



# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE AGUASCALIENTES

CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

## TESIS

**IMPERMEABILIZANTE NATURAL DE TECHOS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS A  
BASE DE COMPONENTE LIGNINA PARA SU PROPIEDAD HIDROFÓBICA**

### PRESENTA

Ing. Civil Junior José Méndez Aguilar

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON  
ESPECIALIDAD EN CONSTRUCCIÓN**

**TUTOR:** Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

**COTUTOR:** Dra. Lorena Vargas Rodríguez

**ASESOR:** Dra. Brenda Estefanía Díaz Macías

Fecha de dictaminación dd/mm/aaaa: 25/10/2023

NOMBRE: Junior José Méndez Aguilar

ID 222747

PROGRAMA: Maestría en Ingeniería Civil LGAC (del posgrado): Estructuras y Construcción

TIPO DE TRABAJO: ( x ) Tesis ( ) Trabajo Práctico

TÍTULO: Impermeabilizante natural de techos en edificios históricos a base de componente lignina para su propiedad hidrofóbica

IMPACTO SOCIAL (señalar el impacto logrado): Compatibilidad con las técnicas tradicionales de restauración y conservación, además contribuir a la preservación del patrimonio, fomentar la sostenibilidad, reducir la contaminación y promover la innovación en la construcción sostenible.

INDICAR SI NO N.A. (NO APLICA) SEGÚN CORRESPONDA:

INDICAR	SI	NO	N.A. (NO APLICA)	SEGÚN CORRESPONDA:
<i>Elementos para la revisión académica del trabajo de tesis o trabajo práctico:</i>				
SI				El trabajo es congruente con las LGAC del programa de posgrado
SI				La problemática fue abordada desde un enfoque multidisciplinario
SI				Existe coherencia, continuidad y orden lógico del tema central con cada apartado
SI				Los resultados del trabajo dan respuesta a las preguntas de investigación o a la problemática que aborda
SI				Los resultados presentados en el trabajo son de gran relevancia científica, tecnológica o profesional según el área
SI				El trabajo demuestra más de una aportación original al conocimiento de su área
SI				Las aportaciones responden a los problemas prioritarios del país
NO				Generó transferencia del conocimiento o tecnológica
SI				Cumple con la ética para la investigación (reporte de la herramienta antiplagio)
<i>El egresado cumple con lo siguiente:</i>				
SI				Cumple con lo señalado por el Reglamento General de Docencia
SI				Cumple con los requisitos señalados en el plan de estudios (créditos curriculares, optativos, actividades complementarias, estancia, predoctoral, etc)
SI				Cuenta con los votos aprobatorios del comité tutorial, en caso de los posgrados profesionales si tiene solo tutor podrá liberar solo el tutor
NO				Cuenta con la carta de satisfacción del Usuario
SI				Coincide con el título y objetivo registrado
SI				Tiene congruencia con cuerpos académicos
SI				Tiene el CVU del Conacyt actualizado
N.A.				Tiene el artículo aceptado o publicado y cumple con los requisitos institucionales (en caso que proceda)
<i>En caso de Tesis por artículos científicos publicados</i>				
N.A.				Aceptación o Publicación de los artículos según el nivel del programa
N.A.				El estudiante es el primer autor
N.A.				El autor de correspondencia es el Tutor del Núcleo Académico Básico
N.A.				En los artículos se ven reflejados los objetivos de la tesis, ya que son producto de este trabajo de investigación.
N.A.				Los artículos integran los capítulos de la tesis y se presentan en el idioma en que fueron publicados
N.A.				La aceptación o publicación de los artículos en revistas indexadas de alto impacto

Con base a estos criterios, se autoriza se continúen con los trámites de titulación y programación del examen de grado:

SI  X  
NO

Elaboró:

\* NOMBRE Y FIRMA DEL CONSEJERO SEGÚN LA LGAC DE ADSCRIPCIÓN:

FIRMAS

Dr. Miguel Ángel Soto Zamora

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO TÉCNICO:

Dr. Martín Hernández Marín

\* En caso de conflicto de intereses, firmará un revisor miembro del NAB de la LGAC correspondiente distinto al tutor o miembro del comité tutorial, asignado por el Decano

Revisó:

NOMBRE Y FIRMA DEL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO:

Dr. Mario Ernesto Esparza Díaz de León

Autorizó:

NOMBRE Y FIRMA DEL DECANO:

Mtra. Ma. Guadalupe Lira Peralta

**Nota: procede el trámite para el Depto. de Apoyo al Posgrado**

En cumplimiento con el Art. 105C del Reglamento General de Docencia que a la letra señala entre las funciones del Consejo Académico: ... Cuidar la eficiencia terminal del programa de posgrado y el Art. 105F las funciones del Secretario Técnico, llevar el seguimiento de los alumnos.

**CARTA DE VOTO APROBATORIO  
INDIVIDUAL**

**María Guadalupe Lira Peralta**  
**DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

PRESENTE

Por medio del presente como **TUTOR** designado del estudiante **JUNIOR JOSÉ MÉNDEZ AGUILAR** con ID 222747 quien realizó la tesis titulado: **IMPERMEABILIZANTE NATURAL DE TECHOS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS A BASE DE COMPONENTE LIGNINA PARA SU PROPIEDAD HIDROFÓBICA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**"Se Lumen Proferre"**

**Aguascalientes, Ags., a 18 de Octubre de 2023**



**Dr. Miguel Ángel Soto Zamora**

**Tutor de tesis**

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

María Guadalupe Lira Peralta  
DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTE

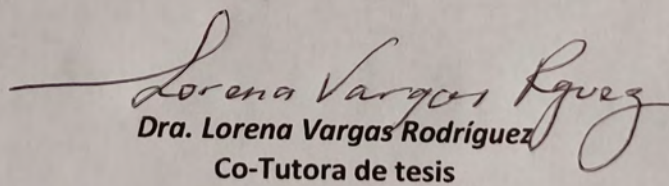
Por medio del presente como **CO-TUTORA** designado del estudiante **JUNIOR JOSÉ MÉNDEZ AGUILAR** con ID **222747** quien realizó la tesis titulado: **IMPERMEABILIZANTE NATURAL DE TECHOS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS A BASE DE COMPONENTE LIGNINA PARA SU PROPIEDAD HIDROFÓBICA**, un trabajo propio innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que él pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Se Lumen Proferre"

Aguascalientes, Ags., a 21 de Octubre de 2023

  
Dra. Lorena Vargas Rodríguez  
Co-Tutora de tesis

c.c.p.- Interesado  
c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

**CARTA DE VOTO APROBATORIO  
INDIVIDUAL**

**María Guadalupe Lira Peralta**  
**DECANA DEL CENTRO DE CIENCIAS DEL DISEÑO Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

**PRESENTE**

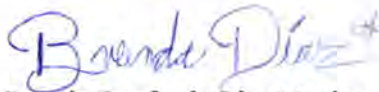
Por medio del presente como **ASESORA** designado del estudiante **JUNIOR JOSÉ MÉNDEZ AGUILAR** con ID **222747** quien realizó *la tesis* titulado: **IMPERMEABILIZANTE NATURAL DE TECHOS EN EDIFICIOS HISTÓRICOS A BASE DE COMPONENTE LIGNINA PARA SU PROPIEDAD HIDROFÓBICA**, un trabajo propio, innovador, relevante e inédito y con fundamento en el Artículo 175, Apartado II del Reglamento General de Docencia doy mi consentimiento de que la versión final del documento ha sido revisada y las correcciones se han incorporado apropiadamente, por lo que me permito emitir el **VOTO APROBATORIO**, para que *él* pueda proceder a imprimirla así como continuar con el procedimiento administrativo para la obtención del grado.

Pongo lo anterior a su digna consideración y sin otro particular por el momento, me permito enviarle un cordial saludo.

**ATENTAMENTE**

**"Se Lumen Proferre"**

**Aguascalientes, Ags., a 21 de Octubre de 2023**



**Dra. Brenda Estefanía Díaz Macías**

**Asesora de tesis**

c.c.p.- Interesado

c.c.p.- Secretaría Técnica del Programa de Posgrado

## **Agradecimientos**

En el proceso de culminación de este proyecto de investigación, quiero externar mi sincera gratitud a quienes contribuyeron significativamente a su realización.

En primer lugar, deseo agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo financiero y su confianza en mi investigación. Su respaldo fue fundamental para hacer posible esta investigación y para mi crecimiento académico.

A la Universidad Autónoma de Aguascalientes por brindarme un entorno académico propicio para la realización de esta tesis. Sus recursos y estructura académica fueron esenciales en el desarrollo de este proyecto.

A la "División de Ciencias de la Salud e Ingenierías" del Campus Celaya-Salvatierra de la Universidad de Guanajuato, agradezco su colaboración y recursos compartidos, que enriquecieron en gran medida mi investigación. Durante el transcurso de este arduo trabajo de investigación, la generosa asistencia brindada por esta institución ha sido indispensable para el éxito de mi proyecto. El respaldo proporcionado en la adquisición y compra de insumos de alta pureza destinados a mis pruebas experimentales ha sido un factor determinante en la obtención de resultados precisos y confiables.

A la empresa CEyPABASA, mi sincero agradecimiento por su valiosa colaboración y por proporcionar los insumos esenciales para mis experimentos. Su compromiso con la innovación y la sostenibilidad ha sido un activo importante en esta investigación.

Finalmente, quiero expresar mi reconocimiento y gratitud a mi comité tutorial por su orientación experta y sus valiosos comentarios a lo largo de todo el proceso de investigación. Quiero reconocer también el valioso asesoramiento y orientación proporcionados por la Dra. Lorena Vargas Rodríguez. Que a pesar de la distancia, sus conocimientos y experiencia han enriquecido significativamente mi trabajo, y su disposición para colaborar en la resolución de desafíos técnicos ha sido inestimable. Sus aportaciones fueron cruciales para dar forma y mejorar este trabajo.

Este logro no habría sido posible sin el respaldo y la contribución de todas estas instituciones y personas. Sus esfuerzos conjuntos han dejado una huella indeleble en esta tesis y en mi formación académica.

## **Dedicatorias**

A lo largo de mi vida y carrera académica he tenido la grandiosa fortuna de contar con el apoyo de excelentes profesionales, familiares y amigos que siempre me han impulsado a perseguir mis metas y objetivos. Este proyecto es un logro personal que sin su ayuda no sería posible, así mismo es el reflejo su esfuerzo y el mío por llevar a cabo esta investigación para la obtención de mi grado académico. Dedico este trabajo a ustedes, que han sido fundamentales en mi formación personal y académica.

