



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN FASE I

APLICACIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL EN LA ELABORACIÓN DE LADRILLOS ECOLÓGICOS

PRESENTADO POR:

11511293 BESSY MARÍA RAMOS RIVERA

ASESOR: ING. DANIEL MONTENEGRO

CAMPUS TEGUCIGALPA; ABRIL, 2020

DEDICATORIA

A Dios y la Virgen María.

A mis padres Renán y Bessy.

A mis hermanos Kelvin, Renán y Daniela, Belén y José C.

A Sky.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el apoyo recibido en todo momento. A mis amigos Kevin Banegas y Óscar Hernández porque sin su tiempo, apoyo y esfuerzo, este proyecto no habría sido posible. A mi hermana Belén que estuvo a mi lado a lo largo del proyecto. Al PhD. Ing. Cristian Cruz, MSc. Ing. Dorian Espinoza, MSc. Ing. Víctor Martínez y MSc. Ing. Daniel Montenegro, por su valiosa asesoría y comentarios. A GeoConsult y el laboratorio de Ingeniería Civil de UNITEC por poner a disposición sus instalaciones para realizar los ensayos de laboratorio y elaborar los ladrillos.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación tuvo como objetivo implementar el diseño factorial para desarrollar una alternativa ecológica del ladrillo tradicional de arcilla cocida. Se buscó desarrollar un ladrillo en el cual no se requiera el uso de hornos artesanales que generan CO₂ durante su proceso de fabricación, sino sólo mezclar los materiales, comprimir la mezcla en un molde y dejarlos secar al sol. Para encontrar qué mezclas de materiales generan un ladrillo ecológico y resistente se aplicó un diseño factorial 2³ que tuvo como producto ocho tipos de ladrillos, en los cuales, se varió el tipo de aditivo natural (cascarilla de arroz y fibras de sisal), aditivo estabilizador (cemento y cal) y su cantidad (5 y 10%).

Los ladrillos ecológicos y tradicionales de arcilla fueron probados a compresión después de los 14 días. Todos los ladrillos ecológicos obtuvieron una resistencia promedio a la compresión por arriba de los 1,000 psi, mientras que los tradicionales de arcilla obtuvieron un promedio de 611.46 psi. Dos de los ladrillos ecológicos cumplieron con el requisito mínimo de resistencia a la compresión (1,500 psi) exigido por la organización internacional ASTM: el ladrillo con cemento 10% + casc. de arroz 1% (1,711.87 psi) y con cemento 10% + fibra de sisal 0.1% (1,976.44 psi). Los factores que produjeron efectos significativos en la resistencia a la compresión fueron determinados, así como el nivel de cada uno que genera los mejores resultados.

Se realizó un estudio estadístico inferencial en el cual se calcularon intervalos de confianza, de predicción y pruebas de hipótesis. La Ingeniería de Valor fue aplicada para evaluar la funcionalidad del ladrillo ecológico, comparándolo con el ladrillo tradicional de arcilla. Evaluando la resistencia a la compresión, transporte, sostenibilidad y disponibilidad de materiales, los ladrillos tradicionales de arcilla y ecológicos obtuvieron un puntaje de 1.8571 y 3.8571, respectivamente.

ABSTRACT

This research's objective was to implement factorial design to develop an ecological alternative to traditional clay brick. The aim was to develop a brick in which the use of artisanal kilns that generate CO₂ during its manufacturing process is not required, but only to mix the materials, compress the mixture in a mold and let them dry in the sun. To find out which material mixtures generate an ecological and resistant brick, a factorial design 2³ was applied, which had as a product eight types of bricks. The type of natural additive (rice husk and sisal fibers), stabilizer (cement and lime) and their quantity (5 and 10%) was varied.

Both ecological and traditional clay bricks were compression tested after 14 days. All ecological bricks had an average compressive strength above 1,000 psi, while traditional clay bricks averaged 611.46 psi. Two of the ecological bricks met the minimum requirement of compressive strength (1,500 psi) required by the international organization ASTM: the brick with 10% cement + 1% husk rice (1,711.87 psi) and 10% cement + 0.1% sisal fiber (1,976.44 psi). The factors that produced significant effects on the compressive strength were determined, as well as the level of each of them that generates the best results.

An inferential statistical study was carried out in which confidence intervals, prediction intervals and hypothesis tests were calculated. Value Engineering was applied to evaluate the functionality of the ecological brick, comparing it to the traditional clay brick. Evaluating compressive strength, transport, sustainability and availability of materials, traditional clay and ecological bricks scored 1.8571 and 3.8571, respectively.

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	Introducción.....	2
II.	Planteamiento del Problema	4
2.1	Precedentes del Problema.....	4
2.2	Definición del Problema.....	6
2.3	Justificación.....	6
2.4	Preguntas de Investigación.....	7
2.5	Objetivos.....	7
2.5.1	Objetivo General.....	7
2.5.2	Objetivos Específicos.....	7
III.	Marco Teórico.....	8
3.1	Diseño de Experimentos	8
3.1.1	Definición.....	8
3.1.2	Diseño factorial.....	9
3.1.2.1	Diseños factoriales 2^3	10
3.1.2.2	Efectos de los factores en la variable respuesta.....	10
3.1.3	Diseño de experimentos en el sector de la construcción	12
3.2	Ladrillos ecológicos.....	13
3.2.1	Antecedentes	13
3.2.2	Aditivos en ladrillos ecológicos.....	14
3.2.2.1	Cemento.....	14
3.2.2.2	Cal.....	15
3.2.2.3	Cascarilla de arroz.....	15
3.2.2.4	Fibra de sisal	16

3.2.3	Resultados de estudios sobre ladrillos ecoógicos	16
3.3	Análisis estadístico	17
3.3.1	Estadística descriptiva	17
3.3.2	Estadística inferencial	18
3.3.2.1	Prueba de normalidad.....	18
3.3.2.2	Intervalos de confianza para la media poblacional.....	19
3.3.2.3	Intervalos de predicción para la media poblacional.....	20
3.3.2.4	Pruebas de hipótesis para la media	20
3.3.2.5	Pruebas de hipótesis para la diferencia de medias.....	20
3.4	Norma ASTM	21
3.5	Ingeniería de Valor	22
3.5.1	Definición.....	22
3.5.2	Metodología propuesta para realizar el estudio de Ingeniería de Valor	23
3.5.2.1	Integrar el equipo de trabajo	23
3.5.2.2	Definir los objetivos del estudio.....	23
3.5.2.3	Definir los criterios de evaluación.....	24
3.5.2.4	Características de los sistemas analizados en función de los criterios de evaluación 24	
3.5.2.5	Justificar las escalas de calificación a utilizar.....	25
3.5.2.6	Ponderar los criterios de evaluación.....	26
3.5.2.7	Evaluar cada una de las alternativas	27
3.5.2.8	Desarrollar la solución viable del estudio	28
IV.	Metodología.....	29
4.1	Enfoque	29

4.2	Variables de Investigación.....	30
4.2.1	Variable dependiente.....	30
4.2.2	Variables independientes.....	30
4.3	Técnicas e Instrumentos Aplicados.....	31
4.3.1	Técnicas.....	31
4.3.2	Instrumentos.....	31
4.4	Materiales.....	32
4.5	Población y Muestra.....	34
4.6	Metodología de Estudio.....	34
4.7	Metodología de Validación.....	36
4.8	Cronograma de Actividades.....	38
V.	Resultados y Análisis.....	39
5.1	Arreglo factorial.....	39
5.2	Elaboración de los ladrillos.....	40
5.3	Resistencia a la compresión.....	45
5.3.1	Ladrillos ecológicos.....	45
5.3.2	Ladrillos tradicionales de arcilla.....	51
5.4	Análisis Estadístico.....	53
5.4.1	Estadística descriptiva.....	53
5.4.2	Estadística inferencial.....	55
5.4.2.1	Validación de la normalidad de los datos obtenidos de resistencia a la compresión	55
5.4.2.2	Intervalos de confianza para la media poblacional.....	57
5.4.2.3	Intervalos de predicción.....	58

5.4.2.4	Pruebas de hipótesis para la media	60
5.4.2.5	Pruebas de hipótesis para la diferencia de medias.....	62
5.5	Validación con norma ASTM C 62.....	64
5.5.1	Análisis después del ensayo de compresión.....	65
5.6	Efecto de los factores	68
5.7	Aplicación de la Ingeniería de Valor	71
VI.	Conclusiones	80
VII.	Recomendaciones	81
VIII.	Aplicabilidad / Implementación.....	82
IX.	Evolución de trabajo actual/trabajo futuro	82

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-	Diseño factorial 2^3 y su representación geométrica.....	10
Ilustración 2.	Gráfica de efectos principales.....	11
Ilustración 3.	Gráfica de interacción de factores	12
Ilustración 4.	Proceso del enfoque cuantitativo	29
Ilustración 5.	Máquina de compresión.....	32
Ilustración 6.	Cemento Portland GU	32
Ilustración 7.	Cal hidratada	33
Ilustración 8.	Cascarilla de arroz.....	33
Ilustración 9.	Fibras de sisal.....	34
Ilustración 10-	Cronograma de actividades	38
Ilustración 11-	Representación geométrica del arreglo factorial.....	40
Ilustración 12.	Muestra de opción #1 de suelo	41
Ilustración 13.	Proceso de fabricación de un ladrillo ecológico	45
Ilustración 14.	Ensayo de compresión en ladrillo ecológico.....	47

Ilustración 15. Ensayo de compresión en ladrillo tradicional de arcilla.....	51
Ilustración 16. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%.....	56
Ilustración 17. Validación de la resistencia a la compresión de los ladrillos con norma ASTM C 62	65
Ilustración 18. (a) Ladrillo ecológico cemento 10% + casc. de arroz 1% y (b) ladrillo tradicional de arcilla después de fallar	66
Ilustración 19. Ladrillos ecológicos después del ensayo de compresión	67
Ilustración 20. Ladrillo ecológico de cal después del ensayo de compresión	68
Ilustración 21. Gráfica normal de los efectos de los factores en la resistencia a la compresión de los ladrillos.....	69
Ilustración 22. Gráfica de interacción de los factores "tipo de estabilizador" y "cantidad de estabilizador"	70
Ilustración 23. Gráfica de efectos principales del factor "tipo de aditivo natural"	71
Ilustración 24. Contenido de humedad óptima del suelo	87
Ilustración 25. Ladrillo de cemento 5% + casc. de arroz 1%	88
Ilustración 26. Ladrillo de cemento 10% + casc. de arroz 1%.....	89
Ilustración 27. Ladrillo de cemento 5% + fibra de sisal 0.1%.....	90
Ilustración 28. Ladrillo de cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	91
Ilustración 29. Ladrillo de cal 5% + casc. de arroz 1%	92
Ilustración 30. Ladrillo de cal 10% + casc. de arroz 1%.....	93
Ilustración 31. Ladrillo de cal 5% + fibra de sisal 0.1%.....	94
Ilustración 32. Ladrillo de cal 10% + fibra de sisal 0.1%.....	95
Ilustración 33. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 5% + casc. de arroz 1%	103
Ilustración 34. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1%.....	104
Ilustración 35. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 5% + fibra de sisal 0.1%	105
Ilustración 36. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 10% + casc. de arroz 1%.....	106
Ilustración 37. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 5% + casc. de arroz 1%.....	107
Ilustración 38. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 10% + fibra de sisal 0.1%.....	108
Ilustración 39. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 5% + fibra de sisal 0.1%	109

Ilustración 40. Prueba de normalidad para la masa del ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	117
Ilustración 41. Prueba de normalidad para la masa del ladrillo tradicional de arcilla	118

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Aumento promedio en porcentaje de la resistencia a la compresión con el tiempo	15
Tabla 2-Requisitos mecánicos y físicos para ladrillos de construcción (ASTM C 62)	22
Tabla 3. Conformación del equipo de trabajo	23
Tabla 4. Tabla resumen de objetivos de la aplicación de la Ingeniería de Valor	24
Tabla 5. Descripción de los criterios a evaluar en cada sistema.....	24
Tabla 6. Características del sistema analizado	25
Tabla 7. Descripción de las escalas a utilizar	26
Tabla 8. Matriz de ponderación de los criterios de evaluación	27
Tabla 9. Matriz de evaluación de criterios	28
Tabla 10. Índice de valor de cada alternativa	28
Tabla 11. Hipótesis al inicio del experimento.....	37
Tabla 12. Arreglo factorial del estudio	39
Tabla 13. Proctor estándar en opción #1 de suelo.....	41
Tabla 14. Cantidad de materiales en cada mezcla.....	44
Tabla 15. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%	46
Tabla 16. Carga de compresión soportada por los ladrillos ecológicos	48
Tabla 17. Resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos.....	50
Tabla 18. Masa y dimensiones de los ladrillos tradicionales de arcilla	52
Tabla 19. Carga de compresión soportada por los ladrillos tradicionales de arcilla	52
Tabla 20. Resistencia a la compresión de los ladrillos tradicionales de arcilla	53
Tabla 21. Estadísticos descriptivos de los ladrillos ecológicos	54
Tabla 22. Estadísticos descriptivos del ladrillo tradicional de arcilla	55

Tabla 23. Valor p para prueba de normalidad de cada tipo de ladrillo ecológico.....	57
Tabla 24. Intervalo de confianza para la media de cada ladrillo ecológico	58
Tabla 25. Datos e intervalo de predicción para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz	59
Tabla 26. Intervalo de predicción de cada ladrillo ecológico	59
Tabla 27. Pruebas de hipótesis para la media de los ladrillos ecológicos y tradicionales de arcilla	61
Tabla 28. Prueba F para la prueba de varianzas de los ladrillos cemento 10% + casc. de arroz 1% y cemento 10% + fibra de sisal 0.1%.....	62
Tabla 29. Prueba t para la prueba de diferencia de medias de los ladrillos cemento 10% + casc. de arroz 1% y cemento 10% + fibra de sisal 0.1%.....	63
Tabla 30. . Valor p para prueba de normalidad de la masa	63
Tabla 31. Prueba F para la prueba de varianzas de la masa de los ladrillos cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y tradicionales de arcilla.....	64
Tabla 32. Prueba t para la prueba de diferencia de medias de los ladrillos cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y tradicionales de arcilla.....	64
Tabla 33. Resultado de conformación del equipo de trabajo	72
Tabla 34. Resultado de objetivos del estudio	72
Tabla 35. Resultado de criterios de evaluación	73
Tabla 36. Características del ladrillo tradicional en función de los criterios de evaluación	74
Tabla 37. Características del ladrillo ecológico en función de los criterios de evaluación.....	75
Tabla 38. Resultado de la justificación de escalas de calificación.....	76
Tabla 39. Resultado de la matriz de ponderación	77
Tabla 40. Resultado de la ponderación de los criterios de evaluación.....	77
Tabla 41. Resultado de la evaluación de los criterios.....	78
Tabla 42. Resultado de la puntuación de cada alternativa.....	79
Tabla 43. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 5% + casc. de arroz 1%	96
Tabla 44. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	97
Tabla 45. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 5% + fibra de sisal 0.1%.....	98
Tabla 46. Masa y medidas del ladrillo cal 10% + casc. de arroz 1%.....	99

Tabla 47. Masa y medidas del ladrillo cal 5% + casc. de arroz 1%	100
Tabla 48. Masa y medidas del ladrillo cal 10% + fibra de sisal 0.1%.....	101
Tabla 49. Masa y medidas del ladrillo cal 5% + fibra de sisal 0.1%	102
Tabla 50. Datos y resultados del IP de cada ladrillo ecológico	113

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Promedio de dimensión	46
Ecuación 2. Área sección transversal	46
Ecuación 3. Resistencia a la compresión	47
Ecuación 4. Intervalo de predicción para una observación futura cuando se conoce σ^2	58
Ecuación 5. % de peso de cada criterio	77
Ecuación 6. Puntaje total de cada criterio.....	79

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Proctor Estándar	87
Anexo 2. Ladrillos ecológicos	88
Anexo 3. Masa y medidas de los ladrillos ecológicos	96
Anexo 4. Prueba de normalidad de la resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos ...	103
Anexo 5. Resultados de Minitab de prueba t de los ladrillos ecológicos.....	110
Anexo 6. Tabla z – distribución normal.....	112
Anexo 7. Intervalo de predicción de ladrillos ecológicos	113
Anexo 8. Resultados de Minitab de la prueba F para varianzas.....	114
Anexo 9. Resultados de Minitab de la prueba t para diferencia de medias	116
Anexo 10. Prueba de normalidad de la masa de los ladrillos cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y tradicional de arcilla	117
Anexo 11. Análisis del diseño factorial realizado en Minitab	119

LISTA DE SIGLAS Y GLOSARIO

ASTM	Sociedad Americana de Ensayos de Materiales
CO ₂	Dióxido de Carbono
GEIs	Gases efecto invernadero
IC	Intervalo de confianza
IP	Intervalo de predicción
psi	lbs/pulg. ²

ASTM: es la mayor organización científica y técnica para el establecimiento y la difusión de normas relativas a las características y prestaciones de materiales, productos, sistemas y servicios.

CO₂: de los gases de efecto invernadero, este es el más importante asociado a actividades humanas, y el principal responsable de este efecto. La concentración en la atmósfera se debe al uso de combustibles fósiles para procesos industriales y medios de transporte.

Gases efecto invernadero: los gases que forman parte de la atmósfera natural y antropogénica (emitidos por la actividad humana), cuya presencia contribuye al efecto invernadero.

Resistencia a la compresión: esfuerzo máximo que puede soportar un material al ser sometido a una carga de aplastamiento.

Valor p: medida de la fuerza de la evidencia en los datos en contra de H₀.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de adecuarse y evolucionar junto con el medio ambiente es una característica inherente a la naturaleza humana. Uno de los factores más vulnerables al cambio es el clima y la principal causa del cambio climático es la emisión de GEIs (gases efecto invernadero). El sector de la construcción juega un papel importante en la emisión de GEIs a nivel mundial y uno de los motivos es el aporte debido a la producción de materiales para la construcción.

En muchas ocasiones, el tiempo para terminar una obra es prioridad para desarrolladores privados y le restan importancia al medioambiente, dejando a un lado los esfuerzos por desarrollar el concepto de reciclaje de los materiales. Las decisiones que se toman al inicio de una construcción, pueden llegar a determinar el aporte de emisiones a lo largo de su ciclo de vida. Una de las maneras en las que este problema puede atacarse desde el inicio es interviniendo directamente sobre la construcción de las nuevas viviendas, siendo más específicos mejorando la sostenibilidad del proceso de fabricación de los materiales que componen la vivienda, como por ejemplo, fabricando materiales amigables con el medio ambiente.

Uno de los materiales de construcción más utilizados en Honduras es el ladrillo y este contribuye a la emisión de GEIs debido a que durante su proceso de fabricación, estos son sometidos a hornos que liberan gases contaminantes al medio ambiente. Una alternativa del ladrillo tradicional es el ladrillo ecológico. La implementación de ladrillos ecológicos es también vista importante en los países desarrollados, debido a que se busca mejorar las propiedades de estos mediante la adición de otros componentes a manera de reciclar.

Encontrar qué materiales se pueden añadir a la mezcla y en qué porcentajes, para poder obtener un material muy parecido al ladrillo tradicional de arcilla que sea tan resistente a la compresión como lo solicitan estándares internacionales, puede resultar difícil. Para poder generar mezclas de materiales se implementará el diseño factorial, rama del Diseño de Experimentos que busca concluir sobre qué mezclas generan los mejores resultados. Asimismo, se aplicará la Ingeniería de

Valor para poder concluir en base a múltiples factores, qué tan factible es la implementación de los ladrillos ecológicos en la construcción de una vivienda.

A continuación, se presentará el planteamiento del problema, en donde se definirá el problema existente y sus precedentes, así como la justificación de la presente investigación. Después, en el marco teórico se avalará la metodología aplicada y por último, se presentarán los resultados obtenidos, conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

El Cambio Climático o calentamiento global está asociado al aumento de emisiones de gases efecto invernadero (GEIs) provenientes de actividades humanas, lo cual altera el funcionamiento natural del sistema climático del planeta tierra, aumentando la temperatura, modificando los patrones de precipitación, incidiendo en la elevación del nivel del mar, la reducción de los glaciares y los eventos climáticos extremos. (Secretaría de Estado en los Despachos de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras, 2012, p. 4)

En la actualidad, el sector de la construcción se está enfrentando a la problemática de la sostenibilidad y una de las causas de este problema es la producción de ciertos materiales para la edificación. Un indicador básico para expresar datos sobre este tema es la emisión de CO₂ (dióxido de carbono) a la atmósfera debido a la fabricación de dichos materiales. Es importante tener presente que dentro del valor total de CO₂ emitido no sólo se ha de tomar en cuenta la fase de producción del material, sino también los componentes que lo forman y la energía que se consume durante todo el proceso. (Amoros García, 2011).

De acuerdo con la Secretaría de Estado en los Despachos de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras (2012) en el inventario de gases efecto invernadero (INGEI) para el año 2000 (dato más reciente hasta la fecha) los procesos industriales generan 689.97×10^9 g (689,970 Ton) representando un 9.87% del total de las emisiones de CO₂. Dentro de este componente industrial, se encuentra el tema de la emisión de GEIs causado por uno de los pasos en la fabricación de ladrillos de arcilla: la cocción en hornos.

Mamlouk & Zaniewski (2009) explican que el ladrillo se fabrica moliendo o triturando la arcilla y mezclándola con agua, para dotarla de una consistencia plástica. Esa arcilla plástica se moldea, se textura y se seca y, finalmente, se cuece. La temperatura de cocido para la fabricación de ladrillos

varía entre 900°C y 1200°C (1650°F a 2200°F). Una de las propiedades más importantes de los ladrillos de arcilla es la resistencia a la compresión, ya que controla su capacidad de soporte de cargas y su durabilidad. Dicha resistencia depende de la composición de la arcilla, del método de fabricación y del grado de cocción. Calkins (2009) menciona que por la fabricación de cada tonelada de ladrillos tradicionales de arcilla se generan alrededor de 283.254 kg de CO₂.

El ladrillo tradicional, de arcilla cocida, es uno de los materiales más utilizados en la construcción ya sea de viviendas u obras civiles complementarias y ha sido utilizado desde los tiempos más antiguos. Amoros García (2011) menciona que civilizaciones importantes como los persas, chinos y romanos usaron en cantidades grandes los ladrillos en murallas, baños y otras construcciones. Otro ejemplo de una construcción grande en la que se ha empleado el uso de este material es el Taj Mahal, en India. En ciudades de Yemen se han alzado casas de hasta ocho pisos con ladrillos como material principal, perdurando por más de 400 años, lo cual evidencia que es un material duradero y fiable.

La norma ASTM C 62 clasifica los ladrillos sólidos de acuerdo con las propiedades relativas a su durabilidad y su resistencia a la meteorización. Dicha norma establece que para el tipo de ladrillo NW (meteorización despreciable), la resistencia mínima a la compresión requerida es de 1,500 psi. López Zerón (2020) comenta que se han realizado pruebas de resistencia a la compresión a ladrillos de arcilla de diferentes partes de Honduras y los resultados indican que el promedio de la resistencia a la compresión se encuentra alrededor de los 500 psi.

El Instituto Nacional de Estadística (2013) menciona que el tercer material de construcción para paredes más utilizado en el país, con un 12.71%, es el ladrillo de arcilla. Las viviendas hechas de piedra rajada, adobe, madera, palo o caña, bahareque y material de desecho suman un 45.47% del total de viviendas, lo cual es un dato negativo ya que el Gabinete Sectorial de Desarrollo e Inclusión Social (2016) menciona que los materiales de construcción de las paredes, techos y pisos tienen sobre todo una incidencia directa en enfermedades relacionadas con el mal de Chagas,

que es un problema de salud pública caracterizado por una prevalencia nacional de infección por *Triatoma cruzi* de 6% en población general y de 3% en escolares en áreas rurales.

Según el Banco Interamericano de Desarrollo (2012), la región Latinoamericana sufre tanto de una escasez de viviendas como de problemas de calidad, que comprenden desde la falta de títulos de propiedad a paredes hechas de materiales de desecho como el cartón, pisos de tierra y la ausencia de acceso a redes de agua potable y saneamiento y que una de cada tres familias de América Latina y el Caribe habita en una vivienda inadecuada.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La fabricación de los ladrillos de arcilla afecta negativamente al medio ambiente debido a que uno de sus pasos requiere la cocción de dichos ladrillos a temperaturas entre 900°C y 1200°C. El proceso de cocción libera CO₂ a la atmósfera y aporta a la emisión de GEIs, alterando el funcionamiento del sistema climático del planeta Tierra. Ciertos ladrillos de arcilla fabricados en Honduras cumplen en promedio con un tercio de la resistencia a la compresión mínima requerida por la ASTM para el tipo de ladrillo que se pretende esté expuesto a meteorizaciones despreciables.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Como respuesta a los problemas de contaminación del medio ambiente surge la idea de desarrollar nuevas alternativas de ladrillos que puedan sustituir al ladrillo de arcilla tradicional, buscando principalmente eliminar del proceso de fabricación la cocción para poder, de esa manera, disminuir la emisión de GEIs. Debido a que en Honduras los ladrillos de arcilla son producidos mayormente de manera artesanal, no se exige cumplir con valores estándares de resistencia, por lo tanto, dentro de las alternativas se pretende mejorar las propiedades mecánicas y físicas de los ladrillos, específicamente la de la resistencia a la compresión para que puedan cumplir con estándares internacionales.

Encontrar una mezcla de materiales que resulte adecuada en términos mecánicos, físicos e incluso económicos podría resultar difícil, es por eso por lo que se ve la necesidad de aplicar el diseño de experimentos, específicamente el tema de diseños factoriales, para poder estudiar el efecto de varios factores (tipo de suelo, aditivos, porcentajes, etc.) sobre una o varias respuestas (resistencia a la compresión). De esta manera, después de probar todas las posibles combinaciones del diseño factorial se puede concluir qué mezclas son realmente las adecuadas.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

Las interrogantes que se pretende responder a lo largo del proyecto son:

1. ¿Qué mezclas de materiales son adecuadas para la fabricación de un ladrillo ecológico?
2. Las mezclas generadas, ¿cumplen con los estándares de la ASTM?
3. Las mezclas generadas, ¿son ingenierilmente factibles?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una alternativa ecológica del ladrillo tradicional de arcilla cocida que cumpla con estándares internacionales de resistencia.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar mezclas de diferentes materiales mediante el diseño factorial.
- Evaluar si los ladrillos cumplen con los estándares mínimos de resistencia a la compresión establecidos por la ASTM.
- Valorar la factibilidad del uso de los ladrillos en la construcción de una vivienda mediante la Ingeniería de Valor.

III. MARCO TEÓRICO

3.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

3.1.1 DEFINICIÓN

Gutiérrez & De la Vara (2008) definen el diseño de experimentos como la forma más eficaz de hacer pruebas; consiste en determinar qué tipo de pruebas se deben realizar y de qué manera para obtener datos que al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder a interrogantes planteadas durante el experimento, y de esa manera clarificar los aspectos inciertos de un proceso, resolver un problema o lograr mejoras. Ejemplos de problemas típicos que pueden resolverse con el diseño de experimentos son los siguientes:

1. Comparar a dos o más materiales con el fin de elegir al que mejor cumple los requerimientos.
2. Comparar varios instrumentos de medición para verificar si trabajan con la misma precisión y exactitud.
3. Determinar los factores (las x vitales) de un proceso que tienen impacto sobre una o más características del producto final.
4. Encontrar las condiciones de operación (temperatura, velocidad, humedad, por ejemplo) donde se reduzcan los defectos o se logre un mejor desempeño del proceso.
5. Reducir el tiempo de ciclo del proceso.
6. Hacer el proceso insensible o robusto a oscilaciones de variables ambientales.
7. Apoyar el diseño o rediseño de nuevos productos o procesos.
8. Ayudar a conocer y caracterizar nuevos materiales.

En el campo de la industria es frecuente realizar pruebas con el propósito de resolver un problema o demostrar una hipótesis; por ejemplo, hacer cambios en los materiales o métodos de un proceso o crear un nuevo material con la intención de lograr mejoras o eliminar algún problema (Gutiérrez & De la Vara, 2008). El diseño estadístico de experimentos es una herramienta útil para el

investigador, ya que apoya y soporta su labor científica a través de la planeación, recolección de datos y validación de la información para corroborar o refutar una hipótesis. (Díaz, 2009)

3.1.2 DISEÑO FACTORIAL

El diseño factorial estudia el efecto de varios factores sobre una o más respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Los factores pueden ser cualitativos (máquinas, tipo de material, operador, etc.), o cuantitativos (temperatura, humedad, velocidad). Para estudiar la manera en que cada factor influye en la variable respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completo se corren todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores estudiados.

Un arreglo factorial es el conjunto de tratamientos que pueden formarse considerando todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores. Para poder conocer el número de corridas a realizar en el experimento, se multiplica el número de tratamientos por el número de réplicas, donde una de éstas se lleva a cabo cada vez que se corre el arreglo. (Gutiérrez & De la Vara, 2008).

Hernández, Valencia, Villar, Vega, & Antiqueras (2005) mencionan que en la búsqueda de composiciones óptimas para mezclas de diversas naturaleza, las técnicas de diseño de experimentos del tipo factorial han sido ampliamente empleadas.

Determinar el número de réplicas que se hará por cada tratamiento, es decir el tamaño de muestra, es una decisión importante y aunque existen varios métodos para estimar el tamaño muestral, muchas veces resultan tener poca aplicabilidad porque requieren cierto conocimiento previo sobre la varianza del error experimental. Si el experimento incluye varios tratamientos (cuatro o más), entonces se puede optar por reducir el número de réplicas. Además, es importante considerar los costos y el tiempo global del experimento. A partir de esto, tomando en cuenta las consideraciones antes expuestas se puede establecer el tamaño de muestra que permita responder las interrogantes planteadas en el experimento.

