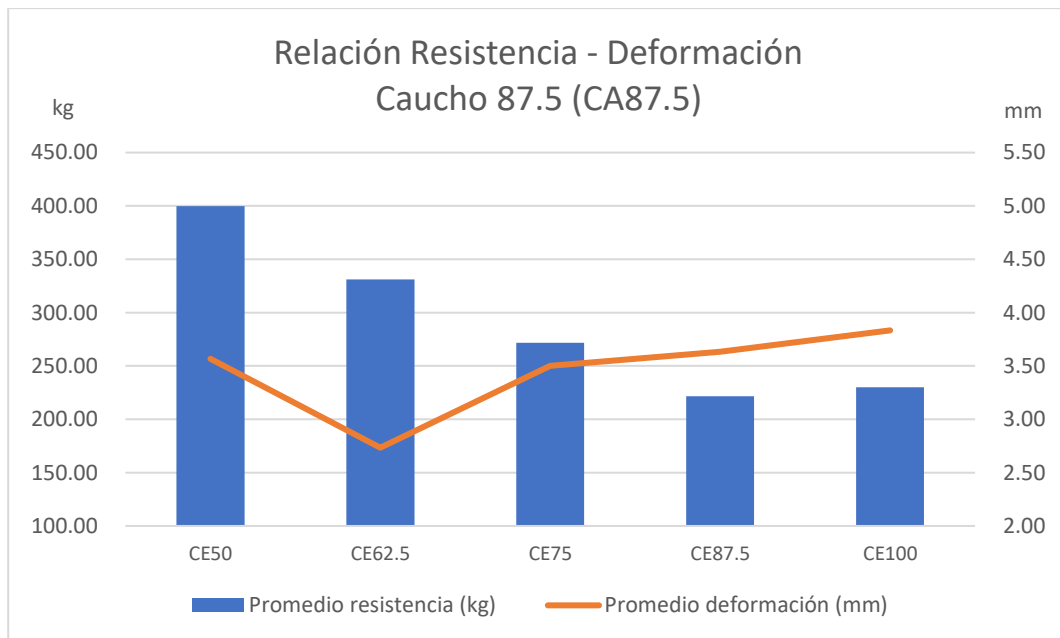
Gráfica 6. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 50.



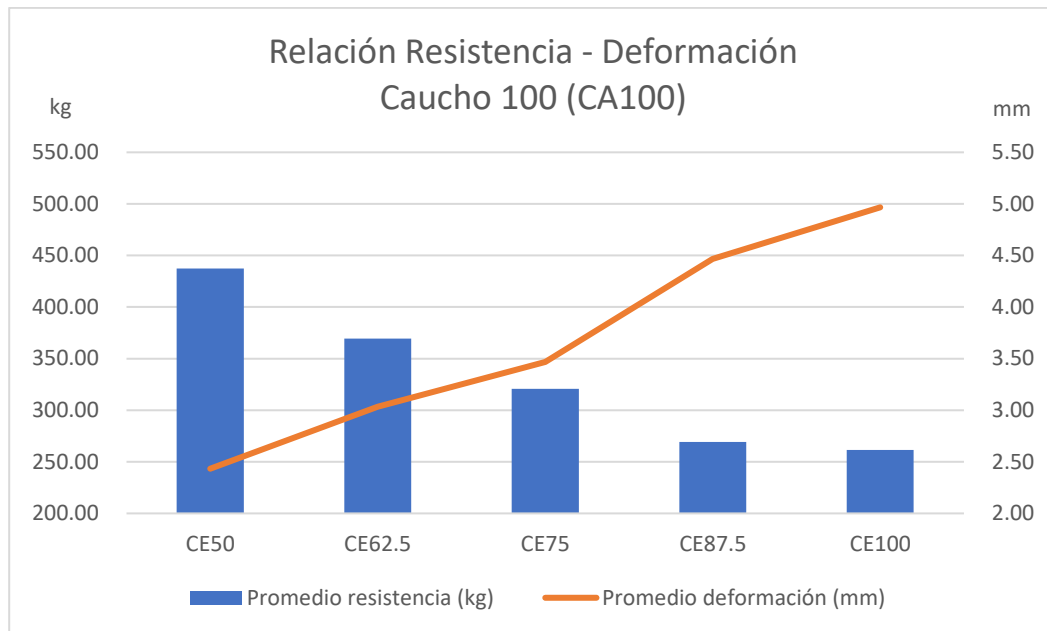
Gráfica 7. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 62.5.



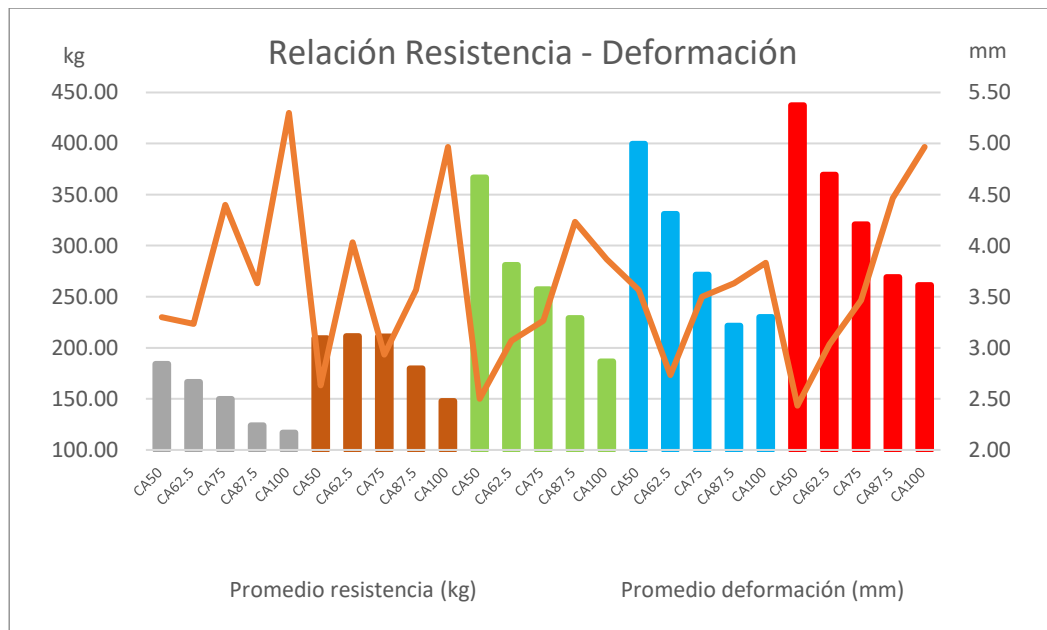
Gráfica 8. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 75.



Gráfica 9. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 87.5.



Gráfica 10. Muestra la capacidad de resistencia (barras color azul) y la deformación (línea color naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento escala de 50 a 100 y el caucho se mantiene en 100.



Gráfica 11. Muestra la capacidad de resistencia (barras de colores) y la deformación (línea naranja) de la relación cemento – caucho. Donde el cemento y el caucho escalan de 50 a 100.

## 4.2 Discusión de resultados

### 4.2.1 Efecto de las variables sobre las propiedades de compresión.

Finalmente, al término de las pruebas de compresión ejecutadas dentro de esta investigación, se concluyó que la mayor resistencia generada fue la que logró la dosificación número 21 (ver Tabla 8), la cual, tuvo un mayor porcentaje de cemento, pudiendo ser el factor principal de su capacidad de resistencia, alcanzando los 17.49 kg/cm<sup>2</sup> (4.29 KN) y una deformación de 2.43 mm. Al mismo tiempo, se pudo observar la cercanía que obtuvo la dosificación número 16, obteniendo 15.98 kg/cm<sup>2</sup> (3.92 KN), la dosificación 22 con un resultado de 14.77 kg/cm<sup>2</sup> (3.62 KN), la dosificación 11 con 14.67 kg/cm<sup>2</sup> (3.60 KN) y la dosificación número 17 con 13.24 kg/cm<sup>2</sup> (3.25 KN).

Como consiguiente, se analizaron datos como resistencia (KN), deformación (mm) y peso (kg),” mediante un factor llamado “Análisis Multivariado”, dentro del programa Statgraphics de las 25 dosificaciones utilizadas en las pruebas mecánicas.

Este procedimiento está diseñado para resumir varias columnas de datos cuantitativos. Calculó varios estadísticos, incluyendo correlaciones, covarianzas y correlaciones parciales. En el procedimiento también se incluyeron una serie de gráficas multivariadas, que proporcionan vistas interesantes de los datos.

A continuación, se presenta la Tabla 10 con el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluyó medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés aquí es el sesgo estandarizado (la diferencia entre lo que se espera matemáticamente y el valor numérico del parámetro que estima) y la curtosis estandarizada (medida estadística que determina el grado de concentración que presentan los valores de una variable alrededor de la zona central de la distribución de frecuencias), las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal.

	Resistencia (KN)	Deformación (mm)	Peso (kg)
Promedio	2.4064	3.62267	0.118053
Desviación Estándar	0.84776	0.910832	0.00561825
Coefficiente de Variación	35.2294%	25.1426%	4.75907%
Mínimo	1.07	1.4	0.106
Máximo	4.5	5.7	0.134
Rango	3.43	4.3	0.028
Sesgo Estandarizado	1.94861	0.842631	0.445714
Curtosis Estandarizada	-0.752067	-0.770008	-0.0976723

Tabla 10. Resumen estadístico de las 75 probetas ensayadas.

La Tabla 11 mostró las correlaciones momento producto de Pearson, entre cada par de variables. El rango de estos coeficientes de correlación va de -1 a +1, y miden la fuerza de la relación lineal entre las variables. También se mostró, entre paréntesis, el número de pares de datos utilizados para calcular cada coeficiente. El tercer número en cada bloque de la tabla es un valor-P que probó la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Valores-P abajo de 0.05 indican correlaciones significativamente diferentes de cero, con un nivel de confianza del 95.0%. Los siguientes pares de variables tienen valores-P por debajo de 0.05:

	Peso (kg)	Deformación (mm)	Resistencia (KN)
Peso (kg)		-0.4341	0.8463
		(75)	(75)
		<b>0.0001</b>	<b>0.0000</b>
Deformación (mm)	-0.4341		-0.4553
	(75)		(75)
	<b>0.0001</b>		<b>0.0000</b>
Resistencia (KN)	0.8463	-0.4553	
	(75)	(75)	
	<b>0.0000</b>	<b>0.0000</b>	

Tabla 11. Correlaciones

#### 4.2.2 Variable dependiente: Resistencia (KN)

Factores:

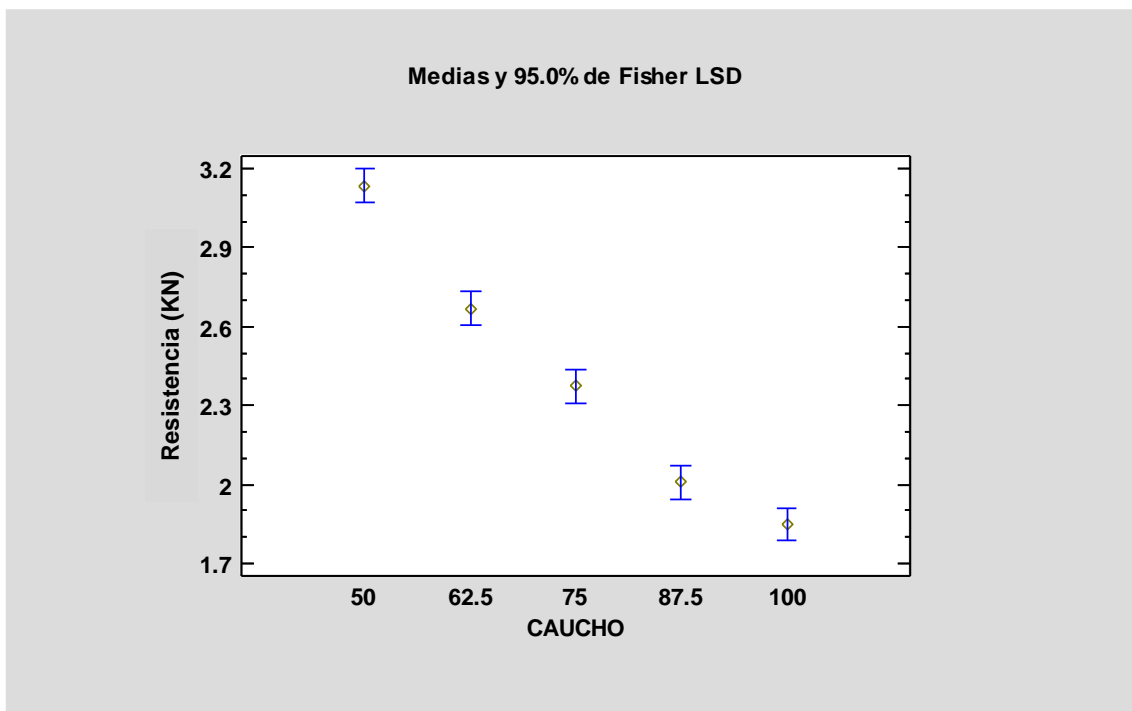
CAUCHO

## CEMENTO

Número de casos completos: 75

Este procedimiento ejecutó un análisis de varianza de varios factores para Resistencia (KN). Realizó varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre Resistencia (KN). También evaluó la significancia de las interacciones entre los factores. La gráfica de Medias y la Gráfica de Interacciones ayudaron a interpretar los efectos significativos.