A mis padres Arcelia y José, que sin duda han sido mi más grande motor en la vida y todo aspecto. Agradezco todo su apoyo, sacrificio y amor incondicional que siempre me ha inspirado a salir adelante. Con orgullo puedo decir que, su educación e inculcación de valores me han hecho el profesional y persona que soy a día de hoy. Son el ejemplo ideal de cómo el simple hecho de ayudar a un hijo en su tarea puede prosperar a éxitos como este. Espero algún día poder devolver todo lo que me han dado, y enorgullecerlos con mis logros.

A mis abuelos Ángel y Teresa, que a lo largo de mi carrera universitaria me abrieron las puertas de su hogar. Su generosidad y disposición de permitirme quedarme en su casa han sido un regalo invaluable en mi vida. Su hospitalidad y el espacio que me brindaron no solo hicieron posible mi educación, sino que también enriquecieron mi vida. Gracias por creer en lo que hago y por hacerme sentir parte de su familia.

A mi abuelo "Balo", que su recuerdo y su amor me impulsa a superar mis miedos en la vida y en consecuencia cumplir mis logros, que también son suyos. A mi abuela Elvira, que su cariño y costumbres permanecen en mí y me han vuelto en una persona decidida, obstinada y fuerte, cómo ella también lo es.

A mi compañera y mejor amiga Diana, que su amor y apoyo a través de este período y nuestro tiempo juntos han sido una bujía para mí día a día. Sus palabras y simple presencia me motivan a ser mejor por mí y para ella. Gracias por haberme acompañado incondicionalmente durante este trayecto y creer en mí.

Agradezco a mi familia, tanto Méndez cómo Aguilar, tíos y primos que siempre me han brindado su ayuda y lo necesario para poder llegar a ésta posición. Este logro, así mismo, es de todos.

A mis amigos de universidad y Loreto, les agradezco su apoyo y amistad a lo largo de los años, nuestras experiencias juntos y su ayuda me han llevado a dónde estoy y por eso, no estoy más que agradecido.

Reconozco a mis tutores, el Dr. Miguel Ángel Soto Zamora y la Dra. Lorena Vargas Rodríguez y les doy gracias por su paciencia y asesoramiento. Su dedicación a mi proyecto y su compromiso para ayudarme a alcanzar mis metas académicas no tienen precio. Sin su orientación constante y sabiduría, este logro no habría sido posible.

Finalmente quisiera agradecer a Leia, mi fiel compañera que estuvo conmigo en largas tardes y noches de lectura, redacción y estrés. Su compañía alejaba la soledad y frustración, y en cambio, me ofrecía calma y motivaba a continuar.

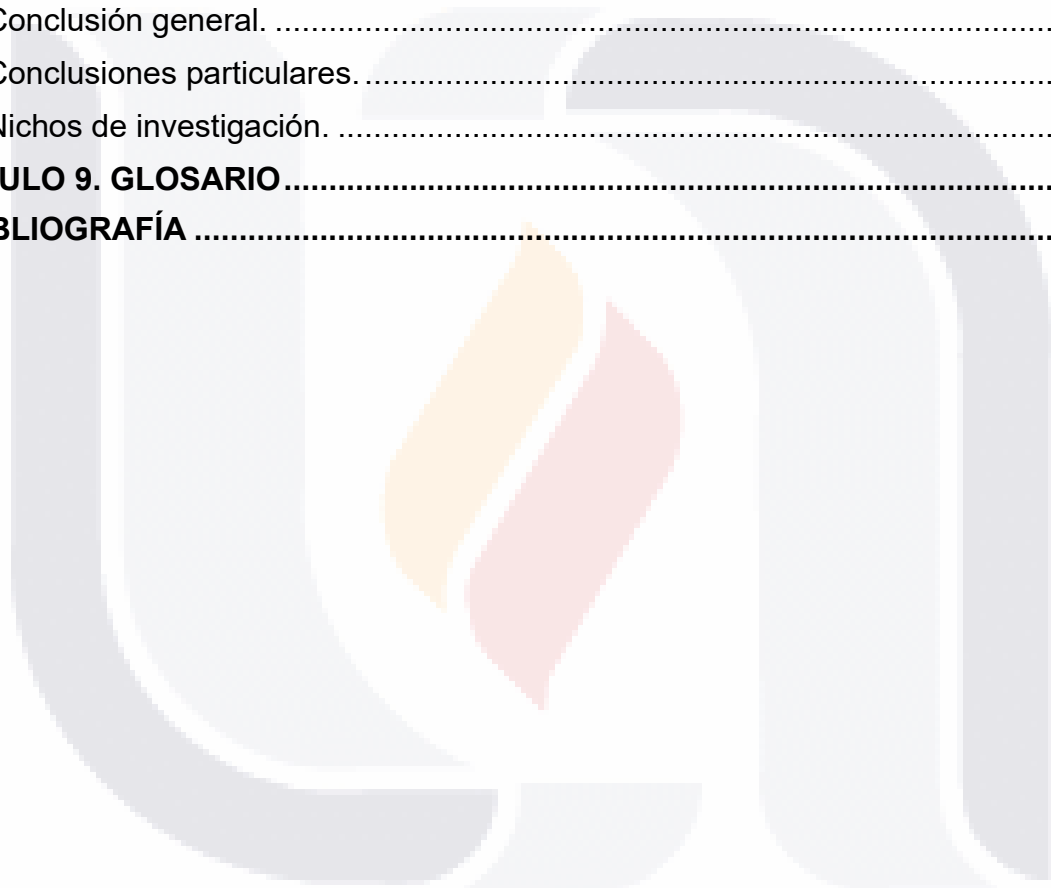
Podría llenar otra tesis completa de agradecimientos y no terminaría de expresar la gratitud que tengo con cada una de las personas que han tenido un impacto significativo en mi vida y carrera profesional, sin embargo, no podría finalizar sin agradecerme y dedicarme este trabajo a mí, que me costó tiempo, esfuerzo y dedicación para lograr culminarlo, pero que sin duda se me ve recompensado por todas las habilidades y conocimientos adquiridos en el proceso.



<b>ÍNDICE GENERAL</b> .....	<b>1</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>11</b>
<b>ÍNDICE DE GRÁFICAS</b> .....	<b>16</b>
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	<b>21</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>22</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>23</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>24</b>
1.1 Prólogo.....	24
1.2 Objetivo General.....	25
1.3 Objetivos Particulares.....	26
1.4 Alcances.....	26
1.5 Pregunta de Investigación.....	27
1.6 Justificación.....	27
1.7 Hipótesis.....	29
<b>CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO</b> .....	<b>30</b>
2.1 Sistemas de Impermeabilización.....	30
2.2 Lignina.....	31
2.3 Métodos y procesos de extracción de lignina.....	33
2.4 Revisión y aplicación de la lignina en la construcción sostenible.....	35
<b>CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>37</b>
<b>3.1 Antecedentes</b> .....	<b>37</b>
<b>3.2 Sistemas impermeabilizantes naturales</b> .....	<b>39</b>
3.2.1 Impermeabilizante a base de lechada de cal.....	39
<b>3.3 Lignina y sus características</b> .....	<b>40</b>
3.3.1 Generalidades.....	40
3.3.2 Lignina Kraft.....	42
<b>3.4 Materiales comúnmente utilizados en azoteas</b> .....	<b>45</b>
<b>3.5 Características a ensayar</b> .....	<b>47</b>
3.5.1 Permeabilidad.....	47
3.5.2 Adherencia.....	47
3.5.3 Absorción.....	48
<b>3.6 Instrumentos de evaluación</b> .....	<b>49</b>

3.6.1 Tubo de Karsten .....	49
3.6.2 Método de revisión de desgaste de las superficies (Norma ASTM).....	50
3.6.3 Gravimetría .....	51
<b>CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA.....</b>	<b>52</b>
4. 1 Tabla de Operacionalización de Variables.....	55
4.2 Pruebas y caracterización de material de fibras de cartón.....	56
4.2.1 Rendimiento.....	56
4.2.2 Solubilidad .....	58
4.2.3 Humedad .....	59
4.2.4 Granulometría.....	59
4.3 Construcción de Probetas.....	62
4.4 Elaboración de mezclas tradicionales de cal.....	69
4.4.1 Mezcla tradicional a base de cal, jabón y alumbre.....	69
4.4.2 Cal de alta pureza en forma de pasta Teocali.....	71
4.5 Prueba Piloto .....	72
4.6 Características a ensayar.....	77
4.6.1 Permeabilidad por tubo de Karsten. (Normativa RILEM 25).....	77
4.6.2 Adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies. (Norma ASTM).....	79
4.6.3 Absorción.....	81
4.7 Procedimiento de prueba de absorción en probetas secas.....	81
4.7.1 Cálculo y expresión de resultados .....	82
4.7.2 Resultados de absorción en probetas sin recubrimiento.....	82
4.8 Resultados de primer prueba piloto .....	83
4.8.1 Permeabilidad .....	83
4.8.2 Adherencia.....	86
4.9 Segunda prueba piloto.....	89
4.10 Resultados de Segunda Prueba Piloto .....	91
4.10.1 Permeabilidad.....	91
4.10.2 Adherencia.....	93
<b>CAPÍTULO 5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>95</b>
5.1 Objetos de Estudios.....	96
5.2 Objetivos de la Campaña Experimental.....	97

5.3 Variables Experimentales .....	98
5.4 Plan de Trabajo.....	99
<b>CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE CAMPAÑA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>99</b>
6.1 Permeabilidad .....	100
6.2 Adherencia.....	116
6.3 Absorción .....	129
<b>CAPÍTULO 7. DISCUSIONES .....</b>	<b>142</b>
<b>CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES .....</b>	<b>160</b>
8.1 Conclusión general. ....	160
8.2 Conclusiones particulares.....	161
8.3 Nichos de investigación. ....	163
<b>CAPÍTULO 9. GLOSARIO.....</b>	<b>165</b>
<b>10. BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>167</b>



## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Comparación química de algunas especies maderables. Fuente: Sjöström (1993).....</i>	<b>32</b>
<i>Tabla 2. Operacionalización de variables. Fuente: Propia. ....</i>	<b>55</b>
<i>Tabla 3. Resultados granulométricos de cenizas ricas en lignina obtenidas.....</i>	<b>60</b>
<i>Tabla 4. Orden de variables en tablas de probetas. Fuente: Propia. ....</i>	<b>64</b>
<i>Tabla 5. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en mortero cal-arena 1:2 con cantidad x1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: propia.....</i>	<b>65</b>
<i>Tabla 6. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.....</i>	<b>65</b>
<i>Tabla 7. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.....</i>	<b>65</b>
<i>Tabla 8. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ....</i>	<b>65</b>
<i>Tabla 9. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ....</i>	<b>66</b>
<i>Tabla 10. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ....</i>	<b>66</b>
<i>Tabla 11. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en cuña de barro rojo recocido con cantidad X1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ...</i>	<b>66</b>
<i>Tabla 12. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en cuña de barro rojo recocido con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ...</i>	<b>66</b>
<i>Tabla 13. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en cuña de barro rojo recocido con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ...</i>	<b>67</b>
<i>Tabla 14. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” en cuña de barro rojo recocido con cantidad X1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ....</i>	<b>67</b>
<i>Tabla 15. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” en cuña de barro rojo recocido con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ....</i>	<b>67</b>
<i>Tabla 16. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” en cuña de barro rojo recocido con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia. ....</i>	<b>67</b>
<i>Tabla 17. Dosificación de fórmula de mezcla tradicional de cal-jabón-alumbre.....</i>	<b>69</b>
<i>Tabla 18. Dosificación de cenizas en muestras de mezclas de cal. Fuente: Propia. ....</i>	<b>72</b>
<i>Tabla 19. Distribución de muestras de mezclas de cal sobre sustrato. Fuente: Propia.</i>	<b>74</b>

<i>Tabla 20. Resultados de absorción en probetas sin recubrimiento. Fuente: Propia .....</i>	<b>82</b>
<i>Tabla 21. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de prueba piloto. Fuente: Propia.....</i>	<b>83</b>
<i>Tabla 22. Resultados de adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies. (norma ASTM) de prueba piloto. Fuente: Propia.....</i>	<b>86</b>
<i>Tabla 23. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de segunda prueba piloto. Fuente: Propia.....</i>	<b>91</b>
<i>Tabla 24. Resultados de adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies. (norma ASTM) de prueba piloto. Fuente: Propia.....</i>	<b>93</b>
<i>Tabla 25. Impermeabilizantes a ensayar. Fuente: Propia .....</i>	<b>96</b>
<i>Tabla 26. Pruebas, Probetas y Ensayes. Fuente: Propia.....</i>	<b>99</b>
<i>Tabla 27. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ....</i>	<b>100</b>
<i>Tabla 28. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ....</i>	<b>101</b>
<i>Tabla 29. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ....</i>	<b>102</b>
<i>Tabla 30. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.....</i>	<b>103</b>
<i>Tabla 31. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.....</i>	<b>104</b>
<i>Tabla 32. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.....</i>	<b>105</b>
<i>Tabla 33. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ....</i>	<b>106</b>
<i>Tabla 34. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15,30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ....</i>	<b>107</b>
<i>Tabla 35. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15 días de edad. Fuente: Propia.....</i>	<b>108</b>
<i>Tabla 36. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.....</i>	<b>109</b>

*Tabla 37. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 110*

*Tabla 38. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 111*

*Tabla 39. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia. 112*

*Tabla 40. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia. .... 113*

*Tabla 41. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia. .... 114*

*Tabla 42. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia. .... 115*

*Tabla 43. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 116*

*Tabla 44. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 116*

*Tabla 45. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 117*

*Tabla 46. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 117*

*Tabla 47. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 118*

*Tabla 48. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 118*

*Tabla 49. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 119*

*Tabla 50. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 119*

*Tabla 51. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 120*

*Tabla 52. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 120*

*Tabla 53. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 121*

*Tabla 54. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 121*

*Tabla 55. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 122*

*Tabla 56. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 122*

*Tabla 57. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 123*

*Tabla 58. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 123*

*Tabla 59. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies sobre superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 124*

*Tabla 60. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 124*

*Tabla 61. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia..... 125*

*Tabla 62. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia. .... 126*

*Tabla 63. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia. 127*

*Tabla 64. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia..... 128*

*Tabla 65. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia..... 129*

*Tabla 66. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: propia. .... 129*

*Tabla 67. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: propia. .... 130*



*Tabla 68. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 130*

*Tabla 69. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia..... 131*

*Tabla 70. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia. .... 131*

*Tabla 71. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 132*

*Tabla 72. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 132*

*Tabla 73. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 133*

*Tabla 74. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 133*

*Tabla 75. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 134*

*Tabla 76. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia. .... 134*

*Tabla 77. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 135*

*Tabla 78. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 135*

*Tabla 79. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 136*

*Tabla 80. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 136*

*Tabla 81. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 137*

*Tabla 82. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... 137*

*Tabla 83. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia..... 138*

*Tabla 84. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia. .... 139*

*Tabla 85. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia..... 140*

*Tabla 86. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia. .... 141*

*Tabla 87. Promedios de Permeabilidad Acumulada en Ciclo de 60 días. Fuente: Propia. 143*

*Tabla 88. Promedios de Porcentaje Desprendido en Superficie en Ciclo de 60 días. Fuente: Propia..... 144*

*Tabla 89. Promedios de Porcentaje Absorbido en Ciclo de 60 días. Fuente: Propia. . 144*

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Fig. 1. Resultados de búsqueda para ‘aplicaciones de la lignina en la construcción’ en la base de datos SCOPUS de 2010 a 2021. Fuente: Jędrzejczak et. al. (2021) .....</i>	<b>29</b>
<i>Fig. 2. Generación de recubrimientos de poliuretano derivados de la lignina a partir de lignina no modificada aislada de licor negro técnico. Fuente: Klein et. al. (2018) .....</i>	<b>34</b>
<i>Fig. 3. Línea del tiempo: Antecedentes de los impermeabilizantes; Fuente: RODRÍGUEZ-URIBE et al. (2021).....</i>	<b>38</b>
<i>Fig. 4. Posición de la lignina dentro de la matriz lignocelulósica. Fuente: Li (2011).....</i>	<b>40</b>
<i>Fig. 5. Superficies comunes en edificios históricos según manual de INAH. Fuente: Padilla J.C. (2021).....</i>	<b>46</b>
<i>Fig 6. Material de fibra de cartón proporcionado por CEyPABASA. Fuente: Propia. ....</i>	<b>53</b>
<i>Fig 7. Imagen microscópica de material de fibra de cartón (aumento de 20x). Fuente: Propia.....</i>	<b>53</b>
<i>Fig 8. Imagen microscópica de material de fibra de cartón (aumento de 40x). Fuente: Propia.....</i>	<b>53</b>
<i>Fig 9. Peso del material con pérdida de humedad. Fuente: Propia.....</i>	<b>56</b>
<i>Fig. 10. Calcinación de material en superficie metálica sobre estufa. Fuente: Propia. .</i>	<b>57</b>
<i>Fig. 11. Cenizas obtenidas de la calcinación de material de fibras de cartón con alto contenido de lignina. Fuente: Propia.....</i>	<b>57</b>
<i>Fig. 12. Pesaje de las cenizas obtenidas en contenedor. Fuente: Propia.....</i>	<b>58</b>
<i>Fig 13. Refractómetro tipo ABBE marca ATAGO. Fuente: Propia. ....</i>	<b>59</b>
<i>Fig 14. Balanza SARTORIUS con precisión de .01 g. Fuente: Propia. ....</i>	<b>60</b>
<i>Fig 15. Material resultante de malla no. 40. Fuente: Propia.....</i>	<b>61</b>
<i>Fig 16. Material resultante de malla no. 50. Fuente: Propia.....</i>	<b>61</b>
<i>Fig 17. Material resultante de malla no. 60. Fuente: Propia.....</i>	<b>61</b>
<i>Fig 18. Material resultante de malla no. 100. Fuente: Propia.....</i>	<b>61</b>
<i>Fig 19. Material resultante de malla no. 200. Fuente: Propia.....</i>	<b>61</b>
<i>Fig 20. Material resultante que paso la malla no. 200. Fuente: Propia.....</i>	<b>61</b>
<i>Fig 21. Distribución de espacios para pruebas de permeabilidad y adherencia en probetas sustrato correspondiente. Fuente: Propia. ....</i>	<b>63</b>
<i>Fig. 22. Elaboración de mezcla de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia.....</i>	<b>68</b>
<i>Fig. 23. Construcción de probetas de mortero cal-arena 1:2 a mayor escala. Fuente: Propia.....</i>	<b>68</b>
<i>Fig. 24. Cuña de barro rojo recocido (5 cm x 10 cm x 20 cm).....</i>	<b>68</b>
<i>Fig. 25. Componentes de mezcla tradicional de cal. Fuente: Propia. ....</i>	<b>69</b>

Fig. 26. Disolución a 60° C de componentes jabón y alumbre en agua. Fuente: Propia.  
70

Figura 27. Resultado de mezcla tradicional de cal. Fuente: Propia. .... 70

Fig. 28. Cal de alta pureza en forma de pasta. Fuente: OXICAL. .... 71

Figura 29. Pesaje de cenizas con alto contenido de lignina para incorporación en mezclas de cal. Fuente: Propia. .... 73

Fig. 30. Mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta teocali. Fuente: Propia. .... 73

Fig. 31. Incorporación de cenizas con alto contenido en lignina a mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali". Fuente: Propia. .... 73

Fig. 32. Cal de alta pureza en forma de pasta teocali con 20 g/litro de ceniza con alto contenido de lignina. Fuente: Propia. .... 73

Fig. 33. Mezcla tradicional de cal. Fuente: Propia. .... 74

Fig. 34. Mezcla tradicional de cal adicionada con 10 g/lt. De cenizas con alto contenido de lignina. Fuente: Propia. .... 74

Fig. 35. Mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt. De cenizas con alto contenido de lignina. Fuente: Propia. .... 74

Fig. 36. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla tradicional de cal sobre sustrato de cuña de tabique de barro rojo recocido. Fuente: Propia. .... 75

Fig. 37. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla tradicional de cal sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia. .... 75

Fig. 38. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre sustrato de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia. .... 76