3.1.2.1 Diseños factoriales 2^3

Un diseño factorial 2^k consiste en tener k factores con dos niveles de prueba cada uno y es, según Gutiérrez & De la Vara (2008), una de las familias de diseños de mayor impacto en la industria y en la investigación, debido a su versatilidad y eficacia. Los diseños factoriales 2^k completos son útiles cuando el número de factores a estudiar está entre dos y cinco ($2 \leq k \leq 5$), rango en el cual el tamaño se encontrará entre cuatro y 32 tratamientos, cantidad de tratamientos que se considera manejable.

El diseño factorial 2^3 consta de $2^3 = 2 \times 2 \times 2 = 8$ tratamientos diferentes. Los tratamientos del diseño 2^3 y su representación geométrica se muestran en la ilustración 1, donde la región experimental es un cubo regular centrado en el origen $(0, 0, 0)$, cuyos vértices son los 8 tratamientos. Para construir el arreglo factorial se alterna el signo menos (-) y el signo más (+) en la primera columna, dos (-) y dos (+) en la segunda columna, y cuatro (-) y cuatro (+) en la tercera.

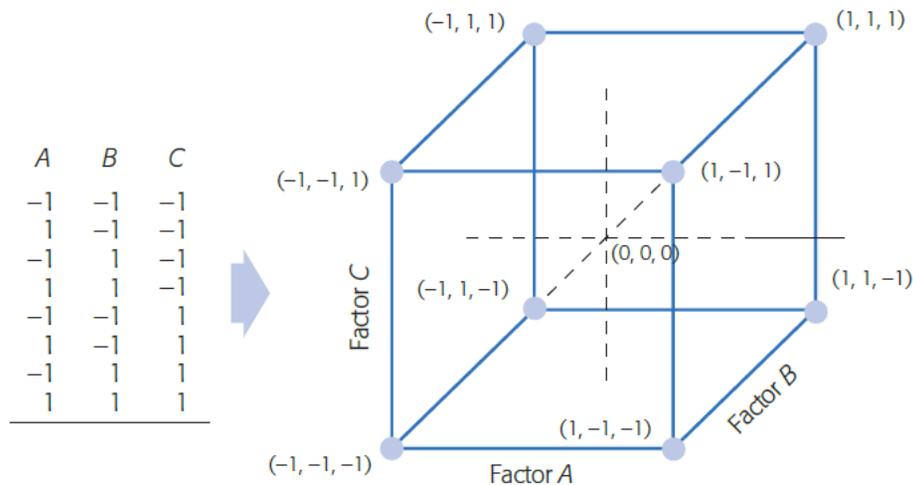


Ilustración 1-Diseño factorial 2^3 y su representación geométrica.

Fuente: (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

3.1.2.2 Efectos de los factores en la variable respuesta

Gutiérrez & De la Vara (2008) menciona que el efecto de un factor se define como el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel de tal factor. Los dos tipos de efectos que hay son los principales y los de interacción. En particular, los efectos principales son

los cambios en la media de la variable de respuesta que se deben a la acción individual de cada factor. En términos matemáticos, el efecto principal de un factor con dos niveles es la diferencia entre la respuesta media observada cuando tal factor estuvo en su primer nivel, y la respuesta media observada cuando el factor estuvo en su segundo nivel. Por otra parte, se dice que dos factores interactúan entre sí o tienen un efecto de interacción sobre la variable de respuesta, cuando el efecto de un factor depende del nivel en que se encuentra el otro.

El efecto principal de un factor se representa de manera gráfica como en la ilustración 2, en donde en el eje horizontal se ubican los niveles del factor y en el eje vertical se encuentra la media de la respuesta observada en los correspondientes niveles. El efecto de interacción de dos factores se pueden graficar como en ilustración 3 en donde en el eje vertical se pone una escala que represente la magnitud de la variable de respuesta, luego uno de los factores se representa con sus dos niveles en el eje horizontal y en dirección vertical de cada uno de estos niveles, se anota un punto que represente la respuesta promedio en cada nivel del otro factor. Al final, cada punto del lado izquierdo se une con su correspondiente punto del lado derecho mediante una línea recta. (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

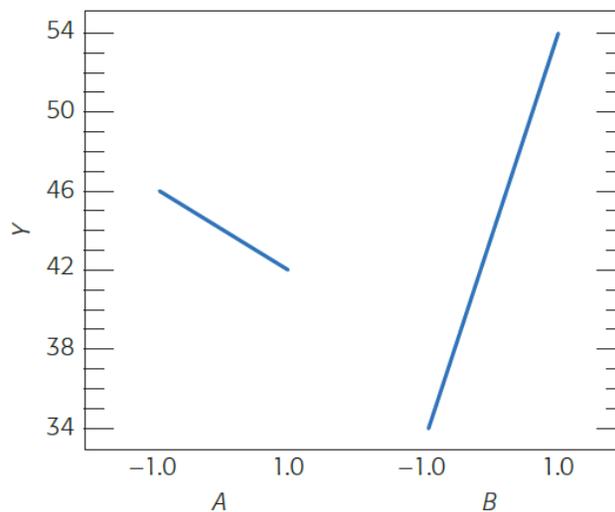


Ilustración 2. Gráfica de efectos principales

Fuente: (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

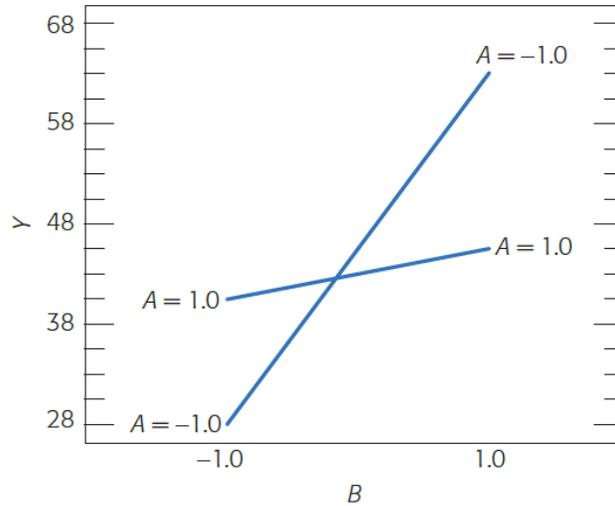


Ilustración 3. Gráfica de interacción de factores

Fuente: (Gutiérrez & De la Vara, 2008)

En la ilustración 2 también se puede apreciar que el efecto principal (individual) del factor B es mayor que el del factor A. Para entender e interpretar de qué manera un efecto de interacción afecta la variable de respuesta, se debe ser cuidadoso y analizar con detalle lo que pasa en Y cuando se mueve un factor dependiendo del nivel en el que esté el otro.

3.1.3 DISEÑO DE EXPERIMENTOS EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Sánchez, Torres, & Esquivel (2019) mencionan que el diseño y análisis de experimentos ha sido empleado en el campo de aplicación de la ingeniería de pavimentos, por ejemplo para evaluar el efecto del contenido de cal en la clasificación y separación de HMA (asfalto de mezcla en caliente), para optimizar la confiabilidad de la base granular cuando se estabiliza con cemento o bien para evaluar la condición del pavimento, la resistencia del pavimento, la incidencia del estado superficial del pavimento sobre el consumo de combustible, las emisiones generadas por los vehículos y el grado de accidentalidad.

El diseño de experimentos ha sido utilizado también para estudiar la reflexión de grietas en muestras de mezcla asfáltica, desarrollando un diseño de optimización en las mezclas. La metodología basada en el diseño de experimentos permitió conocer la influencia de los

parámetros constitutivos del material sobre el comportamiento estructural de la mezcla, presentando un ajuste significativo en comparación a los resultados experimentales extraídos del ensayo en laboratorio (NORAMBUENA-CONTRERAS, CASTRO-FRESNO, DEL COZ, & GARCÍA, 2011).

Con la aplicación del diseño de experimentos se ha logrado que hormigones obtengan las propiedades resistentes deseadas y cumplan con las condiciones de durabilidad preestablecidas. Los métodos de diseño ofrecen una significativa disminución de la cantidad de trabajo experimental y permiten determinar en forma efectiva la dependencia multifactorial de los componentes. Estos métodos de estudios han permitido dejar de lado la idea que tenían hace algunos años los reglamentos, donde la durabilidad del hormigón dependía casi exclusivamente de la relación agua/cemento (MENÉNDEZ & BONAVETTI, 2008).

3.2 LADRILLOS ECOLÓGICOS

3.2.1 ANTECEDENTES

Pérez, Pimentell, De Meza, & Hernández (2017) mencionan que en distintos países se han realizado investigaciones y estudios sobre la utilización de nuevos materiales para la fabricación de bloques y ladrillos, además, se han generado nuevos materiales para el área de la construcción, todo esto con el propósito de reducir los costos de construcción, generar alternativas innovadoras que impacten las construcciones del futuro y así darle un nuevo uso a los materiales que muchas veces son desperdiciados y desechados sin darse cuenta que su reutilización puede generar grandes cambios que pueden impactar de manera directa al mundo entero.

Los ladrillos de suelo cemento representan una alternativa a las directrices del desarrollo sostenible, ya que requieren bajo consumo de energía en la extracción de materias primas, podrán

dispensar al proceso de cocción y reducir la necesidad de transporte, ya que los ladrillos se pueden producir con la tierra de la propia construcción (Grande, 2003)

3.2.2 ADITIVOS EN LADRILLOS ECOLÓGICOS

Los ladrillos no estabilizados pueden llegar a tener resistencias a compresión bajas y uno de los factores que le afectan es el tipo de prensa que se emplea en el proceso de fabricación. El concepto de suelo estabilizado apareció primero en los países occidentales después de la revolución industrial, en donde añadían a la tierra cemento o cal hidráulica. Al agregar estos estabilizadores se conseguía aumentar la durabilidad frente al agua y mejorar sus características mecánicas, como la resistencia a la compresión (Amoros García, 2011).

Gonçalves, y otros (2017) mencionan que el reciclaje y aprovechamiento de residuos ofrecen un gran número de oportunidades económicas y es un requisito de cualquier sistema que pretenda ser sostenible. La actividad industrial y agrícola genera residuos en muchos sectores. Ejemplos en el sector agrícola es la cáscara de arroz y el sisal.

3.2.2.1 *Cemento*

La alternativa constructiva con ladrillos compactados con suelo-cemento es una alternativa ecológica ya que el mayor insumo que se utiliza es el propio suelo. El agregado de cemento mejora las condiciones del suelo respecto a la acción de agentes como la humedad, dándole características de resistencia y estabilidad. Generalmente, el tipo de cemento empleado en el suelo-cemento es el gris normal, denominado Portland, pero, no se excluye la posibilidad del empleo de otros tipos de cemento (Gatani, 2000). Desde que el cemento entra en contacto con el agua, el proceso de fraguado inicia y la resistencia a la compresión aumenta porcentualmente con la edad. Para el concreto, ya existen porcentajes de la resistencia a la compresión alcanzada en función de la edad:

Tabla 1. Aumento promedio en porcentaje de la resistencia a la compresión con el tiempo

Edad	Porcentaje de resistencia
1 día	16%
3 días	40%
7 días	65%
14 días	90%
28 días	99%

Fuente: (Kumar, Dinesh, Krishna, Sreenivas, & Kumar, 2017)

3.2.2.2 Cal

Quiteño (2015) menciona que se han realizado investigaciones sobre las propiedades químicas y geotécnicas de los suelos estabilizados con cal y que en Marruecos se encontró que al adicionar cal en la arcilla, se induce al desarrollo de calcita y silicato hidratado de calcio, el cual se forma por la reacción de la cal y sílice contenido en el suelo, y la presencia de compuestos formados contribuyen al refuerzo del material.

Se ha demostrado en un estudio, Quiteño (2015), que la adición de cal al suelo con que se elaboraron probetas provoca mejoría directa en la propiedad de resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos con las probetas del mismo tipo de suelo con porcentajes diferentes de cal demuestran empíricamente que las resistencia a la compresión aumenta conforme aumenta el porcentaje de cal.

3.2.2.3 Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz representa aproximadamente una quinta parte en peso del fruto recolectado y es a su vez un desecho agroindustrial que constituye aproximadamente el 20 % de la producción mundial de arroz, con estimaciones cercanas a los 7×10^8 toneladas anuales, siendo uno de los mayores residuos resultante de la producción agrícola de los países productores de arroz. (Fuentes, Fragozo, & Mendoza, 2015)

La cascarilla de arroz ha sido explotada como fuente de energía para la combustión, y en las micropartículas de sílice, abundante en las cenizas producidas por la quema, que hoy es un aditivo importante para los cementos Portland (Almeida, Tonoli, Santos, & Savastano, 2013).

3.2.2.4 *Fibra de sisal*

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (s.f.) define el sisal como una fibra vegetal basta y fuerte que se usa cada vez más en materiales compuestos para automóviles y muebles, y en la construcción, así como en productos de plástico y de papel. La fibra de sisal proviene del Agave, nativo de México. La planta crece en una variedad de climas calientes, incluidas zonas secas no utilizables para otros cultivos. El sisal puede cultivarse en casi todos los tipos de suelos, salvo en los que son muy húmedos, salinos o arcillosos, y durante todo el año.

En términos de características físicas, el material reforzado con fibras vegetales es más liviano que uno sin fibras. También, la incorporación de fibra vegetal en un material que contiene cemento mantiene las condiciones de impermeabilidad al agua. En términos de características mecánicas, luego de 28 días de curado se ha observado que al incluir fibras vegetales, se brinda ductilidad, es decir, se aumenta el módulo de rotura (Encalada, 2014).

3.2.3 RESULTADOS DE ESTUDIOS SOBRE LADRILLOS ECOÓGICOS

En el artículo "Caracterización física y mecánica de ladrillos de suelo cemento con la incorporación de diversos residuos", Gonçalves, y otros, (2017) afirman:

El análisis de los resultados identificó una tendencia a cumplir con los requisitos de la norma ISO 8492/2012. Según la norma, la resistencia a la compresión de los ladrillos masiva del suelo cemento no debe ser menor de 2,0 MPa (para valores medios) y 1,7 MPa para los valores individuales, la resistencia a la compresión simples de los ladrillos después de 28 y 56 días para composiciones estudiadas eran mucho más altas que el valor mínimo. Cuando se

piensa en el costo/beneficio de cualquier casa en la composición de ladrillos de suelo cemento, la reducción de la proporción de cemento de 20% a 10% en esta composición, añadiéndose 20% de cenizas, se consigue un ladrillo con suelo cemento con resistencia de 8,26Mpa (28 días) y 8,32Mpa (56 días) muy similar al anterior con 20%. Por lo tanto, se puede proponer que hay una reducción de los costos en la producción del ladrillo de suelo cemento con una reducción de 20% para 10% del cemento necesario, y también un impacto ambiental positivo en lo que respecta el destino final de residuos. (p. 190)

En el artículo "Diseño y prueba experimental de bloques ecológicos a base de materiales orgánicos e inorgánicos", Pérez, Pimentell, De Meza, & Hernández (2017) mencionan que según la Norma Técnica Panameña DGNTI-COPANIT 161-2001 los bloques convencionales suelen ser utilizados para uso no estructural ya que su resistencia no es tan alta como la de los bloques estructurales. Los bloques ecológicos fabricados en el estudio resultaron tener una resistencia superior a la que deberían tener los bloques para uso no estructural, e incluso sobrepasan la resistencia que deberían tener los bloques para uso estructural.

3.3 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.3.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

Si se desea obtener solamente alguna clase de resumen de los datos de una muestra se requiere la estadística descriptiva. Los estadísticos descriptivos proporcionan un resumen conciso de los datos, por ejemplo:

- Media: representa la suma de los números en la muestra, dividido entre la cantidad total de números que hay. (Navidi, 2004)
- Desviación estándar: es la medida de dispersión más común, que indica qué tan dispersos están los datos con respecto a la media. Mientras mayor sea la desviación estándar, mayor será la dispersión de los datos. La desviación estándar se puede utilizar para establecer un valor de referencia para estimar la variación general de un proceso. (Minitab, 2019)

- Varianza: La varianza mide qué tan dispersos están los datos alrededor de la media. La varianza es igual a la desviación estándar elevada al cuadrado. (Minitab, 2019)
- Rango: es la diferencia entre los valores más grandes y pequeños en una muestra. Es una medida de la dispersión. (Navidi, 2004)

3.3.2 ESTADÍSTICA INFERENCIAL

Walpole, Myers, Myers, & Ye (2012) mencionan que la estadística inferencial nos permite obtener conclusiones acerca de la población a partir de una muestra. Los métodos estadísticos se diseñan para contribuir al proceso de realizar juicios científicos frente a la incertidumbre y a la variación. También, mencionan que la inferencia estadística se divide en dos áreas principales: estimación (puntual o por intervalos) y pruebas de hipótesis. Navidi (2004) menciona que cuando la muestra es pequeña, s podría no estar cercano a σ , y \bar{X} puede no ser aproximadamente normal. Sin embargo, si la población es aproximadamente normal, \bar{X} lo será incluso cuando el tamaño muestral sea pequeño, pero debido a que s no está necesariamente cercana a σ , esta cantidad no tendrá una distribución normal. En su lugar, tiene la distribución t de Student con $n - 1$ grados de libertad.

3.3.2.1 Prueba de normalidad

Evaluar la normalidad de los datos es esencial para saber qué técnica estadística aplicar al momento de hacer un análisis. La prueba de normalidad y la gráfica de probabilidad suelen ser las mejores herramientas para evaluar la normalidad. Los resultados de la prueba, con el valor p , indican si se debe rechazar o no puede rechazar la hipótesis nula de que los datos provienen de una población distribuida normalmente. Un tipo de prueba de normalidad es la de Anderson-Darling, esta prueba compara la función de distribución acumulada empírica (ECDF) de los datos de la muestra con la distribución esperada si los datos fueran normales. Si la diferencia observada es adecuadamente grande, se rechazará la hipótesis nula de normalidad de la población. (Minitab, 2019) Las hipótesis para la prueba de Anderson-Darling son:

- H_0 : los datos siguen una distribución normal
- H_1 : los datos no siguen una distribución normal

En Minitab (2019) se explica que para determinar si los datos no siguen una distribución normal, se compara el valor p con el nivel de significancia. Por lo general, un nivel de significancia (denotado como α) de 0.05 funciona adecuadamente. Un nivel de significancia de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que los datos no siguen una distribución normal, cuando los datos sí siguen una distribución normal. Entonces:

- Si $p \leq \alpha$: los datos no siguen una distribución normal (se rechaza H_0). Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, la decisión es rechazar la hipótesis nula y concluir que sus datos no siguen una distribución normal.
- Si $p > \alpha$: no se puede concluir que los datos no siguen una distribución normal (no se puede rechazar H_0). Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, la decisión es que no se puede rechazar la hipótesis nula. Usted no tiene suficiente evidencia para concluir que los datos no siguen una distribución normal.

3.3.2.2 *Intervalos de confianza para la media poblacional*

Los datos que aparecen en las tablas de resultados de estadística descriptiva son datos puntuales. Ese tipo de datos son estimaciones puntuales, porque son sólo números, o puntos. Un hecho importante de las estimaciones puntuales es que casi nunca son exactamente iguales a los valores reales que están estimando. Con la finalidad de que una estimación sea útil, se necesita describir qué tan alejada está del valor verdadero (Navidi, 2004). Hay muchas situaciones en que es preferible determinar un intervalo dentro del cual se esperaría encontrar el valor del parámetro. Tal intervalo se conoce como estimación por intervalo. (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012). A partir de los datos muestrales de una población se puede crear un intervalo para la media. Este intervalo describirá el valor de la media y se podrá hacer inferencias sobre la población. Según Minitab (2019), si se desea reducir el ancho de un intervalo de confianza se puede aumentar el tamaño de la muestra, reducir la variabilidad, utilizar un intervalo de confianza unilateral o reducir el nivel de confianza.

3.3.2.3 Intervalos de predicción para la media poblacional

Algunas veces, además de la media de la población, el experimentador podría estar interesado en predecir el valor posible de una observación futura. Este tipo de requerimiento se satisface muy bien construyendo un intervalo de predicción. El intervalo de predicción proporciona un buen estimado de la ubicación de una observación futura, el cual es muy diferente del estimado del valor promedio de la muestra. Para una distribución normal de mediciones donde se conoce la varianza, se utiliza la tabla Z (Walpole, Myers, Myers, & Ye, 2012). En Minitab (2019) se menciona que el intervalo de predicción siempre es más amplio que el intervalo de confianza debido a la incertidumbre adicional que implica la predicción de una respuesta individual en comparación con la respuesta media.

3.3.2.4 Pruebas de hipótesis para la media

Walpole, Myers, Myers, & Ye (2012) mencionan que los procedimientos que conducen a la aceptación o al rechazo de hipótesis estadísticas comprenden un área importante de la inferencia estadística. La estructura de la prueba de hipótesis se establece usando el término hipótesis nula, el cual se refiere a cualquier hipótesis que se desea probar y se denota con H_0 . El rechazo de H_0 conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa, que se denota con H_1 . Navidi (2004) explica que esencialmente, para realizar una prueba de hipótesis se pone la hipótesis nula en juicio. Se empieza suponiendo que H_0 es verdadera. La prueba de hipótesis implica medir la fuerza del desacuerdo entre la muestra y H_0 para producir un número entre 0 y 1, el valor p , éste mide la factibilidad de H_0 . Entre menor sea el valor p , más fuerte será la evidencia en contra de H_0 . Si el valor p es suficientemente pequeño, se puede estar dispuesto a abandonar la suposición de que H_0 es verdadera y creer, en su lugar, que H_1 es verdadera.

3.3.2.5 Pruebas de hipótesis para la diferencia de medias

La prueba t de 2 muestras se puede utilizar para comparar los promedios entre dos grupos pequeños con datos normales y determinar si existe una diferencia significativa entre ellos o si la

diferencia observada se debe en cambio a una probabilidad aleatoria. Las hipótesis planteadas son:

- $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
- $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Minitab (2019) menciona que para determinar si la diferencia entre las medias de población es estadísticamente significativa, se compara el valor p con el nivel de significancia. Entonces:

- Si valor $p \leq \alpha$: La diferencia entre las medias es estadísticamente significativa (se rechaza H_0) Si el valor p es menor que o igual al nivel de significancia, la decisión es rechazar la hipótesis nula. Usted puede concluir que la diferencia entre las medias de las poblaciones no es igual a la diferencia hipotética.
- Si valor $p > \alpha$: La diferencia entre las medias no es estadísticamente significativa (no se puede rechazar H_0) Si el valor p es mayor que el nivel de significancia, la decisión es que no se puede rechazar la hipótesis nula. Usted no tiene suficiente evidencia para concluir que la diferencia entre las medias de las poblaciones es estadísticamente significativa.

Antes de realizar la prueba de hipótesis para la diferencia de medias es necesario verificar primero si las varianzas de ambos grupos son consideradas iguales o no, de esto depende el tipo de prueba de hipótesis a realizar. Para concluir si las varianzas de dos muestras, se utiliza la prueba F. La prueba F solo es exacta para datos distribuidos normalmente.

3.4 NORMA ASTM

La ASTM (Sociedad Americana de Ensayo de Materiales) publica las normas más aceptadas sobre ladrillos. Las normas ASTM para ladrillos de arcilla contienen los requisitos para las propiedades físicas, tolerancias dimensionales y defectos permitidos, como astillas y grietas. Estos requisitos cubren una amplia gama de requisitos que regulan la durabilidad y la apariencia del ladrillo de arcilla en cada una de estas categorías.

La norma para ladrillos de construcción es la ASTM C 62, en ella se encuentran los parámetros para poder clasificar el ladrillo en base a las propiedades relativas a su durabilidad y su resistencia

a la meteorización. Asimismo en la norma se encuentran los requisitos de las propiedades mecánicas y físicas más importantes: la resistencia a la compresión y resistencia a la absorción. Los requisitos de la norma ASTM C 62 se muestran en la tabla 2. La norma encargada de determinar las propiedades físicas de los ladrillos es la ASTM C 67.

Tabla 2-Requisitos mecánicos y físicos para ladrillos de construcción (ASTM C 62)

Calidad	Resistencia mínima a la compresión, área total, MPa (psi)		Absorción de agua máxima por ebullición durante 5 horas, %		Coeficiente máximo de saturación	
	Media de cinco ladrillos	Individual	Media de cinco ladrillos	Individual	Media de cinco ladrillos	Individual
SW ¹	20,7 (3000)	17,2 (2500)	17,0	20,0	0,78	0,80
MW ²	17,2 (2500)	15,2 (2200)	22,0	25,0	0,88	0,90
NW ³	10,3 (1500)	8,6 (1250)	Sin límite	Sin límite	Sin límite	Sin límite

¹ Meteorización severa.
² Meteorización moderada.
³ Meteorización despreciable.

Fuente: (Mamlouk & Zaniewski, 2009)

3.5 INGENIERÍA DE VALOR

3.5.1 DEFINICIÓN

Calzeta (2012) define la Ingeniería de Valor como:

Un logro sistemático para analizar los requerimientos de funcionalidad de los productos y servicios con el propósito de obtener la funcionalidad esencial al menor costo total. Es un sistema que una empresa puede emplear de manera organizada, para mejorar el valor de sus productos o servicios y así obtener una reducción en costos como fin último. (p. 11)

La Ingeniería de Valor es vista como un proceso de evaluación del valor de métodos o materiales contra su costo. El cociente que resulta entre el valor y el costo es conocido como Índice de Valor (IV) y se busca que éste valor sea lo más alto posible (Carrillo & García, 2011).

3.5.2 METODOLOGÍA PROPUESTA PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE INGENIERÍA DE VALOR

Una propuesta para la metodología de la Ingeniería de Valor es la de Carrillo & García (2011) y se describe a continuación.

3.5.2.1 Integrar el equipo de trabajo

Consiste en conformar el equipo de trabajo, el cual estará encargado de sumar esfuerzos para desarrollar cada una de las etapas del estudio de Ingeniería de Valor. El equipo deberá estar compuesto por aquellos integrantes de la organización que tengan conocimientos sobre el proyecto y sobre las características de los elementos que serán evaluados. Se llena la tabla 3 con la información del equipo.

Tabla 3. Conformación del equipo de trabajo

Proyecto			
Empresa			
Equipo de trabajo			
Nombre	Puesto	Teléfono	e-mail

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.2 Definir los objetivos del estudio

El objetivo de esta etapa es establecer claramente las metas y beneficios que se esperan obtener como resultado de la realización del Estudio de Ingeniería de Valor. Como parte de la definición de los objetivos del estudio se realiza una lluvia de ideas entre los integrantes del equipo de trabajo, para definir qué es lo que se pretende obtener al realizar el estudio, así como las áreas en las cuales se espera obtener mejoras. Se llena la tabla 4 con los objetivos del estudio.

Tabla 4. Tabla resumen de objetivos de la aplicación de la Ingeniería de Valor

Proyecto	
Empresa	
Equipo de trabajo	
Objetivos del estudio	

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.3 Definir los criterios de evaluación

Esta etapa consiste en definir los criterios en base a los cuales se realizará el análisis, es importante aclarar que estos criterios están en función de los beneficios que se quieren alcanzar al realizar el Estudio de Ingeniería de Valor, y que varían para cada caso particular de la aplicación de la metodología. Se llena la tabla 5 con los criterios a evaluar.

Tabla 5. Descripción de los criterios a evaluar en cada sistema

Criterios de evaluación	
ID	Descripción
A	
B	
C	
D	
E	

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.4 Características de los sistemas analizados en función de los criterios de evaluación

Se deben definir las características del sistema actual referentes a los criterios de evaluación que se establecieron anteriormente. Estas características servirán como referencia para la definición de las mejoras que presenta cada una de las propuestas. Se llena la tabla 6 con las características del sistema o producto.

Tabla 6. Características del sistema analizado

Proyecto	
Empresa	
Sistema a evaluar	
Criterios de evaluación	Desempeño
Criterio 1	
Criterio 2	
Criterio 3	
Criterio 4	
Criterio 5	

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.5 Justificar las escalas de calificación a utilizar

Consiste en asignar una escala de calificación particular para cada uno de los criterios de evaluación, los cuales fueron previamente definidos en la etapa de información. Dichas calificaciones quedan definidas por el equipo de trabajo y se basan en el desempeño de la tecnología actual y los resultados esperados de la alternativa que resulte ganadora. Se llena la tabla 7 con la descripción de las escalas definidas.

Tabla 7. Descripción de las escalas a utilizar

Tabla de justificación de escala			
Criterio de evaluación	Definición	Escala	Unidad de medida/cuantificación
Criterio 1	Definición del atributo que se evaluará	4	Máxima calificación
		3	
		2	
		1	Característica mínima aceptable
		4	
		3	
		2	
		1	
		4	
		3	
		2	
		1	
		4	
		3	
		2	
		1	
		4	
		3	
		2	
		1	

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.6 Ponderar los criterios de evaluación

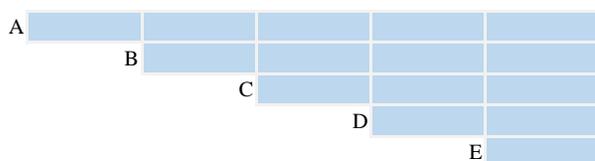
El nivel de importancia que tiene cada uno de los criterios de evaluación queda definido mediante la asignación de un porcentaje. La determinación del porcentaje resulta una de las etapas básicas de la realización del estudio de valor, ya que se busca justificar el porqué de la asignación de este. Para la determinación del porcentaje se presenta una herramienta para la solución a este problema, se trata de la matriz para la ponderación de cada uno de los criterios de evaluación. La asignación del porcentaje se llevará a cabo entre los miembros del equipo de trabajo. Se trata de comparar entre sí cada uno de los criterios de evaluación, pudiendo ser a criterio de los evaluadores (integrantes del equipo de trabajo) de mayor o menor importancia, o igual importancia. Auxiliándose de la matriz de ponderación de criterios se determina el porcentaje de cada uno. Se llena la tabla 8 para poder ponderar cada criterio.