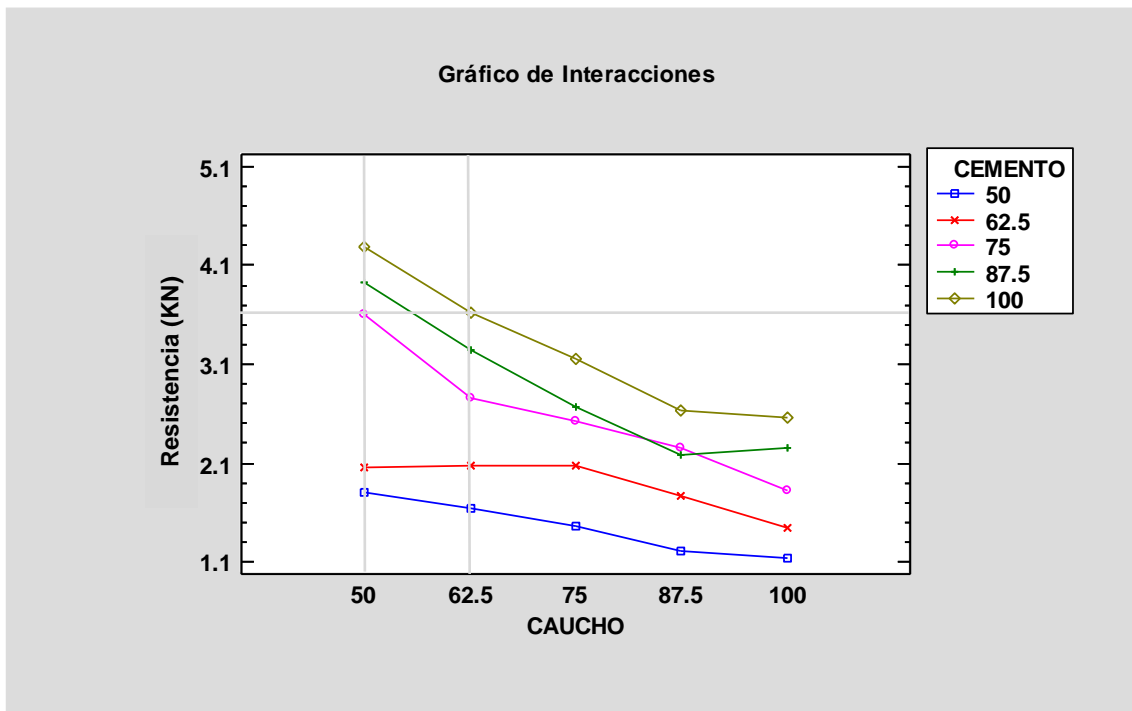
En la siguiente Gráfica de medias (ver Gráfica), inicialmente, se pudo confirmar que, el comportamiento de las mezclas en su fase experimental es estable, de acuerdo a la presentación lineal ascendente (de derecha a izquierda en relación a las cantidades de caucho). También se analizó que, entre menor cantidad de material de caucho en la probeta, la capacidad de resistencia aumentó.



Gráfica 12. Comportamiento del caucho en relación con la resistencia. Entre menor cantidad de material de caucho en la probeta, la capacidad de resistencia aumentó.



La siguiente grafica (ver Gráfica 13) muestra las interacciones de las variables independientes (cemento - caucho) en relación con la variable de respuesta (resistencia). Esta nos muestra que al utilizar la cantidad de material de cemento en un 75% con un 50% de caucho, la resistencia es similar al utilizar un porcentaje de cemento del 100% con el 62.5 de caucho. Este resultado permitirá optimizar la cantidad de materiales en futuras investigaciones.



Gráfica 13. Interacciones resistencia - peso. Esta nos muestra que al utilizar la cantidad de material de cemento en un 75% con un 50% de caucho, la resistencia es similar al utilizar un porcentaje de cemento del 100% con el 62.5 de caucho.

#### 4.2.3 Variable dependiente: Deformación (mm)

Factores:

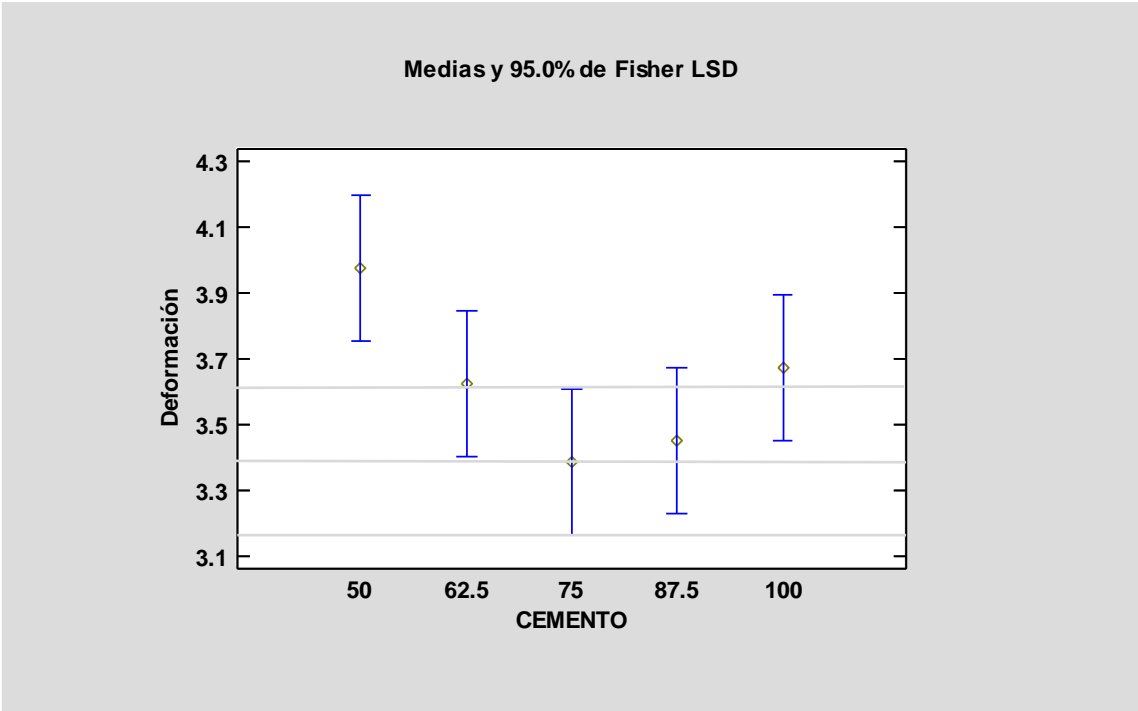
CAUCHO

CEMENTO

Número de casos completos: 75

Este procedimiento ejecutó un análisis de varianza de varios factores para Deformación. Realizó varias pruebas y gráficas para determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Deformación. También evaluó la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. La Gráfica de Medias y la Gráfica de Interacciones permitió interpretar los efectos significativos.

En la siguiente Gráfica (Gráfica 14) se muestra que, en la proporción del 75% de cemento, existe una menor deformación de la probeta, inclusive por debajo de las proporciones de 87.5% y 100%.



Gráfica 14. Comportamiento de la deformación en relación con el cemento. Se muestra que, en la proporción del 75% de cemento, existe una menor deformación de la probeta, inclusive por debajo de las proporciones de 87.5% y 100%.

## CONCLUSIONES

Como punto de partida, es importante mencionar que se cumplieron con los objetivos particulares propuestos al inicio de la investigación, como fue:

Diseñar probetas con diferente dosificación de materiales para la realización de pruebas mecánicas. Se cumplió porque se diseñaron mezclas y se elaboraron probetas con diferente dosificación de materiales mediante un diseño de experimental.

Pesar y comparar las probetas diseñadas para pruebas con una probeta testigo, con una densidad de  $1.6 \text{ g/cm}^3$ . Se cumplió de manera satisfactoria ya que el total de muestras fueron debidamente catalogadas y pesadas, destacando que, la densidad máxima obtenida está en  $1.04 \text{ g/cm}^3$ .

Aplicar pruebas de resistencia a la compresión a las probetas diseñadas. Al concluir el diseño experimental, dio como resultado 25 mezclas y 75 probetas realizadas y ensayadas, obteniendo las cargas máximas aplicadas y la deformación generada por la misma.

Generar tablas de estadísticas para la comparación de datos obtenidos. Igualmente, se obtuvieron las tablas correspondientes, mismas que fueron empleadas para el logro del siguiente objetivo que fue analizar las propiedades resultantes del nuevo material elaborado cumpliendo plenamente con el mismo.

Así mismo, se cumplió el objetivo general que menciona “Evaluar el desempeño mecánico del nuevo mortero compuesto por cemento, jal, caucho y agua, mediante probetas producidas con las mezclas diseñadas con diversas proporciones que resultaron del diseño experimental para aplicarles cargas y poder analizar sus capacidades de resistencia a la compresión”, ya que fue posible elaborar el nuevo mortero compuesto por cemento, jal, caucho y agua. Además de poder analizar la resistencia a la compresión de diversas proporciones de mezcla según el diseño experimental factorial multinivel.

La hipótesis del presente trabajo menciona que “Al considerar la densidad y la proporción de cemento – arena de un mortero de  $f'c$  75 kg/cm<sup>2</sup> y sustituir en la mezcla la arena por caucho triturado reciclado de neumáticos, así como de jal, se obtendrá un nuevo mortero más ligero y con características de resistencia similares”, con la información obtenida de la experimentación podemos mencionar que la hipótesis se cumple parcialmente, ya que la capacidad de resistencia a la compresión que se obtuvo no fue la esperada de los 75 kg/cm<sup>2</sup>, sino que se obtuvo una máxima de 18 kg/cm<sup>2</sup> equivalente a 180 t/m<sup>2</sup>, esto representa cualidades suficientes para su uso en la construcción en elementos que se especifiquen como no estructurales bajo la norma NMX-C486-ONNCCE. Por otro lado, se logró obtener un material con menor densidad, con un rango de valores entre 0.9 y 1.04 g/cm<sup>3</sup>, representando aproximadamente el 60% de la densidad, siendo estos menores al testigo que es de 1.6 g/cm<sup>3</sup>, por lo que sí cumple cabalmente con este rubro.

Estos resultados obtenidos son importantes, porque se logró crear un nuevo mortero capaz de ser utilizado en la industria de la construcción, la resistencia alcanzada, así como la baja densidad obtenida, son aptas para que puedan utilizarse en acabados dentro de la obra, como enjarres o aplanados no finos, rellenos, entortados, además porque se logró integrar materiales reciclados a la mezcla, como el caucho proveniente de neumáticos que contrarrestan el problema de contaminación en vertederos, rellenos sanitarios, ríos y calles. Por otro lado, los resultados obtenidos evidencian que el material obtuvo una deformación muy alta, describiendo un comportamiento dúctil a la falla, esto es importante porque favorece a que las estructuras sean más estables en caso de un siniestro.

Las aportaciones de este material, según las características observadas son:

- Ligereza, puesto que su densidad anda por debajo del 60% de un mortero tradicional. Por lo que es muy recomendable su empleo en azoteas y entresijos, ya que, su bajo peso favorecerá al diseño estructural de las cubiertas.

- Resistencia, a pesar de que no se lograron mayores a 20 kg/cm<sup>2</sup>, su uso no se limita para acabados, rellenos, etc.
- Ductilidad, permite que sea un material óptimo en las juntas constructivas entre edificios, así mismo, en los muros, ya que, evitará el agrietamiento de los mismos al eliminar la fragilidad que se obtiene al emplear un mortero tradicional.

Para el seguimiento de este tema de investigación se recomienda lo siguiente:

- Materiales

- Ser materiales puros y que no estén mezclados con algún otro material anexo a la investigación.
- Los moldes elaborados de aluminio, fierro o acero, no son funcionales, ya que el material se adhiere con mayor fuerza y es difícil su extracción hasta el grado de dañar la probeta.
- La madera es un buen material para este diseño de molde. A este se le implementa aceite para que no se hinche por la humedad y pueda ser fácil la extracción de las probetas

- Elaboración de las probetas

- Deben de obtener ayuda gente preparada en el tema para la elaboración de las probetas.
- Es indispensable el vibrado del material para extraer el aire.
- La arena dentro de la mezcla de mortero se debe mantener y sustituirla parcialmente pero no en su totalidad

- Pruebas

- Se deberá obtener apoyo en el manejo de maquinaria y equipo dentro de la elaboración de la prueba.

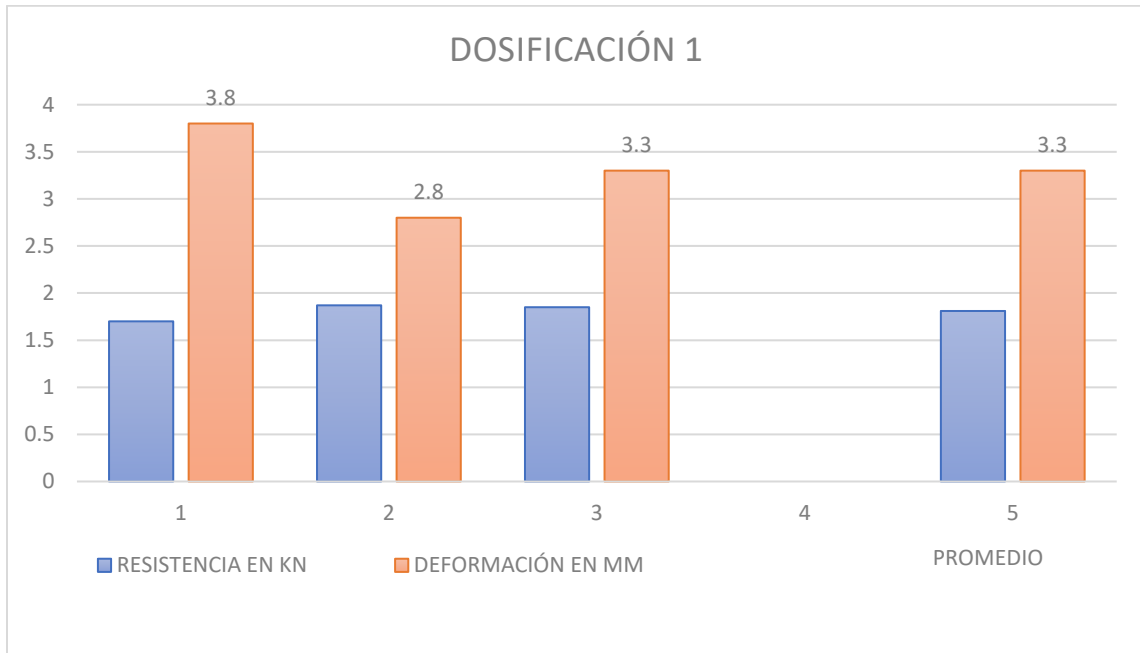
- Tener ayuda para la evidencia fotográfica, ya que se deben de capturar etapas como la estructuración de la gráfica, el momento de compresión del material y la captura de datos.