Fig. 39. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia. .... 76

Fig. 40. Probetas de prueba piloto cubiertas por mezclas de cal. (mezcla tradicional de cal-parte superior; mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali"- parte inferior) (sustratos de cuña de barro rojo recocido- parte izquierda; sustratos de mortero cal-arena 1:2- parte derecha). Fuente: Propia. .... 76

Fig. 41. Permeabilidad por Tubo de Karsten. Fuente: Hendrickx (2013) ..... 77

Fig. 42. Tubos de Karsten. Fuente: Prop y Fig. 43. Tubo de Karsten sobre probeta. Fuente: Propia  
78

Fig. 44. Kit de adherencia para revisión de desgaste de las superficies. Fuente: Propia.  
79

Fig. 45 y 46. Aplicación de método de revisión de desgaste de las superficies. (Norma ASTM). Fuente: Propia. .... 80

*Fig. 47. Clasificación de resultados de adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies..... 80*  
*Fuente: Normativa ASTM..... 80*

*Fig. 48. Secado de probetas en horno a 100 °C. Fuente: Propia..... 81*

*Fig. 49 y 50. Probetas sumergidas dentro de contenedor de agua y Pesaje de probetas saturada. Fuente: Propia..... 82*

*Fig. 51 y 52. Prueba de adherencia sobre probetas. Fuente: Propia..... 88*

*Fig. 53. Incineración de material de fibras de cartón y elaboración de mezcla tradicional de cal Fuente: Propia..... 90*

*Fig. 54. Incorporación de ceniza de material de fibra de cartón en mezcla a base de cal. Fuente: Propia..... 90*

*Fig. 55. Aplicación de mezcla tradicional de cal con proporciones de cenizas correspondientes a segunda prueba piloto sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia..... 90*

*Fig. 56. Aplicación de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con proporciones de cenizas correspondientes a segunda prueba piloto sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia..... 90*

*Fig. 57. Prueba de permeabilidad de segunda prueba piloto a través de tubos de Karsten. Fuente: Propia..... 91*

*Fig. 58. Prueba de adherencia de segunda prueba piloto a través de método de revisión de desgaste. Fuente: Propia..... 91*

*Fig. 59. Probeta de segunda prueba piloto después de aplicación del método de revisión de desgaste. Fuente: Propia..... 91*

*Fig. 60. Mapa conceptual de ensayos de probetas. Fuente: Propia..... 95*

*Fig. 61. Mapa Conceptual de Variables Experimentales. Fuente: Propia..... 98*

*Fig 62. Fibras en muestra de ceniza rica lignina vistas a través de microscopio con aumento de 30x. Fuente: Propia..... 147*

*Fig 63. Fibras en muestra de ceniza rica lignina vistas a través de microscopio con aumento de 40x. Fuente: Propia..... 147*

*Figura 64. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia. 149*

*Figura 65. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia. 150*

*Figura 66. Imagen microscópica 1 de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia..... 150*

Figura 67. Imagen microscópica 2 de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia..... **150**

Figura 68. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia..... **151**

Figura 69. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia..... **151**

Figura 70. Imagen microscópica 1 cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo Recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia..... **151**

Figura 71. Imagen microscópica 2 cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo Recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia..... **152**

Figura 72. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 20x). Fuente: Propia. **153**

Figura 73. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia. **153**

Figura 74. Imagen microscópica 1 de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 20x). Fuente: Propia..... **154**

Figura 75. Imagen microscópica 2 de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia..... **154**

Figura 76. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia..... **154**

Figura 77. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia..... **155**

Figura 78. Imagen microscópica 1 cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x) (izquierda). Fuente: Propia..... **155**

Figura 79. Imagen microscópica 2 cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia..... **155**

Figura 80. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 20x). Fuente: Propia. **157**

*Figura 81. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia.*  
**157**

*Figura 82. Imagen microscópica 1 de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia.....*  
**157**

*Figura 83. Imagen microscópica 2 de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia.....*  
**158**

*Figura 84. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia.....*  
**158**

*Figura 85. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.....*  
**158**

*Figura 86. Imagen microscópica 1 cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia.....*  
**159**

*Figura 87. Imagen microscópica 2 cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.....*  
**159**

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Curva granulométrica de resultados obtenidos del tamizaje de ceniza rica en lignina. Fuente: Propia. ....	62
Gráfica 2. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de mezcla tradicional de cal sobre mortero 1:2. Fuente: Propia.....	84
Gráfica 3. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de mezcla tradicional de cal sobre cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia. ....	84
Gráfica 4. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	85
Gráfica 5. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.....	85
Gráfica 6. Resultados de prueba piloto de adherencia de mezcla tradicional de cal sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	86
Gráfica 7. Resultados de prueba piloto de adherencia de mezcla tradicional de cal sobre cuña de barro rojo recocido fuente: Propia. ....	87
Gráfica 8. Resultados de prueba piloto de adherencia cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	87
Gráfica 9. Resultados de prueba piloto de adherencia cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.....	88
Gráfica 9. Resultados de segunda prueba piloto de permeabilidad de mezcla tradicional de cal sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	92
Gráfica 10. Resultados de segunda prueba piloto de permeabilidad de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	92
Gráfica 10. Resultados de segunda prueba piloto de adherencia de mezcla tradicional de cal sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	93
Gráfica 11. Resultados de segunda prueba piloto de adherencia de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia. ....	93
Gráfica 12. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ....	100
Gráfica 13. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15 y 30 días de edad. Fuente: Propia. ....	101
Gráfica 14. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 60 días de edad. Fuente: Propia. ....	101
Gráfica 15. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15 y 30 días de edad. Fuente: Propia. ....	102



Gráfica 16. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **102**

Gráfica 17. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ... **103**

Gráfica 18. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ... **104**

Gráfica 19. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. ... **105**

Gráfica 20. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **106**

Gráfica 21. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **107**

Gráfica 22. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **108**

Gráfica 23. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15,30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **109**

Gráfica 24. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **110**

Gráfica 25. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia. .... **111**

Gráfica 26. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia. **112**

Gráfica 27. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes

*períodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia..... 113*

*Gráfica 28. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia. .... 114*

*Gráfica 29. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia. .... 115*

*Gráfica 30. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia..... 116*

*Gráfica 31. Resultados de Adherencia de Campaña Experimental de Mezclas de Cal adicionadas con 35 g/lit de Ceniza por Método de Revisión de Desgaste de las Superficies (Norma ASTM) sobre superficies de Mortero de Cal-Arena 1:2 y Cuña de Barro Rojo Recocido a 15 días de Edad. Fuente: Propia..... 117*

*Gráfica 32. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia..... 118*

*Gráfica 33. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 119*

*Gráfica 34. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 120*

*Gráfica 35. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma astm) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 121*

*Gráfica 36. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 122*

*Gráfica 37. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 123*

*Gráfica 38. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.....* **124**

*Gráfica 39. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia. ....* **125**

*Gráfica 40. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia. ....* **126**

*Gráfica 41. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.*  
**127**

*Gráfica 42. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.....* **128**

*Gráfica 43. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.....* **129**

*Gráfica 44. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.....* **130**

*Gráfica 45. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.....* **131**

*Gráfica 46. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.....* **132**

*Gráfica 47. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.....* **133**

*Gráfica 48. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia..... 134*

*Gráfica 49. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 135*

**136**

*Gráfica 50. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 136*

*Gráfica 51. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia..... 137*

*Gráfica 52. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia..... 138*

*Gráfica 53. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia. .... 139*

*Gráfica 54. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia..... 140*

*Gráfica 55. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia. .... 141*

## ACRÓNIMOS

**BUAA:** Benemérita Universidad Autónoma de Aguascalientes.

**CEyPABASA:** Celulosas y Papel del Bajío S.A. de C.V.

**CONAHCYT:** Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías.

**ICOMOS:** Consejo Internacional de Monumentos y Sitios.

**INAH:** Instituto Nacional de Antropología e Historia.

**OXICAL:** Empresa dedicada a la producción de óxido de calcio, con amplia experiencia y especializada en cal viva de alta pureza.

**RILEM:** The International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures.

**SCOPUS:** Base de datos bibliográfica de resúmenes y citas de artículos de revistas científicas propiedad de Elsevier.

**UG:** Universidad de Guanajuato.

**UTP:** Universidad Tecnológica de Puebla.

## RESUMEN

Actualmente, la lignina tiene un potencial significativo en el ámbito de la construcción debido a sus propiedades únicas y su versatilidad. Aunque tradicionalmente ha sido considerada un subproducto no deseado de la industria papelera, en los últimos años se ha reconocido su valor como material de construcción.

El desarrollo de un impermeabilizante natural a base de componente lignina para techos en edificios históricos es una solución innovadora y respetuosa con el medio ambiente. La lignina, un polímero presente en las plantas, se utiliza como ingrediente principal en esta formulación. Este impermeabilizante ofrece una protección efectiva contra la humedad y filtraciones en los techos, preservando la integridad de los edificios históricos sin comprometer su valor arquitectónico. Su uso no solo protege estos valiosos edificios de la degradación causada por la humedad, sino que también reduce la dependencia de productos químicos sintéticos y plásticos en la construcción. Al ser natural, es una alternativa más sostenible y menos dañina para el entorno. Su aplicación ofrece una solución duradera y respetuosa con el patrimonio histórico.

A través de esta investigación se comprueba la hidrofobicidad de este componente en adición a las mezclas tradicionales empleadas en obras de restauración, conservación y protección de edificios de carácter histórico y patrimonial, además de su evaluación de desempeño como impermeabilizante y compatibilidad con las técnicas tradicionales de restauración y conservación.

## ABSTRACT

Currently, lignin has significant potential in the construction area due to its unique properties and versatility. Although it has traditionally been considered an unwanted by-product of the paper industry, in recent years its value as a construction material has been recognized.

The development of a natural lignin-based waterproofing component for roofs in historic buildings is an innovative and environmentally friendly solution. Lignin, a polymer present in plants, is used as the main ingredient in this formulation. This waterproofing offers effective protection against moisture and roof leaks, preserving the integrity of historic buildings without compromising their architectural value. Its use not only protects these valuable buildings from degradation caused by moisture, but also reduces the dependence on synthetic chemicals and plastics in construction. Being natural, it is a more sustainable alternative that is less harmful to the environment. Its application offers a lasting and respectful solution with the historical heritage.