Tabla 8. Matriz de ponderación de los criterios de evaluación

Criterios de evaluación	
ID	Descripción
A	Criterio 1
B	Criterio 2
C	Criterio 3
D	Criterio 4
E	Criterio 5

A A es de mayor importancia

A/B A y B son de igual importancia



Ponderación		
Criterio	Total	% del total
Criterio 1		0%
Criterio 2		0%
Criterio 3		0%
Criterio 4		0%
Criterio 5		0%
Total	0	0%

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.7 *Evaluar cada una de las alternativas*

Una vez determinado el nivel de importancia de cada uno de los criterios de evaluación, el siguiente paso, es evaluar las alternativas que se hayan propuesto. Cada uno de los criterios podrá recibir una calificación de 1-4, la calificación obtenida dependerá de las características que presente. La calificación total recibida para cada alternativa será la suma de los totales parciales obtenidos por cada una de las alternativas. El total parcial se obtiene como el producto de multiplicar el porcentaje asignado a cada uno de los criterios, y la calificación recibida. Se llena la tabla 9 para evaluar cada criterio.

Tabla 9. Matriz de evaluación de criterios

Evaluación de los criterios				
ID	Descripción	Concepto	%	Escala de criterio
A	Criterio 1	Alternativa 1		
		Alternativa 2		
B	Criterio 2	Alternativa 1		
		Alternativa 2		
C	Criterio 3	Alternativa 1		
		Alternativa 2		
D	Criterio 4	Alternativa 1		
		Alternativa 2		
E	Criterio 5	Alternativa 1		
		Alternativa 2		

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

3.5.2.8 Desarrollar la solución viable del estudio

Una de las actividades siguientes, una vez que se han evaluado cada una de las alternativas y que se tiene la calificación total recibida por cada una de ellas, es realizar una comparación entre las alternativas propuestas. La información contenida en la tabla reflejará el puntaje obtenido por cada alternativa. De la misma manera se hace una comparativa en cuanto al costo y se proporciona el índice de valor definido como el cociente de la calificación total recibida por cada alternativa entre su costo. Se llena la tabla 10 para calcular el IV de cada alternativa.

Tabla 10. Índice de valor de cada alternativa

Desempeño de las alternativas			
Alternativa	Puntaje total	Costo total	Índice de valor
Alternativa 1			
Alternativa 2			

Fuente: (Carrillo & García, 2011)

IV. METODOLOGÍA

4.1 ENFOQUE

El enfoque cuantitativo utiliza la recolección de datos para probar una hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías (Dzul). El enfoque de la investigación es cuantitativo ya que es realizado de la siguiente manera, descrita a través de fases por Hernández Sampieri (2014):

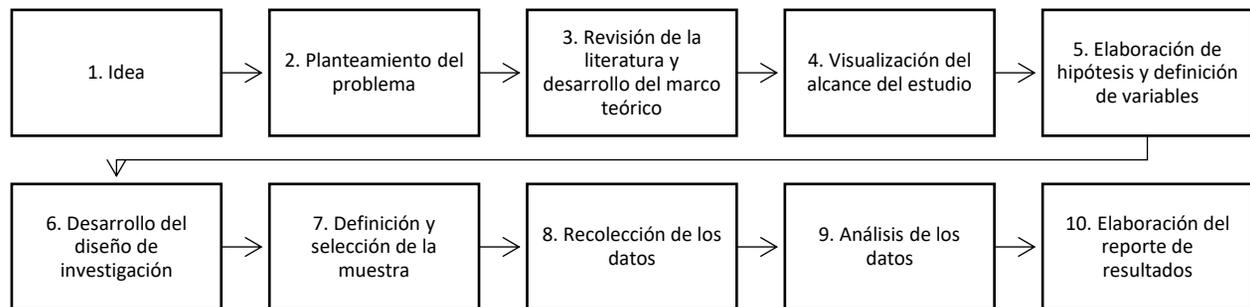


Ilustración 4. Proceso del enfoque cuantitativo

Fuente: (Hernández Sampieri, 2014)

Las fases 1-7 engloban el proceso realizado para poder completar el primer objetivo de la investigación, desde generar la idea principal hasta elaborar los ladrillos con mezclas de materiales ya establecidas, después de haber realizado una revisión de literatura extensa y pruebas preliminares con los materiales utilizados. La evaluación de los resultados obtenidos después de someter los ladrillos a los ensayos de compresión es representada en las últimas fases del proceso (8-10), así como la aplicación de la Ingeniería de Valor que fue necesaria para completar el tercer objetivo.

El enfoque cuantitativo tiene las características de:

1. El investigador o investigadora plantea un problema de estudio delimitado y concreto sobre el fenómeno, aunque en evolución. Sus preguntas de investigación versan sobre cuestiones específicas.

2. Una vez planteado el problema de estudio, el investigador o investigadora considera lo que se ha investigado anteriormente (la revisión de la literatura) y construye un marco teórico (la teoría que habrá de guiar su estudio), del cual deriva una o varias hipótesis (cuestiones que va a examinar si son ciertas o no) y las somete a prueba mediante el empleo de los diseños de investigación apropiados.

3. Las hipótesis se generan antes de recolectar y analizar los datos.

4. La recolección de los datos se fundamenta en la medición (se miden las variables o conceptos contenidos en las hipótesis). Esta recolección se lleva a cabo al utilizar procedimientos estandarizados y aceptados por una comunidad científica.

5. Debido a que los datos son producto de mediciones, se representan mediante números (cantidades) y son analizados con métodos estadísticos.

6. En una investigación cuantitativa se intenta generalizar los resultados encontrados en un grupo o segmento (muestra) a una colectividad mayor (universo o población). También se busca que los estudios efectuados puedan replicarse. (Hernández Sampieri, 2014, p. 5-6)

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Las variables presentes durante la investigación se clasifican en dependientes e independientes.

4.2.1 VARIABLE DEPENDIENTE

- Resistencia a la compresión (psi)

4.2.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

- Cantidad de suelo en el ladrillo (g)
- Cantidad de cemento en el ladrillo (g)
- Cantidad de cal en el ladrillo (g)
- Cantidad de agua en el ladrillo (g)
- Cantidad de cascarilla de arroz en el ladrillo (g)

- Cantidad de fibras de sisal en el ladrillo (g)
- Fuerza colocada al material para fabricar el ladrillo (lbs)

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

4.3.1 TÉCNICAS

- Arqueo bibliográfico, para hacer la revisión de fuentes de información.
- Ensayos de laboratorio, para clasificar el suelo, materia prima de los ladrillos y para poder realizar las pruebas requeridas a los ladrillos para conocer sus propiedades.
- Diseños factoriales, para generar las combinaciones de materiales de cada tipo de ladrillo.
- Pruebas estadísticas, para analizar los datos recolectados después de realizar las pruebas a los ladrillos.
- Ingeniería de Valor, para realizar una comparación entre los ladrillos tradicionales de arcilla y los ladrillos ecológicos y poder analizar qué tan factible es su implementación.

4.3.2 INSTRUMENTOS

- Bases de datos virtuales, utilizada para recolectar toda la información necesaria para llevar a cabo la investigación.
- MS Excel, utilizado para elaboración de tablas y cálculos básicos.
- Minitab, utilizado para evaluar estadísticamente los resultados obtenidos.
- Balanza, utilizada para el pesaje de los materiales.
- Utensilios básicos de laboratorio como ser cucharas, bandejas, etc., utilizados para la fabricación de los ladrillos.
- Máquina de compresión Humboldt CM-2500-DIR, utilizada para la fabricación de los ladrillos y para conocer la resistencia a la compresión de estos.



Ilustración 5. Máquina de compresión

Fuente: (Test Mark Industries, 2020)

4.4 MATERIALES

Los materiales utilizados son los que componen las mezclas de los ladrillos.

- Cemento Portland de uso general



Ilustración 6. Cemento Portland GU

Fuente: elaboración propia

- Cal hidratada



Ilustración 7. Cal hidratada

Fuente: elaboración propia

- Cascarilla de arroz



Ilustración 8. Cascarilla de arroz

Fuente: elaboración propia

- Fibras de sisal



Ilustración 9. Fibras de sisal

Fuente: elaboración propia

- Agua
- Material selecto

4.5 POBLACIÓN Y MUESTRA

La población son los ocho tipos de ladrillos fabricados más los ladrillos tradicionales de arcilla. Para los ladrillos ecológicos, la población debe ser estudiada en su totalidad, por lo que la muestra sería lo mismo (5); para el ladrillo tradicional se escoge una muestra de 5 elementos.

4.6 METODOLOGÍA DE ESTUDIO

Se determinó de cuántos materiales, aparte del suelo, estaría compuesta la mezcla de los ladrillos y para determinar en qué cantidad estaría presente cada uno se tomaron las recomendaciones de un profesional con experiencia en temas relacionados. Para determinar la cantidad óptima de agua que la mezcla requiere se realizó el ensayo de Proctor Estándar en el suelo. El suelo utilizado

fue tamizado antes de fabricar los ladrillos con el tamiz No. 4 para que los ladrillos estuvieran conformados con partículas no mayores a 4.76mm.

Para la elaboración de los ladrillos se utilizó un molde que es capaz de soportar fuertes presiones. Teniendo los materiales listos se realizaron múltiples intentos de fabricación, para observar las dimensiones con las que los ladrillos resultaban y establecer qué cantidad de suelo era necesaria para que el ladrillo tuviera altura similar a la de un ladrillo tradicional de arcilla. Una vez conociendo la cantidad de suelo, aditivo estabilizador, aditivo vegetal y agua para cada mezcla se procedió a fabricar 5 réplicas de cada tipo de ladrillo. La cantidad de réplicas se decidió tomando como justificación principal el hecho de que fabricar 1 ladrillo requiere de fuerza física considerable y entre 30-40 minutos y considerando que la norma ASTM C 62 exige un valor de resistencia a la compresión resultando de un promedio de 5 ladrillos.

Los ladrillos fueron elaborados siguiendo los siguientes pasos:

1. Pesar cada material según la combinación del ladrillo a fabricar
2. Limpiar y engrasar el molde
3. Mezclar el suelo y aditivos
4. Agregar el agua y mezclar hasta que la mezcla esté homogénea
5. Agregar al molde la mezcla preparada en 3 partes, después de cada una colocar la tapadera y dar 25 golpes con un martillo de goma, equitativamente
6. Colocar el molde en la máquina de compresión y asegurarse que esté centrado
7. Aplicar una carga de 40,000lbs al molde
8. Retirar el molde y remover el ladrillo con mucho cuidado

Se decidió esperar 14 días antes de someter los ladrillos a compresión, considerando que el cemento y cal necesitan un tiempo de fraguado y tomando como referencia el porcentaje de resistencia que alcanza un cilindro de concreto a esa edad. Se sometieron los 5 ladrillos de cada tipo al ensayo de compresión, tomando previamente los datos de peso y medidas de la sección para luego poder calcular su resistencia a la compresión. Cabe mencionar que también se

sometieron a los ensayos los ladrillos tradicionales de arcilla para poder luego compararlos con los ecológicos.

Los datos de la resistencia a la compresión de los ladrillos fueron analizados y comparados con los requisitos mecánicos para ladrillos de construcción de la ASTM. Se logró concluir si los ladrillos ecológicos cumplen con el requisito para el ladrillos clasificado como NW. Un estudio estadístico descriptivo e inferencial fue realizado en el cual se validó si las hipótesis iniciales del experimento eran verdaderas o no. Asimismo se calcularon intervalos de confianza, de predicción y pruebas de hipótesis para la diferencia de medias. Con un análisis del diseño factorial se determinó qué factores, individualmente o interaccionando entre ellos, generó efectos significativos en la variable respuesta del experimento, la resistencia a la compresión de los ladrillos.

Después de conocer las propiedades de los ocho tipos de ladrillos ecológicos y los ladrillos tradicionales de arcilla, se evaluó la factibilidad de los ladrillos ecológicos en cuanto a la implementación de estos en la construcción de una vivienda. La manera de evaluación fue aplicando la Ingeniería de Valor, para obtener resultados objetivos, se tomaron en cuenta criterios de ingenieros civiles.

4.7 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Con el objetivo de validar que los ladrillos ecológicos cumplen con el estándar de resistencia a la compresión de la ASTM, se obtuvo el promedio de resistencia de 5 ladrillos de cada tipo. Los resultados obtenidos, de la resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos y tradicionales de arcilla se compararon con el valor mínimo especificado por la norma ASTM C 62 (1,500 psi).

Las hipótesis planteadas al inicio del experimento (tabla 11) fueron probadas mediante un análisis estadístico inferencial, específicamente con las pruebas de hipótesis para la media poblacional. Para poder realizar un estudio estadístico inferencial con los datos de resistencia obtenidos, se verificó primero si los datos son aproximadamente normales. El método de validación fue con la prueba de normalidad, realizada en Minitab.

Tabla 11. Hipótesis al inicio del experimento

Ladrillo	H₀
cemento 10% + casc. de arroz 1%	$\mu = 1,500$ psi
cemento 5% + casc. de arroz 1%	$\mu = 1,000$ psi
cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	$\mu = 1,500$ psi
cemento 5% + fibra de sisal 0.1%	$\mu = 1,000$ psi
cal 10% + casc. de arroz 1%	$\mu = 1,500$ psi
cal 5% + casc. de arroz 1%	$\mu = 1,000$ psi
cal 10% + fibra de sisal 0.1%	$\mu = 1,500$ psi
cal 5% + fibra de sisal 0.1%	$\mu = 1,000$ psi
tradicional de arcilla	$\mu = 500$ psi

Fuente: elaboración propia

La validación de la implementación de los ladrillos ecológicos en una construcción se realizó con la técnica de la Ingeniería de Valor, en la cual se evaluaron diferentes criterios que son importantes y deben ser considerados al momento de escoger entre un material y otro.

4.8 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

Actividad/Semana	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Semana 6	Semana 7	Semana 8	Semana 9	Semana 10	Semana 11
	20/01 - 26/01	27/01 - 02/02	03/02 - 09/02	10/02 - 16/02	17/02 - 23/02	24/02 - 01/03	02/03 - 08/03	09/03 - 15/03	16/03 - 22/03	23/03 - 29/03	30/03 - 05/04
	L M Mi J V S D										
Revisión de Literatura	■	■	■	■	■	■	■				
Planteamiento del problema		■	■	■	■	■	■				
Recolección de materiales		■	■	■	■	■	■				
Ensayos de laboratorio al suelo		■	■	■	■	■	■				
Diseño factorial				■	■	■	■				
Realizar pruebas preliminares de ladrillos ecológicos					■	■	■				
Fabricar ladrillos ecológicos						■	■	■	■	■	■
Espera tiempo de fraguado de los ladrillos ecológicos						■	■	■	■	■	■
Ensayo de compresión en ladrillos tradicionales							■	■	■	■	■
Ensayo de compresión en ladrillos ecológicos								■	■	■	■
Análisis estadístico descriptivo con datos de resistencia a la compresión									■	■	■
Validación de resultados con norma ASTM C 67									■	■	■
Análisis estadístico inferencial con datos de resistencia a la compresión										■	■
Aplicación de la Ingeniería de Valor										■	■
Concluir en base a los resultados										■	■
Realizar artículo científico										■	■
Entrega Final											■

Ilustración 10-Cronograma de actividades

Fuente: elaboración propia

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 ARREGLO FACTORIAL

El diseño factorial de la investigación fue de 2^3 en donde se estudiaron tres factores con dos niveles cada uno. Los factores del experimento son de tipo cualitativo y cuantitativo, siendo los cualitativos el tipo de estabilizador (cemento y cal) y el tipo de aditivo vegetal (cascarilla de arroz y fibra de sisal) presentes en la mezcla, y siendo el factor cuantitativo la cantidad de estabilizador, en porcentaje respecto a la masa total de la mezcla. Los porcentajes de cada factor presente en la mezcla se escogieron bajo el criterio de un especialista en el tema y son: 5 y 10% para el cemento y la cal, 1% para la cascarilla de arroz y 0.1% para la fibra de sisal. Se elaboró el arreglo factorial para ocho tipos de ladrillos (tabla 12) y se representó geoméricamente (ilustración 11).

Tabla 12. Arreglo factorial del estudio

Aditivo estabilizador	Cantidad de estabilizador	Aditivo vegetal
cemento	5%	cas. de arroz
cal	5%	cas. de arroz
cemento	10%	cas. de arroz
cal	10%	cas. de arroz
cemento	5%	fibra de sisal
cal	5%	fibra de sisal
cemento	10%	fibra de sisal
cal	10%	fibra de sisal

Fuente: elaboración propia.

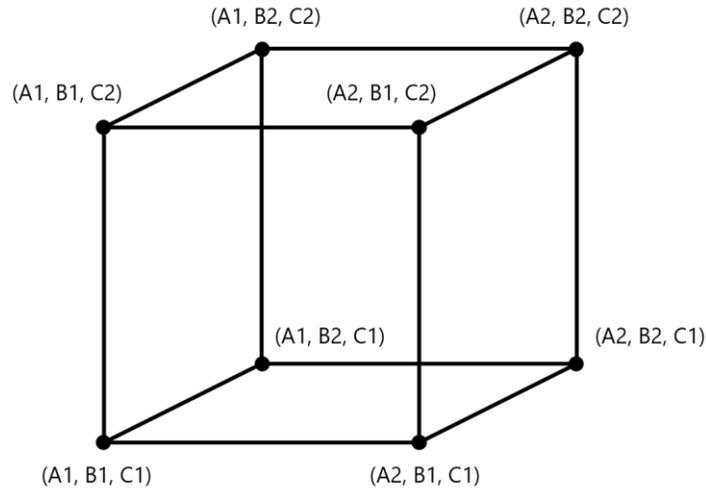


Ilustración 11-Representación geométrica del arreglo factorial

Fuente: elaboración propia.

5.2 ELABORACIÓN DE LOS LADRILLOS

El suelo utilizado en los ladrillos fue escogido entre varios, y buscando utilizar el mismo que utilizan las ladrilleras para que al momento de comparar los ladrillos ecológicos, estos tuvieran una mayor relación a los tradicionales. Las opciones de suelo fueron 3, el primer suelo (ilustración 12) presentó complicaciones al momento en el que se le realizó el ensayo de Proctor Estándar, ya que como se muestra en la tabla 13, la *masa del suelo húmedo + molde* tardó en disminuir a medida que se aumentaba el contenido de humedad y una vez bajó el valor, éste volvió a subir en el próximo aumento de humedad.



Ilustración 12. Muestra de opción #1 de suelo

Fuente: elaboración propia.

Tabla 13. Proctor estándar en opción #1 de suelo

Humedad de la mezcla	12%	14%	16%	18%	20%	22%	24%	32%	34%	36%	38%
Masa del molde	9.280 lbs										
Masa suelo húmedo + molde	11.815 lbs	11.924 lbs	11.938 lbs	11.999 lbs	12.048 lbs	12.074 lbs	12.153 lbs	12.368 lbs	12.386 lbs	12.345 lbs	12.370 lbs
Masa del suelo húmedo	2.536 lbs	2.644 lbs	2.659 lbs	2.719 lbs	2.769 lbs	2.795 lbs	2.873 lbs	3.089 lbs	3.107 lbs	3.066 lbs	3.091 lbs
Lata No.	56	58	306	85	80	29	90	7	13	5	30
Masa de lata vacía	11.11 g	11.00 g	10.94 g	11.06 g	11.07 g	10.90 g	10.92 g	10.93 g	10.88 g	11.11 g	11.15 g
Masa lata + suelo húmedo	27.32 g	22.95 g	25.44 g	25.07 g	24.03 g	26.27 g	24.91 g	38.65 g	32.05 g	23.49 g	22.28 g

Fuente: elaboración propia.

Esto no resultó normal ya que el suelo a simple vista no tenía una humedad tan alta y porque lo correcto es que una vez el valor de la masa baje, éste siga bajando al aumentar el contenido de humedad. También, se consultó con un especialista en geotecnia y recomendó no utilizar el suelo porque lo consideraba una toba limosa y no aportaría a la resistencia de los ladrillos. El segundo tipo de suelo fue descartado ya que era una arcilla dura y no iba a ser fácil de trabajar con él, tanto para realizar los ensayos de laboratorio como los ladrillos. Se decidió trabajar con la tercera opción, un material selecto obtenido de una ladrillera ubicada en las afueras de la ciudad de Tegucigalpa (ilustración 13).



Ilustración 13. Ladrillera en la que se obtuvo el suelo utilizado en ladrillos ecológicos

Fuente: elaboración propia.

Se determinó en base a pruebas iniciales que se tenía que utilizar 3,500 g de suelo en cada ladrillo. El ensayo de Proctor Estándar indicó que el contenido óptimo de humedad en la mezcla es de un 22% (ver anexo 1). Dado que el suelo en su estado natural ya contiene un porcentaje de humedad, en este caso un 11% (tabla 14), no se le agregó un 22% de agua, sino un 11% para complementarse y llegar al óptimo.

Tabla 14. Contenido de humedad del suelo

DETALLE	Latita No.		
	LP1	5	80
Masa de latita, W_1	11.04 g	11.16 g	11.03 g
Masa de latita + suelo húmedo, W_2	22.81 g	23.75 g	26.89 g
Masa de latita + suelo seco, W_3	21.64 g	22.47 g	25.36 g
Masa de agua, $W_w = W_2 - W_3$	1.17 g	1.28 g	1.53 g
Masa de Suelo Seco, $W_s = W_3 - W_1$	10.60 g	11.31 g	14.33 g
Contenido de Humedad	11.04 %	11.32 %	10.68 %
Contenido de Humedad Promedio	11.01 %		

Fuente: elaboración propia.

El contenido de humedad del suelo se calculó:

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{11.04 + 11.32 + 10.68}{3} = 11.01\%$$

Cabe mencionar que no todas las mezclas se realizaron con el contenido óptimo de humedad. Para las mezclas de cal 5% + casc. de arroz se tuvo que aumentar la cantidad de agua, esto debido a que el 22% no aportaba a la trabajabilidad de la mezcla y después de ser compactada, al ser manipulado el ladrillo se desintegraba. Se utilizó el contenido de humedad con el que la mezcla resultaba tener buena trabajabilidad, 27%. La mezcla exacta de los ocho tipos de ladrillos ecológicos se especifica en la tabla 15.

Tabla 15. Cantidad de materiales en cada mezcla

Cemento 5% + cascarilla de arroz 1%		Cemento 10% + cascarilla de arroz 1%	
suelo	3,500.00 g	suelo	3,500.00 g
cemento	175.00 g	cemento	350.00 g
cas. arroz	36.75 g	cas. arroz	38.50 g
agua (11%)	404.25 ml	agua (11%)	423.50 ml
Cemento 5% + fibra de sisal 0.1%		Cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	
suelo	3,500.00 g	suelo	3,500.00 g
cemento	175.00 g	cemento	350.00 g
fibra sisal	3.68 g	fibra sisal	3.85 g
agua (11%)	404.25 ml	agua (11%)	423.50 ml
Cal 5% + cascarilla de arroz 1%		Cal 10% + cascarilla de arroz 1%	
suelo	3,500.00 g	suelo	3,500.00 g
cal	175.00 g	cal	350.00 g
cas. arroz	36.75 g	cas. arroz	38.50 g
agua (16%)	588.00 ml	agua (11%)	423.50 ml
Cemento 5% + fibra de sisal 0.1%		Cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	
suelo	3,500.00 g	suelo	3,500.00 g
cal	175.00 g	cal	350.00 g
fibra sisal	3.68 g	fibra sisal	3.85 g
agua (11%)	404.25 ml	agua (11%)	423.50 ml

Fuente: elaboración propia

En la ilustración 14 se muestra un proceso de fabricación condensado: preparación del suelo, mezcla de materiales ya pesados, colocación de la mezcla en el molde, compactación y liberación del ladrillo del molde; asimismo se muestra el resultado final de un tipo de ladrillo (resultado final de todos los tipos de ladrillos en anexo 2).

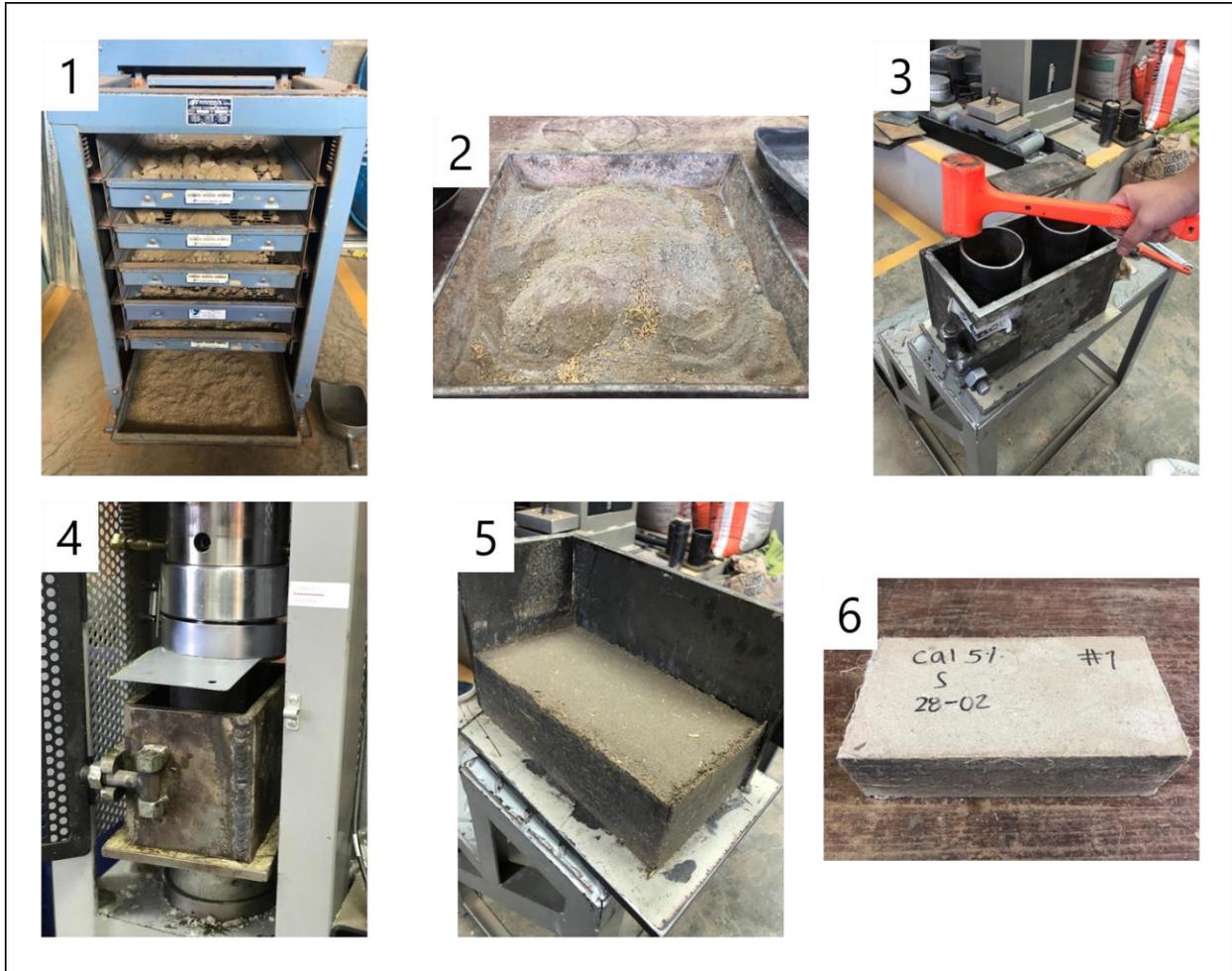


Ilustración 14. Proceso de fabricación de un ladrillo ecológico

5.3 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

5.3.1 LADRILLOS ECOLÓGICOS

Se tomaron los datos de la masa y dimensiones de los ladrillos antes de ser sometidos al ensayo de compresión, calculando un promedio (ecuación 1) en el ancho, largo y alto, puesto que las dimensiones no necesariamente son constantes en toda su sección. Con los datos de ancho y largo se calculó el área de la sección transversal (ecuación 2), dato necesario para calcular la resistencia a la compresión de los ladrillos.

$$\text{Promedio} = \frac{\text{dimensión 1} + \text{dimensión 2}}{2}$$

Ecuación 1. Promedio de dimensión

$$\text{área} = (\text{ancho})(\text{largo})$$

Ecuación 2. Área sección transversal

En la tabla 16 se muestran los resultados del ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%. Para ver los resultados de masa y dimensiones de los demás ladrillos ecológicos, ver anexo 3.

Tabla 16. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%

#1	masa	3,726.40 g		#4	masa	3,653.40 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.10 pulg.	5.13 pulg.
		5.10 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.10 pulg.	10.15 pulg.		largo	10.05 pulg.	10.03 pulg.
		10.20 pulg.				10.00 pulg.	
	alto	3.40 pulg.	3.35 pulg.		alto	3.00 pulg.	2.98 pulg.
3.30 pulg.		2.95 pulg.					
área	51.77 pulg.²		área	51.38 pulg.²			
#2	masa	3,615.30 g		#5	masa	3,653.80 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.
		5.10 pulg.				5.10 pulg.	
	largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.		largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.
		10.00 pulg.				10.05 pulg.	
	alto	2.90 pulg.	2.98 pulg.		alto	2.90 pulg.	2.93 pulg.
3.05 pulg.		2.95 pulg.					
área	51.00 pulg.²		área	51.26 pulg.²			
#3	masa	3,927.50 g		#3	masa	3,927.50 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.
		5.10 pulg.				5.10 pulg.	
	largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.		largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.
		10.05 pulg.				10.05 pulg.	
	alto	3.05 pulg.	2.98 pulg.		alto	3.05 pulg.	2.98 pulg.
2.90 pulg.		2.90 pulg.					
área	51.26 pulg.²		área	51.26 pulg.²			

Fuente: elaboración propia

Un ejemplo del cálculo del promedio del ancho y área de la sección transversal se muestra a continuación, para el ladrillo #4:

$$\text{ancho} = \frac{5.10 + 5.15}{2} = 5.13 \text{ pulg.}$$

$$\text{área} = (5.13)(10.03) = 51.38 \text{ pulg.}^2$$

Una vez obtenida la información del ladrillo, se procedió a realizar el ensayo de compresión (ilustración 15) y conociendo la carga máxima que soportó, se calculó su resistencia con la ecuación 3.