Finalmente, este trabajo se presenta como un avance exploratorio, siendo necesario complementarlo con la investigación sobre el comportamiento de este nuevo material a la intemperie.

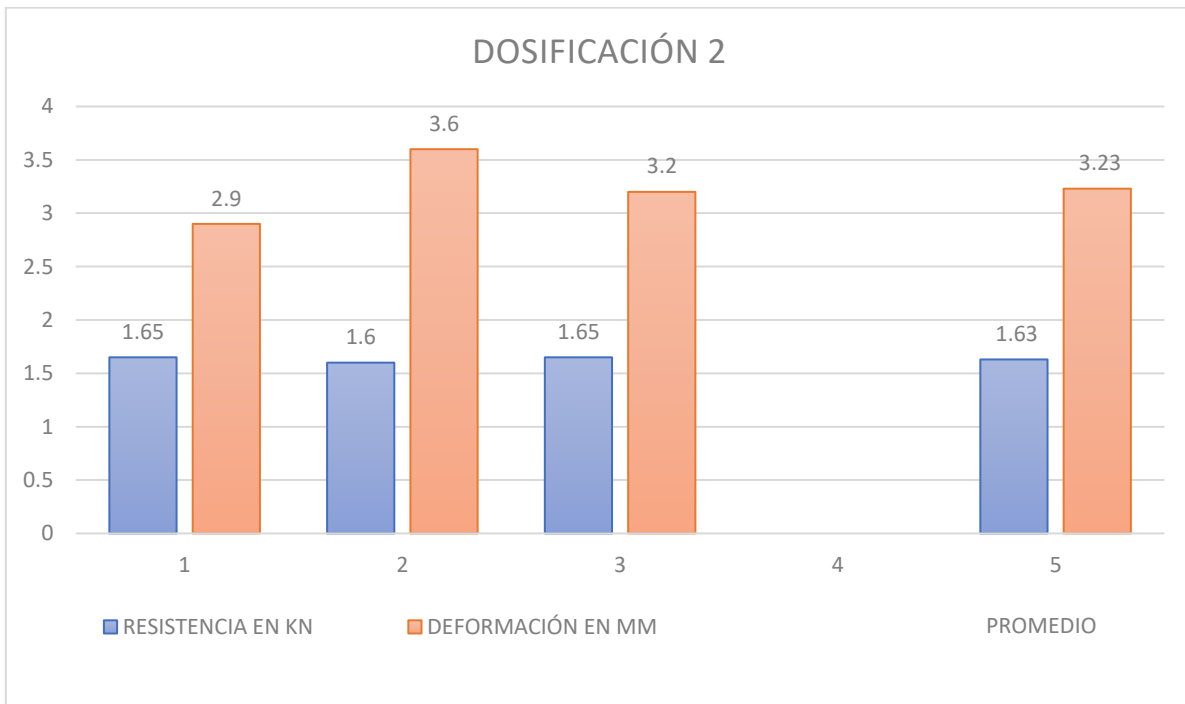
Al término de las pruebas realizadas y en análisis de los datos se generan nuevas preguntas de investigación como:

- ¿La reducción del tamaño de las partículas de caucho puede mejorar la aleación de los materiales?
- ¿Si se reduce la dosificación del agua en las mezclas se podrá obtener una mayor resistencia en las probetas?