Through this investigation, the hydrophobicity of this component is verified in addition to the traditional mixtures used in restoration, conservation and protection works of historical and patrimonial buildings, in addition to its performance evaluation as waterproofing and compatibility with traditional techniques of restoration and conservation.

# TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Prólogo**

La infiltración de agua y humedad en superficies o muros construidas a base de mampostería, mortero, concreto o cualquier tipo de material poroso suele ser un problema recurrente para cualquier tipo de vivienda o edificación que esté expuesta al contacto con la intemperie y por ende al agua. El paso de agua y humedad a muros y azoteas provoca deterioro y daños que con el paso del tiempo pueden llegar a ser graves. La eflorescencia, hongos, grietas, y salitre son algunas de las consecuencias de la presencia del agua en superficies porosas. Sin embargo, para mitigar los impactos negativos de ésta, existen los impermeabilizantes.

Los impermeabilizantes son sustancias que detienen el paso de agua o humedad a superficies o muros, ya que al presentar compuestos químicos capaces de cumplir esta función y servir como agentes hidrófugos logran mantener secos los objetos y áreas que puedan cubrir. En la construcción utilizar un sistema impermeabilizante ayuda a proteger y prevenir el daño y deterioro de los materiales constructivos en cualquier etapa del proceso de construcción. Es por esto, que, para aumentar la duración de la vida útil de las edificaciones, se recomienda su aplicación. El origen de los impermeabilizantes puede ser tanto sintético como natural.

A medida que el mundo del diseño y la construcción se van innovando, se van implementando nuevas tecnologías y materiales de origen natural en elementos estructurales, constructivos y de revestimiento para mitigar y disminuir los efectos negativos que estos puedan producir al medio ambiente. La preocupación de personas y empresas por cuidar al medio ambiente cada vez es más grande, es por ello que la necesidad de crear productos de origen natural y materiales ecológicos ha crecido y crecerá aún más en los próximos años. Con la intención de desarrollar un impermeabilizante natural sin compuestos químicos o tóxicos que a su vez sea amigable con el medio ambiente, se pretende usar como base el componente lignina.

La lignina es un polímero graso contenido en la mayoría de las maderas secas que se caracteriza por funcionar como un tipo de fibra o adhesivo y dar firmeza a las maderas,



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

y que además puede presentar un alto grado de hidrofobicidad. De acuerdo a Lora & Glasser (2002) la lignina no es un biopolímero constante en composición y por ello sus características varían dependiendo de la especie de planta o madera de la que es obtenida. Para su extracción será necesario revisar distintas especies de madera y procesos. Al paso, de los años este compuesto ha ido generando mucha atención en la comunidad científica y cada vez más se realizan estudios e investigaciones que involucran a los materiales creados a base de lignina extraída de madera (Jędrzejczak et al., 2021).

En la restauración, preservación y remodelación de edificios patrimoniales catalogados por el INAH se prioriza la utilización de materiales de origen natural ya que se encuentran sujetos a normativas y procesos regulados establecidos por la misma institución. Estas mismas normas prohíben la aplicación de impermeabilizantes no naturales sobre las superficies de techos y paredes de estos inmuebles.

Es por ello que, a través de la presente investigación, se pretende crear, desarrollar y evaluar un impermeabilizante natural a base del componente lignina aplicable en techados, cuñas y superficies de edificios históricos mediante una metodología experimental, explicativa, descriptiva y analítica.

El componente lignina se obtuvo a través de residuos de la industria papelera que a menudo son considerados desperdicios. Mediante una caracterización del material y una posterior modificación térmica para la obtención de cenizas se pretendió darle una mejor aplicación a estos residuos ricos en lignina por medio de su incorporación a mezclas tradicionales de cal comúnmente utilizadas para preservación y protección de azoteas y techados en edificios de carácter histórico y patrimonial.

## **1.2 Objetivo General**

Crear y evaluar en su desempeño de impermeabilizante a las lechadas de cal tradicionales utilizadas para bóvedas, terrados y superficies de cuña en techos y azoteas de edificios patrimoniales enriquecido en su propiedad hidrofóbica con la adición del componente de lignina.

### **1.3 Objetivos Particulares**

- A.** Realizar una revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas sobre los sistemas de impermeabilización naturales aplicables en edificios patrimoniales, características hidrofugantes y adhesivas de la lignina y la aplicación de ésta para tales fines.
- B.** Desarrollar una metodología para la obtención del componente lignina desde residuos de la industria papelera.
- C.** Elaborar la formulación adecuada de un impermeabilizante con la adición del componente lignina obtenida.
- D.** Mediante una campaña experimental, caracterizar y evaluar el comportamiento de las mezclas tradicionales de cal enriquecidas en su propiedad hidrofóbica con la adición del componente de lignina en distintos porcentajes dependiendo de la formulación seleccionada, tomando como parámetros la adherencia, permeabilidad y la absorción.

### **1.4 Alcances**

- A.** La información utilizada a lo largo de la investigación será recopilada de libros, e- libros, artículos científicos y documentación que pueda ser obtenida mediante los gestores de búsqueda tradicionales y científicos a los que la Universidad Autónoma de Aguascalientes tiene acceso, así como también de su biblioteca física y digital y repositorio bibliográfico.
- B.** A partir de lo obtenido de la revisión bibliográfica y con la colaboración del Departamento de Ingeniería Agroindustrial de la División de C. de la Salud e Ingenierías del Campus Celaya-Salvatierra de la Universidad de Guanajuato se generarán distintas fórmulas de un impermeabilizante adicionado con el componente lignina obtenida, para posteriormente, a través de pruebas piloto hacer la selección de la receta adecuada.
- C.** Al contar con las formulaciones revisadas y aprobadas, se llevarán a cabo las pruebas de experimentación pertinentes basadas en normatividad aceptada correspondiente.
- D.** La experimentación se limitará a realizarse en materiales utilizados en techos de edificios históricos.

E. Todo el proceso de experimentación se realizará en un laboratorio con el uso correcto y riguroso de los equipos y materiales necesarios.

### **1.5 Pregunta de Investigación**

¿Se puede realizar una formulación eficaz con la adición del componente lignina al impermeabilizante natural a base de lechada de cal con el fin de mejorar sus características permeables e hidrófugas?

### **1.6 Justificación**

Hoy en día el sector de la construcción se enfrenta a una gran cantidad de problemas debido principalmente al crecimiento de la población y sobreexplotación de recursos naturales para la producción de materiales constructivos (Maraveas, 2020). La industria de la construcción en el siglo XXI enfrenta numerosos desafíos globales asociados con la creciente preocupación por el medio ambiente.” (Jędrzejczak et al., 2021)

No es secreto que productos y materiales a base de componentes ecológicos y naturales comienzan a tener mucha presencia y demanda en el mercado de la construcción. Tanto personas como empresas han tomado conciencia del impacto ambiental negativo que llega a ocasionar este gremio, por lo que existe una considerable urgencia y necesidad de materiales que puedan permitir una reducción de este impacto ambiental general de la industria de la construcción al tiempo que alcancen a mejorar la sostenibilidad. Así como también el aprovechamiento y optimización de recursos naturales para la creación de productos ecológicos que puedan ser usados durante cualquier tipo de actividad de construcción, restauración o preservación, tales como aditivos, elementos constructivos, acabados, pinturas, etc. Algunas edificaciones exigen estrictamente, que para actividades relacionadas a su conservación e interferencia constructiva se utilicen únicamente materiales y sustancias de origen natural o vegetal. Tal es el caso que ocurre con los edificios patrimoniales, ya que, debido a los requerimientos integrados en las especificaciones técnicas y estéticas por parte de los organismos públicos en coordinación con las nuevas corrientes en el rubro de restauración y protección de patrimonio histórico, nace la obligación de preservar, cubrir y/o impermeabilizar las superficies de los materiales constructivos tradicionalmente usados en edificios históricos con un material de origen natural.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Los materiales utilizados en muros y azoteas de edificaciones patrimoniales, resultan ser candidatos ideales para la aplicación y pruebas del impermeabilizante natural ya que estos edificios están sujetos a normativas establecidas por el INAH en las que se impide utilizar materiales no naturales, químicos o sintéticos en cualquier labor de revestimiento o conservación.

Con el objetivo de aprovechar un material que comúnmente se considera como desperdicio biológico, se propone usar el componente lignina como base de un impermeabilizante natural hecho a partir de la lechada de cal. Esto para confirmar lo documentado por Padilla (2021).

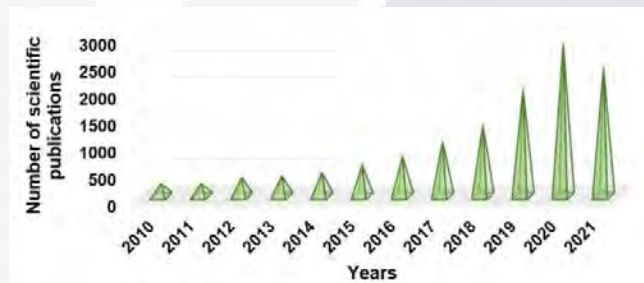
Padilla (2021) sostiene que el éxito obtenido en su producto impermeabilizante a base de cenizas de origen vegetal, se debe a la propiedad hidrófoba que contiene el componente lignina. En su estudio descubre que la lignina por su composición en malla es la causante de la propiedad impermeable en la ceniza, y es ahí que nace el cuestionamiento por saber si el componente lignina por sí solo combustionado atribuye mejores propiedades hidrofugantes al impermeabilizante tradicional a base de lechada de cal. Y de acuerdo a Park et al. (2008) la lignina y sus derivados cuentan con las características adecuadas para ser aplicadas en la creación de revestimientos y compuestos ya que tienen un tamaño de partícula pequeño, son hidrófobos y además son capaces de formar mezclas estables.

Yu & Kim (2020) enuncian que en décadas recientes, los avances en la aplicación de lignina incluyen la sintetización de polímeros, pinturas, adhesivos y fertilizantes, pero de acuerdo a Suota et al. (2021), estas aplicaciones todavía están limitadas por su heterogeneidad, variabilidad y baja reactividad. Yu & Kim (2020) también describen el cambio de perspectiva que se ha tenido en cuanto al componente mencionado, ya que anteriormente se le consideraba como un producto de desperdicio pero que con el paso del tiempo su potencial como materia prima para productos valiosos ha generado relevancia y atención en la comunidad científica.