Ilustración 15. Ensayo de compresión en ladrillo ecológico

$$f_c = P/A$$

Ecuación 3. Resistencia a la compresión

Donde,

f_c → resistencia a la compresión del ladrillo (psi)

P → carga de compresión soportada por el ladrillo (lbs)

A → área de sección transversal del ladrillo (pulg.²)

La carga soportada de cada ladrillo ecológico se muestra en la tabla 17.

Tabla 17. Carga de compresión soportada por los ladrillos ecológicos

cemento 10% + casc. de arroz 1%		cal 10% + casc. de arroz 1%	
#	carga soportada	#	carga soportada
1	79,010.00 lbs	1	58,280.00 lbs
2	100,330.00 lbs	2	58,980.00 lbs
3	80,840.00 lbs	3	64,410.00 lbs
4	89,230.00 lbs	4	76,310.00 lbs
5	89,790.00 lbs	5	68,920.00 lbs

cemento 5% + casc. de arroz 1%		cal 5% + casc. de arroz 1%	
#	carga soportada	#	carga soportada
1	71,050.00 lbs	1	59,840.00 lbs
2	63,560.00 lbs	2	53,960.00 lbs
3	62,390.00 lbs	3	48,410.00 lbs
4	55,630.00 lbs	4	49,500.00 lbs
5	57,570.00 lbs	5	49,230.00 lbs

cemento 10% + fibra de sisal 0.1%		cal 10% + fibra de sisal 0.1%	
#	carga soportada	#	carga soportada
1	105,350.00 lbs	1	64,600.00 lbs
2	90,480.00 lbs	2	58,680.00 lbs
3	112,130.00 lbs	3	86,600.00 lbs
4	104,400.00 lbs	4	68,310.00 lbs
5	94,430.00 lbs	5	63,180.00 lbs

cemento 5% + fibra de sisal 0.1%		cal 5% + fibra de sisal 0.1%	
#	carga soportada	#	carga soportada
1	65,050.00 lbs	1	66,360.00 lbs
2	76,580.00 lbs	2	62,190.00 lbs
3	61,060.00 lbs	3	68,410.00 lbs
4	74,230.00 lbs	4	56,940.00 lbs
5	63,490.00 lbs	5	62,520.00 lbs

Fuente: elaboración propia

Para el cálculo de la resistencia a la compresión del ladrillo ecológico #4 del tipo cemento 10% + casc. de arroz 1%:

$$f_c = \frac{89,230 \text{ lbs}}{51.38 \text{ pulg.}^2} = 1,736.73 \text{ psi}$$

La resistencia a la compresión de todos los ladrillos ecológicos se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos

cemento 10% + casc. de arroz 1%				cal 10% + casc. de arroz 1%			
#	área	carga soportada	resistencia a la compresión	#	área	carga soportada	resistencia a la compresión
1	51.77 pulg. ²	79,010.00 lbs	1,526.32 psi	1	51.63 pulg. ²	58,280.00 lbs	1,128.71 psi
2	51.00 pulg. ²	100,330.00 lbs	1,967.25 psi	2	51.38 pulg. ²	58,980.00 lbs	1,147.96 psi
3	51.26 pulg. ²	80,840.00 lbs	1,577.21 psi	3	51.13 pulg. ²	64,410.00 lbs	1,259.79 psi
4	51.38 pulg. ²	89,230.00 lbs	1,736.73 psi	4	52.28 pulg. ²	76,310.00 lbs	1,459.78 psi
5	51.26 pulg. ²	89,790.00 lbs	1,751.83 psi	5	52.53 pulg. ²	68,920.00 lbs	1,312.11 psi

cemento 5% + casc. de arroz 1%				cal 5% + casc. de arroz 1%			
#	área	carga soportada	resistencia a la compresión	#	área	carga soportada	resistencia a la compresión
1	51.38 pulg. ²	71,050.00 lbs	1,382.77 psi	1	51.26 pulg. ²	59,840.00 lbs	1,167.50 psi
2	51.51 pulg. ²	63,560.00 lbs	1,233.94 psi	2	51.38 pulg. ²	53,960.00 lbs	1,050.16 psi
3	51.25 pulg. ²	62,390.00 lbs	1,217.37 psi	3	52.01 pulg. ²	48,410.00 lbs	930.80 psi
4	52.53 pulg. ²	55,630.00 lbs	1,059.01 psi	4	51.51 pulg. ²	49,500.00 lbs	961.05 psi
5	51.50 pulg. ²	57,570.00 lbs	1,117.86 psi	5	52.27 pulg. ²	49,230.00 lbs	941.89 psi

cemento 10% + fibra de sisal 0.1%				cal 10% + fibra de sisal 0.1%			
#	área	carga soportada	resistencia a la compresión	#	área	carga soportada	resistencia a la compresión
1	51.51 pulg. ²	105,350.00 lbs	2,045.23 psi	1	52.00 pulg. ²	64,600.00 lbs	1,242.31 psi
2	51.26 pulg. ²	90,480.00 lbs	1,765.29 psi	2	51.50 pulg. ²	58,680.00 lbs	1,139.42 psi
3	51.38 pulg. ²	112,130.00 lbs	2,182.26 psi	3	52.66 pulg. ²	86,600.00 lbs	1,644.65 psi
4	51.00 pulg. ²	104,400.00 lbs	2,047.06 psi	4	52.01 pulg. ²	68,310.00 lbs	1,313.43 psi
5	51.26 pulg. ²	94,430.00 lbs	1,842.36 psi	5	52.27 pulg. ²	63,180.00 lbs	1,208.67 psi

cemento 5% + fibra de sisal 0.1%				cal 5% + fibra de sisal 0.1%			
#	área	carga soportada	resistencia a la compresión	#	área	carga soportada	resistencia a la compresión
1	51.89 pulg. ²	65,050.00 lbs	1,253.70 psi	1	52.02 pulg. ²	66,360.00 lbs	1,275.79 psi
2	51.26 pulg. ²	76,580.00 lbs	1,494.10 psi	2	51.63 pulg. ²	62,190.00 lbs	1,204.43 psi
3	51.51 pulg. ²	61,060.00 lbs	1,185.49 psi	3	52.26 pulg. ²	68,410.00 lbs	1,309.03 psi
4	52.53 pulg. ²	74,230.00 lbs	1,413.20 psi	4	51.76 pulg. ²	56,940.00 lbs	1,100.13 psi
5	51.75 pulg. ²	63,490.00 lbs	1,226.86 psi	5	52.02 pulg. ²	62,520.00 lbs	1,201.96 psi

Fuente: elaboración propia

5.3.2 LADRILLOS TRADICIONALES DE ARCILLA

Ladrillos tradicionales de arcilla también fueron probados a compresión (ilustración 16) para comparar después los resultados con los ladrillos ecológicos.



Ilustración 16. Ensayo de compresión en ladrillo tradicional de arcilla

Fuente: elaboración propia

La masa y dimensiones de cada ladrillo tradicional de arcilla se muestran en la tabla 19 y como se puede ver, el área de estos ladrillos es un poco menor a la de los ladrillos ecológicos. Su masa cae en el mismo rango de los ladrillos ecológicos.

Tabla 19. Masa y dimensiones de los ladrillos tradicionales de arcilla

#1	masa	3,848.40 g		#4	masa	4,010.40 g	
	ancho	4.90 pulg.	4.83 pulg.		ancho	4.80 pulg.	4.83 pulg.
		4.75 pulg.				4.85 pulg.	
	largo	9.55 pulg.	9.40 pulg.		largo	9.85 pulg.	9.68 pulg.
		9.25 pulg.				9.50 pulg.	
	alto	3.50 pulg.	3.50 pulg.		alto	3.50 pulg.	3.60 pulg.
3.50 pulg.		3.70 pulg.					
área	45.36 pulg.²		área	46.68 pulg.²			
#2	masa	3,940.20 g		#5	masa	3,919.80 g	
	ancho	4.80 pulg.	4.78 pulg.		ancho	4.90 pulg.	4.83 pulg.
		4.75 pulg.				4.75 pulg.	
	largo	9.75 pulg.	9.58 pulg.		largo	9.85 pulg.	9.73 pulg.
		9.40 pulg.				9.60 pulg.	
	alto	3.70 pulg.	3.63 pulg.		alto	3.60 pulg.	3.65 pulg.
3.55 pulg.		3.70 pulg.					
área	45.72 pulg.²		área	46.92 pulg.²			
#3	masa	3,984.80 g		#3	masa	3,984.80 g	
	ancho	4.90 pulg.	4.88 pulg.		ancho	4.90 pulg.	4.88 pulg.
		4.85 pulg.				4.85 pulg.	
	largo	9.75 pulg.	9.65 pulg.		largo	9.75 pulg.	9.65 pulg.
		9.55 pulg.				9.55 pulg.	
	alto	3.60 pulg.	3.55 pulg.		alto	3.60 pulg.	3.55 pulg.
3.50 pulg.		3.50 pulg.					
área	47.04 pulg.²		área	47.04 pulg.²			

Fuente: elaboración propia

La carga soportada por cada ladrillo tradicional de arcilla se muestra en la tabla 20 y su resistencia a la compresión, calculada de la misma manera que con los ladrillos ecológicos, en la tabla 21.

Tabla 20. Carga de compresión soportada por los ladrillos tradicionales de arcilla

ladrillo tradicional de arcilla	
#	carga soportada
1	23,190.00 lbs
2	30,790.00 lbs
3	31,600.00 lbs
4	26,810.00 lbs
5	29,400.00 lbs

Fuente: elaboración propia

Tabla 21. Resistencia a la compresión de los ladrillos tradicionales de arcilla

ladrillo tradicional de arcilla			
#	área	carga soportada	resistencia a la compresión
1	45.36 pulg. ²	23,190.00 lbs	511.30 psi
2	45.72 pulg. ²	30,790.00 lbs	673.44 psi
3	47.04 pulg. ²	31,600.00 lbs	671.72 psi
4	46.68 pulg. ²	26,810.00 lbs	574.31 psi
5	46.92 pulg. ²	29,400.00 lbs	626.56 psi

Fuente: elaboración propia

5.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los datos recolectados, se realizó un estudio estadístico descriptivo e inferencial para poder concluir científicamente sobre la población.

5.4.1 ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

En las tablas 22 y 23 se muestran brevemente parámetros básicos de la estadística descriptiva que ayuda a tener un mejor entendimiento del comportamiento de los ladrillos.

Tabla 22. Estadísticos descriptivos de los ladrillos ecológicos

<i>cemento 10% + casc. de arroz 1%</i>		<i>cal 10% + casc. de arroz 1%</i>	
Media	1,711.87	Media	1,261.67
Desviación estándar	173.20	Desviación estándar	134.54
Varianza de la muestra	29,999.38	Varianza de la muestra	18,101.14
Rango	440.93	Rango	331.07
Mínimo	1,526.32	Mínimo	1,128.71
Máximo	1,967.25	Máximo	1,459.78
Cuenta	5	Cuenta	5
<i>cemento 5% + casc. de arroz 1%</i>		<i>cal 5% + casc. de arroz 1%</i>	
Media	1,202.19	Media	1,010.28
Desviación estándar	123.95	Desviación estándar	99.66
Varianza de la muestra	15,364.05	Varianza de la muestra	9,931.33
Rango	323.75	Rango	236.69
Mínimo	1,059.01	Mínimo	930.80
Máximo	1,382.77	Máximo	1,167.50
Cuenta	5	Cuenta	5
<i>cemento 10% + fibra de sisal 0.1%</i>		<i>cal 10% + fibra de sisal 0.1%</i>	
Media	1,976.44	Media	1,309.69
Desviación estándar	169.30	Desviación estándar	197.45
Varianza de la muestra	28,660.95	Varianza de la muestra	38,987.55
Rango	416.97	Rango	505.23
Mínimo	1,765.29	Mínimo	1,139.42
Máximo	2,182.26	Máximo	1,644.65
Cuenta	5	Cuenta	5
<i>cemento 5% + fibra de sisal 0.1%</i>		<i>cal 5% + fibra de sisal 0.1%</i>	
Media	1,314.67	Media	1,218.27
Desviación estándar	132.30	Desviación estándar	80.56
Varianza de la muestra	17,504.48	Varianza de la muestra	6,490.06
Rango	308.61	Rango	208.90
Mínimo	1,185.49	Mínimo	1,100.13
Máximo	1,494.10	Máximo	1,309.03
Cuenta	5	Cuenta	5

Fuente: elaboración propia

Tabla 23. Estadísticos descriptivos del ladrillo tradicional de arcilla

<i>ladrillo tradicional de arcilla</i>	
Media	611.46
Desviación estándar	69.12
Varianza de la muestra	4,777.96
Rango	162.14
Mínimo	511.30
Máximo	673.44
Cuenta	5

Fuente: elaboración propia

El dato más importante es la media ya que con ese valor se podrá validar los resultados con la norma ASTM C 62. El ladrillo que obtuvo la mayor resistencia a la compresión fue el ecológico de cemento 10% + fibra de sisal 0.1%, sin embargo es uno de los ladrillos que obtuvieron una mayor desviación estándar y varianza. El ladrillo que menos desviación estándar y varianza resultó tener fue el tradicional de arcilla. El ladrillo que tiene un mayor rango es el de cal 10% + fibra de sisal 0.1%.

5.4.2 ESTADÍSTICA INFERENCIAL

5.4.2.1 *Validación de la normalidad de los datos obtenidos de resistencia a la compresión*

El análisis estadístico inferencial se realizó solamente con los ladrillos ecológicos. Conocer la distribución de los datos fue esencial para determinar si el análisis estadístico era el adecuado para los datos. Se realizó una prueba de normalidad con los datos de resistencia a la compresión, esto para cada tipo de ladrillo ecológico con el fin de determinar si la población aproximadamente normal. La prueba de normalidad aplicada fue la de Anderson-Darling y con la gráfica de probabilidad se conocieron los resultados. El nivel de significancia utilizado para esta prueba fue de 0.05. Las pruebas de hipótesis para la prueba de normalidad fueron:

- H_0 : los datos siguen una distribución normal
- H_1 : los datos no siguen una distribución normal

Para el ladrillo ecológico de cemento 10% + casc. de arroz 1%, el resultado de la prueba de normalidad se muestra en la ilustración 17.

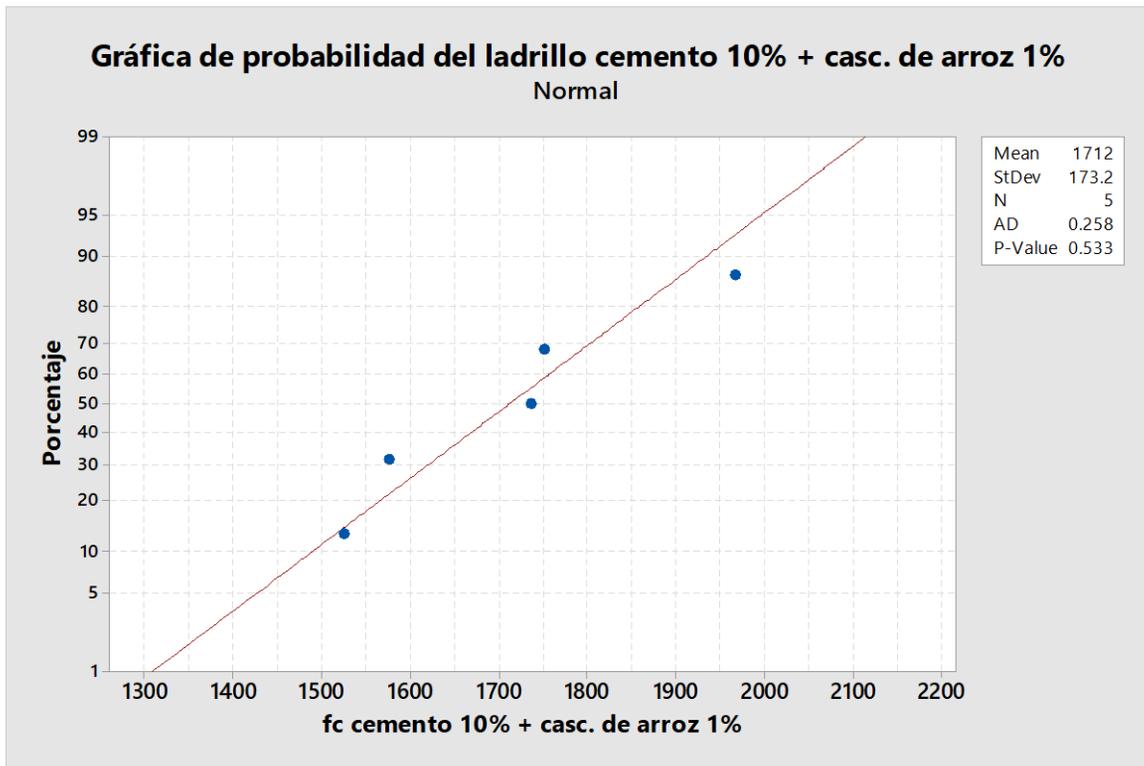


Ilustración 17. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica, la distribución provee un buen ajuste para los datos porque los puntos tienden a seguir una línea recta. Puesto que el valor p (P-value) es mayor que el nivel de significancia ($0.533 > 0.05$), no se rechaza la hipótesis nula; se concluye que los datos siguen una distribución normal. Los resultados del valor p para todos los ladrillos ecológicos se muestran en la tabla 24. Para ver la gráfica de probabilidad para los demás ladrillos ecológicos, ver anexo 4.

Tabla 24. Valor p para prueba de normalidad de cada tipo de ladrillo ecológico

Ladrillo	Valor p
cemento 10% + casc. de arroz 1%	0.533
cemento 5% + casc. de arroz 1%	0.704
cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	0.468
cemento 5% + fibra de sisal 0.1%	0.324
cal 10% + casc. de arroz 1%	0.574
cal 5% + casc. de arroz 1%	0.177
cal 10% + fibra de sisal 0.1%	0.123
cal 5% + fibra de sisal 0.1%	0.555

Fuente: elaboración propia

De la tabla anterior se puede concluir que para los ocho tipos de ladrillos, no se rechaza la hipótesis nula, es decir que todos siguen una distribución normal. A partir de esto, se puede partir a calcular intervalos de confianza y realizar pruebas de hipótesis.

5.4.2.2 Intervalos de confianza para la media poblacional

Se calculó un intervalo de confianza para la media de cada tipo de ladrillo ecológico, esto con el fin de tener un rango de valores en el que con un 95% de confianza, el valor de la resistencia a la compresión siempre estará contenido. La muestra de cada tipo de ladrillo es considerada pequeña porque es menor a 30 pero, como se demostró que todos los datos son aproximadamente normales, se pudo utilizar la distribución de probabilidad *t* de Student para calcular los intervalos de confianza. Los IC se calcularon en Minitab y los resultados son resumidos en la tabla 25. Para mayor detalle, ver anexo 5.

Tabla 25. Intervalo de confianza para la media de cada ladrillo ecológico

Ladrillo	IC (95%)
cemento 10% + casc. de arroz 1%	(1496.80, 1926.90) psi
cemento 5% + casc. de arroz 1%	(1048.30, 1356.10) psi
cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	(1766.20, 2186.60) psi
cemento 5% + fibra de sisal 0.1%	(1150.40, 1478.90) psi
cal 10% + casc. de arroz 1%	(1094.60, 1428.70) psi
cal 5% + casc. de arroz 1%	(886.50, 1134.00) psi
cal 10% + fibra de sisal 0.1%	(1064.50, 1554.90) psi
cal 5% + fibra de sisal 0.1%	(1118.20, 1318.30) psi

Fuente: elaboración propia

Para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1% se puede asegurar con un 95% de confianza que el valor real de la resistencia a la compresión de ese ladrillo, de haber sido elaborado al mismo tiempo y en iguales condiciones, siempre estará entre 1,496.80 y 1,926.90 psi. Lo mismo ocurre con los demás tipos de ladrillos.

5.4.2.3 Intervalos de predicción

Para poder predecir valores posibles de resistencia a la compresión de una observación futura, se calculó un intervalo de predicción para cada tipo de ladrillo ecológico. Para una distribución normal de mediciones con una media poblacional μ desconocida y varianza σ^2 conocida, un intervalo de predicción con cierto porcentaje de confianza de una observación futura es calculado con la ecuación 4.

$$\bar{x} - z_{\alpha/2}\sigma\sqrt{1 + 1/n} < x_0 < \bar{x} + z_{\alpha/2}\sigma\sqrt{1 + 1/n}$$

Ecuación 4. Intervalo de predicción para una observación futura cuando se conoce σ^2

Donde,

\bar{x} → media de la muestra

$z_{\alpha/2}$ → valor z que deja un área de $\alpha/2$ a la derecha bajo la curva normal

σ → desviación estándar de la población

n → tamaño de la muestra

Los datos necesarios para calcular el intervalo de predicción se obtienen de la estadística descriptiva y de la tabla Z, para la distribución normal (anexo 6). En la tabla 26 se muestran los datos y resultados del IP para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%.

Tabla 26. Datos e intervalo de predicción para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz

cemento 10% + casc. de arroz 1%	
Media	1,711.87
Desviación estándar	173.20
Cuenta	5
$Z_{\alpha/2}$	1.96
Límite inferior	1,340.00 psi
Límite superior	2,083.74 psi

Fuente: elaboración propia

Los límites inferior y superior se calcularon con la ecuación 4:

$$[1,711.87 - (1.96)(173.20)\sqrt{1 + 1/5} < x_0 < 1,711.87 + (1.96)(173.20)\sqrt{1 + 1/5}]$$

$$(1340.00, 2083.74) \text{ psi}$$

Para ver los datos de entrada de los demás ladrillos ecológicos, ver anexo 7. El resumen de los intervalos de predicción para los ladrillos ecológicos se muestra en la tabla 27.

Tabla 27. Intervalo de predicción de cada ladrillo ecológico

Ladrillo	IP (95%)
cemento 10% + casc. de arroz 1%	(1340.00, 2083.74) psi
cemento 5% + casc. de arroz 1%	(936.06, 1468.32) psi
cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	(1612.96, 2339.92) psi
cemento 5% + fibra de sisal 0.1%	(1030.61, 1598.73) psi
cal 10% + casc. de arroz 1%	(972.81, 1550.53) psi
cal 5% + casc. de arroz 1%	(796.31, 1224.24) psi
cal 10% + fibra de sisal 0.1%	(885.76, 1733.63) psi
cal 5% + fibra de sisal 0.1%	(1045.30, 1391.23) psi

Fuente: elaboración propia

El IP con una confianza del 95% para el ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1% es (1340.00, 2083.74) psi lo cual quiere decir que, si en el futuro se elaboran 100 ladrillos en iguales condiciones, el valor de la resistencia a la compresión de 95 de ellos estará dentro de ese intervalo. Los IP son de un rango mayor a los IC debido a la incertidumbre adicional que implica la predicción de una respuesta individual en comparación con la respuesta media. El mismo análisis se aplica para los demás ladrillos. Con este intervalo se sabe qué se podría esperar en observaciones futuras.

5.4.2.4 Pruebas de hipótesis para la media

Para concluir si las hipótesis planteadas al comienzo del experimento son verdaderas, se realizaron pruebas de hipótesis para la media en cada tipo de ladrillo ecológico y en este caso, también se realizó el análisis para los ladrillos tradicionales de arcilla. La hipótesis nula fue la hipótesis planteada inicialmente para cada ladrillo y la alternativa es que esa hipótesis se rechaza. Igual que en los intervalos de confianza se considera una muestra pequeña y debido a que los datos son aproximadamente normales, se trabajó con la distribución de probabilidad t de Student. Las pruebas de hipótesis se realizaron en Minitab (anexo 5) y de los resultados proporcionados se analiza el estadístico t y valor p .

Para poder concluir si la hipótesis nula se rechaza o no se rechaza, se observó el valor p , de ser menor que el nivel de significancia se rechazó la hipótesis nula y se aceptó la hipótesis alternativa, mientras que si éste fue mayor que el nivel de significancia se aceptó la hipótesis nula. Como el nivel de confianza escogido para la prueba fue de 95%, el nivel de significancia es de 0.05. El resumen de los resultados obtenidos de la prueba de hipótesis para la media de cada ladrillo se muestra en la tabla 28.

Tabla 28. Pruebas de hipótesis para la media de los ladrillos ecológicos y tradicionales de arcilla

cemento 10% + casc. de arroz 1%				
H ₀ :	$\mu = 1,500$ psi	t	Valor p	∴ no se rechaza la hipótesis nula, $\mu = 1,500$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,500$ psi	2.74	0.052	
cemento 5% + casc. de arroz 1%				
H ₀ :	$\mu = 1,000$ psi	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu \neq 1,000$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,000$ psi	3.65	0.022	
cemento 10% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\mu = 1,500$ psi	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu \neq 1,500$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,500$ psi	6.29	0.003	
cemento 5% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\mu = 1,000$ psi	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu \neq 1,000$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,000$ psi	5.32	0.006	
cal 10% + casc. de arroz 1%				
H ₀ :	$\mu = 1,500$ psi	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu \neq 1,500$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,500$ psi	-3.96	0.017	
cal 5% + casc. de arroz 1%				
H ₀ :	$\mu = 1,000$ psi	t	Valor p	∴ no se rechaza la hipótesis nula, $\mu = 1,000$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,000$ psi	0.23	0.829	
cal 10% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\mu = 1,500$ psi	t	Valor p	∴ no se rechaza la hipótesis nula, $\mu = 1,500$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,500$ psi	-2.16	0.097	
cal 5% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\mu = 1,000$ psi	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu \neq 1,000$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 1,000$ psi	6.06	0.004	
tradicionales de arcilla				
H ₀ :	$\mu = 500$ psi	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu \neq 500$ psi
H ₁ :	$\mu \neq 500$ psi	3.61	0.023	

Fuente: elaboración propia

A los ladrillos que obtuvieron un valor p menor que 0.05, se les rechazó la hipótesis nula aceptó la hipótesis alternativa. En estos casos, con el estadístico t se puede concluir también si la media en realidad es menor o mayor que la planteada. Por ejemplo, el ladrillo cemento 10% + fibra de

sisal 0.1% obtuvo un valor p de 0.003, es decir que su resistencia a la compresión media no es igual a 1,500 psi y al observar que el estadístico t tiene es 6.29 (valor positivo), se puede concluir que en realidad es mayor que 1,500 psi. Con el ladrillo cal 10% + casc. de arroz 1% también se rechazó la hipótesis nula, es decir que su resistencia a la compresión media no es igual a 1,500 psi, en realidad es menor ya que el estadístico t es -3.96 (valor negativo).

5.4.2.5 Pruebas de hipótesis para la diferencia de medias

Para concluir si estadísticamente existe una diferencia entre las medias poblacionales de la resistencia a la compresión del ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1% (muestra 1) y el ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1% (muestra 2), se realizó una prueba de hipótesis para la diferencia de medias. Fue necesario primero verificar si las varianzas de ambas muestras se consideran iguales o desiguales y puesto que fue comprobado que los datos de resistencia a la compresión son normales, se pudo aplicar la prueba F para varianzas de dos muestras, y con el resultado se escogió el tipo de prueba t con el que se realizó la prueba de hipótesis para la diferencia de medias. El nivel de confianza con el que se realizaron las pruebas fue de 95% y ambas fueron realizadas en Minitab.

En la prueba F, si las varianzas son iguales, la relación de las varianzas será igual a 1. Se probó entonces la hipótesis nula (la relación entre las varianzas es igual a 1) contra la hipótesis alternativa (la relación entre las varianzas es distinta a 1). El resumen de los resultados de la prueba F se muestra en la tabla 29, para mayor detalle ver anexo 8.

Tabla 29. Prueba F para la prueba de varianzas de los ladrillos cemento 10% + casc. de arroz 1% y cemento 10% + fibra de sisal 0.1%

cemento 10% + casc. de arroz 1% & cemento 10% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$	F	Valor p	∴ no se rechaza la hipótesis nula, $\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$
H ₁ :	$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 \neq 1$	1.05	0.966	

Fuente: elaboración propia

El valor p resultó ser mayor que el nivel de significancia (0.05), por lo que ambas varianzas son consideradas iguales. El estadístico F con un valor de 1.05 demuestra que la varianza de la muestra 1 (ladrillo cemento 10% + casc. de arroz 1%) es un poco mayor que la del otro tipo de ladrillo. Al tener varianzas iguales se procedió a realizar la prueba t para dos muestras con varianzas iguales. El resumen de los resultados se muestran en la tabla 30 y para mayor detalle ver anexo 9.

Tabla 30. Prueba t para la prueba de diferencia de medias de los ladrillos cemento 10% + casc. de arroz 1% y cemento 10% + fibra de sisal 0.1%

cemento 10% + casc. de arroz 1% & cemento 10% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\mu_1 - \mu_2 = 0$	t	Valor p	∴ se rechaza la hipótesis nula, $\mu_1 - \mu_2 \neq 0$
H ₁ :	$\mu_1 - \mu_2 \neq 0$	-2.44	0.040	

Fuente: elaboración propia

El valor p es menor que el nivel de significancia por lo que se concluye que estadísticamente las medias poblacionales de la resistencia a la compresión de los dos tipos de ladrillo no son iguales. El estadístico t demuestra al ser negativo que la media de la muestra 1 es menor.

Se realizó también la prueba t para diferencias de medias para concluir si la masa de los ladrillos de cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y ladrillos tradicionales es estadísticamente distinta, esto para posteriormente hacer el análisis de Ingeniería de Valor. Para poder realizar la prueba F para varianzas de dos muestras, se tuvo que comprobar que los datos son normales, por lo cual se realizó la prueba de normalidad a los datos de masa de ambos tipos de ladrillos (anexo 10), la cual dio como resultado los valores p de la tabla 31.