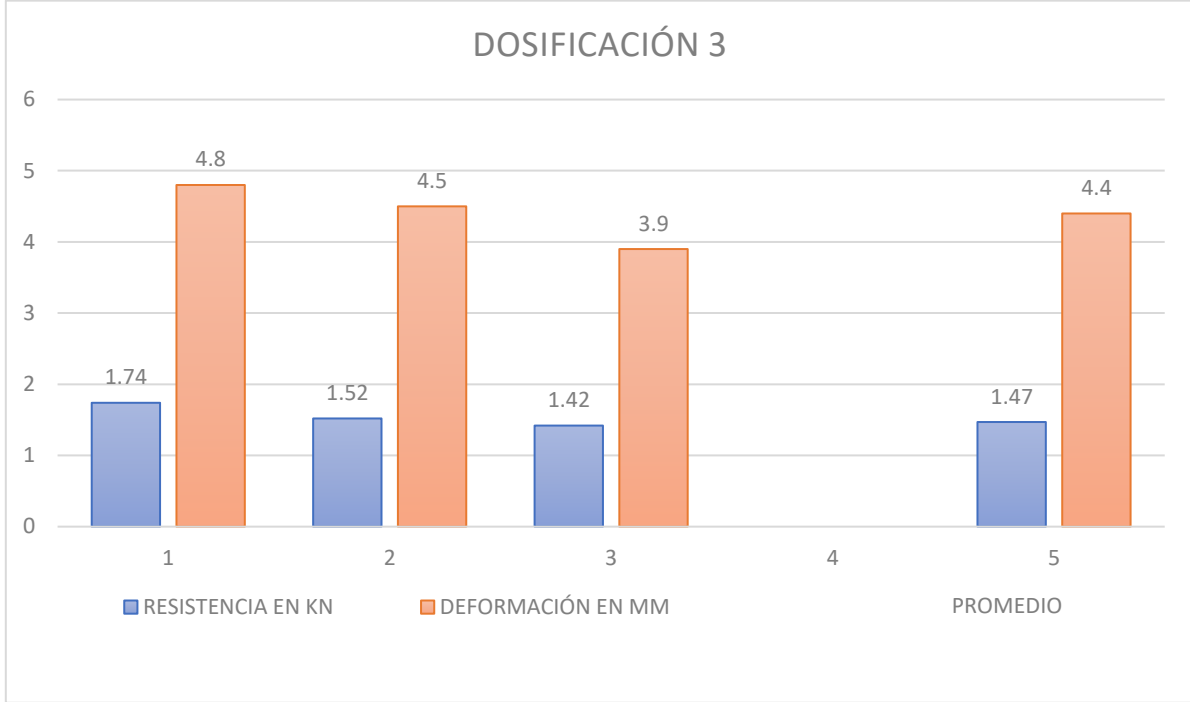
## ANEXOS



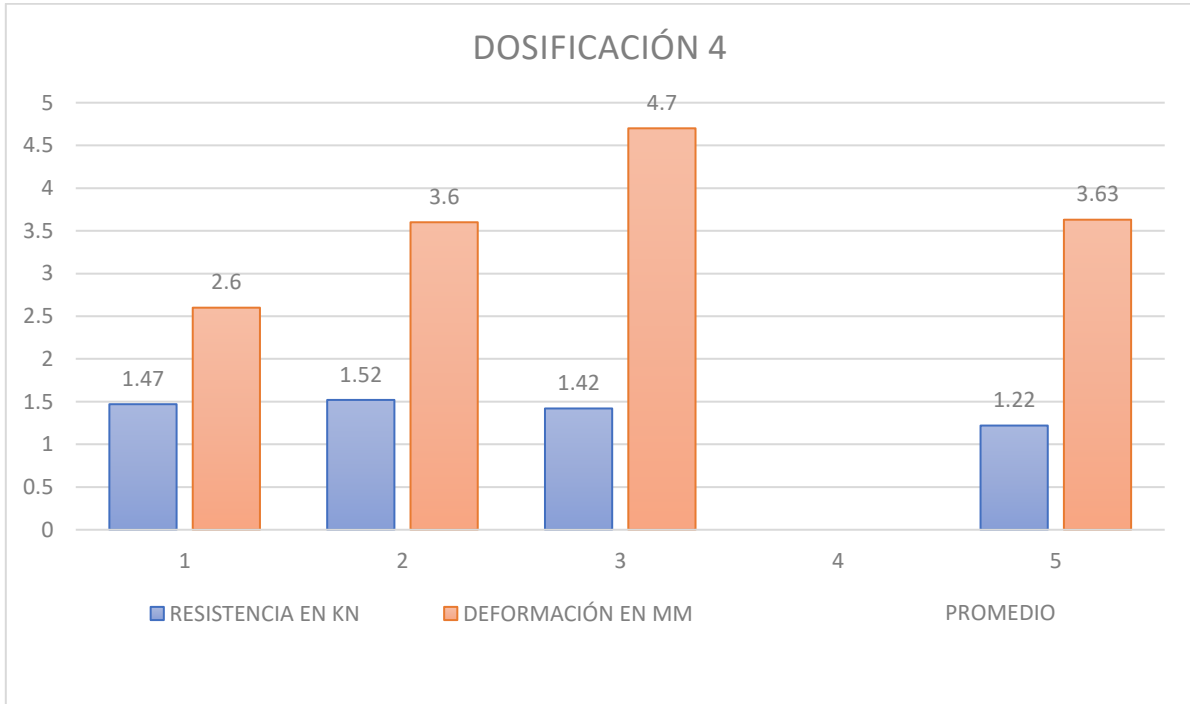
Gráfica de la dosificación 1



Gráfica de la dosificación 2

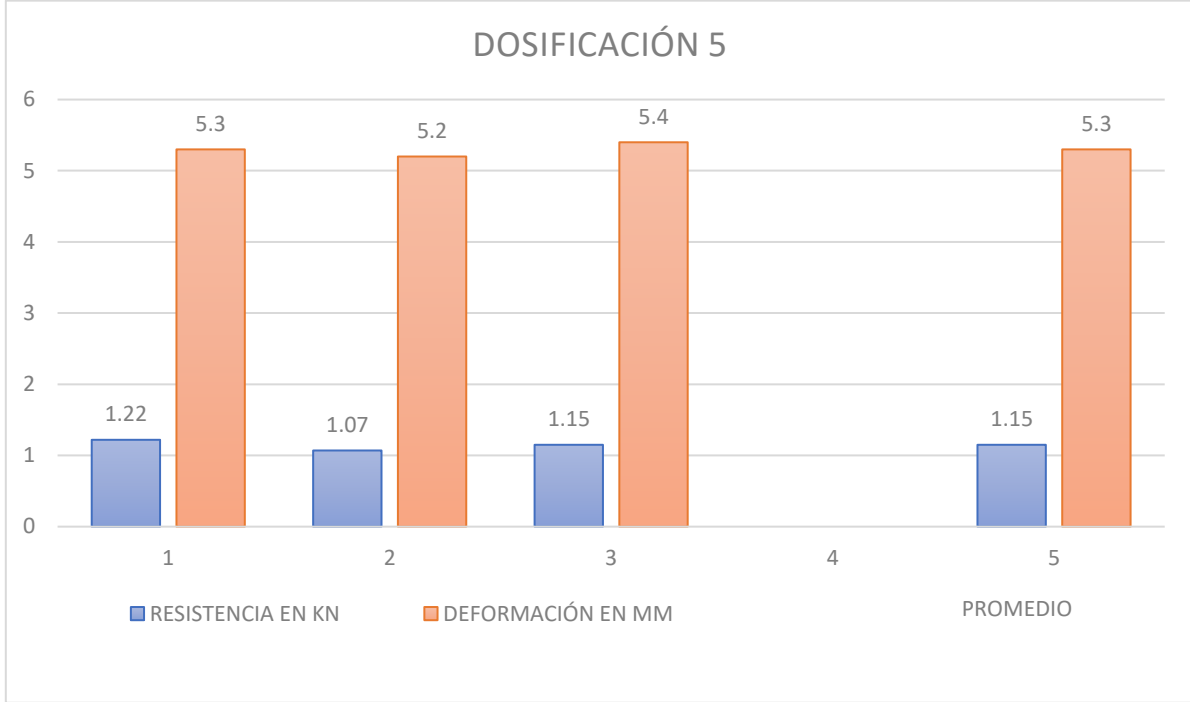


Gráfica de la dosificación 3

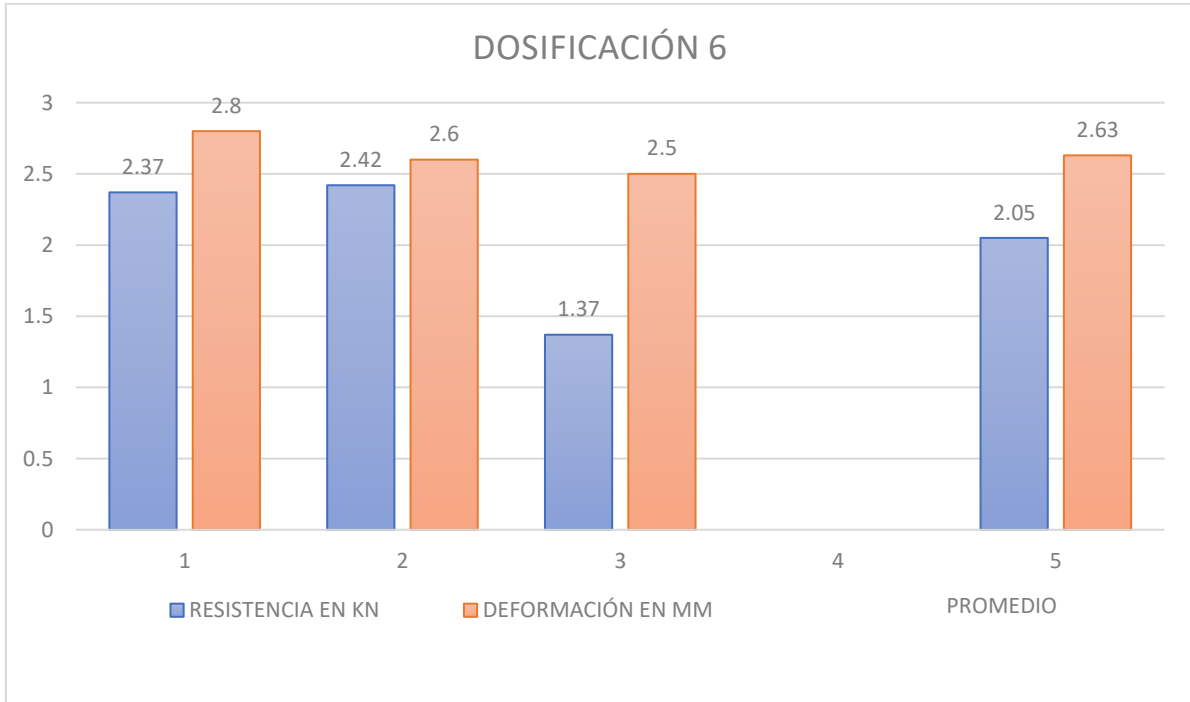


Gráfica de la dosificación 4

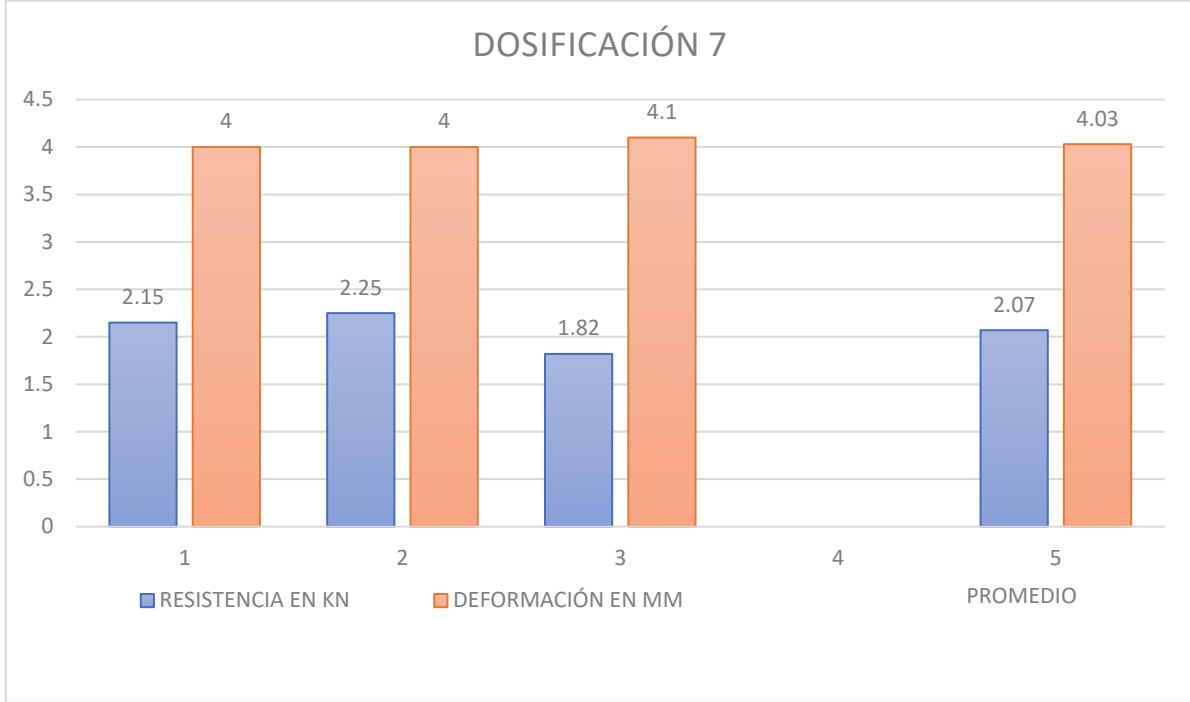




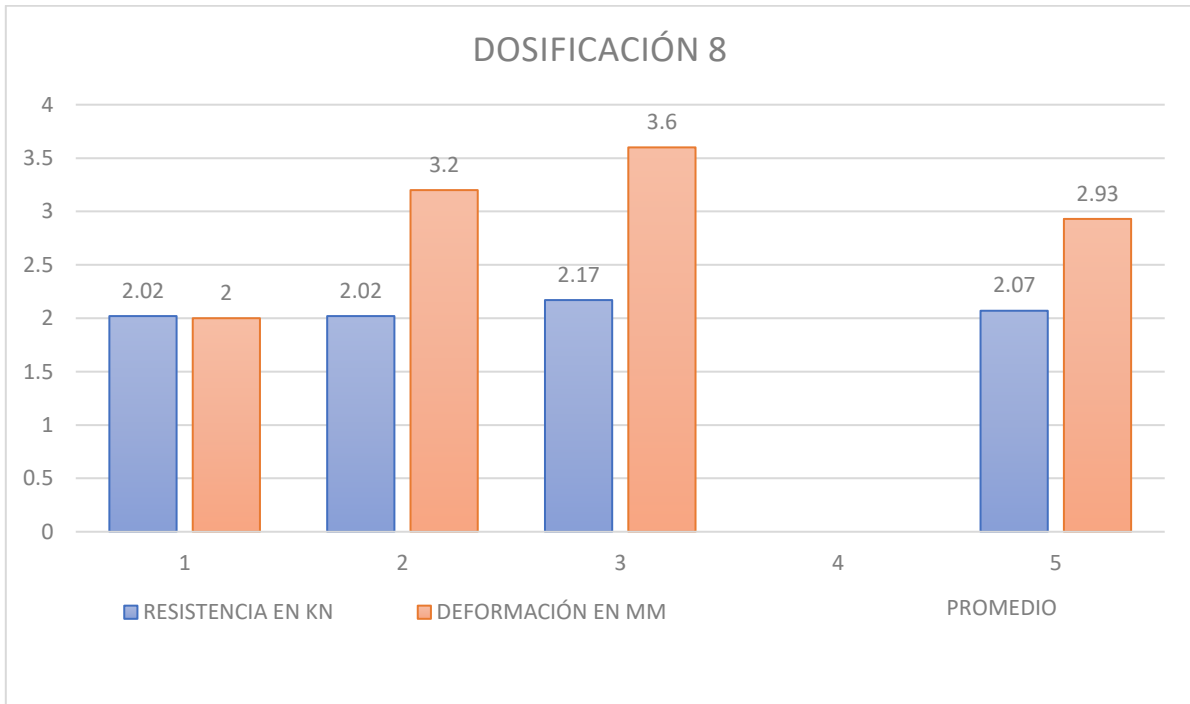
Gráfica de la dosificación 5



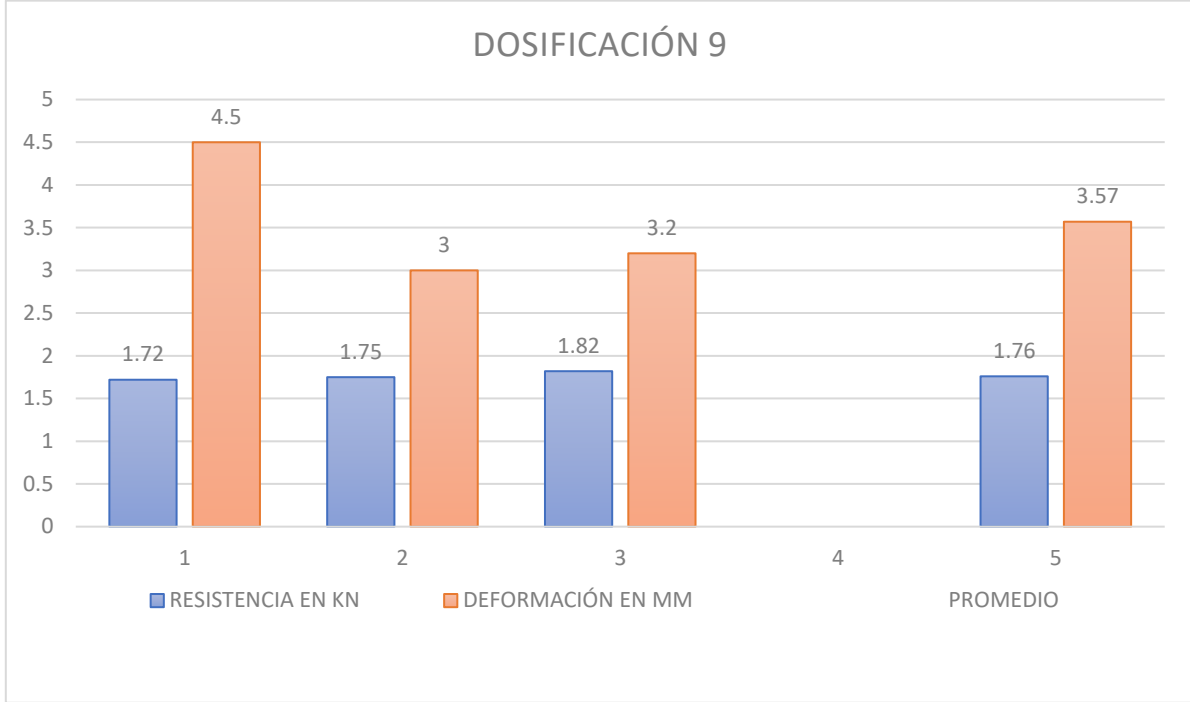