Anualmente, las plantas terrestres sintetizan alrededor de 150 mil millones de toneladas de lignina, lo que hace de este biopolímero uno de los recursos biológicos más abundantes en el planeta. Alwadani et al. (2021) sostiene que la lignina es una

macromolécula abundante y disponible en grandes cantidades en el mundo, sin embargo, está infrautilizada. Y de acuerdo a Jędrzejczak et al. (2021) es el polímero aromático más abundante que se encuentra en la naturaleza. Es un producto de desecho de procesos industriales, principalmente de la industria del papel y la pulpa.

Con base en lo documentado por Jędrzejczak et al. (2021), la lignina es un componente que con el tiempo es cada vez más estudiado y usado en el ámbito de la construcción sostenible ya que al pasar los años aumentan el número de publicaciones científicas relacionadas con la lignina y la construcción (Fig. 1)



*Fig. 1. Resultados de búsqueda para ‘aplicaciones de la lignina en la construcción’ en la base de datos SCOPUS de 2010 a 2021. Fuente: Jędrzejczak et. al. (2021)*

Se espera que la presente investigación muestre que el uso de lignina como residuo biológico para desarrollar un impermeabilizante sostenible sea efectivo, por lo que el producto desarrollado se adherirá a los estándares normativos del INAH.

Así mismo, se pretende trascender que los residuos orgánicos tienen el potencial de reemplazar y agregar valor a los materiales de construcción convencionales y, por lo tanto, lograr la sostenibilidad económica, ambiental y social a largo plazo.

### 1.7 Hipótesis

La adición del componente lignina en un porcentaje específico a las mezclas de impermeabilizante natural basadas en lechada de cal utilizadas en bóvedas, terrados y superficies de cuña de edificios patrimoniales, mejora significativamente sus propiedades hidrofóbicas y proporciona un impermeabilizante de buena calidad en comparación con productos similares.

## **CAPÍTULO 2. REVISIÓN DEL ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO**

### **2.1 Sistemas de Impermeabilización**

De acuerdo a Padilla (2021), las edificaciones antiguas tradicionalmente eran impermeabilizadas con materiales naturales extraídos en los alrededores del sitio de construcción. Mezclas de piedra alumbre eran aplicadas sobre el tabique rojo utilizado que cubrían y daban resistencia a losetas de barro con grosores de aproximadamente 80 cm que eran comúnmente usadas en edificios patrimoniales tales como conventos, iglesias, haciendas, etc.

Padilla (2021) sostiene que, en décadas recientes, debido al desarrollo industrial petrolero, productos derivados del mismo han sido sumamente efectivos en el tratamiento de humedades. Así mismo, con el paso del tiempo, cada vez se descubren más sustancias que funcionan como un plus innovador en la creación de nuevos productos impermeabilizantes, los cuáles pueden provenir de un origen sintético o natural. Los elementos principales que conforman los impermeabilizantes de origen natural son las mezclas con cal y piedra alumbre, mientras que los sintéticos, provienen de los derivados del petróleo. (Espinoza C.A., 2016)

Debido a las exigencias que establece el INAH en su normativa de la preservación y conservación de edificios históricos y patrimoniales, los materiales o sustancias utilizados en el recubrimiento, protección o impermeabilización deben ser provenientes de origen natural.

En México, uno de los sistemas de impermeabilización tradicionales más efectivos en evitar la infiltración de agua y humedad se basa en la colocación de ladrillos en forma petatillo encima de la azotea, este sistema de construcción que además funciona para impermeabilizar superficies de los techados fue una herencia de los españoles, esto según Espinoza C.A. (2016).

Este proceso es completamente natural ya que no se utiliza ningún producto de origen sintético o químico, solo se agrega a la superficie una capa de mezcla que consiste de agua, material aglutinante, y arena fina tradicionalmente conocida como lechada o

chalpaque. Esta lechada, posteriormente se deshidrata y endurece para brindar una capa protectora al ladrillo.

Desde tiempos prehispánicos un material aglutinante que se ha utilizado con frecuencia en la construcción en México es la cal. Actualmente la cal es constantemente aplicada en obras de preservación y mantenimiento en edificios históricos y patrimoniales.

La cal también es uno de los materiales más utilizados en la producción de impermeabilizantes con base de origen natural. Según Espinoza C.A. (2016) la cal viva presenta características bioclimáticas las cuales permiten su preservación durante largos períodos de tiempo debido a sus atributos hidrofugantes.

“La cal al aplicarse se cristaliza y se carbonata, de afuera hacia adentro, conservando humedad en mayor medida en el centro, lo que le permite tener propiedades de elasticidad, que minimizan el micro agrietamiento a diferencia del cemento.” (Espinoza C.A., 2016)

## **2.2 Lignina**

Con base en lo documentado por Martone et al. (2009), la lignina es un polímero graso complejo que forma la materia estructural de los tejidos de soporte en planta, maderas y algunas algas. Según Gutiérrez Villanueva et al. (2020) la multifuncionalidad química de la misma proporciona características muy variadas que permiten un apreciable número de transformaciones químicas y aplicaciones en la industria.

La lignina, biopolímeros de lignina y derivados de lignina cuentan con diversas propiedades, tales como alta estabilidad térmica, antioxidantes, biodegradabilidad, acciones antimicrobianas, propiedades adhesivas, etc., por lo que pueden usarse ampliamente en una amplia gama de áreas. Lora & Glasser (2002) confirman que estas características dependen de la planta de la que es obtenida la lignina y de su método de extracción.

Una de las propiedades de la lignina que más interesa en la presente investigación es su capacidad de funcionar como un agente hidrófobo en la creación del impermeabilizante natural. Park et al. (2008) establece que la lignina y sus derivados tienen la química adecuada para ser utilizados en la fabricación de revestimientos y

compuestos ya que tienen un tamaño de partícula pequeño, son hidrófobos y tienen la capacidad de formar mezclas estables.

Puede ser obtenida a partir de diversas materias primas renovables como por ejemplo la caña de azúcar, el bagazo, pinos, cedros y de la mayoría de maderas. Las maderas más rígidas contienen menor cantidad de lignina mientras que las maderas blandas poseen mayor cantidad del componente lignina.

La madera es una de las principales fuentes para la obtención de lignina en el mundo. Según Tribot et al. (2019) la lignina representa aproximadamente el 30% del peso de la madera y proporciona rigidez y propiedades antimicrobianas a la madera. Para Li (2011) la madera se compone esencialmente de celulosa, hemicelulosas, lignina y extractos.

Sin embargo, dependiendo de la especie maderable su composición relativa varía demasiado, y también la composición química de la madera varía cuantitativamente entre las especies de árboles. En la tabla (Tabla 1) se puede apreciar la composición química de distintas especies maderables y su contenido en porcentaje.

Tabla 1. Comparación química de algunas especies maderables. Fuente: Sjöström (1993)

Constituyente (%)	Maderas Blandas		Maderas Rígidas	
	Pino Silvestre (Pinus sylvestris)	Abeto (Picea glauca)	Abedúl de Plata (Betula verrucosa)	Eucalipto (Eucalyptus camaldulensis)
<b>Celulosa</b>	40.0	39.5	42.0	45.0
<b>Hemicelulosa</b>				
-Glucomanano (%)	16.0	17.2	2.3	3.1
-Glucoronoxilano (%)	8.9	10.4	27.5	14.1
-Otros Polisacáridos (%)	3.6	3.0	2.6	2.0
<b>Lignina</b>	27.7	27.5	22.0	31.3
<b>Total de extractivos</b>	3.5	2.1	3.0	2.8

Los procesos de extracción de lignina generan una gran cantidad de subproductos industriales. Recientemente, se han enfatizado rutas alternativas hacia la valorización de la lignina (por ejemplo, como resinas de base biológica, adhesivos o compuestos), pero estos varían dependiendo en su mayoría de la estructura química de la lignina, que también depende del proceso de extracción.



Nuevas aplicaciones para la lignina en diversas áreas están surgiendo, principalmente en alternativas sostenibles a los productos no renovables.

### **2.3 Métodos y procesos de extracción de lignina**

Normalmente la lignina es obtenida de las industrias del papel y la pulpa, y vista como desperdicio orgánico. Tribot et al. (2019) enuncia que este rubro industrial por sí solo genera entre 50-70 millones de toneladas de lignina al año.

Debido a que se pueden presentar complicaciones en la extracción natural de lignina mediante procesos y métodos que se puedan llevar a cabo en un laboratorio, es importante considerar la lignina Kraft en alternativas que puedan contener ésta.

Tribot et al. (2019) también confiere que, durante siglos, las industrias del papel y la pulpa han aplicado métodos de extracción tales como sulfito, Kraft y procesos de soda-antraquinona, aunque no siempre para obtener lignina. En la actualidad, han surgido diversas alternativas en el concepto de la biorrefinería, también llamados “métodos de pretratamiento”. Estos métodos actualmente se encuentran bajo investigación, y permiten el aislamiento y recuperación de lignina de la madera común.

Como se mencionó anteriormente, los procesos de extracción de lignina varían dependiendo de la especie de planta o madera que se pretende usar como materia prima, así como también el nivel de pureza que cada proceso puede arrojar. De acuerdo a Radotić & Mičić (2016), la obtención de una pureza relativamente alta es un paso crucial en el material extraído a partir de la materia prima. Por lo tanto, la evaluación de la pureza ocupa un lugar importante en todo el proceso de extracción. El grado de pureza necesaria depende de la aplicación posterior de los polímeros obtenidos. Sin embargo, de acuerdo a Chaves & Jiménez (2018), se han utilizado muchos métodos de extracción para aislar la lignina del vegetal, pero ninguno permite obtenerla en su estado puro.

Li (2011) establece que la lignina se puede aislar de diversas materias primas, es decir, principalmente de madera y licor negro. Existen varios métodos para el aislamiento de la lignina de la madera, en general, donde la lignina se aísla eliminando componentes

que no son lignina . Además, se usa dióxido de carbono o ácido sulfúrico para aislar la lignina del licor negro.