Tabla 31. Valor p para prueba de normalidad de la masa

Ladrillo	Valor p
cemento 10% + fibra de sisal 0.1%	0.848
tradicional de arcilla	0.784

Fuente: elaboración propia

El valor p de cada tipo de ladrillo es mayor que el nivel de significancia. Los datos de masa son normales y conociendo eso se realizó la prueba F (anexo 8) para concluir las varianzas son iguales o no. El resumen de los resultados se muestra en la tabla 32.

Tabla 32. Prueba F para la prueba de varianzas de la masa de los ladrillos cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y tradicionales de arcilla

cemento 10% + fibra de sisal 0.1% & tradicional de arcilla				
H ₀ :	$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$	F	Valor p	∴ no se rechaza la hipótesis nula, $\sigma_1^2 / \sigma_2^2 = 1$
H ₁ :	$\sigma_1^2 / \sigma_2^2 \neq 1$	2.31	0.437	

Fuente: elaboración propia

Las varianzas se consideran iguales porque el valor p es mayor que el nivel de significancia, por lo tanto, la prueba t para diferencia de medias (anexo 9) aplicada es para muestras con varianzas iguales. El resumen de los resultados se muestra en la tabla 33.

Tabla 33. Prueba t para la prueba de diferencia de medias de los ladrillos cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y tradicionales de arcilla

cemento 10% + casc. de arroz 1% & cemento 10% + fibra de sisal 0.1%				
H ₀ :	$\mu_1 - \mu_2 = 0$	t	Valor p	∴ no se rechaza la hipótesis nula, $\mu_1 - \mu_2 = 0$
H ₁ :	$\mu_1 - \mu_2 \neq 0$	1.04	0.330	

Fuente: elaboración propia

No existe una diferencia significativa entre las medias poblacionales de ambos tipos de ladrillo.

5.5 VALIDACIÓN CON NORMA ASTM C 62

La categorización mínima que establece la norma es el tipo de ladrillo NW, meteorización despreciable, y exige una resistencia a la compresión promedio mínima de 5 ladrillos de 1,500 psi. Conociendo cuál es el promedio de la resistencia y como muestra la ilustración 18:

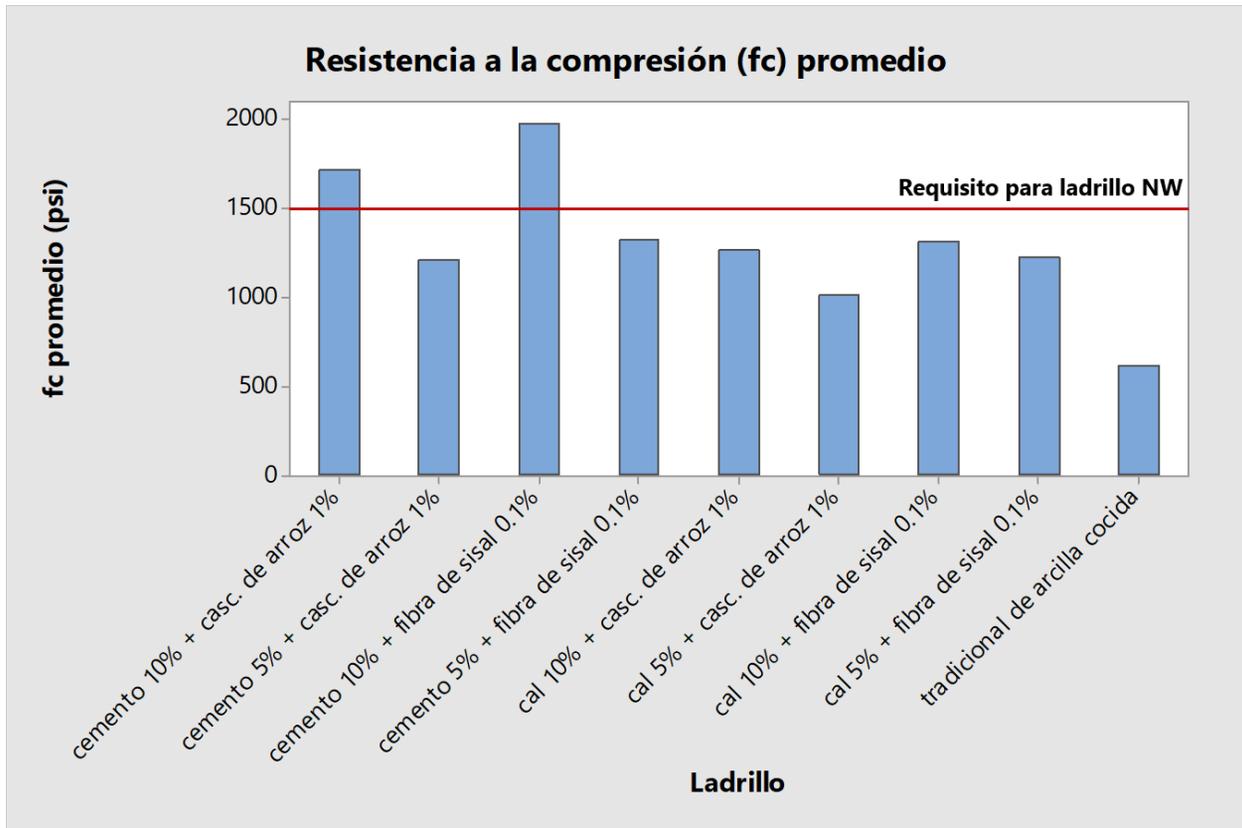


Ilustración 18. Validación de la resistencia a la compresión de los ladrillos con norma ASTM C 62

Fuente: elaboración propia

se puede observar que dos de los ladrillos ecológicos (cemento 10% + casc. de arroz 1% y cemento 10% + fibra de sisal 0.1%) cumplen con el valor mínimo de resistencia requerido, siendo el segundo tipo el que presenta el mejor resultado. El ladrillo tradicional de arcilla es el que presentó el promedio de resistencia a la compresión más bajo.

5.5.1 ANÁLISIS DESPUÉS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN

Todos los ladrillos ecológicos fallaron de la misma manera, de los lados, como se puede observar un ejemplo en la ilustración 19 (a). Una vez que la máquina de compresión indicaba que el ladrillo había fallado se paraba el ensayo pero, se pudo observar que el ladrillo quedaba prácticamente entero (ilustración 20), sólo ciertas partes de los lados se desprendían. Esto puede representar una

ventaja ya que al ser sometido a cargas excesivas un elemento conformado por estos ladrillos, no colapsaría por completo ni de un solo, sino al fallar daría un aviso y permite a las personas actuar. En cambio, los ladrillos tradicionales de arcilla cocida tienen la característica de ser un material frágil y fue comprobado en el ensayo de compresión. Cuando el ladrillo falló, éste se quebró en pedazos (ilustración 19 (b)).

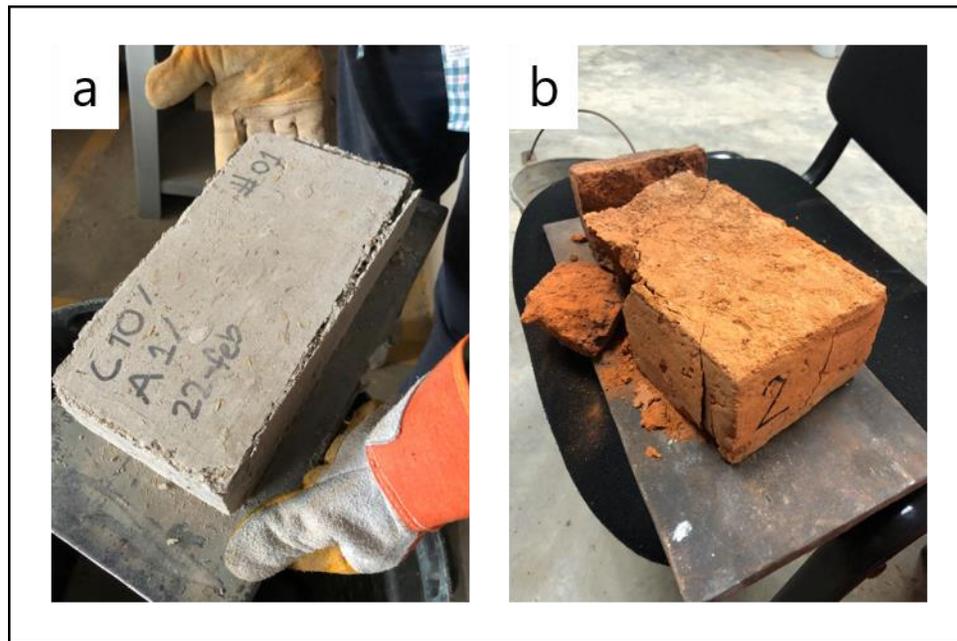


Ilustración 19. (a) Ladrillo ecológico cemento 10% + casc. de arroz 1% y (b) ladrillo tradicional de arcilla después de fallar

Fuente: elaboración propia



Ilustración 20. Ladrillos ecológicos después del ensayo de compresión

Fuente: elaboración propia

Haciendo una comparación entre los ladrillos ecológicos de cemento y cal, se observó que los que contienen cal se descomponen un poco más al momento de fallar, siempre de los lados (ilustración 21).



Ilustración 21. Ladrillo ecológico de cal después del ensayo de compresión

Fuente: elaboración propia

Tanto la cascarilla de arroz como la fibra de sisal sirvieron como entrelace, para unir más las partículas de los materiales que componen la mezcla. Entre la cascarilla de arroz y la fibra de sisal, los ladrillos ecológicos con fibra de sisal resultaron ser más resistentes.

5.6 EFECTO DE LOS FACTORES

Los efectos que pueden ser generados en la variable respuesta pueden ser por la actuación de cada factor por sí solo o por la interacción de ellos. Son 7 los posibles efectos, siendo A el tipo de estabilizador, B el porcentaje de estabilizador y C el tipo de aditivo natural los dichos efectos son: A, B, C, AB, AC, BC y ABC. Los factores que tienen un mayor impacto en el resultado de resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos se pueden conocer después del análisis del diseño factorial realizado en Minitab, específicamente con la gráfica normal de los efectos (ilustración 22). Para ver más detalles ver anexo 11.

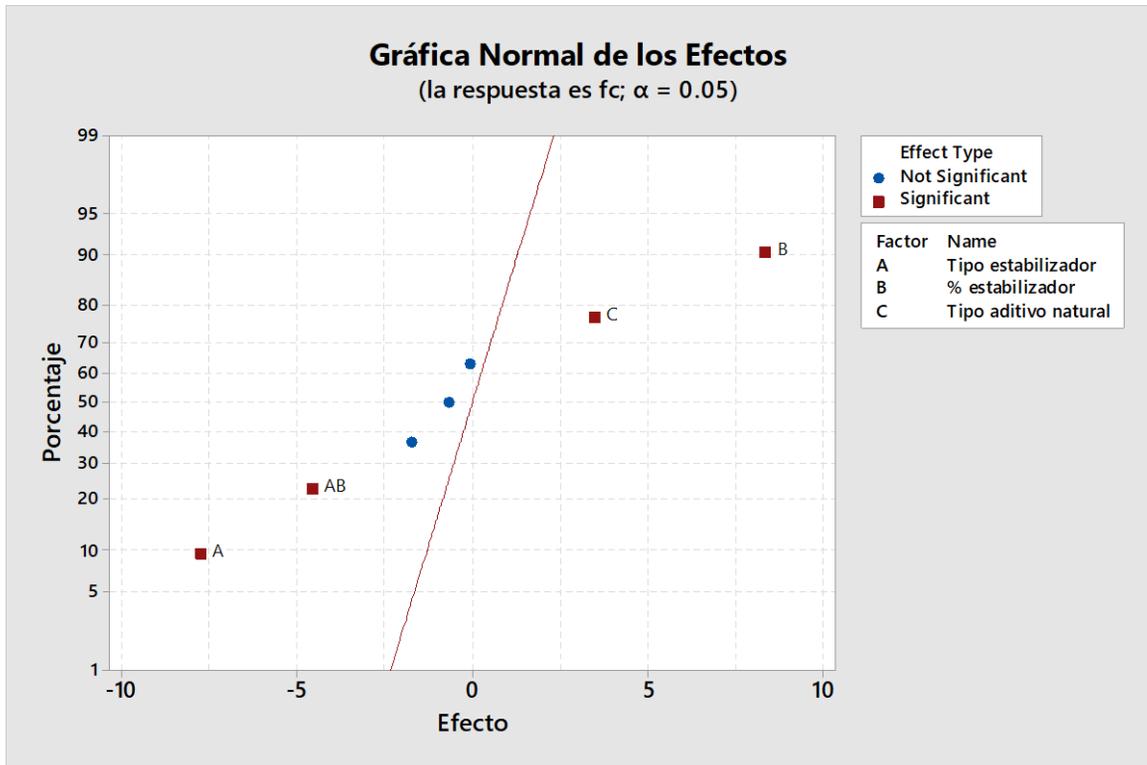


Ilustración 22. Gráfica normal de los efectos de los factores en la resistencia a la compresión de los ladrillos

Fuente: elaboración propia

Los efectos que representan un efecto significativo en la respuesta son los que se representan con puntos color rojo, mientras que los que están en color azul no se consideran factores con efectos significativos. Los tres factores del diseño factorial generan por sí solos un efecto significativo en la variable respuesta y conjuntamente, los factores A y B también. Para saber qué nivel de cada factor es el que genera una mayor resistencia a la compresión, se observan las gráficas de efectos y de interacción. Para los factores A y B se analizó la gráfica de interacción (ilustración 23) y para el factor C la gráfica de efecto (ilustración 24).

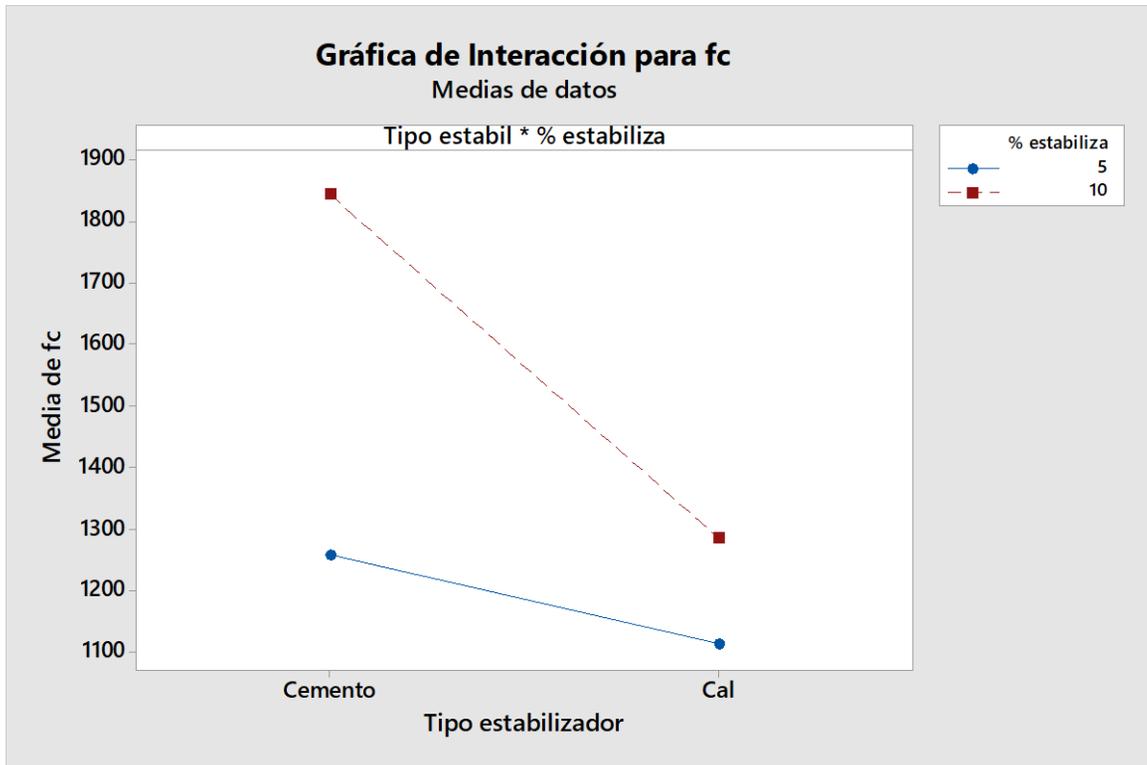


Ilustración 23. Gráfica de interacción de los factores “tipo de estabilizador” y “cantidad de estabilizador”

Fuente: elaboración propia

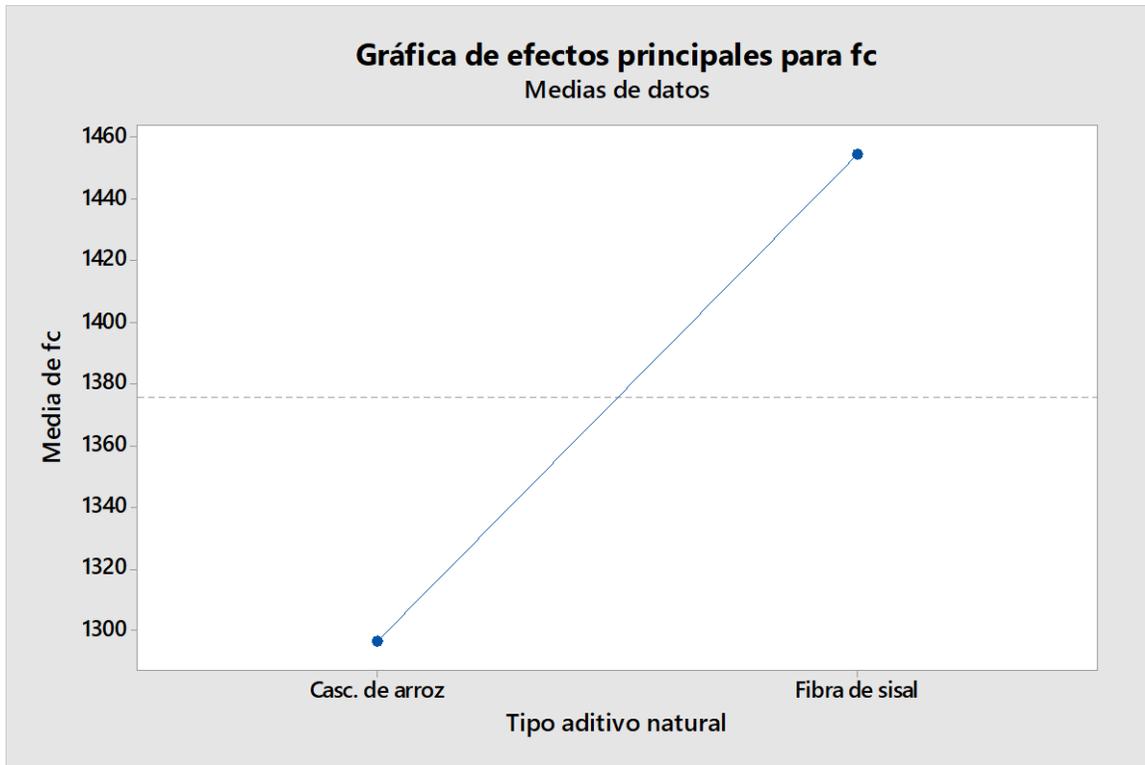


Ilustración 24. Gráfica de efectos principales del factor “tipo de aditivo natural”

Fuente: elaboración propia

Como se mostró en las gráfica de interacción, la cuando el ladrillo contiene cemento en una cantidad del 10%, se generan los valores mayores de resistencia a la compresión, mientras que cuando el ladrillo contiene cal en una cantidad de 5% se generan los valores más bajos. Un 5% de cemento y un 10% de cal parecen tener valores de resistencia casi iguales. En la gráfica de efectos del factor del tipo de aditivo natural se puede concluir que la fibra de sisal genera los mejores resultados de resistencia a la compresión.

5.7 APLICACIÓN DE LA INGENIERÍA DE VALOR

Para poder concluir si la alternativa ecológica supera a la tradicional se comparó el ladrillo ecológico que obtuvo la mayor resistencia a la compresión con el ladrillo tradicional de arcilla. Para evitar la subjetividad y tener un mejor criterio al momento de hacer las evaluaciones, durante todo el proceso se contó con la asesoría de un Ingeniero Civil con especialidad en estructuras. Los

resultados de la Ingeniería de Valor se muestran a continuación. El equipo de trabajo y la propuesta de alternativas se muestra en la tabla 34.

Tabla 34. Resultado de conformación del equipo de trabajo

Proyecto	Proyecto de Investigación
Empresa	N/A
Material a evaluar	Ladrillos
Equipo de trabajo	Bessy Ramos
e-mail	bessyramos@unitec.edu
Alternativas	
1. Ladrillo tradicional de arcilla	
2. Ladrillo ecológico con cemento y fibra de sisal	

Fuente: elaboración propia

Es importante justificar y establecer qué beneficios se esperan obtener después de aplicar la técnica de Ingeniería de Valor (tabla 35).

Tabla 35. Resultado de objetivos del estudio

Proyecto	Proyecto de investigación
Empresa	N/A
Equipo de trabajo	Bessy Ramos
Objetivos del estudio	
Elemento o sistema que se quiere evaluar	Ladrillos (tradicionales de arcilla cocida vs. ecológico con cemento y fibra de sisal)
¿Para qué se quiere evaluar?	Para valorar la factibilidad del uso del ladrillo ecológico en una construcción
Beneficios que se espera tener	Conocer qué tipo de ladrillo ofrece un mejor beneficio al momento de ser implementado en una construcción, después de tomar en consideración diferentes criterios

Fuente: elaboración propia

Se establecieron 4 criterios de evaluación (tabla 36), los cuales fueron decididos basándose en la información disponible.

Tabla 36. Resultado de criterios de evaluación

Criterios de evaluación	
ID	Descripción
A	Resistencia a la compresión
B	Transporte
C	Sostenibilidad
D	Disponibilidad de materiales

Fuente: elaboración propia

- La resistencia a la compresión es una de las características más importantes a tomar en consideración al momento de elegir un material para la construcción. De esto depende el diseño estructural de los elementos presentes en diferentes tipos de construcciones.
- El criterio de Transporte hace referencia al momento en el que se tiene que transportar los ladrillos de un sitio a otro, por ejemplo de la fábrica al sitio de construcción. Un factor importante es el peso del material a ser transportado ya que todo vehículo tiene un límite y no es correcto dejarlo de lado. Otro factor importante es el tipo cuidado que se debe de tener al momento de manipular los materiales para evitar tener pérdidas. Un material delicado deber ser manipulado con un mayor cuidado que los no delicados. El tener mayor cuidado implica invertir más tiempo al momento de transportar los materiales.
- El criterio de sostenibilidad se refiere al impacto que tiene al medio ambiente específicamente el proceso de fabricación de los ladrillos. Como fue mencionado en secciones anteriores, una forma de ver el impacto al medio ambiente es con la cantidad de CO₂ que es generada a partir de las fases en la fabricación.
- La disponibilidad de materiales necesarios para poder fabricar los ladrillos se debe de tomar en cuenta porque el que no sean accesibles afecta la logística que al final se resume en costos y tiempo.

Cabe mencionar que un criterio de suma importancia es el costo de fabricación de los ladrillos, pero en este caso no se puede tomar en consideración ya que los ladrillos ecológicos no fueron elaborados con maquinaria especializada, que sería la utilizada al momento producir a gran escala como los ladrillos tradicionales de arcilla. También se considera la gran variedad de precios de maquinaria para fabricar ladrillos que existe en el mercado.

Las características de los ladrillos analizados en función de los criterios de evaluación se describen en las tablas 37 y 38.

Tabla 37. Características del ladrillo tradicional en función de los criterios de evaluación

Proyecto	Proyecto de investigación
Empresa	N/A
Material a evaluar	Ladrillos
Ladrillo tradicional de arcilla	
Criterios de evaluación	Desempeño
Resistencia a la compresión	Los ladrillos tradicionales tienen una resistencia a la compresión relativamente baja, estando muy por debajo del valor mínimo requerido por la norma ASTM C 62.
Transporte	Debido a que es un material que presenta una falla frágil, se debe tener cuidado al momento de transportar el material de un sitio a otro. En cuestión de peso, la masa de los ladrillos tradicionales es la misma que la del ladrillo ecológico.
Sostenibilidad	Tiene un impacto negativo al medio ambiente debido a que durante su proceso de fabricación, los ladrillos son sometidos a hornos hasta por 48 horas, generando CO ₂ al ambiente.
Disponibilidad de materiales	Los materiales necesarios para la mezcla en la fabricación de los ladrillos son distintos tipos de suelo (de la variedad del suelo depende mucho su resistencia) y a veces aserrín; éstos son de fácil acceso.

Fuente: elaboración propia

Es importante mencionar el hecho de que los ladrillos tradicionales utilicen varios tipos de suelos en la mezcla, hace que exista una gran probabilidad de que al final, los ladrillos en diferentes zonas del país tengan diferentes resistencias a la compresión.

Tabla 38. Características del ladrillo ecológico en función de los criterios de evaluación

Proyecto	Proyecto de investigación
Empresa	N/A
Material a evaluar	Ladrillos
Ladrillo ecológico con cemento y fibra de sisal	
Criterios de evaluación	Desempeño
Resistencia a la compresión	Su resistencia a la compresión es tres veces la de los ladrillos tradicionales y cumple con el requisito de la norma ASTM C 62 para ser clasificado como un ladrillo NW (meteorización despreciable)
Transporte	Es un material robusto y que al caer al suelo no se quiebra y debido a que al momento de que el ladrillo falla permanece prácticamente completo, no se requiere de mucho cuidado al momento de transportarlo. En cuestión de peso, la masa es igual a la de los ladrillos tradicionales.
Sostenibilidad	En cuanto a su proceso de fabricación, el ladrillo es amigable con el medio ambiente ya que en ninguna fase es sometido a hornos que generan CO ₂ al ambiente.
Disponibilidad de materiales	<ul style="list-style-type: none"> • El suelo utilizado es el material selecto, el cual es de fácil acceso en todo el país. • El cemento es un material de fácil acceso en todo el país. • La fibra de sisal es una fibra vegetal basta y fuerte que proviene del Agave, la planta crece en una variedad de climas calientes, incluidas zonas secas no utilizables para otros cultivos. El sisal puede cultivarse en casi todos los tipos de suelos, salvo en los que son muy húmedos, salinos o arcillosos, y durante todo el año.

Fuente: elaboración propia

El siguiente paso fue proponer la escala de evaluación de los criterios (tabla 39). Se decidió tener una escala de 1-4 (siendo 4 la mejor calificación y 1 la peor), para evitar asignación de calificaciones con tendencia central. Es importante establecer la unidad de medida y la manera en la que se cuantificará cada escala.

Tabla 39. Resultado de la justificación de escalas de calificación

Tabla de justificación de escala			
Criterio de evaluación	Definición	Escala	Unidad de medida/cuantificación
Resistencia a la compresión	Mayor resistencia a la compresión	4	1,500 psi en adelante
		3	1,000 – 1,500 psi
		2	500 – 10,00 psi
		1	0 – 500 psi
Transporte	Menor masa del ladrillo y menor cuidado requerido al momento de manipularlos	4	0 – 2,500 g y no se requiere de mucho cuidado duranate su manipulación
		3	2,500 – 5,000 g y no se requiere de mucho cuidado duranate su manipulación
		2	0 – 2,500 g y sí se requiere de mucho cuidado duranate su manipulación
		1	2,500 – 5,000 g y sí se requiere de mucho cuidado duranate su manipulación
Sostenibilidad	Menor cantidad de kg de CO ₂ generados en el proceso de fabricación por cada ladrillo	4	0 – 0.25 kg de CO ₂
		3	0.25 – 0.50 kg de CO ₂
		2	0.50 – 0.75 kg de CO ₂
		1	0.75 – 1.00 kg de CO ₂
Disponibilidad de materiales	Accesibilidad de los materiales necesarios para la mezcla	4	Un 75 – 100% de los materiales son de fácil acceso
		3	Un 50 – 75% de los materiales son de fácil acceso
		2	Un 25 – 50% de los materiales son de fácil acceso
		1	Un 0 – 25% de los materiales son de fácil acceso

Fuente: elaboración propia

Como se puede observar, se buscó tener unidades de medida que fueran cuantificables, para que los resultados tuvieran mayor validez y precisión.

Se ponderaron los criterios de evaluación para obtener un porcentaje de peso en cada uno. En la tabla 40 se muestra la comparación de los criterios entre ellos y se estableció qué criterio es considerado más importante que el otro. Para evitar la subjetividad y tener un mejor criterio, se hizo mano a mano con un Ingeniero Civil. En la tabla 41 se hace la ponderación para conocer el peso que representa cada criterio.

Tabla 40. Resultado de la matriz de ponderación

Criterios de evaluación	
ID	Descripción
A	Resistencia a la compresión
B	Transporte
C	Sostenibilidad
D	Disponibilidad de materiales

A	A es de mayor importancia
A/B	A y B son de igual importancia

A	A	A	A	A
	B	C	B/D	B
		C	C	C
			D	D

Fuente: elaboración propia

Entre el criterio A, B, C y D, el que tiene mayor importancia es el A. Comparando el criterio B con el C, el C tiene mayor importancia y entre el B y D, ambos tienen la misma importancia. Entre el criterio C y D el que tiene mayor importancia es el C. Para encontrar el peso de cada criterio se utilizó la ecuación 5.

$$\% \text{ de peso} = \frac{\text{cantidad}}{\sum \text{cantidad}} * 100$$

Ecuación 5. % de peso de cada criterio

Tabla 41. Resultado de la ponderación de los criterios de evaluación

Ponderación		
Criterio	Cantidad	% de peso
Resistencia a la compresión	3	42.86%
Transporte	1	14.29%
Sostenibilidad	2	28.57%
Disponibilidad de materiales	1	14.29%
Σ	7	100%

Fuente: elaboración propia

Para el criterio de resistencia a la compresión:

$$\% \text{ de peso} = \frac{3}{7} * 100 = 42.86\%$$

El criterio que representa un mayor peso es la resistencia a la compresión, seguido por la sostenibilidad y por último con un mismo porcentaje, el transporte y disponibilidad de materiales.