Gráfica de la dosificación 6



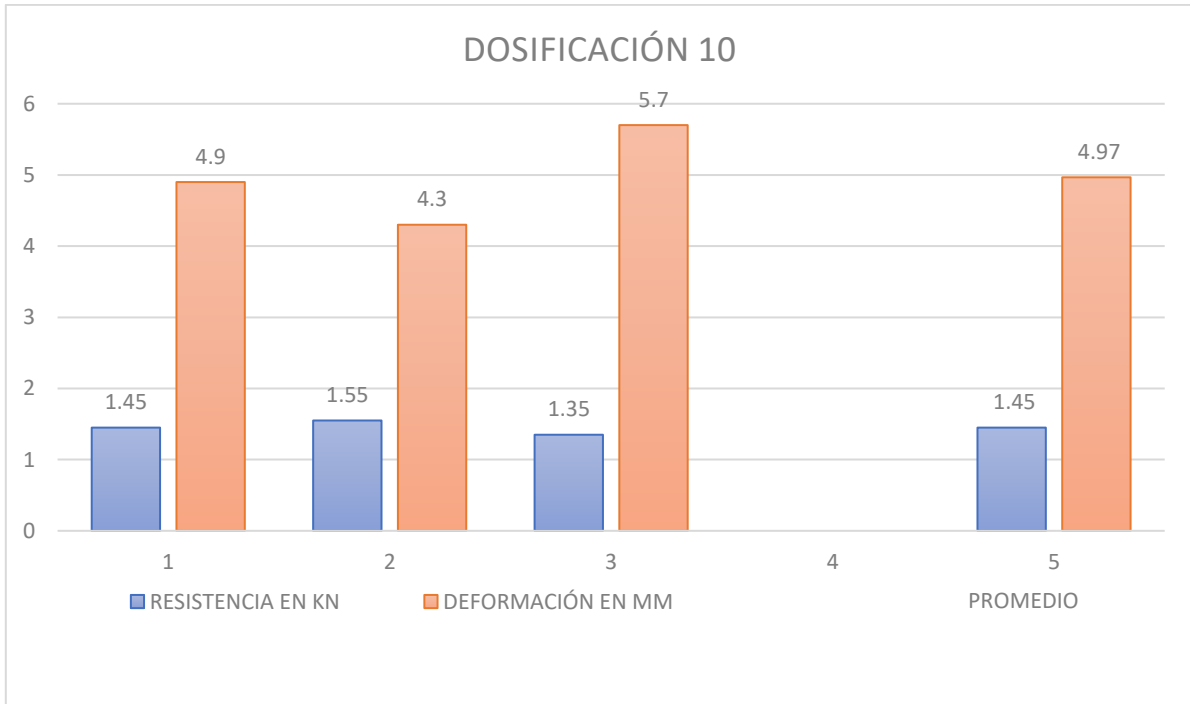
Gráfica de la dosificación 7



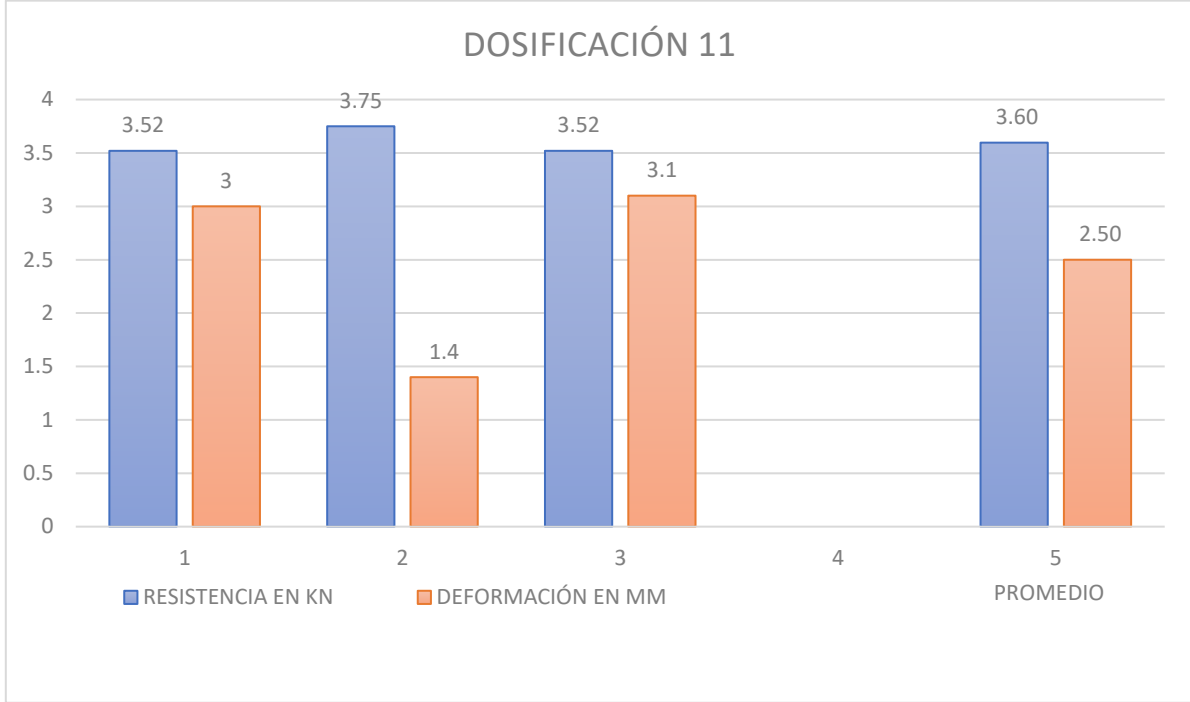
Gráfica de la dosificación 8



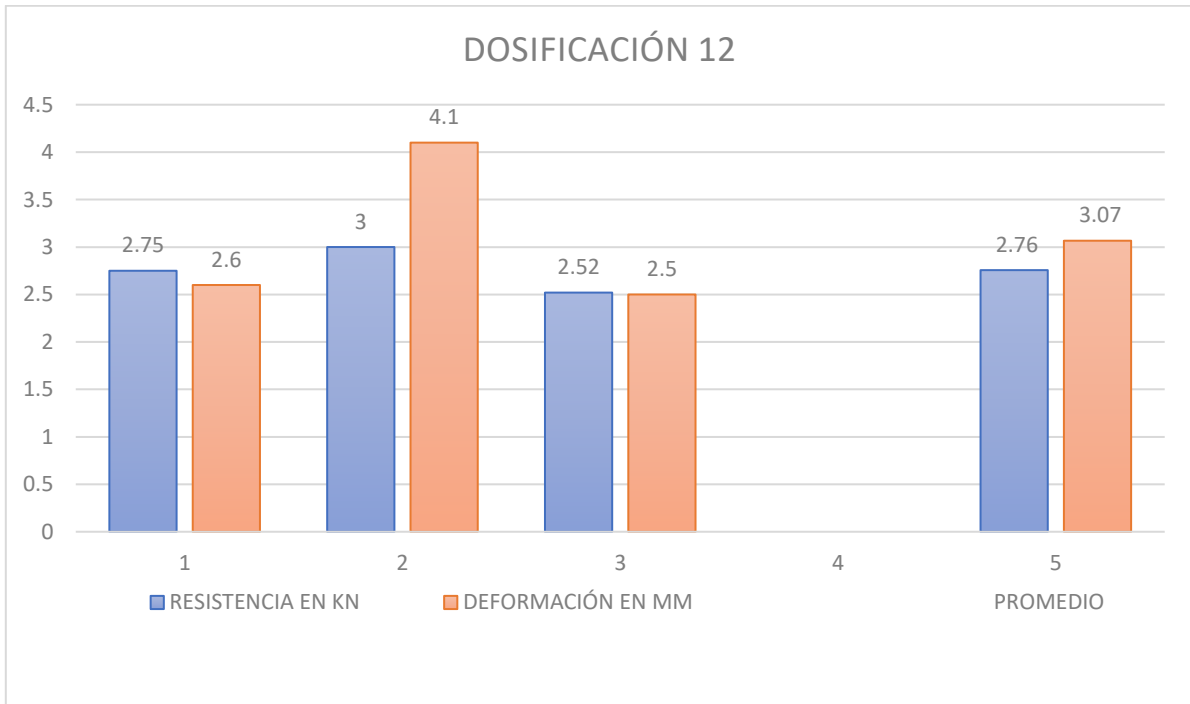
Gráfica de la dosificación 9



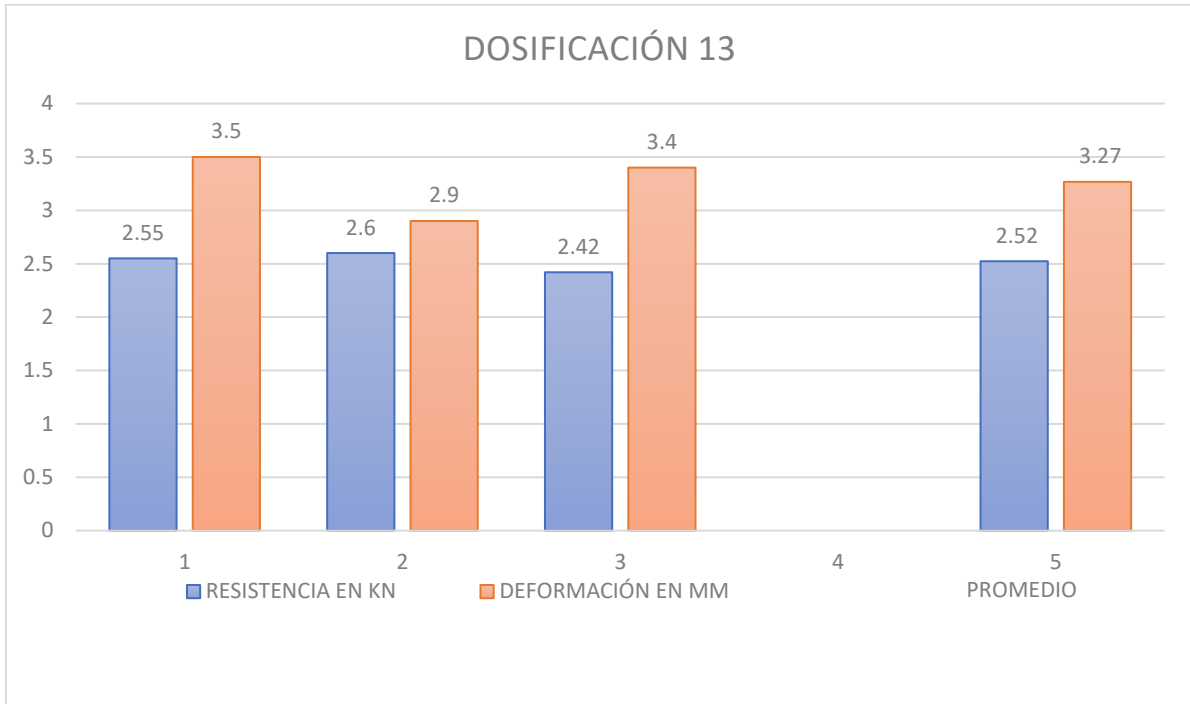
Gráfica de la dosificación 10



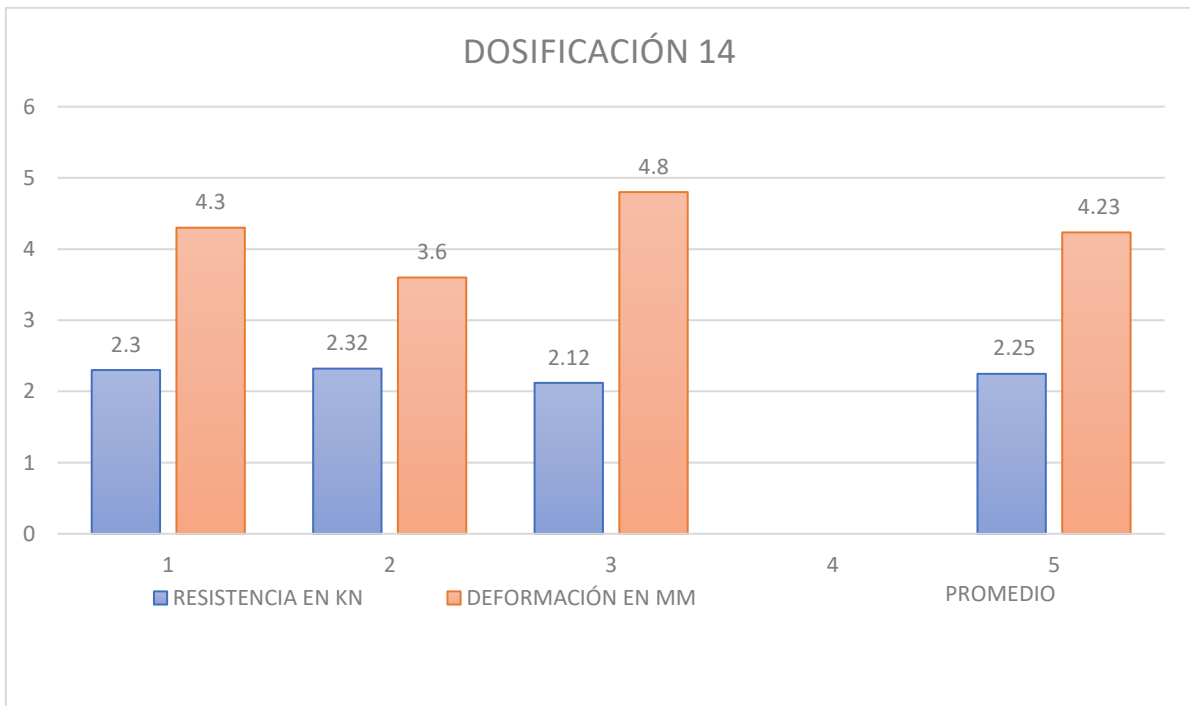
Gráfica de la dosificación 11



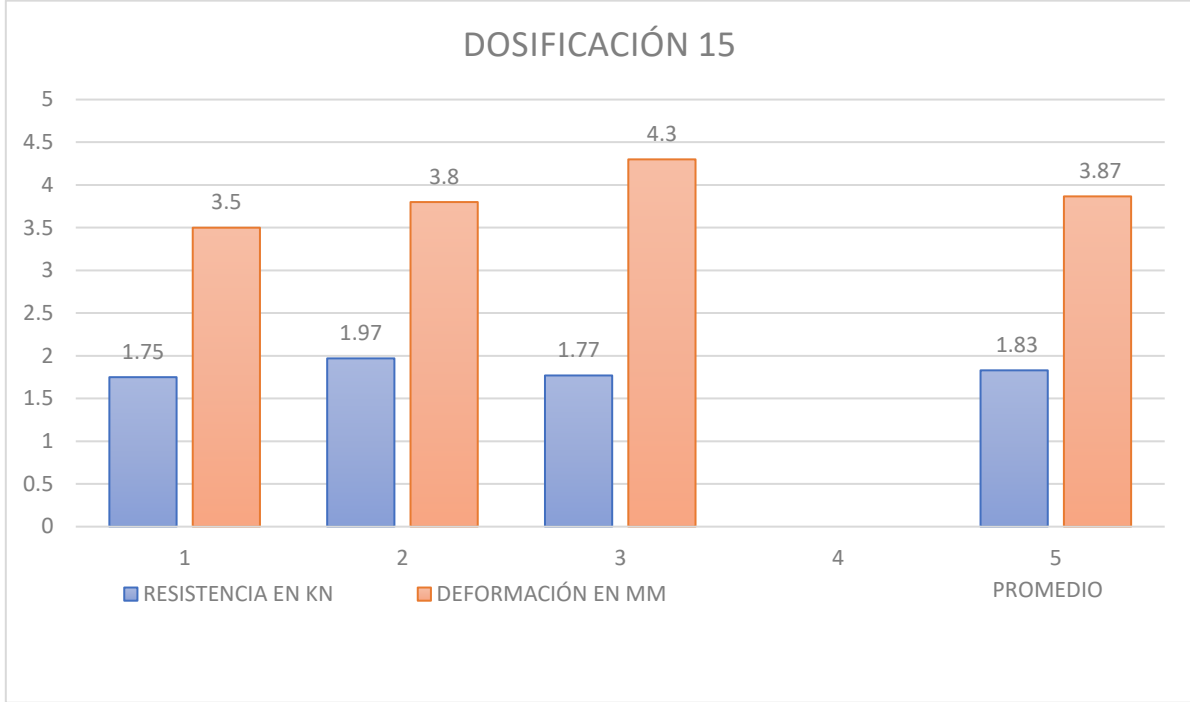