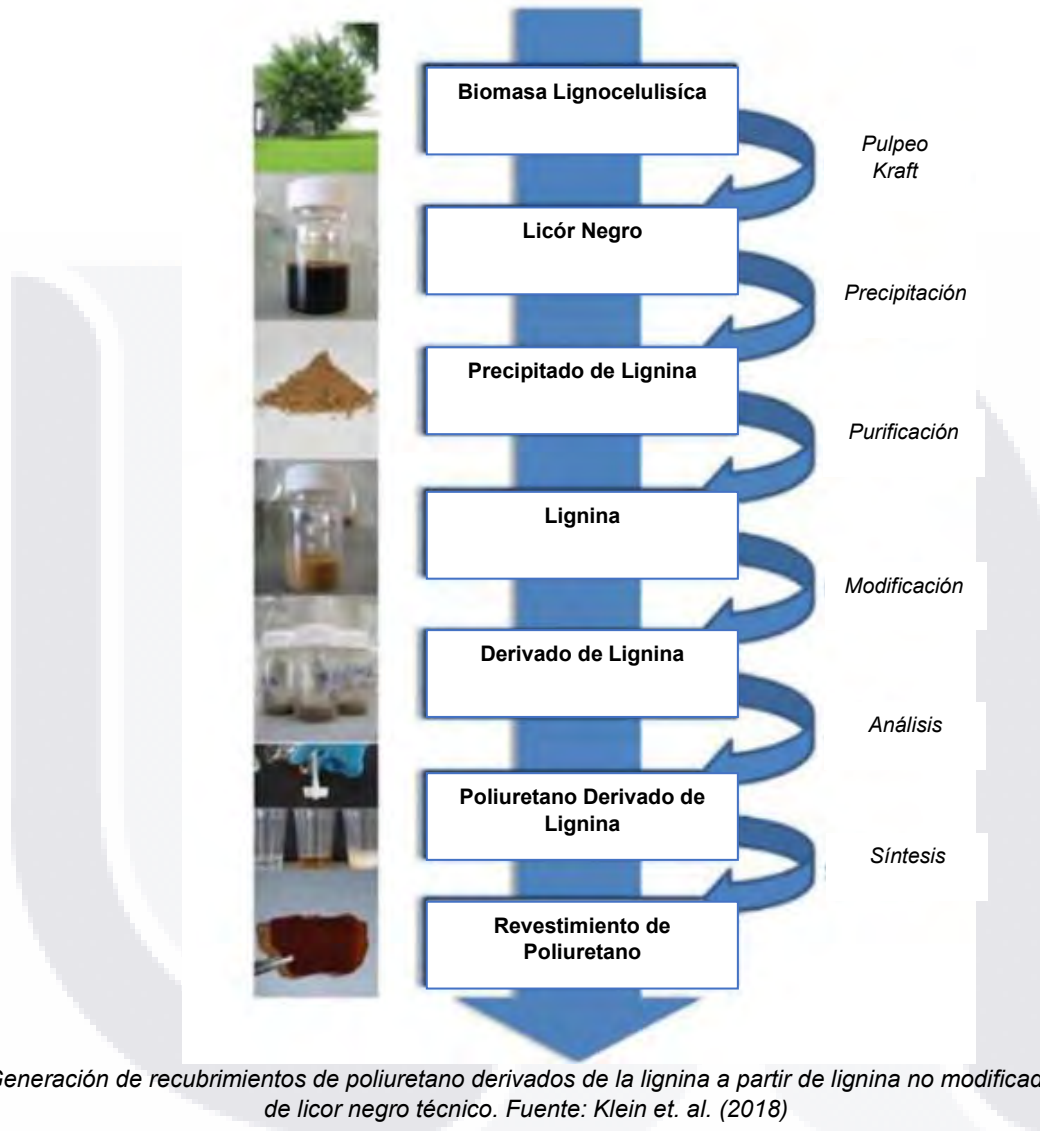


Fig. 2. Generación de recubrimientos de poliuretano derivados de la lignina a partir de lignina no modificada aislada de licor negro técnico. Fuente: Klein et. al. (2018)

Vinod et al. (2023) sostiene que según el método empleado para aislar lignina, las propiedades químicas de ésta, como la composición, el peso molecular y la estructura molecular, pueden verse comprometidas, lo que resulta en la síntesis de muchos tipos de lignina con diversos usos. También difieren en la solubilidad, hidrofobicidad e hidrofiliidad de la lignina. Además, la fuente de lignina y el método de extracción pueden afectar sus cualidades, por lo que es esencial elegir la ruta de valorización adecuada para convertir la lignina en productos de valor añadido.

## **2.4 Revisión y aplicación de la lignina en la construcción sostenible**

Ante los avances de la ciencia y la construcción, la última década ha sido marcada por la inclusión de nuevos materiales vegetales y orgánicos en la creación de productos industriales y constructivos como un intento de contrarrestar el impacto ambiental que genera este rubro. Utilizar desechos agrícolas para desarrollar materiales de construcción ayuda a la reducción de contaminación que es sumamente valioso en el ámbito de la construcción y también contribuye a la problemática de la eliminación de desechos, que preocupa a la industria de procesamiento agrícola. La rápida urbanización y la dificultad para desechar residuos orgánicos han creado oportunidades para que la industria de la construcción utilice estos desechos agrícolas. (Ganasen & Bahrami, 2023)

Maraveas (2020) habla de cómo se han identificado diversos tipos de residuos agrícolas que van desde la ceniza de cáscara de arroz, la ceniza de bagazo de caña de azúcar y la ceniza de hojas de bambú, entre otros, como soluciones potentes en la creación de materiales de construcción sostenibles. El estudio de Maraveas (2020) consiste en el análisis de estos elementos aplicados en 6 diferentes tipos de materiales de construcción, los cuáles son elementos de ladrillo o mampostería, hormigón verde, materiales aislantes para edificios, materiales de refuerzo para edificios, tableros de partículas y plásticos de base biológica. Un elemento en común que comparten estos residuos, particularmente es el componente lignina.

Según Jędrzejczak et al. (2021) las propiedades de la lignina se definen en términos de acuerdo a sus relaciones estructura-propiedad y cómo las diferencias estructurales que surgen de los métodos de extracción de lignina influyen en su aplicación dentro de la industria de la construcción. La lignina y los compuestos de lignina permiten el reemplazo parcial de los productos desarrollados a partir del petróleo, haciendo que los materiales finales y todo el sector de la construcción sean más sostenibles. Los recientes descubrimientos tecnológicos de la lignina en el sector de la construcción incluyen compuestos de cemento, espumas rígidas de poliuretano, pinturas y recubrimientos.

Es probable que la lignina comience a reemplazar los productos convencionales, generalmente derivados del petróleo en un futuro próximo. Este cambio surge de la creciente preocupación por el medio ambiente , así como de los problemas económicos asociados con el agotamiento del petróleo crudo y el precio creciente de ese recurso y materiales derivados de él, esto según Jędrzejczak et al. (2021).

Con el paso del tiempo ha crecido el interés de la comunidad científica y constructiva por la investigación y aplicación de residuos orgánicos en productos industriales y materiales de construcción. De acuerdo a los datos de la base de datos SCOPUS proporcionados por Jędrzejczak et al. (2021), para el 29 de junio de 2021 existían más de 13.000 artículos con la frase "lignina utilizada para aplicaciones de construcción". Incrementar el uso de lignina en la construcción tiene un doble beneficio: primero, aumentará el nivel de sustentabilidad en la construcción, y, en segundo lugar, contribuirá a encontrar nuevas aplicaciones con alto valor agregado para la lignina. Finalmente, la lignina no solo ayuda en la producción de materiales ecológicos sino puede ayudar a mejorar parámetros de evaluación en estos mismos materiales

## **CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO**

### **3.1 Antecedentes**

La humedad y goteras por mucho tiempo han sido de los problemas que el agua provoca en superficies de muros y techados y debido a la magnitud del problema que terminan ocasionando, ignorarlo resulta imposible ya que esto significaría la aparición de manchas de humedad en paredes e infiltración de agua en losas que debilitan su comportamiento estructural a la larga. Por lo tanto, la impermeabilización ha llegado a ser un requerimiento sustancial para todo tipo de edificaciones ya sea de uso residencial, comercial e industrial.

Tradicionalmente, a inicios del siglo XX, un obrero común lograba obtener un recubrimiento conveniente de la porosidad de cualquier material constructivo con sólo una mezcla de cemento con cal, como acabado final. Otra alternativa, era emplear un método económico y efectivo, que consistía en la aplicación de chapopote caliente. Este ofrecía una apariencia poco estética, sin embargo, era bastante durable, hasta que se deshidratava y despegaba.

Éstos y demás métodos para impermeabilizar se vieron reemplazados por la aparición de una gran diversidad de sistemas impermeabilizantes integrados con polímeros que han sido registrados por empresas y marcas comerciales. Productos comerciales los cuales son de creación relativamente reciente y sumamente elevados en precios, sin embargo, estos suelen ser productos de gran calidad siempre y cuando la técnica de aplicación sea la correcta. Habrá que tomarse en cuenta que cuando la cobertura y el recubrimiento no son completos, la lluvia puede infiltrar cualquier material constructivo y generar problemas de humedad.

Con el tiempo han surgido nuevos aditivos tanto naturales como sintéticos en la creación de nuevos sistemas impermeabilizantes que ayuden en el recubrimiento y protección de superficies en cualquier tipo de construcción. Los aditivos en los impermeabilizantes pretenden adicionar propiedades a la superficie sobre la cual son colocados, estas propiedades pueden ser hidrófugas, térmicas, retardantes, endurecedoras, etc.

De acuerdo a Rodríguez-Urbe et al. (2021) se entiende que “los sistemas de impermeabilización son el conjunto de elementos que, combinados entre sí, garantizan que no se produzcan filtraciones y humedades en las edificaciones.”



Fig. 3. Línea del tiempo: Antecedentes de los impermeabilizantes; Fuente: RODRÍGUEZ-URIBE et al. (2021).

El aumento de la demanda y la escasez de los recursos han provocado que la industria química tenga que depender cada vez más de los recursos renovables. A través de los últimos años, se han realizado numerosos estudios de investigación utilizando varios métodos y técnicas para desarrollar lignina como adhesivos y recubrimientos debido a su capacidad de renovación. El producto desarrollado en este proyecto de investigación pretende ser una alternativa innovadora y económica a los productos impermeabilizantes habituales de marcas comerciales que suelen ser elevados de precio. Al combinar la lechada de cal tradicional usada como impermeabilizante natural y la lignina Kraft en un cierto porcentaje se espera la obtención de un revestimiento de alta efectividad contra la penetración del agua y además sea un paso hacia adelante en la creación de nuevos productos ecológicos y sustentables para el ámbito de la construcción.