Después de la ponderación, se evaluó cada criterio según la escala de calificación de cada uno de ellos (tabla 42).

Tabla 42. Resultado de la evaluación de los criterios

Evaluación de los criterios				
ID	Descripción	Concepto	% de peso	Escala de criterio
A	Resistencia a la compresión	Ladrillo tradicional	42.86%	2
		Ladrillo ecológico		4
B	Transporte	Ladrillo tradicional	14.29%	1
		Ladrillo ecológico		3
C	Sostenibilidad	Ladrillo tradicional	28.57%	1
		Ladrillo ecológico		4
D	Disponibilidad de materiales	Ladrillo tradicional	14.29%	4
		Ladrillo ecológico		4

Fuente: elaboración propia

- Para el criterio A, el ladrillo tradicional obtuvo una calificación de 2 debido a que su resistencia a la compresión tiene un promedio de 611.46 psi, mientras que el ladrillo ecológico al tener una resistencia promedio de 1,976.44 psi obtuvo una escala de 4.
- Para el criterio B, el ladrillo tradicional obtuvo una calificación de 1 debido a que tiene una masa promedio de 3,940.72 g y al ser un material frágil (como se mostró en la sección de validación con norma ASTM), se requiere tener mayor cuidado al momento de manipularlos. El ladrillo ecológico obtuvo una calificación de 3 debido a que su masa promedio es de 3,993.64 g y es un material que no requiere de mucho cuidado al ser manipulado por ser robusto.

- Para el criterio C, el ladrillo tradicional obtuvo una calificación de 1 debido a que como es mencionado en los precedentes, durante su proceso de fabricación, son generados aproximadamente 283.254 kg de CO₂ por cada tonelada de ladrillo, es decir que por un ladrillo de 3,940.72 g, son generados 0.915 kg de CO₂. En cambio, el ladrillo ecológico obtuvo una calificación de 4 debido a que durante su proceso de fabricación no se genera ninguna cantidad de CO₂.
- Para el criterio D, ambos tipos de ladrillos obtuvieron una calificación de 4 debido a que todos los materiales necesarios para su fabricación son de fácil acceso.

La puntuación final se muestra en la tabla 43 y se calculó con la ecuación 6.

$$Puntaje\ total = (cantidad_A * \% de\ peso_A) + (cantidad_B * \% de\ peso_B) + (cantidad_C * \% de\ peso_C) + (cantidad_D * \% de\ peso_D)$$

Ecuación 6. Puntaje total de cada criterio

Tabla 43. Resultado de la puntuación de cada alternativa

Alternativa	Puntaje total
Ladrillo tradicional de arcilla	1.8571
Ladrillo ecológico con cemento y fibra de sisal	3.8571

Fuente: elaboración propia

El puntaje del ladrillo tradicional:

$$Puntaje = (2 * 42.86\%) + (1 * 14.29\%) + (1 * 28.57\%) + (4 * 14.29\%) = 1.8571$$

El siguiente paso sería calcular el índice de valor de cada alternativa pero, debido a que no se cuenta con información acerca del costo de una actividad utilizando el ladrillo ecológico (L./m² por ejemplo), no se calcula. De todas formas, el puntaje obtenido por cada alternativa demuestra que considerando los criterios evaluados, que son criterios importantes a tomar en consideración en una construcción, el ladrillo ecológico lleva una gran ventaja. Aun así se debe tener en cuenta que la conclusión después de tomar en consideración el costo, podría cambiar.

VI. CONCLUSIONES

- Se logró elaborar un ladrillo que no genera CO₂ durante su proceso de fabricación. Con la aplicación de un diseño factorial 2³ se logró generar 8 mezclas diferentes de ladrillos ecológicos. El arreglo factorial tuvo tres factores, cada uno con dos niveles: tipo de estabilizador (cemento y cal), cantidad de estabilizador (5 y 10%) y tipo de aditivo vegetal (cascarilla de arroz y fibra de sisal). Los tres factores produjeron efectos significativos en el valor de resistencia a la compresión, así como la interacción entre el tipo de estabilizador y su cantidad. De llegar a repetir el experimento, los intervalos de predicción calculados pueden ser utilizados para inferir sobre futuros resultados.
- El promedio de 5 ladrillos tradicionales fue de 611.46 psi, valor que está a 888.54 psi por debajo de la resistencia mínima requerida por la ASTM. En cambio, todos los ladrillos ecológicos resultaron tener un valor de resistencia a la compresión por arriba de los 1,000.00 psi, pero sólo 2 de ellos cumplen con el requisito mínimo de la ASTM. El ladrillo que obtuvo la mayor resistencia fue el de cemento 10% + fibra de sisal 0.1% con una resistencia promedio de 1,976.44 psi (323.23% más resistente que el ladrillo tradicional). Con pruebas de hipótesis se concluyó que sí existe una diferencia significativa en la resistencia a la compresión entre los ladrillos que cumplen con la norma ASTM C 62.
- La técnica de Ingeniería de Valor dio como resultado un puntaje de 1.8751 y 3.8751 para el ladrillo tradicional de arcilla y ecológico con cemento 10% + fibra de sisal 0.1%, respectivamente. Se demostró que considerando la resistencia a la compresión, transporte de los ladrillos, sostenibilidad durante el proceso de fabricación y disponibilidad de materiales necesarios para fabricarlos, el ladrillo ecológico representa mayores beneficios al ser implementados en una construcción.

VII. RECOMENDACIONES

- Debido a que el cemento es considerado un material que contamina al medio ambiente, se recomienda generar mezclas de materiales que en lugar del cemento, contengan otro tipo de estabilizador que pueda generarle al ladrillo buenas propiedades físicas y mecánicas.
- El parámetro que fue revisado en esta investigación fue la resistencia a la compresión, porque la norma ASTM lo considera el más importantes, pero, se recomienda realizar otros tipos de ensayos a los ladrillos para observar otras propiedades, como por ejemplo el ensayo de absorción (que también lo evalúa la norma ASTM) y abrasión. También, se recomienda implementar los ladrillos ecológicos en una construcción real, por ejemplo en una pared, para poder observar cómo se comporta.
- Se recomienda calcular un costo de fabricación estimado para los ladrillos ecológicos y de esa manera poder calcular el índice de valor de cada alternativa en la aplicación de la Ingeniería de Valor.

VIII. APLICABILIDAD / IMPLEMENTACIÓN

La aplicabilidad e implementación de los ladrillos ecológicos en una construcción se evaluó con la técnica de Ingeniería de Valor, en la sección 5.6 y específicamente con el ladrillo que obtuvo la mayor resistencia a la compresión (cemento 10% + fibra de sisal 0.1%). Se demostró que el ladrillo ecológico sí se podría implementar en una construcción y ofrecería mayores beneficios que el ladrillo tradicional de arcilla.

IX. EVOLUCIÓN DE TRABAJO ACTUAL/TRABAJO FUTURO

El siguiente paso después de conocer qué ladrillos cumplen con requisitos de resistencia es implementarlos en una construcción. Por ejemplo, se debe comprobar que los ladrillos aparte de ser resistentes a la compresión, presenten un buen comportamiento cuando son utilizados en paredes y para validar esto, se pueden hacer ensayos solicitados por normas internacionales. Asimismo es importante conocer si los ladrillos ecológicos son buenos aislantes térmicos, acústicos y si de llegar a presentarse un sismo, presentarían un buen comportamiento. También, se pueden fabricar ladrillos ecológicos con huecos para poder construir paredes reforzadas.

Para futuras investigaciones se puede buscar utilizar otros materiales como aditivos, siempre con el objetivo de reciclar. Un ejemplo de un material que podría funcionar como aditivo es el plástico. El poliestireno sería un material que produciría ladrillos más ligeros con buena capacidad de deformación.

En el estudio de Ingeniería de Valor, se debe ampliar más considerando otros criterios, como el del consumo de energía y la emisión de GEIs durante la producción de los ladrillos y en la producción y transporte de las materias primas.

BIBLIOGRAFÍA

- Almeida, A., Tonoli, G., Santos, S., & Savastano, H. (2013). Improved durability of vegetable fibers reinforced cement composite subject to accelerated carbonation at early age. *ELSEVIER*, 49-58.
- Amoros García, M. (2011). *Desarrollo de un nuevo ladrillo de tierra cruda, con aglomerantes y aditivos estructurales de base vegetal*. Madrid: Biblioteca Universitaria Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado el 28 de Enero de 2020, de http://oa.upm.es/9058/2/TESIS_MASTER_MARTA_AMOROS_GARCIA.pdf
- Banco Interamericano de Desarrollo. (14 de Mayo de 2012). Obtenido de <https://www.iadb.org/es/noticias/estudio-del-bid-america-latina-y-el-caribe-encaran-creciente-deficit-de-vivienda>
- Calkins, M. (2009). *Materials for Sustainable Sites*. Canadá: John Wiley & Sons, Inc.
- Calzeta, M. (2012). *Beneficios y oportunidades de incremento del valor en obras de ingeniería civil*. Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Carrillo, G., & García, S. (2011). *Ingeniería de Valor*. Instituto tecnológico y de estudios superiores de Monterrey, Monterret.
- CentralAmericaData. (12 de Junio de 2017). Obtenido de https://www.centralamericadata.com/es/article/home/Las_viviendas_que_necesita_Honduras
- Comité Técnico Interinstitucional de Cambio Climático. (8 de Junio de 2010). Obtenido de <http://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/hon148589.pdf>
- Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos* (Segunda ed.). Antioquia: Editorial Universidad de Antioquia.
- Dzul, M. (s.f.). *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo*. Obtenido de https://www.uaeh.edu.mx/docencia/VI_Presentaciones/licenciatura_en_mercadotecnia/fundamentos_de_metodologia_investigacion/PRES39.pdf
- Encalada, A. (2014). *Estudio de compuestos cementíceos reforzados con fibras vegetales*. Tesis de maestría, Universidad Politècnica de Catalunya, Barcelona.

- Enshassi, A., Kochendoerfer, B., & Rizq, E. (2014). Evaluación de los impactos medioambientales de los proyectos de construcción. *Revista Ingeniería de Construcción*, 235.
- Fuentes, N., Fragozo, O., & Mendoza, L. (2015). Residuos agroindustriales como adiciones en la elaboración de bloques de concreto no estructural. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 99-116.
- Gabinete Sectorial de Desarrollo e Inclusión Social. (27 de Junio de 2016). Obtenido de <https://www.ohchr.org/Documents/Issues/Housing/RightLife/Honduras.pdf>
- Gatani, M. (2000). Ladrillos de suelo-cemento: mampuesto tradicional en base a un material sostenible. *Informes de la construcción*, 35-47.
- Gonçalves, J., Paixão, R., Ribeiro, J., Feltrim, N., da Silva, P., Perez, M., . . . de Moraes, A. (2017). Caracterización física y mecánica de ladrillos de suelo cemento con la incorporación de diversos residuos. *GEPEC*, 182-196.
- Grande, F. (2003). *Fabricação de tijolos modulares de solo-cimento por prensagem manual com e sem adição de sílica ativa*. Tesis de maestría, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos.
- Gutiérrez , H., & De la Vara, R. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos* (Segunda ed.). McGraw Hill Interamericana.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México D.F.: McGRAW-HILL.
- Hernández, J., Valencia, E., Villar, E., Vega, J., & Antiqueras , J. (Junio de 2005). Optimización de mezclas con vidrio líquido y proceso CO2. (Arita, Ed.) *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 51-57.
- IEA, & UNEP. (2018). *Programa de la ONU para el Medio Ambiente*. Obtenido de https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/27140/Global_Status_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Instituto Nacional de Estadística. (2013). *INE*. Obtenido de <http://170.238.108.227/binhnd/RpWebEngine.exe/Portal?BASE=CPVHND2013NAC&lang=ESP>

- Kumar, A., Dinesh, B., Krishna, G., Sreenivas, K., & Kumar, V. (2017). *Improvement of Compressive Strength of Pervious Concrete*. Narayana Engineering College, Nellore.
- López Zerón, J. C. (5 de Febrero de 2020). Resistencia a la compresión de ladrillos de arcilla. (B. M. Ramos Rivera, Entrevistador)
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2009). *Materiales para Ingeniería Civil*. Madrid: PEARSON PRENTICE HALL. Recuperado el 28 de Enero de 2020
- MENÉNDEZ, G., & BONAVENTTI, V. (2008). Los Diseños de Experimentos y la Tecnología del Hormigón. *Revista de la Construcción*, 7(1), 94-104. doi:0717-7925
- Minitab. (2019). *Soporte de Minitab 18*. Recuperado el 19 de Marzo de 2020, de <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/data-concepts/what-is-the-variance/>
- Naciones Unidas. (s.f.). *United Nations*. Obtenido de <https://www.un.org/es/sections/issues-depth/climate-change/index.html>
- Navidi, W. (2004). *Estadística para Ingenieros y Científicos* (Primera ed.). Estados Unidos de América: McGraw-Hill Companies, Inc. Recuperado el 10 de Marzo de 2020
- NORAMBUENA-CONTRERAS, J., CASTRO-FRESNO, D., DEL COZ, J., & GARCÍA, P. (2011). Simulación numérica de una mezcla asfáltica usando MEF y diseño de experimentos. *Revista de la Construcción*, 10(2), 4-15. doi: 0718-915X
- Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura . (s.f.). *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/es/>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2003). *FAO*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/XII/0523-B2.htm>
- Pérez, H., Pimentell, K., De Meza, O., & Hernández, M. (2017). Diseño y prueba experimental de bloques ecológicos a base de materiales orgánicos e inorgánicos. *Revista de Iniciación Científica*, 45-55.
- Quiteño, A. (2015). La cal como elemento que mejora la resistencia en la producción del ladrillo de adobe en el departamento de Ahuchapán. *Anuario de Investigación*, 367-374.
- Rivera L., G. A. (s.f.). Concreto Simple. En G. A. Rivera L., *Concreto Simple* (pág. 147). Cauca.

Sánchez, E., Torres, G., & Esquivel, R. (2019). Desempeño de un material granular estabilizado con cemento cuando se aplica carga a compresión. *Tecnura*, 59-71.

Secretaría de Estado en los Despachos de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras. (Octubre de 2012). Recuperado el 28 de Enero de 2020, de <https://unfccc.int/resource/docs/natc/honnc2.pdf>

Test Mark Industries. (2020). *TMI*. Obtenido de <https://www.testmark.net/2500.html>

Walpole, R. D., Myers, R. H., Myers, S. M., & Ye, K. (2012). *Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias* (Novena ed.). Boston, Massachusetts, Estados Unidos de América: Pearson Education Inc. Recuperado el 15 de Marzo de 2020

ANEXOS

Anexo 1. Proctor Estándar

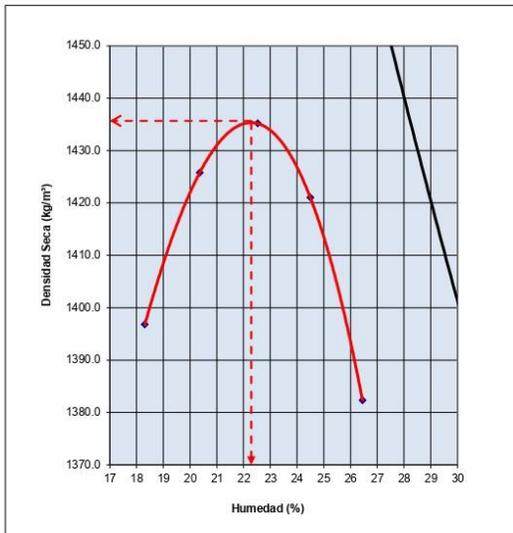


INGENIERÍA
DE ALTA CALIDAD

HOJA DE ENSAYO PARA LA PRUEBA DE COMPACTACIÓN

Cliente: Alumnos Unitec **Proyecto:** Investigación de Aditivos **# de Ref.:** -
Localización: Tegucigalpa, F.M. **Estación:** - **Tomada por:** El cliente **Fecha:** miércoles, 19 de febrero de 2020 **Probada por:** Elvin García
Método: ASTM D698 **N° Capas:** 3 **N° Golpes por Capa:** 25 **Vol. Molde:** 0.000943964 m³
Contacto: - **E-mail y Teléfono:** - **Método de preparación:** Seco

Recepción: -
Entregado por: -
Recibido por: -



SELECCIÓN DE MÉTODO		
A	B	C
	x	
Compactación con Martillo Manual		

Método C
Método B
Método A

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA			
Tamiz	Peso (gr)	% Retenido	Pesos por Especimen (kg)
3/4 (+)	280.00	2.02%	Cuartero
3/8 (+)	910.00	6.56%	Cuartero
# 4 (+)	1,200.00	8.65%	Cuartero
# 4 (-)	11,490.00	82.78%	Cuartero
Total	13,880.00	100.00%	3.000

Densidad Seca	
1,435.69 kg/m ³	89.63 lb/ft ³
14.08 kN/m ³	

Humedad Óptima	
22.29	%

CORRECCIÓN POR PARTÍCULAS DE MAYOR TAMAÑO (SI APLICA)			
No Aplica			
FRACCIÓN FINA		FRACCIÓN GRUESA	
P ₂₀ (gr.)	616.45	P ₇₅ (gr.)	774.10
P ₄₀ (gr.)	595.21	P ₁₅₀ (gr.)	742.20
No. Lata	RM	No. Lata	R-3
P _{lata vacía} (gr.)	105.78	P _{lata vacía} (gr.)	105.15
% w _f	4.34	% w _g	5.01
P _F	98.00	P _G	2.00
Gravedad Específica Bulk	1.580		
G _s de la fracción fina	2.425		

Densidad Seca Corregida	
1,438.31 kg/m ³	89.79 lb/ft ³
14.11 kN/m ³	

Humedad Óptima Corregida	
21.94	%

DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	
INVESTIGACIÓN DE ADITIVOS	

Humedad de la mezcla	12%	14%	16%	18%	20%
Molde n°	1	1	1	1	1
Peso suelo húmedo + molde (kg.)	5.700	5.760	5.800	5.810	5.790
Peso molde (kg.)	4.140	4.140	4.140	4.140	4.140
Peso suelo húmedo (kg.)	1.560	1.620	1.660	1.670	1.650
Densidad húmeda (kg/m³)	1,652.6	1,716.2	1,758.5	1,769.1	1,747.9
Lata n°	M-01	JV	MPH	V-63	RB
Peso lata + suelo húmedo (gr.)	1,070.35	1,210.32	1,213.11	1,620.17	1,399.92
Peso lata + suelo seco (gr.)	922.34	1,024.57	1,010.63	1,323.62	1,129.47
Peso de la humedad (gr.)	148.01	185.75	202.48	296.55	270.45
Peso de la lata vacía (gr.)	114.15	112.51	111.98	113.12	106.92
Peso suelo seco (gr.)	808.2	912.1	898.7	1,210.5	1,022.6
Contenido de humedad (%)	18.31	20.37	22.53	24.50	26.45
Densidad seca (kg/m³)	1,396.8	1,425.8	1,435.2	1,421.0	1,382.3

Nota 1: Para definir el método a utilizar se utilizan los porcentajes retenidos en los tamices de 3/4", 3/8" y No.4. En el método A se utiliza el tamiz No. 4, en el método B el tamiz 3/8", y en el C el tamiz 3/4"

miércoles, 19 de febrero de 2020
Fecha

Ing. Kimberly Hernández
Revisó

Ing. Óscar Munillo
Liberó

Ilustración 25. Contenido de humedad óptima del suelo

Fuente: GeoConsult

Anexo 2. Ladrillos ecológicos

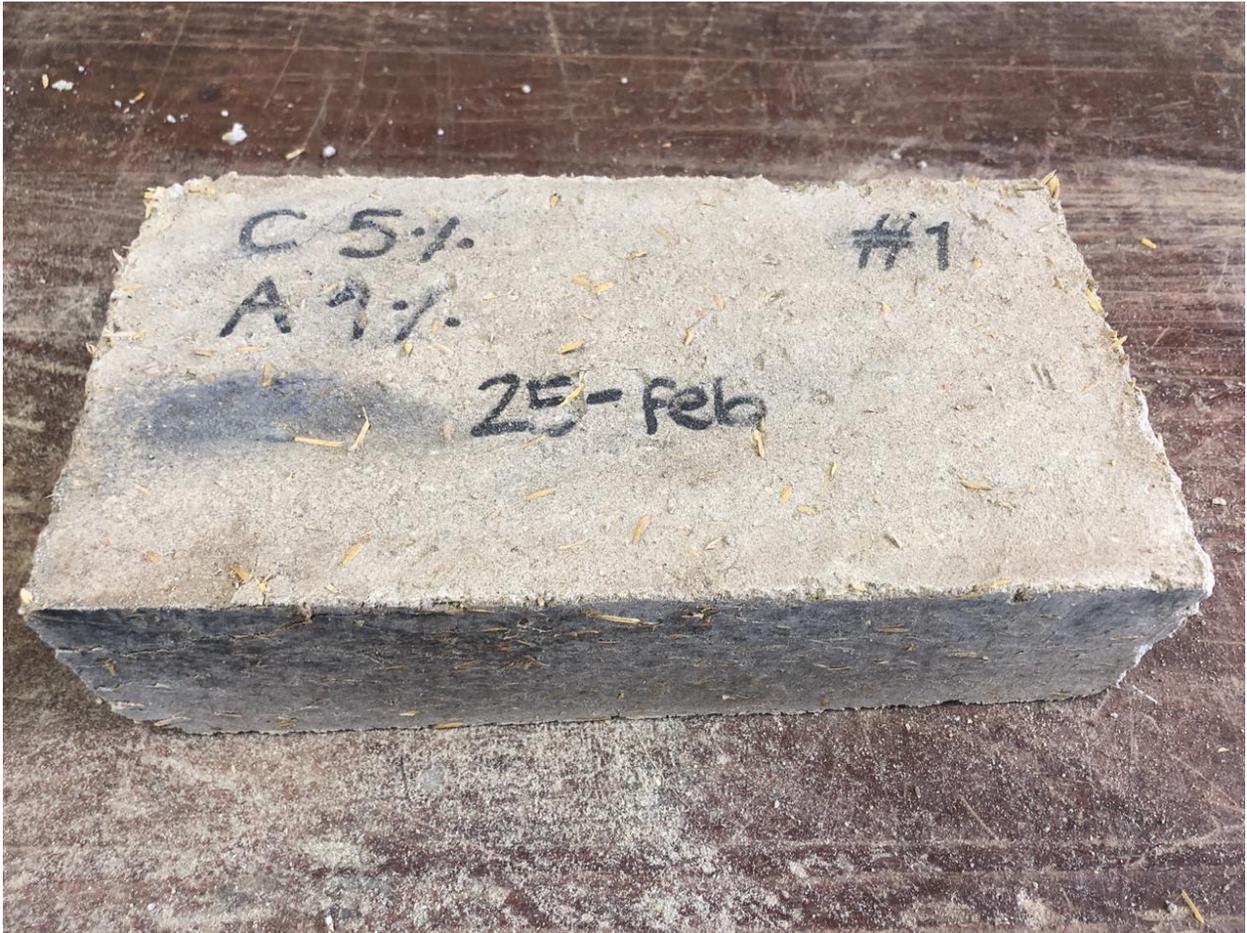


Ilustración 26. Ladrillo de cemento 5% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia



Ilustración 27. Ladrillo de cemento 10% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia



Ilustración 28. Ladrillo de cemento 5% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

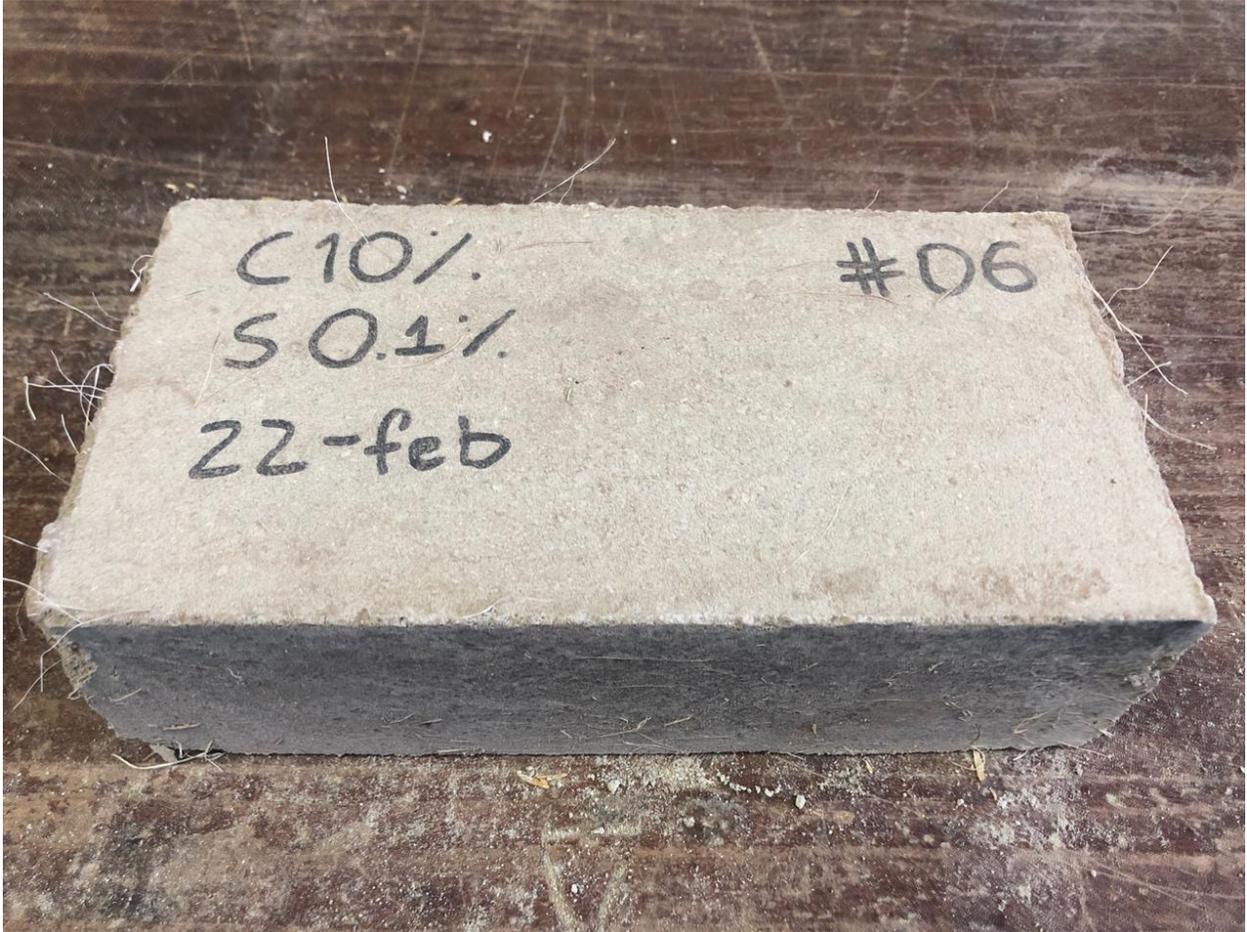


Ilustración 29. Ladrillo de cemento 10% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia



Ilustración 30. Ladrillo de cal 5% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia

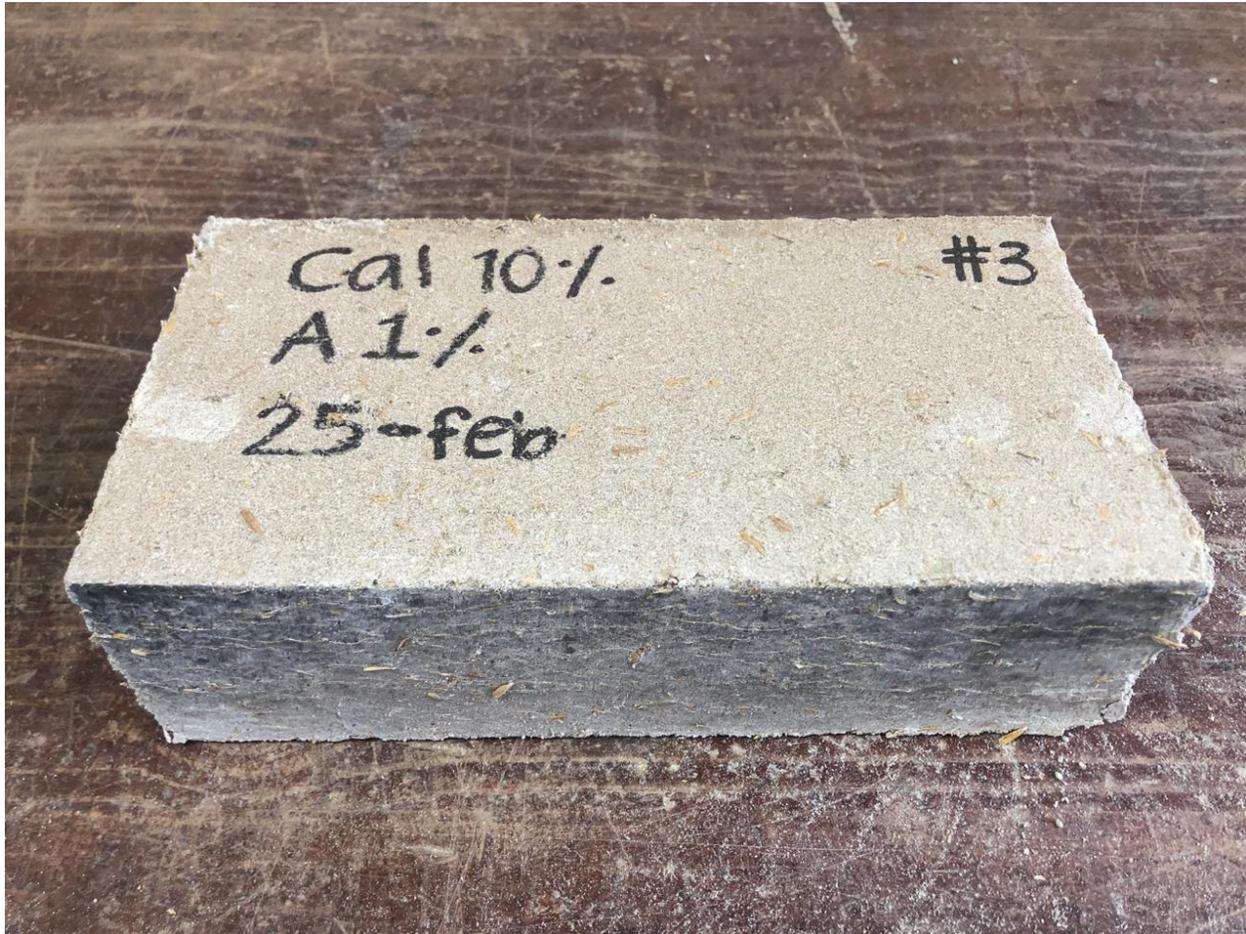


Ilustración 31. Ladrillo de cal 10% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia

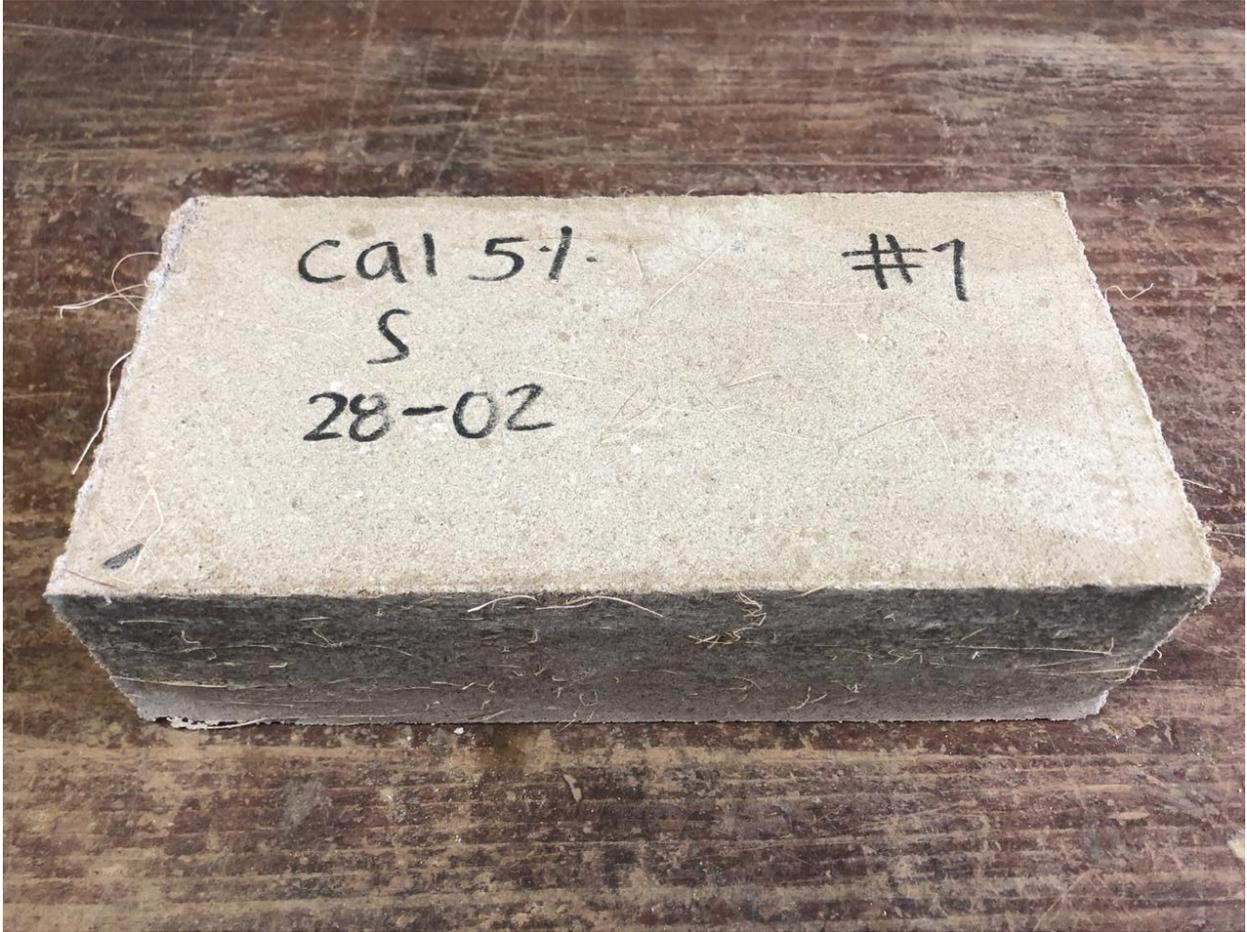


Ilustración 32. Ladrillo de cal 5% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

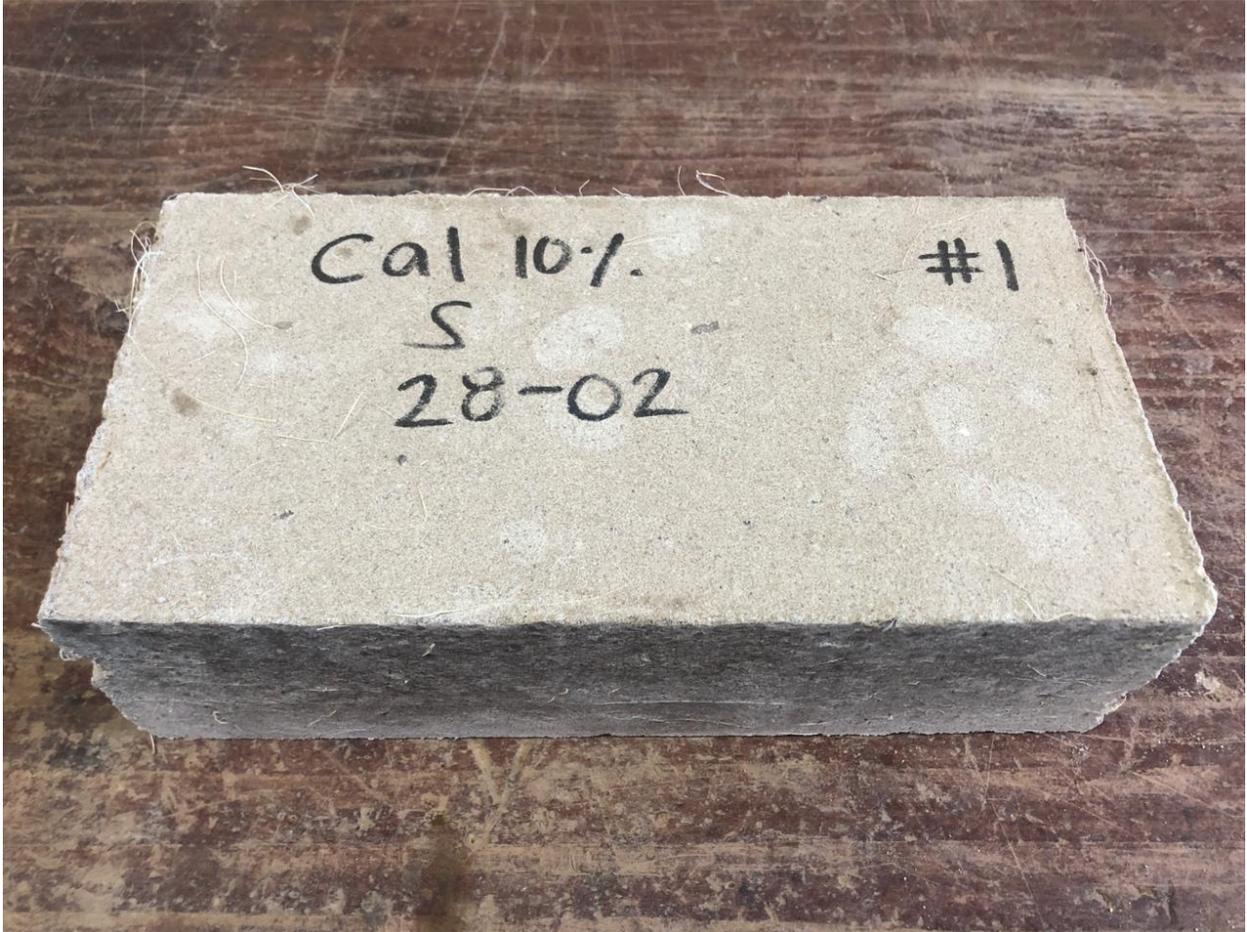


Ilustración 33. Ladrillo de cal 10% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

Anexo 3. Masa y medidas de los ladrillos ecológicos

Tabla 44. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 5% + casc. de arroz 1%

#1	masa	3,435.80 g		#4	masa	3,450.50 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.
		5.10 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.10 pulg.	10.08 pulg.		largo	10.20 pulg.	10.20 pulg.
		10.05 pulg.				10.20 pulg.	
	alto	3.00 pulg.	2.95 pulg.		alto	2.95 pulg.	2.93 pulg.
2.90 pulg.		2.90 pulg.					
área	51.38 pulg.²		área	52.53 pulg.²			
#2	masa	3,406.80 g		#5	masa	3,498.30 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.
		5.10 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.10 pulg.	10.10 pulg.		largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.
		10.10 pulg.				10.00 pulg.	
	alto	2.75 pulg.	2.83 pulg.		alto	3.00 pulg.	3.00 pulg.
2.90 pulg.		3.00 pulg.					
área	51.51 pulg.²		área	51.50 pulg.²			
#3	masa	3,171.60 g					
	ancho	5.10 pulg.	5.13 pulg.				
		5.15 pulg.					
	largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.				
		10.00 pulg.					
	alto	3.00 pulg.	2.95 pulg.				
2.90 pulg.							
área	51.25 pulg.²						

Fuente: elaboración propia

Tabla 45. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1%

#1	masa	4,128.40 g		#4	masa	4,001.20 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.
		5.10 pulg.					
	largo	10.10 pulg.	10.10 pulg.		largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.
		10.10 pulg.					
	alto	3.10 pulg.	3.13 pulg.		alto	3.10 pulg.	3.18 pulg.
3.15 pulg.							
área	51.51 pulg.²		área	51.00 pulg.²			
#2	masa	4,021.10 g		#5	masa	3,869.90 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.
		5.10 pulg.					
	largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.		largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.
		10.05 pulg.					
	alto	3.10 pulg.	3.10 pulg.		alto	3.10 pulg.	3.13 pulg.
3.10 pulg.							
área	51.26 pulg.²		área	51.26 pulg.²			
#3	masa	3,947.60 g					
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.				
		5.10 pulg.					
	largo	10.05 pulg.	10.08 pulg.				
		10.10 pulg.					
	alto	3.00 pulg.	3.05 pulg.				
3.10 pulg.							
área	51.38 pulg.²						

Fuente: elaboración propia

Tabla 46. Masa y dimensiones del ladrillo cemento 5% + fibra de sisal 0.1%

#1	masa	3,967.90 g		#4	masa	3,879.00 g	
	ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.		ancho	5.20 pulg.	5.18 pulg.
		5.15 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.10 pulg.	10.08 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.15 pulg.
		10.05 pulg.				10.20 pulg.	
	alto	2.90 pulg.	2.95 pulg.		alto	3.50 pulg.	3.25 pulg.
3.00 pulg.		3.00 pulg.					
área	51.89 pulg.²		área	52.53 pulg.²			
#2	masa	3,856.30 g		#5	masa	3,524.00 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.18 pulg.
		5.10 pulg.				5.20 pulg.	
	largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.		largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.
		10.05 pulg.				10.00 pulg.	
	alto	3.00 pulg.	3.05 pulg.		alto	2.85 pulg.	2.85 pulg.
3.10 pulg.		2.85 pulg.					
área	51.26 pulg.²		área	51.75 pulg.²			
#3	masa	3,907.30 g					
	ancho	5.15 pulg.	5.13 pulg.				
		5.10 pulg.					
	largo	10.00 pulg.	10.05 pulg.				
		10.10 pulg.					
	alto	3.15 pulg.	3.03 pulg.				
2.90 pulg.							
área	51.51 pulg.²						

Fuente: elaboración propia

Tabla 47. Masa y medidas del ladrillo cal 10% + casc. de arroz 1%

#1	masa	3,654.10 g		#4	masa	3,559.10 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.13 pulg.		ancho	5.10 pulg.	5.13 pulg.
		5.15 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.10 pulg.	10.08 pulg.		largo	10.20 pulg.	10.20 pulg.
		10.05 pulg.				10.20 pulg.	
	alto	3.15 pulg.	3.08 pulg.		alto	2.90 pulg.	2.95 pulg.
3.00 pulg.		3.00 pulg.					
área	51.63 pulg.²		área	52.28 pulg.²			
#2	masa	3,856.70 g		#5	masa	3,551.10 g	
	ancho	5.15 pulg.	5.13 pulg.		ancho	5.20 pulg.	5.18 pulg.
		5.10 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.05 pulg.	10.03 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.15 pulg.
		10.00 pulg.				10.20 pulg.	
	alto	3.10 pulg.	3.05 pulg.		alto	2.95 pulg.	2.98 pulg.
3.00 pulg.		3.00 pulg.					
área	51.38 pulg.²		área	52.53 pulg.²			
#3	masa	3,633.40 g					
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.				
		5.10 pulg.					
	largo	10.05 pulg.	10.03 pulg.				
		10.00 pulg.					
	alto	3.05 pulg.	3.08 pulg.				
3.10 pulg.							
área	51.13 pulg.²						

Fuente: elaboración propia

Tabla 48. Masa y medidas del ladrillo cal 5% + casc. de arroz 1%

#1	masa	3,348.50 g		#4	masa	3,715.00 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.13 pulg.
		5.10 pulg.				5.10 pulg.	
	largo	10.05 pulg.	10.05 pulg.		largo	10.00 pulg.	10.05 pulg.
		10.05 pulg.				10.10 pulg.	
alto	2.90 pulg.	2.93 pulg.	alto	2.90 pulg.	3.00 pulg.		
	2.95 pulg.			3.10 pulg.			
área	51.26 pulg.²		área	51.51 pulg.²			
#2	masa	3,396.30 g		#5	masa	3,444.30 g	
	ancho	5.10 pulg.	5.10 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.18 pulg.
		5.10 pulg.				5.20 pulg.	
	largo	10.05 pulg.	10.08 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.10 pulg.
		10.10 pulg.				10.10 pulg.	
	alto	2.90 pulg.	2.93 pulg.		alto	2.85 pulg.	2.88 pulg.
2.95 pulg.		2.90 pulg.					
área	51.38 pulg.²		área	52.27 pulg.²			
#3	masa	3,643.60 g		#3	masa	3,643.60 g	
	ancho	5.20 pulg.	5.18 pulg.		ancho	5.20 pulg.	5.18 pulg.
		5.15 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.00 pulg.	10.05 pulg.		largo	10.00 pulg.	10.05 pulg.
		10.10 pulg.				10.10 pulg.	
	alto	3.00 pulg.	3.00 pulg.		alto	3.00 pulg.	3.00 pulg.
3.00 pulg.		3.00 pulg.					
área	52.01 pulg.²		área	52.01 pulg.²			

Fuente: elaboración propia

Tabla 49. Masa y medidas del ladrillo cal 10% + fibra de sisal 0.1%

#1	masa	3,818.50 g		#4	masa	3,457.40 g	
	ancho	5.20 pulg.	5.20 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.18 pulg.
		5.20 pulg.				5.20 pulg.	
	largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.05 pulg.
		10.00 pulg.				10.00 pulg.	
	alto	2.90 pulg.	2.90 pulg.		alto	3.00 pulg.	2.93 pulg.
2.90 pulg.		2.85 pulg.					
área	52.00 pulg.²		área	52.01 pulg.²			
#2	masa	3,822.20 g		#5	masa	3,795.10 g	
	ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.
		5.15 pulg.				5.15 pulg.	
	largo	10.00 pulg.	10.00 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.15 pulg.
		10.00 pulg.				10.20 pulg.	
	alto	3.00 pulg.	2.93 pulg.		alto	3.00 pulg.	2.95 pulg.
2.85 pulg.		2.90 pulg.					
área	51.50 pulg.²		área	52.27 pulg.²			
#3	masa	3,739.10 g		#3	masa	3,739.10 g	
	ancho	5.15 pulg.	5.18 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.18 pulg.
		5.20 pulg.				5.20 pulg.	
	largo	10.20 pulg.	10.18 pulg.		largo	10.20 pulg.	10.18 pulg.
		10.15 pulg.				10.15 pulg.	
	alto	2.90 pulg.	2.90 pulg.		alto	2.90 pulg.	2.90 pulg.
2.90 pulg.		2.90 pulg.					
área	52.66 pulg.²		área	52.66 pulg.²			

Fuente: elaboración propia

Tabla 50. Masa y medidas del ladrillo cal 5% + fibra de sisal 0.1%

#1	masa	3,795.10 g		#4	masa	3,480.40 g	
	ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.
		5.15 pulg.					
	largo	10.10 pulg.	10.10 pulg.		largo	10.00 pulg.	10.05 pulg.
		10.10 pulg.					
	alto	3.00 pulg.	2.93 pulg.		alto	2.80 pulg.	2.95 pulg.
2.85 pulg.							
área	52.02 pulg.²		área	51.76 pulg.²			
#2	masa	3,515.50 g		#5	masa	3,406.50 g	
	ancho	5.15 pulg.	5.13 pulg.		ancho	5.15 pulg.	5.15 pulg.
		5.10 pulg.					
	largo	10.10 pulg.	10.08 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.10 pulg.
		10.05 pulg.					
	alto	2.90 pulg.	2.88 pulg.		alto	2.85 pulg.	2.93 pulg.
2.85 pulg.							
área	51.63 pulg.²		área	52.02 pulg.²			
#3	masa	3,454.20 g		#3	masa	3,454.20 g	
	ancho	5.20 pulg.	5.20 pulg.		ancho	5.20 pulg.	5.20 pulg.
		5.20 pulg.					
	largo	10.10 pulg.	10.05 pulg.		largo	10.10 pulg.	10.05 pulg.
		10.00 pulg.					
	alto	2.90 pulg.	2.95 pulg.		alto	2.90 pulg.	2.95 pulg.
3.00 pulg.							
área	52.26 pulg.²		área	52.26 pulg.²			

Fuente: elaboración propia

Anexo 4. Prueba de normalidad de la resistencia a la compresión de los ladrillos ecológicos

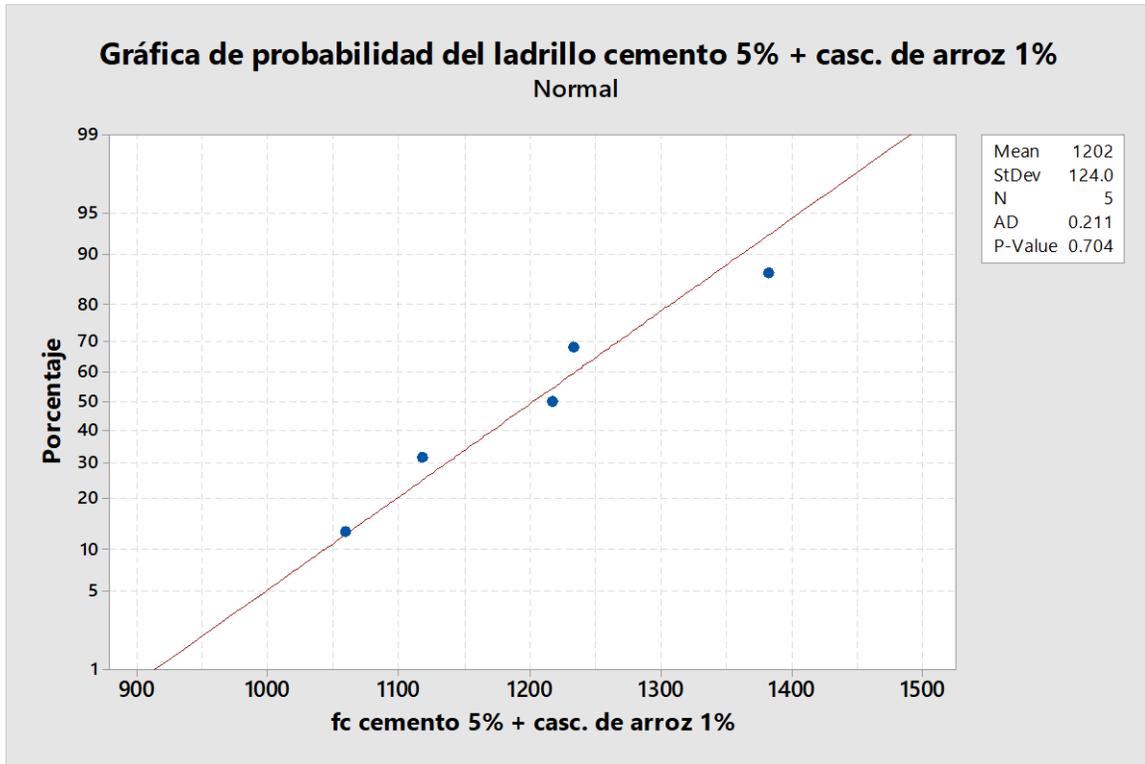


Ilustración 34. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 5% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia

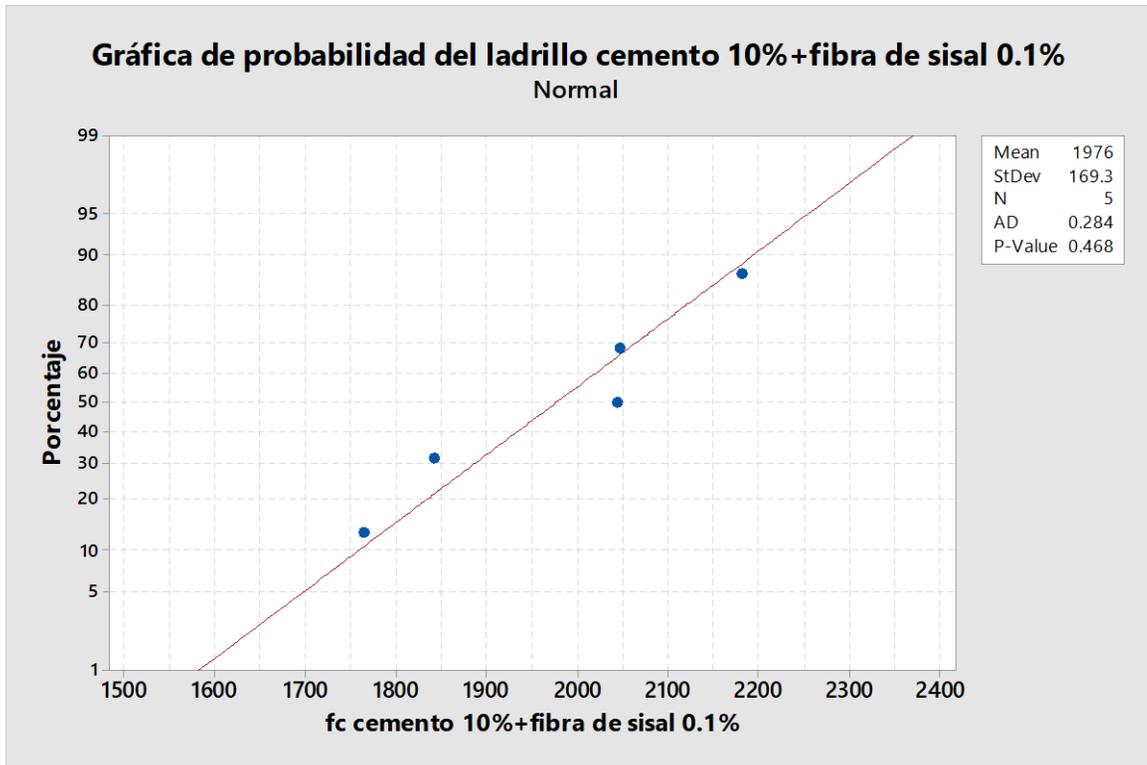


Ilustración 35. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

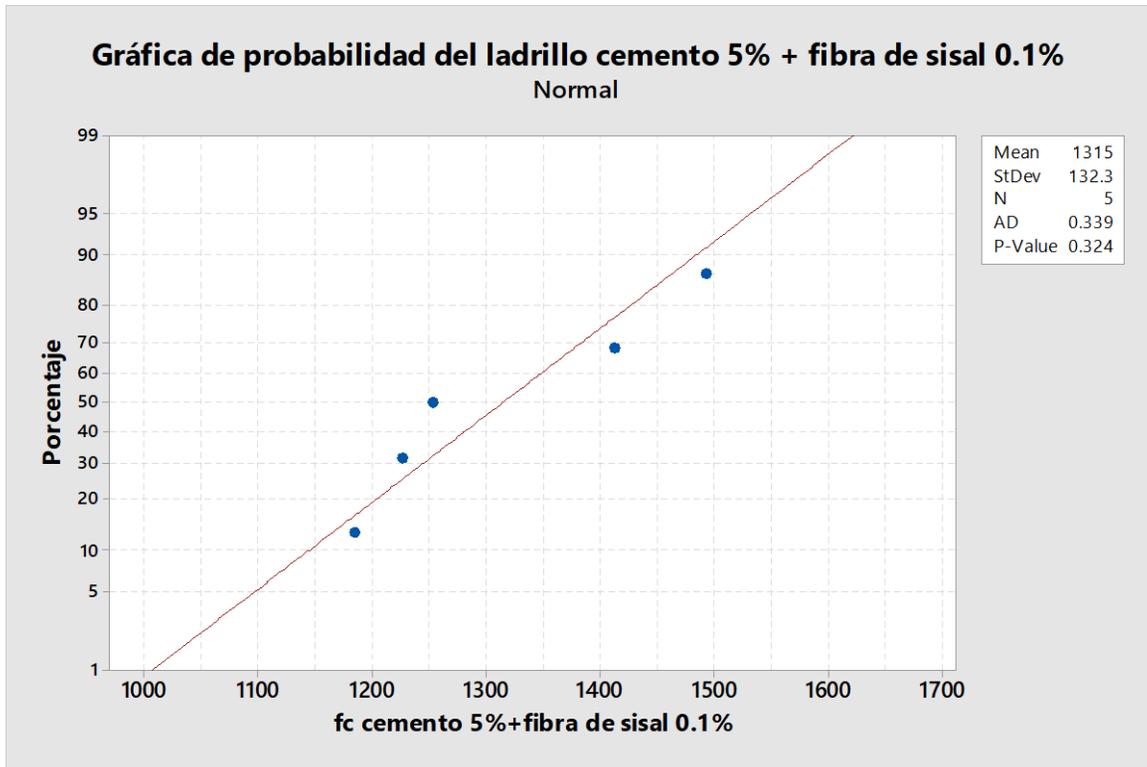


Ilustración 36. Prueba de normalidad para el ladrillo cemento 5% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

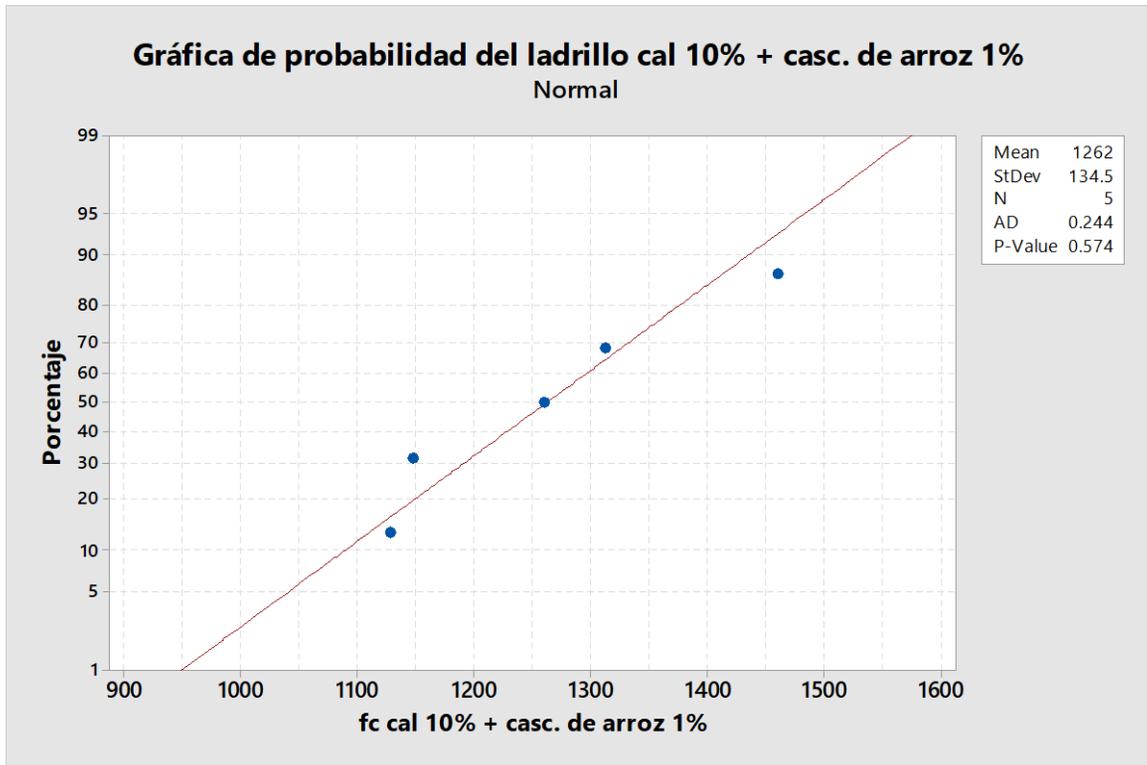


Ilustración 37. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 10% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia

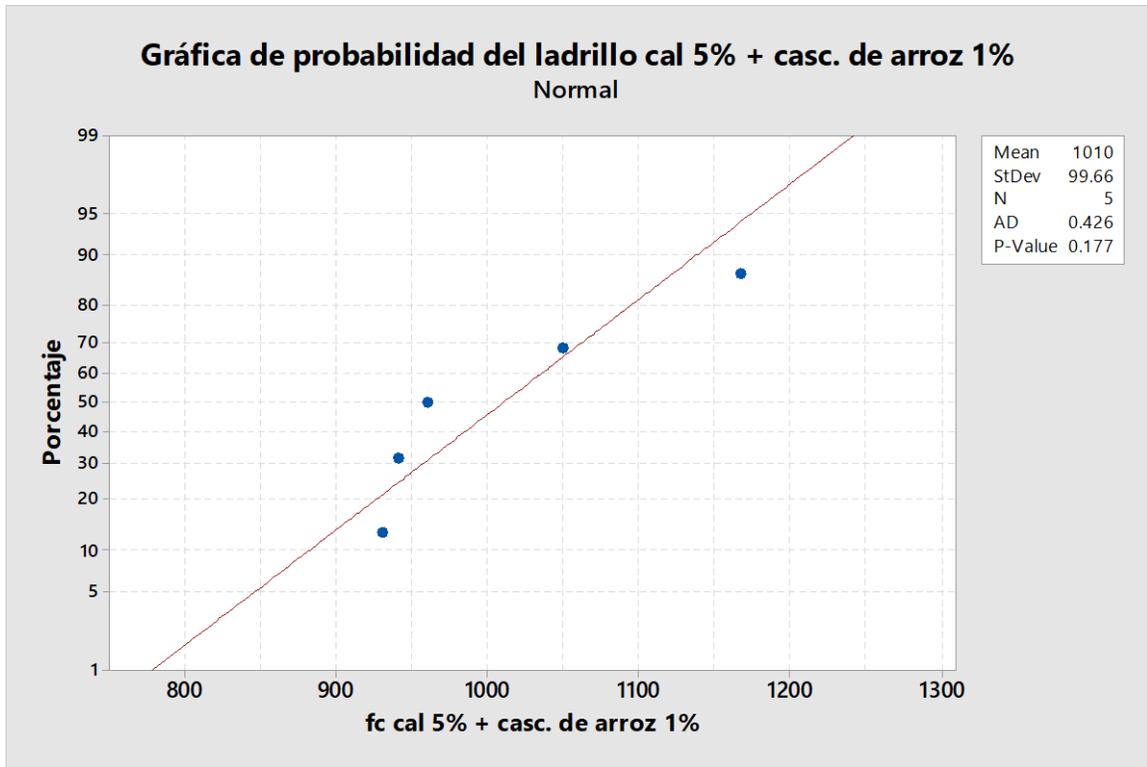


Ilustración 38. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 5% + casc. de arroz 1%

Fuente: elaboración propia

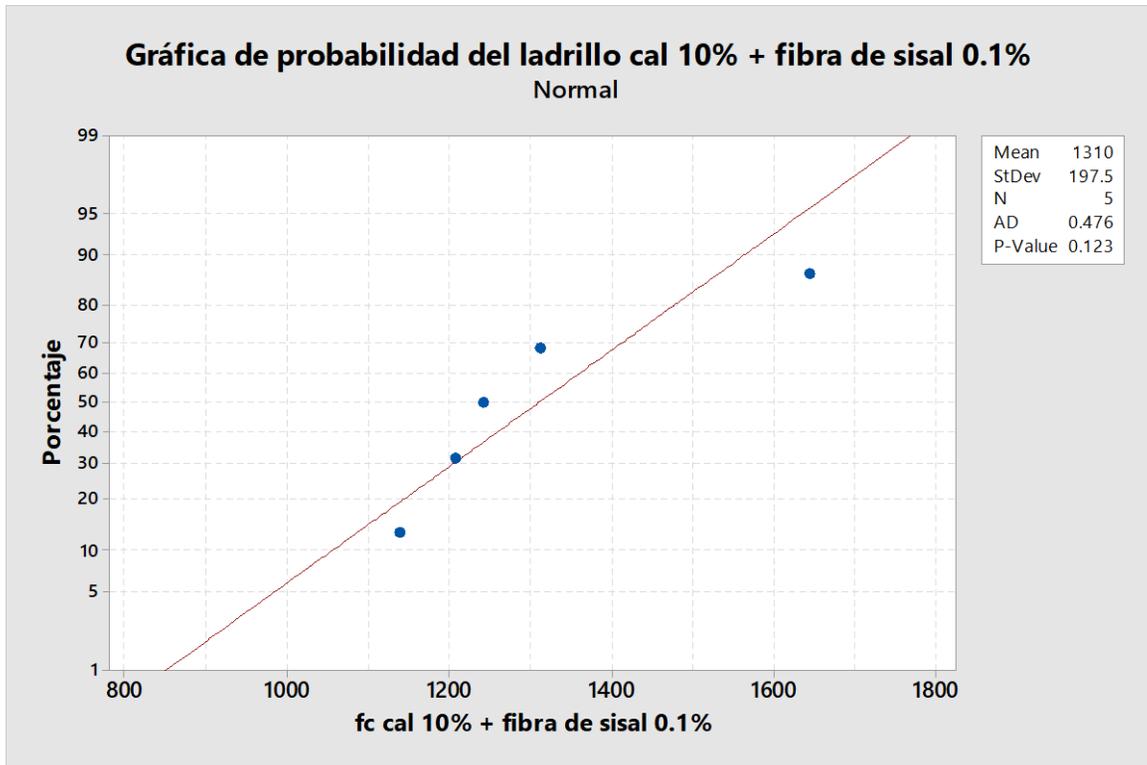


Ilustración 39. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 10% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

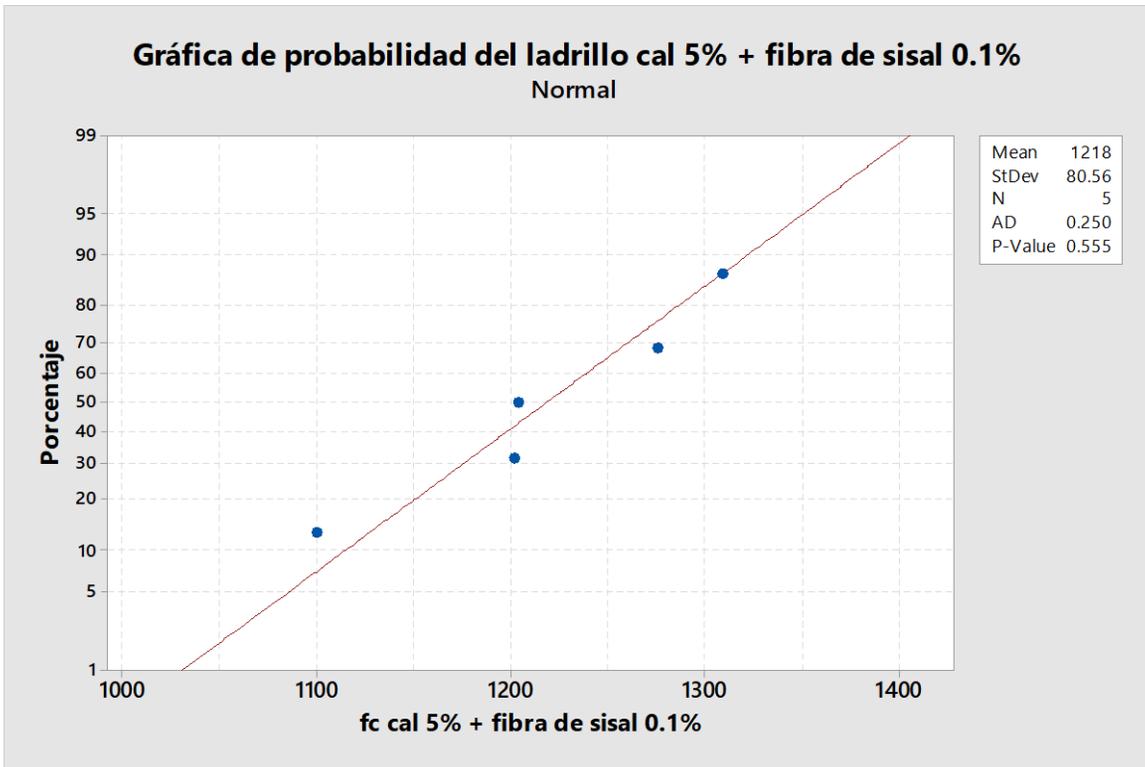


Ilustración 40. Prueba de normalidad para el ladrillo cal 5% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

Anexo 5. Resultados de Minitab de prueba t de los ladrillos ecológicos

One-Sample T: cemento 10% + casc. de arroz 1%

Test of $\mu = 1500$ vs $\neq 1500$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cemento 10% + casc. de a	5	1711.9	173.2	77.5	(1496.8; 1926.9)	2.74	0.052

One-Sample T: cemento 5% + casc. de arroz 1%

Test of $\mu = 1000$ vs $\neq 1000$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cemento 5% + casc. de ar	5	1202.2	124.0	55.4	(1048.3; 1356.1)	3.65	0.022

One-Sample T: cemento 10%+fibra de sisal 0.1%

Test of $\mu = 1500$ vs $\neq 1500$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cemento 10%+fibra de sis	5	1976.4	169.3	75.7	(1766.2; 2186.6)	6.29	0.003

One-Sample T: cemento 5%+fibra de sisal 0.1%

Test of $\mu = 1000$ vs $\neq 1000$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cemento 5%+fibra de sisa	5	1314.7	132.3	59.2	(1150.4; 1478.9)	5.32	0.006

One-Sample T: cal 10% + casc. de arroz 1%

Test of $\mu = 1500$ vs $\neq 1500$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cal 10% + casc. de arroz	5	1261.7	134.5	60.2	(1094.6; 1428.7)	-3.96	0.017

One-Sample T: cal 5% + casc. de arroz 1%

Test of $\mu = 1000$ vs $\neq 1000$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cal 5% + casc. de arroz	5	1010.3	99.7	44.6	(886.5; 1134.0)	0.23	0.829

One-Sample T: cal 10% + fibra de sisal 0.1%

Test of $\mu = 1500$ vs $\neq 1500$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cal 10% + fibra de sisal	5	1309.7	197.5	88.3	(1064.5; 1554.9)	-2.16	0.097

One-Sample T: cal 5% + fibra de sisal 0.1%

Test of $\mu = 1000$ vs $\neq 1000$

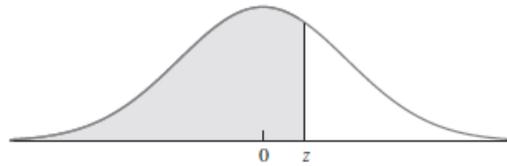
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
cal 5% + fibra de sisal	5	1218.3	80.6	36.0	(1118.2; 1318.3)	6.06	0.004

One-Sample T: tradicional de arcilla

Test of $\mu = 500$ vs $\neq 500$

Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI	T	P
tradicional de arcilla	5	611.5	69.1	30.9	(525.6; 697.3)	3.61	0.023

Anexo 6. Tabla z – distribución normal



z	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	.5000	.5040	.5080	.5120	.5160	.5199	.5239	.5279	.5319	.5359
0.1	.5398	.5438	.5478	.5517	.5557	.5596	.5636	.5675	.5714	.5753
0.2	.5793	.5832	.5871	.5910	.5948	.5987	.6026	.6064	.6103	.6141
0.3	.6179	.6217	.6255	.6293	.6331	.6368	.6406	.6443	.6480	.6517
0.4	.6554	.6591	.6628	.6664	.6700	.6736	.6772	.6808	.6844	.6879
0.5	.6915	.6950	.6985	.7019	.7054	.7088	.7123	.7157	.7190	.7224
0.6	.7257	.7291	.7324	.7357	.7389	.7422	.7454	.7486	.7517	.7549
0.7	.7580	.7611	.7642	.7673	.7704	.7734	.7764	.7794	.7823	.7852
0.8	.7881	.7910	.7939	.7967	.7995	.8023	.8051	.8078	.8106	.8133
0.9	.8159	.8186	.8212	.8238	.8264	.8289	.8315	.8340	.8365	.8389
1.0	.8413	.8438	.8461	.8485	.8508	.8531	.8554	.8577	.8599	.8621
1.1	.8643	.8665	.8686	.8708	.8729	.8749	.8770	.8790	.8810	.8830
1.2	.8849	.8869	.8888	.8907	.8925	.8944	.8962	.8980	.8997	.9015
1.3	.9032	.9049	.9066	.9082	.9099	.9115	.9131	.9147	.9162	.9177
1.4	.9192	.9207	.9222	.9236	.9251	.9265	.9279	.9292	.9306	.9319
1.5	.9332	.9345	.9357	.9370	.9382	.9394	.9406	.9418	.9429	.9441
1.6	.9452	.9463	.9474	.9484	.9495	.9505	.9515	.9525	.9535	.9545
1.7	.9554	.9564	.9573	.9582	.9591	.9599	.9608	.9616	.9625	.9633
1.8	.9641	.9649	.9656	.9664	.9671	.9678	.9686	.9693	.9699	.9706
1.9	.9713	.9719	.9726	.9732	.9738	.9744	.9750	.9756	.9761	.9767
2.0	.9772	.9778	.9783	.9788	.9793	.9798	.9803	.9808	.9812	.9817
2.1	.9821	.9826	.9830	.9834	.9838	.9842	.9846	.9850	.9854	.9857
2.2	.9861	.9864	.9868	.9871	.9875	.9878	.9881	.9884	.9887	.9890
2.3	.9893	.9896	.9898	.9901	.9904	.9906	.9909	.9911	.9913	.9916
2.4	.9918	.9920	.9922	.9925	.9927	.9929	.9931	.9932	.9934	.9936
2.5	.9938	.9940	.9941	.9943	.9945	.9946	.9948	.9949	.9951	.9952
2.6	.9953	.9955	.9956	.9957	.9959	.9960	.9961	.9962	.9963	.9964
2.7	.9965	.9966	.9967	.9968	.9969	.9970	.9971	.9972	.9973	.9974
2.8	.9974	.9975	.9976	.9977	.9977	.9978	.9979	.9979	.9980	.9981
2.9	.9981	.9982	.9982	.9983	.9984	.9984	.9985	.9985	.9986	.9986
3.0	.9987	.9987	.9987	.9988	.9988	.9989	.9989	.9989	.9990	.9990
3.1	.9990	.9991	.9991	.9991	.9992	.9992	.9992	.9992	.9993	.9993
3.2	.9993	.9993	.9994	.9994	.9994	.9994	.9994	.9995	.9995	.9995
3.3	.9995	.9995	.9995	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9996	.9997
3.4	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9997	.9998
3.5	.9998	.9998	.9998	.9998	.9998	.9998	.9998	.9998	.9998	.9998
3.6	.9998	.9998	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999	.9999

Fuente: (Navidi, 2004)

Anexo 7. Intervalo de predicción de ladrillos ecológicos

Tabla 51. Datos y resultados del IP de cada ladrillo ecológico

<i>cemento 10% + casc. de arroz 1%</i>		<i>cal 10% + casc. de arroz 1%</i>	
Media	1,711.87	Media	1,261.67
Desviación estándar	173.20	Desviación estándar	134.54
Cuenta	5	Cuenta	5
$Z_{\alpha/2}$	1.96	$Z_{\alpha/2}$	1.96
Límite inferior	1,340.00 psi	Límite inferior	972.81 psi
Límite superior	2,083.74 psi	Límite superior	1,550.53 psi
<i>cemento 5% + casc. de arroz 1%</i>		<i>cal 5% + casc. de arroz 1%</i>	
Media	1,202.19	Media	1,010.28
Desviación estándar	123.95	Desviación estándar	99.66
Cuenta	5	Cuenta	5
$Z_{\alpha/2}$	1.96	$Z_{\alpha/2}$	1.96
Límite inferior	936.06 psi	Límite inferior	796.31 psi
Límite superior	1,468.32 psi	Límite superior	1,224.24 psi
<i>cemento 10% + fibra de sisal 0.1%</i>		<i>cal 10% + fibra de sisal 0.1%</i>	
Media	1,976.44	Media	1,309.69
Desviación estándar	169.30	Desviación estándar	197.45
Cuenta	5	Cuenta	5
$Z_{\alpha/2}$	1.96	$Z_{\alpha/2}$	1.96
Límite inferior	1,612.96 psi	Límite inferior	885.76 psi
Límite superior	2,339.92 psi	Límite superior	1,733.63 psi
<i>cemento 5% + fibra de sisal 0.1%</i>		<i>cal 5% + fibra de sisal 0.1%</i>	
Media	1,314.67	Media	1,218.27
Desviación estándar	132.30	Desviación estándar	80.56
Cuenta	5	Cuenta	5
$Z_{\alpha/2}$	1.96	$Z_{\alpha/2}$	1.96
Límite inferior	1,030.61 psi	Límite inferior	1,045.30 psi
Límite superior	1,598.73 psi	Límite superior	1,391.23 psi

Fuente: elaboración propia

Anexo 8. Resultados de Minitab de la prueba F para varianzas

Test and CI for Two Variances: cemento 10% + casc. de a; cemento 10%+fibra de sis

Method

Null hypothesis Variance(cemento 10% + casc. de arroz 1%) / Variance(cemento 10%+fibra de sisal 0.1%) = 1
Alternative hypothesis Variance(cemento 10% + casc. de arroz 1%) / Variance(cemento 10%+fibra de sisal 0.1%) ≠ 1
Significance level $\alpha = 0.05$

F method was used. This method is accurate for normal data only.

Statistics

Variable	N	StDev	Variance	95% CI for Variances
cemento 10% + casc. de arroz 1%	5	173.203	29999.381	(10768.593; 247714.549)
cemento 10%+fibra de sisal 0.1%	5	169.295	28660.953	(10288.151; 236662.720)

Ratio of standard deviations = 1.023

Ratio of variances = 1.047

95% Confidence Intervals

Method	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
F	(0.330; 3.171)	(0.109; 10.053)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F	4	4	1.05	0.966

Test and CI for Two Variances: masa cemento10%+fibra sisal0.1%; masa tradicional de arcilla

Method

Null hypothesis Variance(masa cemento10%+fibra sisal0.1%) / Variance(masa tradicional de arcilla) = 1
 Alternative hypothesis Variance(masa cemento10%+fibra sisal0.1%) / Variance(masa tradicional de arcilla) ≠ 1
 Significance level $\alpha = 0.05$

F method was used. This method is accurate for normal data only.

Statistics

Variable	N	StDev	Variance	95% CI for Variances
masa cemento10%+fibra sisal0.1%	5	95.397	9100.683	(3266.786; 75147.270)
masa tradicional de arcilla	5	62.768	3939.812	(1414.237; 32532.296)

Ratio of standard deviations = 1.520

Ratio of variances = 2.310

95% Confidence Intervals

Method	CI for StDev Ratio	CI for Variance Ratio
F	(0.490; 4.710)	(0.241; 22.186)

Tests

Method	DF1	DF2	Test Statistic	P-Value
F	4	4	2.31	0.437

Anexo 9. Resultados de Minitab de la prueba t para diferencia de medias

Two-Sample T-Test and CI: cemento 10% + casc. de arroz 1%; cemento 10%+fibra de sisal 0.1%

Two-sample T for cemento 10% + casc. de arroz 1% vs cemento 10%+fibra de sisal 0.1%

				SE
	N	Mean	StDev	Mean
cemento 10% + casc. de a	5	1712	173	77
cemento 10%+fibra de sis	5	1976	169	76

Difference = μ (cemento 10% + casc. de arroz 1%) - μ (cemento 10%+fibra de sisal 0.1%)
Estimate for difference: -265
95% CI for difference: (-514; -15)
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = -2.44 P-Value = 0.040 DF = 8
Both use Pooled StDev = 171.2605

Two-Sample T-Test and CI: masa cemento10%+fibra sisal0.1%; masa tradicional de arcilla

Two-sample T for masa cemento10%+fibra sisal0.1% vs masa tradicional de arcilla

				SE
	N	Mean	StDev	Mean
masa cemento10%+fibra si	5	3993.6	95.4	43
masa tradicional de arci	5	3940.7	62.8	28

Difference = μ (masa cemento10%+fibra sisal0.1%) - μ (masa tradicional de arcilla)
Estimate for difference: 52.9
95% CI for difference: (-64.8; 170.7)
T-Test of difference = 0 (vs \neq): T-Value = 1.04 P-Value = 0.330 DF = 8
Both use Pooled StDev = 80.7480

Anexo 10. Prueba de normalidad de la masa de los ladrillos cemento 10% + fibra de sisal 0.1% y tradicional de arcilla

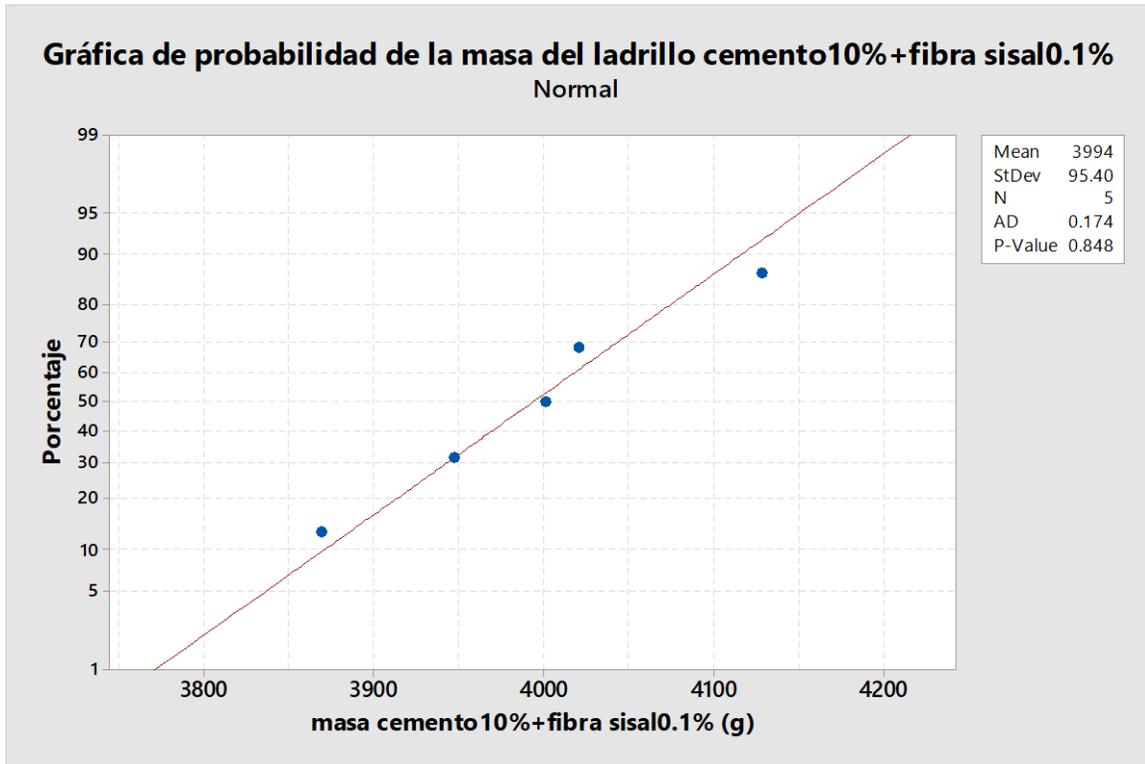


Ilustración 41. Prueba de normalidad para la masa del ladrillo cemento 10% + fibra de sisal 0.1%

Fuente: elaboración propia

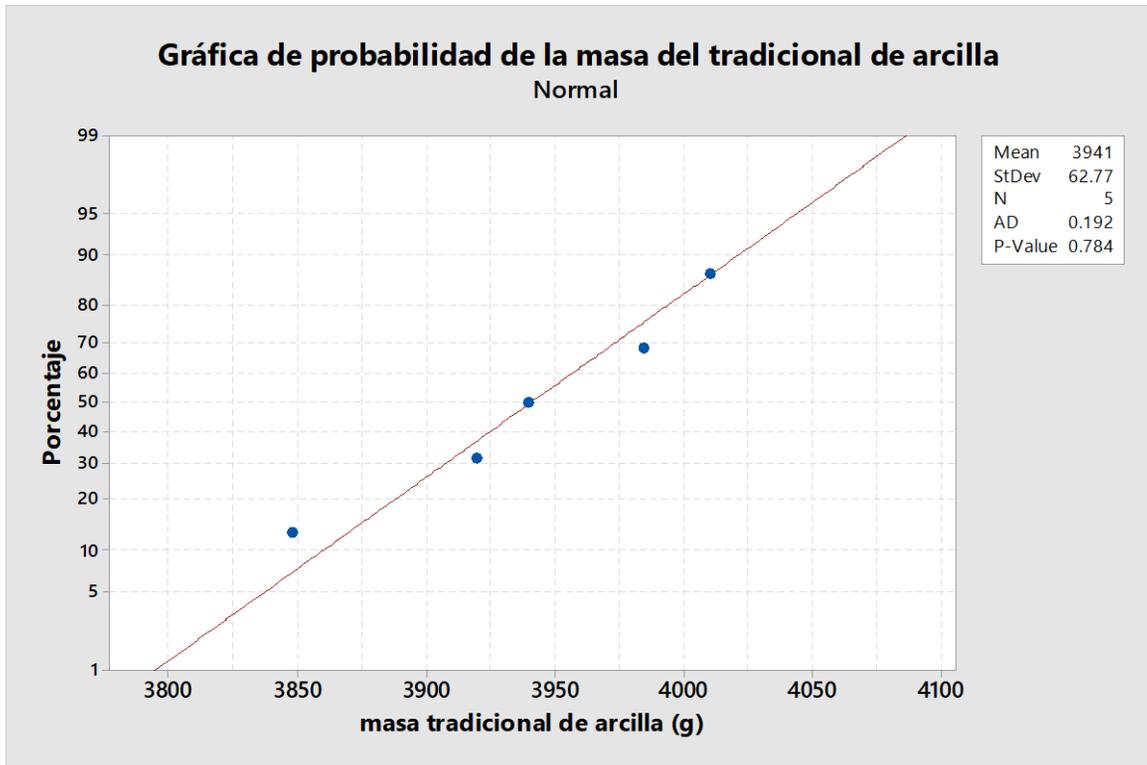


Ilustración 42. Prueba de normalidad para la masa del ladrillo tradicional de arcilla

Fuente: elaboración propia

Anexo 11. Análisis del diseño factorial realizado en Minitab

Factorial Regression: fc versus Tipo estabilizador; % estabilizador; Tipo aditivo natural

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value
Model	7	3417033	488148	23.66
Linear	3	2917829	972610	47.15
Tipo estabilizador	1	1234219	1234219	59.83
% estabilizador	1	1433128	1433128	69.47
Tipo aditivo natural	1	250482	250482	12.14
2-Way Interactions	3	438343	146114	7.08
Tipo estabilizador*% estabilizador	1	429148	429148	20.80
Tipo estabilizador*Tipo aditivo natural	1	9156	9156	0.44
% estabilizador*Tipo aditivo natural	1	39	39	0.00
3-Way Interactions	1	60860	60860	2.95
Tipo estabilizador*% estabilizador*Tipo aditivo natural	1	60860	60860	2.95
Error	32	660156	20630	
Total	39	4077188		

Source	P-Value
Model	0.000
Linear	0.000
Tipo estabilizador	0.000
% estabilizador	0.000
Tipo aditivo natural	0.001
2-Way Interactions	0.001
Tipo estabilizador*% estabilizador	0.000
Tipo estabilizador*Tipo aditivo natural	0.510
% estabilizador*Tipo aditivo natural	0.966
3-Way Interactions	0.096
Tipo estabilizador*% estabilizador*Tipo aditivo natural	0.096
Error	
Total	

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
143.631	83.81%	80.27%	74.70%

Coded Coefficients

Term	Effect	Coef	SE Coef	T-Value
Constant		1375.6	22.7	60.57
Tipo estabilizador	-351.3	-175.7	22.7	-7.73
% estabilizador	378.6	189.3	22.7	8.33
Tipo aditivo natural	158.3	79.1	22.7	3.48
Tipo estabilizador*% estabilizador	-207.2	-103.6	22.7	-4.56
Tipo estabilizador*Tipo aditivo natural	-30.3	-15.1	22.7	-0.67
% estabilizador*Tipo aditivo natural	-2.0	-1.0	22.7	-0.04
Tipo estabilizador*% estabilizador*Tipo aditivo natural	-78.0	-39.0	22.7	-1.72

Term	P-Value	VIF
Constant	0.000	
Tipo estabilizador	0.000	1.00
% estabilizador	0.000	1.00
Tipo aditivo natural	0.001	1.00
Tipo estabilizador*% estabilizador	0.000	1.00
Tipo estabilizador*Tipo aditivo natural	0.510	1.00
% estabilizador*Tipo aditivo natural	0.966	1.00
Tipo estabilizador*% estabilizador*Tipo aditivo natural	0.096	1.00

Regression Equation in Uncoded Units

fc = 807.8 + 135.1 Tipo estabilizador + 75.71 % estabilizador + 82.1 Tipo aditivo natural
- 41.43 Tipo estabilizador*% estabilizador
+ 101.9 Tipo estabilizador*Tipo aditivo natural
- 0.39 % estabilizador*Tipo aditivo natural - 15.60 Tipo estabilizador*
% estabilizador*Tipo aditivo natural

Alias Structure

Factor Name

A Tipo estabilizador
B % estabilizador
C Tipo aditivo natural

Aliases

I
A
B
C
AB
AC
BC
ABC

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

Obs	fc	Fit	Resid	Std Resid	
24	1644.6	1309.7	335.0	2.61	R

R Large residual