Gráfica de la dosificación 12



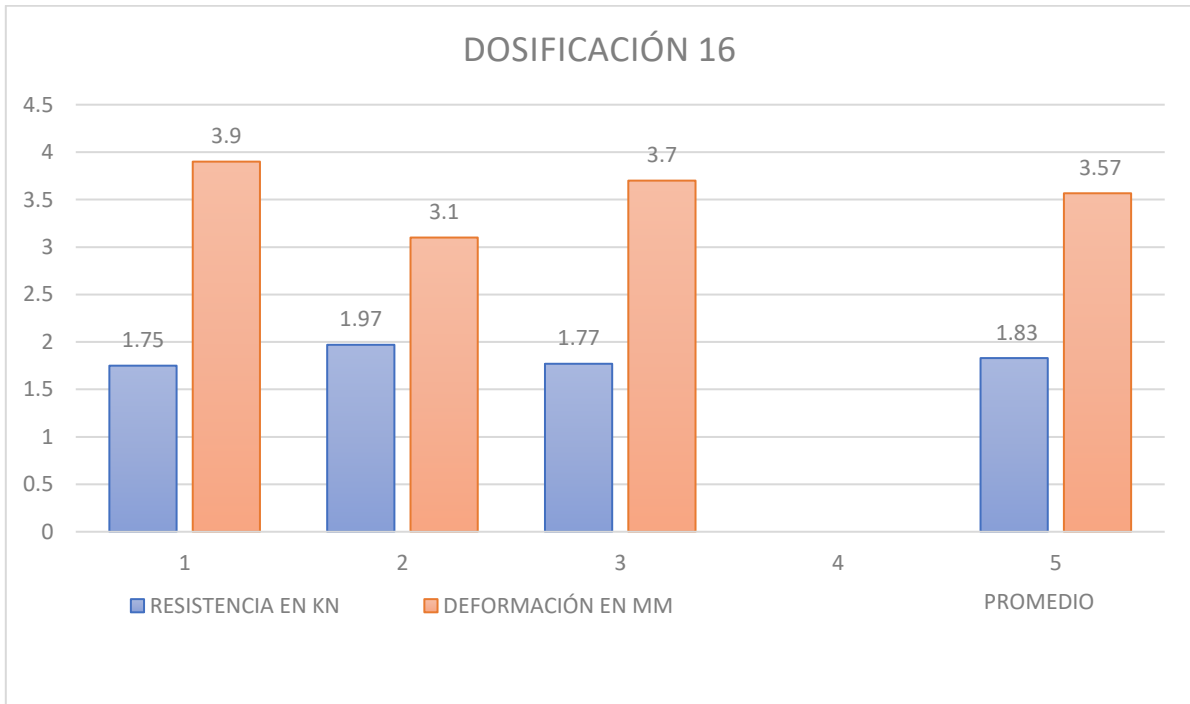
Gráfica de la dosificación 13



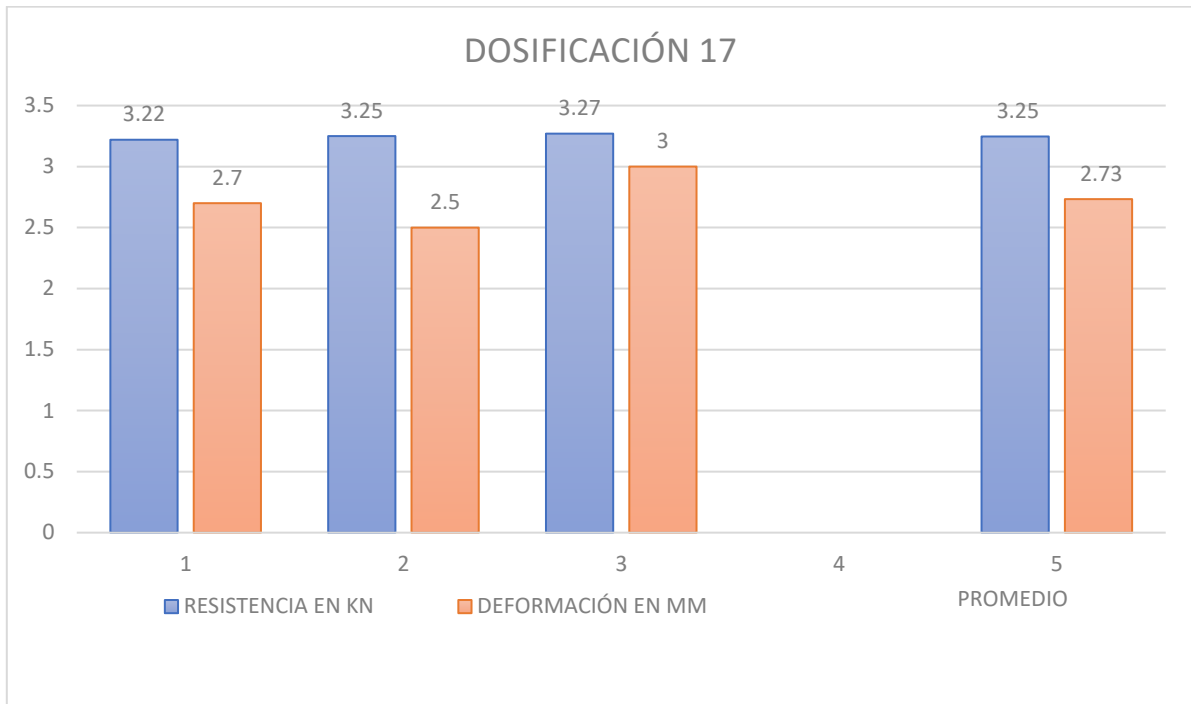
Gráfica de la dosificación 14



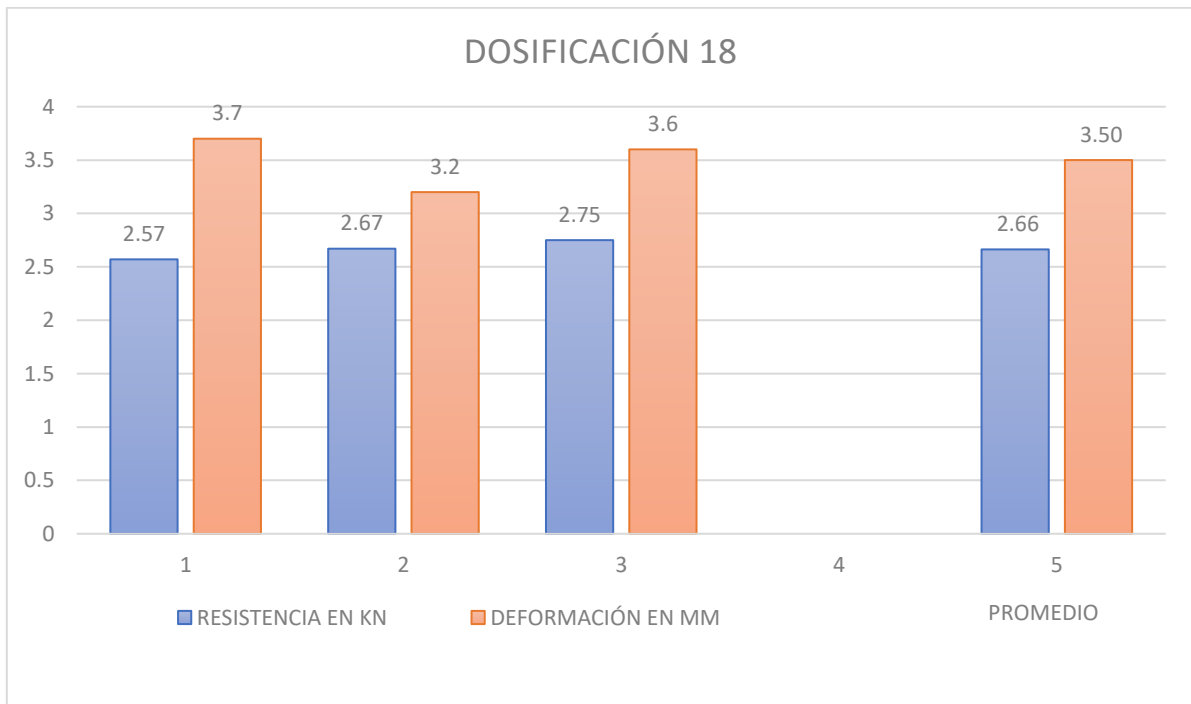
Gráfica de la dosificación 15



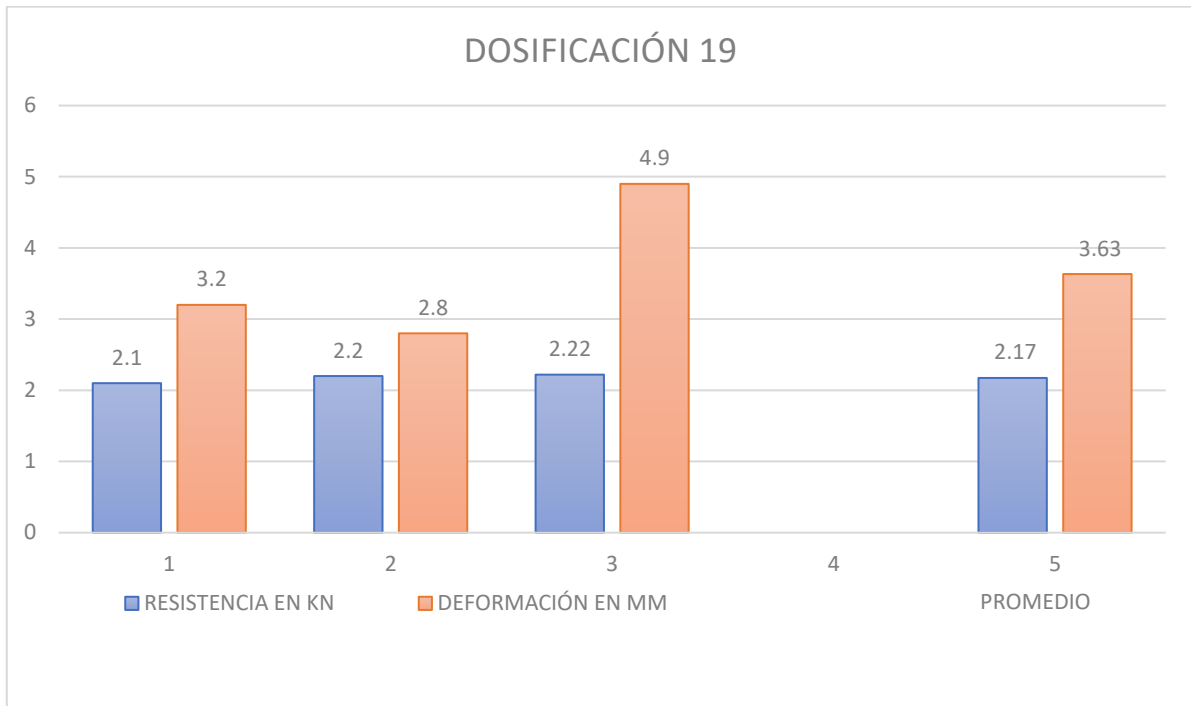
Gráfica de la dosificación 16



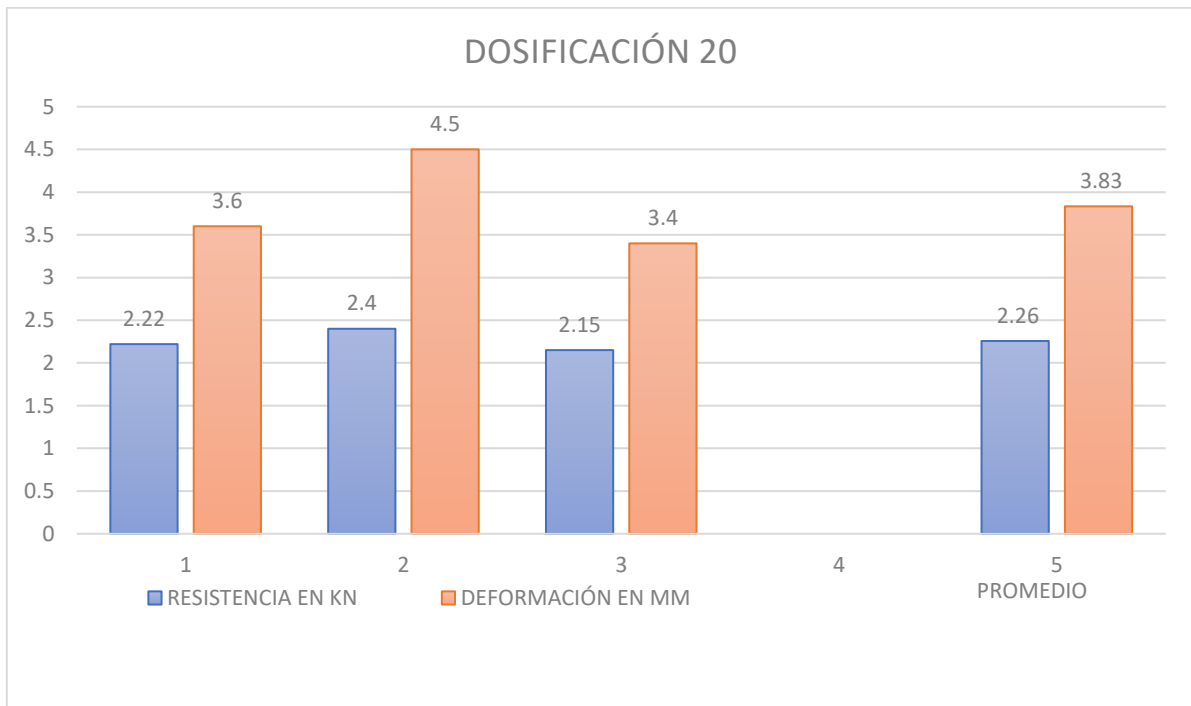
Gráfica de la dosificación 17



Gráfica de la dosificación 18

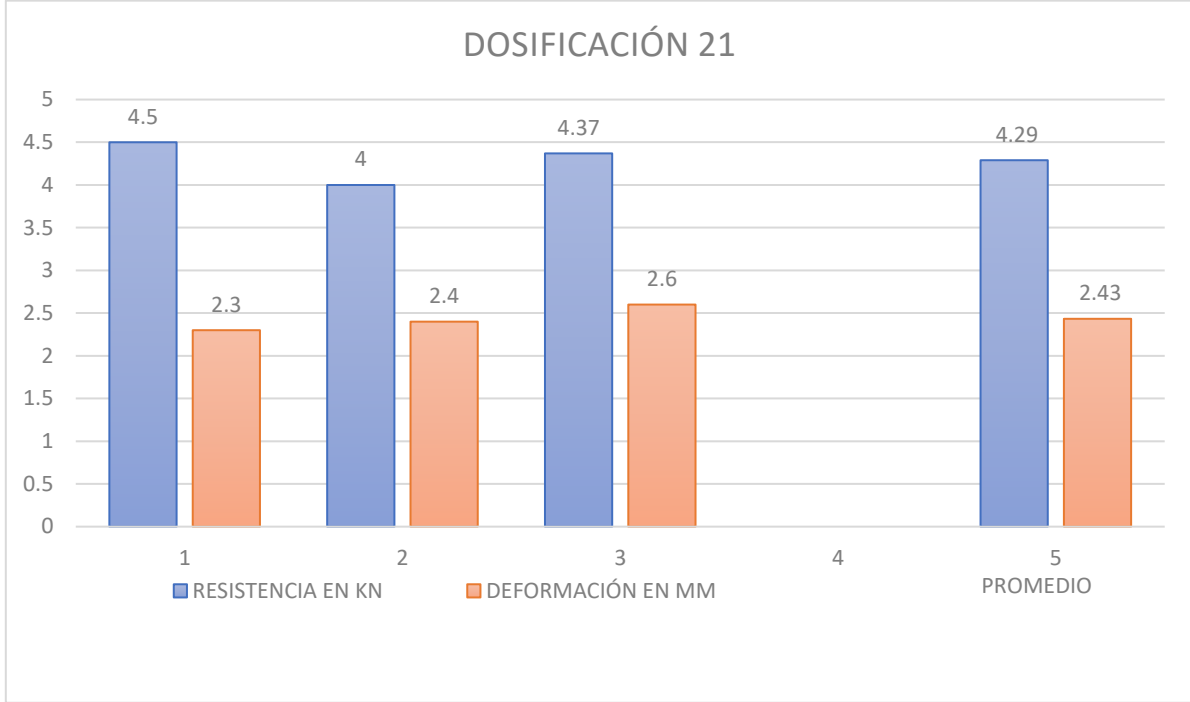


Gráfica de la dosificación 19

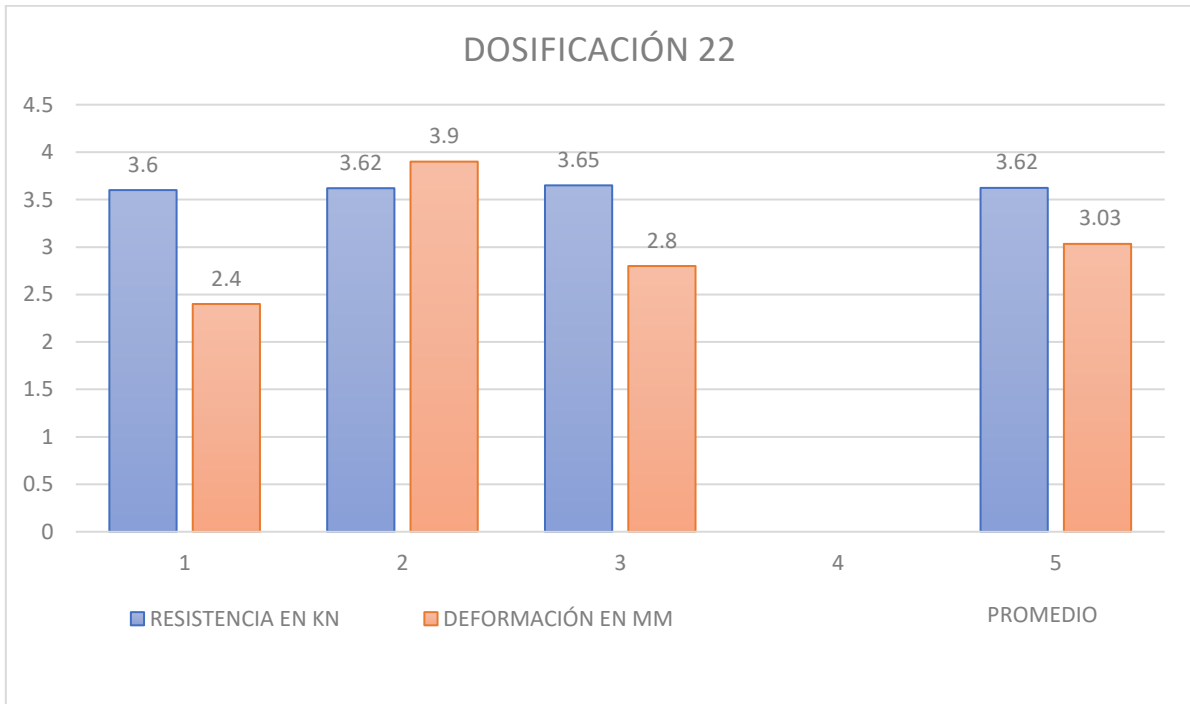


Gráfica de la dosificación 20

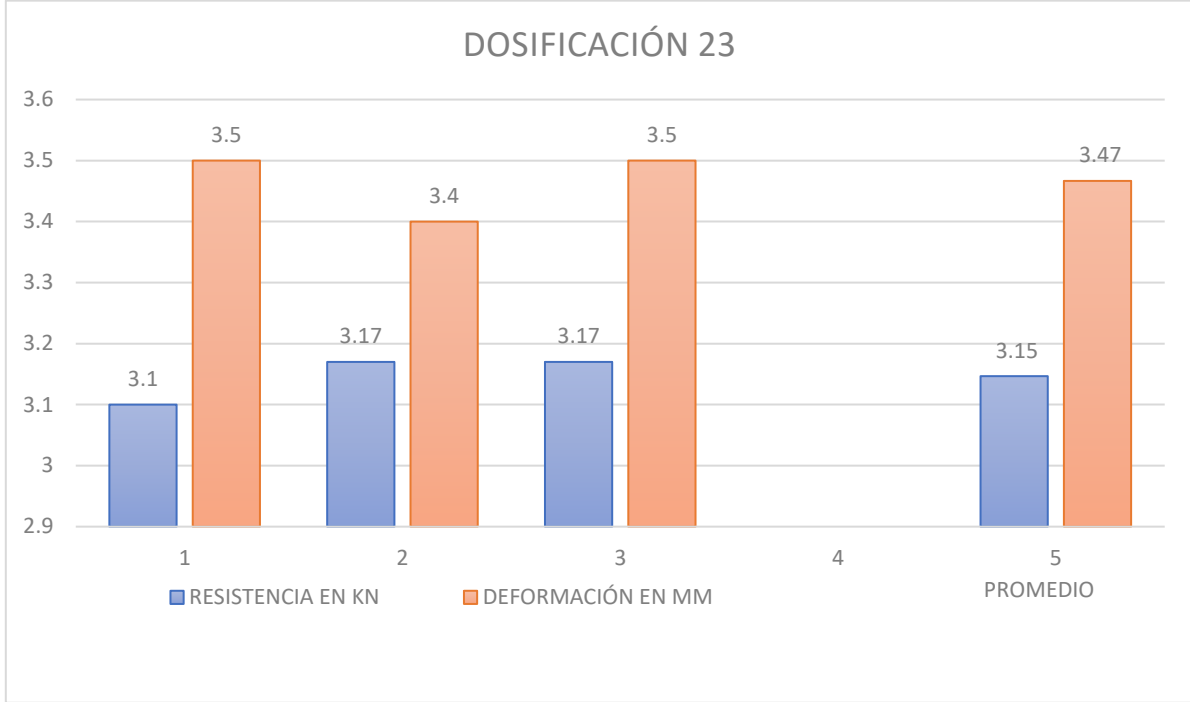




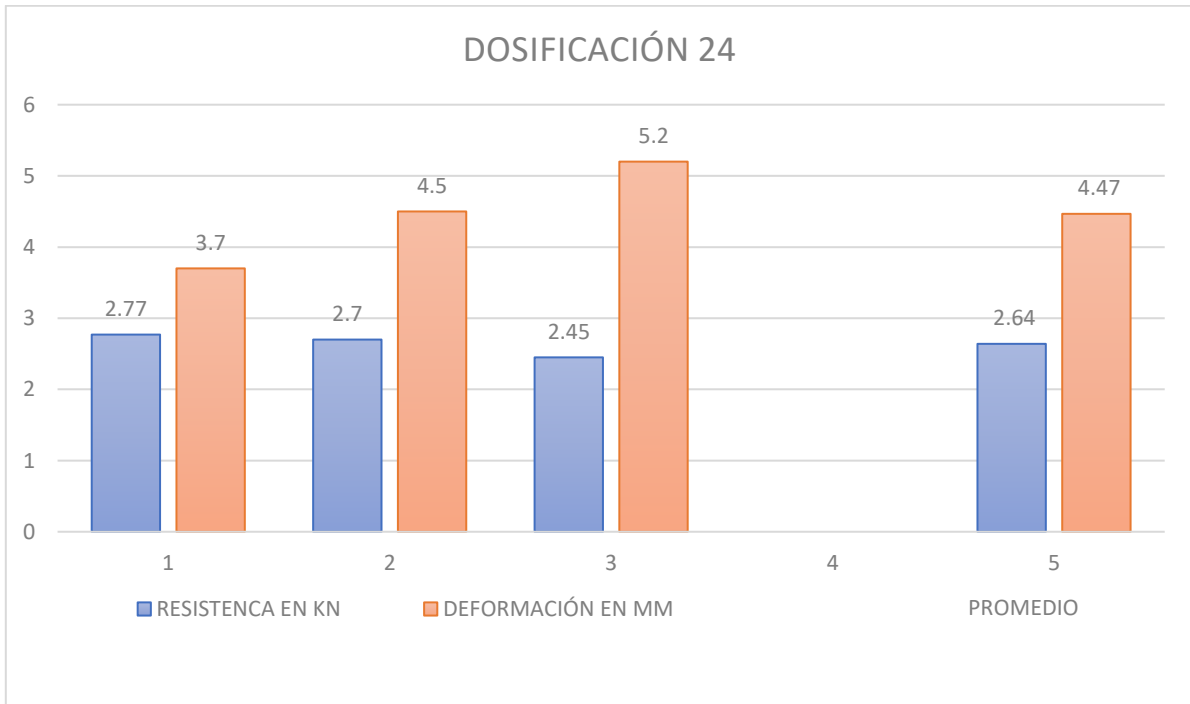
Gráfica de la dosificación 21



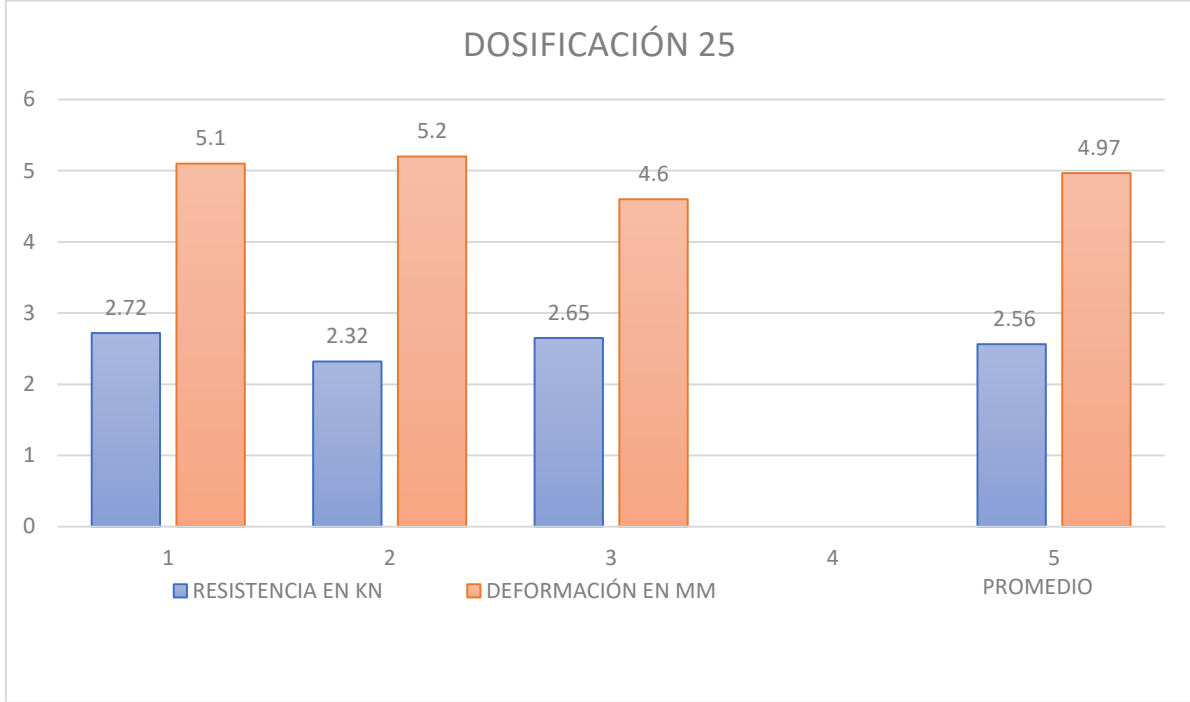
Gráfica de la dosificación 22



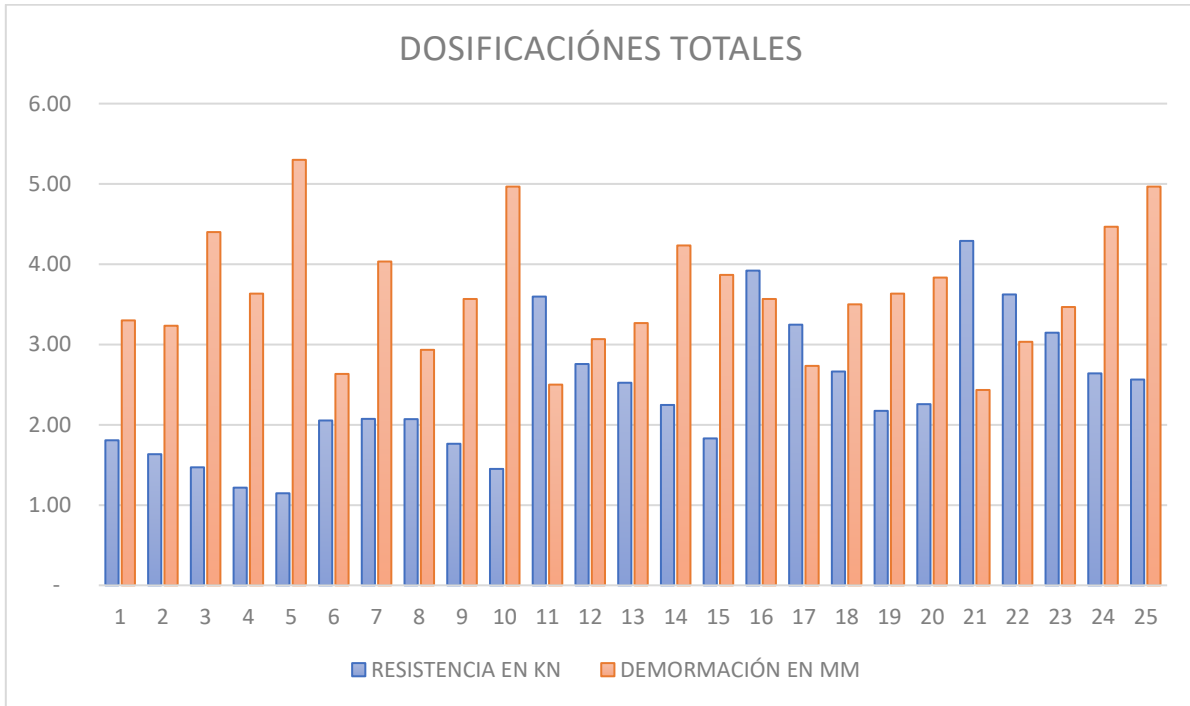
Gráfica de la dosificación 23



Gráfica de la dosificación 24



Gráfica de la dosificación 25.



Gráfica del promedio de las 25 dosificaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SANEAMIENTO DE SITIOS CONTAMINADOS CON LLANTAS DE DESECHO Y GESTIÓN DE RESIDUOS DE LLANTAS DE DESECHO.

<http://www.borderlegislators.org/Meetings/XIX%20Tampico/Power%20Point%20Presentations/Edgar%20Del%20Villar%20Alvelais,%20SEMARNAT.pdf>

MATERIALES CEMENTANTES COMPUESTOS (CCM): ESTADO DEL ARTE, SITUACIÓN ACTUAL Y APLICACIONES EN LA INGENIERÍA CIVIL

[https://www.researchgate.net/profile/Luisa\\_Viera/publication/339106392\\_Materiales\\_Cementantes\\_Compuestos\\_ccm\\_estado\\_del\\_arte\\_situacion\\_actual\\_y\\_aplicaciones\\_en\\_la\\_Ingenieria\\_Civil/links/5e3d9ef2a6fdccd96590ce1a/Materiales-Cementantes-Compuestos-ccm-estado-del-arte-situacion-actual-y-aplicaciones-en-la-Ingenieria-Civil.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Luisa_Viera/publication/339106392_Materiales_Cementantes_Compuestos_ccm_estado_del_arte_situacion_actual_y_aplicaciones_en_la_Ingenieria_Civil/links/5e3d9ef2a6fdccd96590ce1a/Materiales-Cementantes-Compuestos-ccm-estado-del-arte-situacion-actual-y-aplicaciones-en-la-Ingenieria-Civil.pdf)

HISTORIA, CARACTERIZACIÓN Y RESTAURACIÓN DE MORTEROS

<https://books.google.com.mx/books?id=lokp->

ESCALA DE DUREZA DE MOHS

[mGpGWoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false](https://www.interelectronix.com/es/que-es-la-escala-de-dureza-de-mohs.html)

<https://www.interelectronix.com/es/que-es-la-escala-de-dureza-de-mohs.html>

Y. YIFTAH EL: A NEOLITHIC VILLAGE FROM THE SEVENTH MILLENIUM BC IN THE LOWER GALILEE. ISRAEL

[https://www.academia.edu/31450667/Y. Garfinkel. 1987. Yiftahel A Neolithic Village from the Seventh Millennium B.C. in Lower Galilee Israel. Journal of Field Archaeology 14 199 212](https://www.academia.edu/31450667/Y._Garfinkel._1987._Yiftahel_A_Neolithic_Village_from_the_Seventh_Millennium_B.C._in_Lower_Galilee_Israel._Journal_of_Field_Archaeology_14_199_212)

STONE CONSERVATION AN OVERVIEW OF CURRENT RESEARCH

[http://www.getty.edu/conservation/publications\\_resources/pdf\\_publications/pdf/stoneconservation.pdf](http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/stoneconservation.pdf)

CARACTÉRISATION DES MORTIERS PHARAONIQUES DU TEMPLE D'AMON À KARNAK

[https://www.academia.edu/24236501/Caract%C3%A9risation\\_des\\_mortiers\\_pharaoniques\\_du\\_temple\\_dAmon\\_%C3%A0\\_Karnak](https://www.academia.edu/24236501/Caract%C3%A9risation_des_mortiers_pharaoniques_du_temple_dAmon_%C3%A0_Karnak)

LA 'RECETA' DE LOS ANTIGUOS ROMANOS PARA CONSEGUIR UN HORMIGÓN SUPERRESISTENTE AL PASO DEL TIEMPO.

<https://www.elmundo.es/ciencia-y-salud/ciencia/2017/07/03/595a59f5e2704e852d8b456f.html>

COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN MEZCLAS DE CAL HIDRATADA, CENIZA Y ROCA VOLCÁNICA (PIEDRA PÓMEZ), EN SUSTITUCIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.

<https://citt.itsm.edu.mx/ingeniantes/articulos/ingeniantes7no2vol1/8%20Comportamiento%20t%C3%A9rmico%20en%20mezclas%20de%20cal%20hidratada,%20ce niza%20y%20roca%20volc%C3%A1nica.pdf>

PROPUESTA PARA LA DOCUMENTACIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LAS TÉCNICAS CONSTRUCTIVAS ROMANAS

<https://digital.csic.es/bitstream/10261/137789/1/tecnicasconstructivasromana.pdf>

“CARACTERIZACIÓN Y ESTUDIO, DE LOS MORTEROS Y MATERIALES PÉTREOS, EN LAS RUINAS DE LA CIUDAD DE POMPEYA”.

<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/11696/1/Es2.pdf>

EFFECTOS DE LA CASEÍNA COMO ADITIVO EN LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS PARA EL DESARROLLO DE MORTEROS.

<http://repositoriodigital.ucsc.cl/bitstream/handle/25022009/1147/Rodrigo%20Ivan%20Cid%20Cid.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

HISTORIA, CARACTERIZACION Y RESTAURACION DE MORTEROS.

[https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=lokp-mGpGWoC&oi=fnd&pg=PA9&dq=historia+del+mortero&ots=aE3UaYaD\\_K&sig=BrSD8Suwdw6fDCI0XnWcj7zGMI8#v=onepage&q=historia%20del%20mortero&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=lokp-mGpGWoC&oi=fnd&pg=PA9&dq=historia+del+mortero&ots=aE3UaYaD_K&sig=BrSD8Suwdw6fDCI0XnWcj7zGMI8#v=onepage&q=historia%20del%20mortero&f=false)

MORTEROS

[https://previa.uclm.es/area/ing\\_rural/trans\\_const/tema9.pdf](https://previa.uclm.es/area/ing_rural/trans_const/tema9.pdf)

PIEDRA PÓMEZ

[https://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2003\\_04/PPOMEZ03.pdf](https://www.igme.es/PanoramaMinero/Historico/2003_04/PPOMEZ03.pdf)

ARENAS

[http://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201\\_PPTP\\_217\\_V03.pdf](http://www.elorrio.eus/es-ES/Ayuntamiento/Perfil-Contratante/2014%20Proyecto%20de%20urbanizacion%20del%20vial%20y%20puente6/P1201_PPTP_217_V03.pdf)

MATERIALES Y COMPUESTOS PARA LA INDUSTRIA DEL CAUCHO

[https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material\\_Complementario/Materiales\\_y\\_Compuestos\\_para\\_la\\_Industria\\_del\\_Neumatico.pdf](https://campus.fi.uba.ar/file.php/295/Material_Complementario/Materiales_y_Compuestos_para_la_Industria_del_Neumatico.pdf)

AGUA

[https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_12/pdf/Cap6\\_agua.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_12/pdf/Cap6_agua.pdf)

<https://www.gob.mx/semarnat>

<http://www.fao.org/home/es/>

EL AGUA

<http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/000001/cap4.pdf>

JALCRETO

<https://www.acepconcretos.com/2021/02/07/jalcreto-sus-principales-ventajas/>

CREAN ARTÍCULOS SUSTENTABLES CON LLANTAS USADAS

<https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Crean-articulos-sustentables-con-llantas-usadas-20181203-0056.html>

DIN 1306. CONCEPTOS

<https://www.scribd.com/document/526908306/DIN-1306>

## FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS Y CITADAS

*SEMARNAT, (2009). Saneamiento de sitios contaminados con llantas de desecho y gestión de residuos de llantas de desecho. Secretaría de Fomento y Normatividad Ambiental. 12 de marzo del 2009.*

*Juan Castorena, (2020). Gaceta Oficial de la ciudad de México. Ciudad de México, México.*

*Gobierno de España, (2019). Dirección General de Política Energética y Minas del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.*

*Diario Oficial de la Federación, (2004). NMX-C-155-ONNCCE-2004. Norma mexicana, industria de la construcción-concreto-concreto hidráulico industrializado-especificaciones. 01 de marzo del 2005.*

*ACEP Concretos, (2021). Jalcreto. Sus principales ventajas. Aguascalientes, México.*

*Guillermo Castro, (2008). Materiales y Compuestos para la Industria del Neumático. Departamento de Ingeniería Mecánica F.I.U.B.A.*

*CONAGUA, (2011). CONAGUA, SEMARNAT. Estadísticas del Agua en México. Agua.*

*Almeida (2011). Utilización de Fibras de Caucho de Neumáticos Reciclados en la Elaboración de Bloques de Mampostería para Mitigar el Impacto Ambiental en el Cantón Ambato. Ambato – Ecuador.*

*Elizabeth Meza Rodríguez (2018). Crean Artículos Sustentables Con Llantas Usadas - El Economista. 03 de Diciembre de 2018*

*M. Farfán\* E. Leonardo\* (2018) Caucho Reciclado en la Resistencia a la Compresión y Flexión de Concreto Modificado con Aditivo Plastificante. Universidad César Vallejo. Trujillo, Perú.*

*Juan Carlos Pérez Oyola - Yeison Leonardo Arrieta Ballén (2017) Estudio Para Caracterizar Una Mezcla De Concreto Con Caucho Reciclado En Un 5% En Peso Comparado Con Una Mezcla De Concreto Tradicional de 3500 PSI. Universidad Católica De Colombia Facultad de Ingeniería Programa De Ingeniería Civil Bogotá D. C. 2017.*

*Carpio López Víctor Andrés<sup>1</sup> , Viera Arroba Luisa Paulina<sup>2</sup> (2018). Materiales Cementantes Compuestos (ccm): estado del arte, situación actual y aplicaciones en la Ingeniería Civil. Universidad Central de Ecuador.*

*Héctor Moreno, Sara Ibañez, (2018). La Escala de Mhos -Dureza en los Materiles. Universidad Politécnica de Valencia, España.*

*Malinowski, R.; Slatkine, A.; Ben Yair, M. Durability of Roman mortars and concretes for hydraulic structures at Caesarea and Tiberias. RILEM, Prague. 1961.*

*Malinowski, R. Concretes and mortars in ancient aqueducts. Concrete International. 1979; 1: 66-76.*

*Garfinkel, Y. Yiftah El: A Neolithic Village from the Seventh Millenium BC in the Lower Galilee. Israel Journal of Field Archeology. 1987; 14: 199-214*

*Furlan, V. Causes, mechanisms and measurement of damage in cultural heritage materials. The state of the art - Mortars, bricks and renderings. Advanced workshop "Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones" Pavia (Italy), 14- 21 september, 1990.*

*Teresa Guerrero, (2017). La "receta" de los antiguos romanos para conseguir un hormigón super resistente al paso del tiempo. Revista digital "El Mundo". Madrid, España.*



*Christian Flores, José Guzmán, José Navarro, Luis García, (2020). Comportamiento térmico en mezclas de cal hidratada, ceniza y roca volcánica (piedra pómez), en sustitución del cemento Port- land. Revista "Ingeniantes". Colima, México.*

*Martinet, G.; Deloye, F.X.; Golvin, J.C. Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak. Bull.liaison Labo. P.et Ch. sept-oct 1992; 181: 39-45.*

*Antonio Pizzo (2010). Propuesta para la documentación y clasificación de las técnicas constructivas romanas. Università di Roma-La Sapienza. Dipartimento RADAAR*

*Rodrigo Iván Cid Cid 2017. EFECTOS DE LA CASEÍNA COMO ADITIVO EN LAS RESISTENCIAS MECÁNICAS PARA EL DESARROLLO DE MORTEROS. UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN*

*Rodríguez, 2018. Crean artículos sustentables con llantas usadas. Revista el Economista.*

*Yheison J. Guzmán y Esthefany L. Guzmán (2015) "Sustitución de los áridos por fibras de caucho de neumático reciclado en la elaboración del concreto estructural de Chimbote - 2015". Universidad de Nuevo Chimbote, Perú.*

*Irene Urrua (2006) "Hormigón con Caucho: Determinación del Módulo de Elasticidad". Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.*

*Cristian Peñaloza (2015), Comportamiento Mecánico de una Mezcla para Concreto Reciclado Usando Neumáticos Triturados como Reemplazo del 10% y 30% del Volumen del Agregado Fino para un Concreto con Fines de Uso Estructural. Universidad Católica de Colombia. Bogotá, Colombia.*

*Andrés Alquicira (2006), Estudio del comportamiento del concreto reforzado con fibras obtenidas del reciclado de llantas. Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México, México.*

*Herwin Eraso, Natalia Ramos (2015). Estudio del comportamiento mecánico del concreto, sustituyendo parcialmente el agregado fino por caucho molido recubierto con polvo calcáreo. Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad, Javeriana, Cali.*

*Cochran-Cox (1983). )Libro Diseños experimentales/por William G. Cochran y Gertrude M. Cox.*

*Oscar E. Magarinos ' ; Carlos E. Alderete »; Lucía E. Arias ' y AaríA A. Lucca (2014). Estudio de morteros que contienen escamas de plástico procedente de residuos post-industriales. Instituto de Tecnología Arquitectónica (ITA) Fac. de Arquitectura y Urbanismo -U. N. T. ' Instituto de Microbiología, Fac. de Bioquímica, Química y Farmacia - U. N. T.*

*Ley de Vivienda, (2006). Ley de Vivienda. Diario Oficiao de la Federación. 27 de junio de 2006. Estados Unidos Mexicanos.*

*Agenda 2030, (2015). Asambela General. Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La visión Nacional Hacia una Gestión Sustentable.*

*Ley General del Cambio Climático, (2012). Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos. Estados Unidos Mexicanos.*

*Gaceta Oficial de la ciudad de México, (2020), Gobierno de la ciudad de México. Órgano de Difusión del Gobierno de la Ciudad de México. 19 de octubre del 2020.*

*CEMEX, (2019). Hablando de Cementos Portland. Artículos de Construcción. 19 de junio del 2019.*

*CMT. Características de los Materiales, (2002). Materiales para Estructuras. Materiales para Concreto Hidráulico. Calidad del Agua para Concreto Hidráulico. 09 de diciembre del 2002.*

*ABC Portland Cement Company, (1984). C150 / C150M - 12. DIN 1306. 01 de junio de 1984. Qualitytwon, NJ.*