## **3.2 Sistemas impermeabilizantes naturales.**

### **3.2.1 Impermeabilizante a base de lechada de cal.**

En México, a cal desde tiempos prehispánicos ha sido utilizada como un material aglutinante (Espinoza C.A., 2016). Sus orígenes se remontan a las primeras mezclas de cal, hace aproximadamente 12,000 años, en la construcción de las primeras grandes urbes alrededor del mundo (Rodríguez-Uribe et al., 2021). En la actualidad la cal juega un rol importante en la construcción, es un componente fundamental en la elaboración de morteros comúnmente utilizados en juntas de muros de mampostería. Incluso es usada en el aplanado de muros y como material para dar pendiente en azoteas, aunque también puede funcionar como material de recubrimiento tradicionalmente utilizado en obras de restauración en edificios y construcciones de carácter histórico y arqueológico (Espinoza C.A., 2016).

Espinoza C.A. (2016) establece que existen 2 tipos de cales, la cal hidráulica y la cal viva, un material muy importante en el mantenimiento y obras de conservación en edificios históricos. La primera funciona como un cementante, ya que, al entrar en contacto con agua, esta se fragua inmediatamente. La cal viva, la cual sería la de nuestro interés, al contrario que la hidráulica, esta posee propiedades bioclimáticas que permiten su exposición a la intemperie durante largos períodos de tiempo, además de que también contiene características hidrofugantes, las cuales le otorgan la capacidad de transpirar a través de sus poros, dando así salida a la humedad.

“Cuando la cal viva se apaga en obra, y la pasta resultante se satura de agua en un medio hermético, esta cal vuelve a su estado natural, se convierte en una roca caliza, la cal apagada no tiene propiedades adherentes y su fijación es mecánica”. (De Guzmán, 2001)

### 3.3 Lignina y sus características.

#### 3.3.1 Generalidades.

La lignina es una de las macromoléculas más abundantes en el planeta. Es uno de los elementos que forman parte de la estructura biológica de los tejidos en plantas junto con la celulosa y hemicelulosa. También se considera un biopolímero importante en la composición de las paredes celulares en plantas y maderas, proporcionando soporte mecánico y protección contra varios tipos de esfuerzos que puede atravesar la planta y además contribuye significativamente a la resistencia de la biomasa a la degradación. Según Li (2011), la lignina es un compuesto químico complejo y el único polímero aromático presente en la madera, y se concentra mayormente en las paredes celulares, uniéndose a la celulosa y hemicelulosa (Figura 4). Es considerada la segunda biomasa más abundante de forma natural, constituye aproximadamente del 15% al 35% de las paredes celulares de las plantas terrestres, sin embargo, siempre fue tratado como desecho y se ha utilizado en aplicaciones de bajo valor, como la generación de calor y electricidad. La lignina es, por mucho, la sustancia basada en fracciones aromáticas más abundante en la naturaleza y el mayor contribuyente a la materia orgánica del suelo.

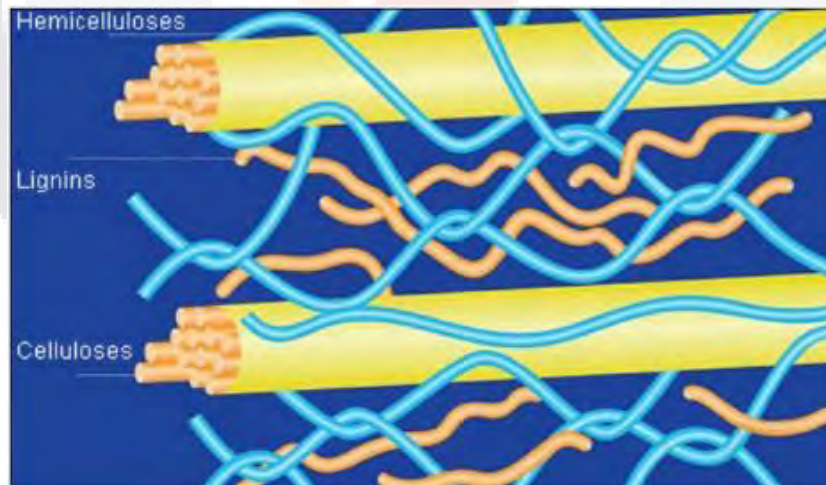


Fig. 4. Posición de la lignina dentro de la matriz lignocelulósica. Fuente: Li (2011)

En las últimas décadas, los avances en la aplicación de lignina incluyen la síntesis de polímeros, tintes, adhesivos y fertilizantes. Últimamente se ha pasado de percibir la lignina como un producto de desecho a verla como una materia prima potencial para productos valiosos.



TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

A la luz del consumo incesante de materias primas en el mundo de hoy, la búsqueda de recursos sostenibles es cada vez más fructífera. Por ello, su abundancia en la naturaleza podría resolver potencialmente el problema de los recursos que se agotan rápidamente si se tradujera con éxito en un recurso renovable o se valorizara en materiales de mayor valor.

Recientemente, se enfatizaron rutas alternativas hacia la valorización de la lignina (por ejemplo, como resinas, adhesivos o compuestos de base biológica), pero dependen en gran medida de la estructura química de la lignina, y también del proceso de fraccionamiento.

Es importante entender que el proceso de extracción de lignina no es sencillo, de acuerdo a Radotić & Mičić (2016), aislar la lignina en su estado natural y sin cambios es prácticamente una tarea inalcanzable, por lo que se requiere el uso de procedimientos extremos para separar la lignina de las paredes celulares y la celulosa, lo que provoca una alteración parcial de su estructura original. No obstante, en los últimos años se han aumentado los esfuerzos para asimilar los métodos de extracción y conseguir ser amigables con el medio ambiente, así como para conseguir polímeros con una estructura nativa mejor conservada.

Li (2011) sostiene que las propiedades físicas y las características químicas de la lignina varían no solo entre las diferentes especies de madera y/o plantas, sino también según el método de aislamiento. Además, la estructura molecular y los grupos funcionales difieren para los distintos tipos de lignina.

Radotić & Mičić (2016) sostienen que la purificación es el siguiente paso crucial para obtener material satisfactorio a partir del material vegetal de partida. Por lo tanto, la evaluación de la pureza tiene un lugar importante en todo el proceso de aislamiento. El grado de pureza necesaria depende de la aplicación posterior de los polímeros obtenidos.

La mayoría de las ligninas aisladas son polvos amorfos marrones. Dependiendo del método de preparación utilizado y de la fracción representada de la lignina total, hay algunos cambios correspondientes en color y forma. Según Li (2011), la estructura de

la lignina, tiene una cadena lateral de anillo aromático no polar y un grupo de ácido sulfónico polar, etc., por lo tanto, es lipofílica e hidrofílica.

Como se mencionó previamente, la lignina es el segundo componente más abundante del material vegetal y de acuerdo a Khan et al. (2019), se ha demostrado que es un recurso natural prometedor para aplicaciones de adhesivos y revestimientos. Los materiales adhesivos y de revestimiento se obtienen convencionalmente de fuentes no renovables, como las fuentes basadas en el petróleo.

En el 2022, Liu et al. reportaron que la lignina, como polímero natural rentable, respetuoso con el medio ambiente y renovable, contiene una estructura rígida de anillo de benceno, lo que hace que se convierta en un material atractivo para la síntesis de materiales superhidrofóbicos de biomasa. Ruwoldt et al. (2023) menciona que, muchas aplicaciones pueden beneficiarse de la inclusión de lignina en superficies, películas y revestimientos funcionales.

Sin embargo, también consideran que en la investigación actual sobre materiales superhidrofóbicos a base de lignina, todavía hay una serie de problemas tales como procesos complicados, hidrofobicidad insuficiente, baja tasa de injerto, etc. Por lo tanto, es necesario seguir buscando un proceso simple para preparar materiales a base de lignina con alta superhidrofobicidad.

### **3.3.2 Lignina Kraft.**

Junto con la celulosa, la lignina es el recurso renovable más abundante de la tierra. Industrialmente, la lignina está disponible como la llamada lignina Kraft, extraída a partir del licor negro, un subproducto de la tecnología de fabricación de pulpa Kraft.

Hoy en día, Klein et al. (2018) reporta que el licor negro técnico es utilizado casi exclusivamente por la industria de la celulosa y el papel como fuente de energía renovable para la proceso de pulpa Kraft, menos del 2% se utiliza para otros aplicaciones comerciales. Este uso de energía es el punto de referencia ecológico y económico y la tarea desafiante para los esfuerzos de valorización de la lignina. Es un recurso renovable económico que posee numerosas propiedades atractivas, como alta estabilidad térmica, biodegradabilidad, alto contenido de carbono, actividad

antioxidante y rigidez favorable (Magalhães et al., 2019). El uso de la lignina en diferentes aplicaciones ha sido un tema de interés para muchos investigadores. Así mismo, es un punto de referencia ecológico y económico y la tarea desafiante para los esfuerzos de valorización de la lignina.

Entonces, la lignina industrial proviene principalmente de la extracción de pulpa y celulosa en industrias. Wang et al. (2020) reporta que existen tres tipos de lignina extraídas del licor negro de pulpa: el lignosulfonato, la lignina Kraft y la lignina de solvente orgánico. Entre ellos, la lignina Kraft es la más común.

Normalmente, el aislamiento de la lignina es un subproducto de la industria de la pulpa y el papel. El lignosulfonato derivado de la pulpa de madera al sulfito y la lignina Kraft derivada de la pulpa Kraft de madera son los principales tipos de lignina disponibles comercialmente. Así pues, la lignina Kraft es un producto de los procesos de extracción realizados en la industria de la pulpa. Las ligninas derivadas de estos procesos ofrecen un enorme potencial tanto para agregar valor a los procesos de biorefinación como para ofrecer una amplia gama de propiedades que no se han explorado tan a fondo en aplicaciones de productos potenciales como las ligninas bien estudiadas derivadas de los procesos químicos convencionales de fabricación de pulpa.

Con base en los datos proporcionados por Tribot et al. (2019), la producción anual de pulpa Kraft ronda alrededor de las 130 millones de toneladas, filtrando aproximadamente entre 55 a 90 millones de toneladas de lignina Kraft que comúnmente es utilizada para fines energéticos. Y de acuerdo a Dastpak et al., (2018) y Cao et al. (2021), solamente el 2% de lignina obtenida es comercializada para la creación de productos con valor añadido.

Los productos de lignina Kraft se utilizan generalmente en aplicaciones de alto valor. En muchas aplicaciones, la lignina base debe modificarse antes de su uso. Una vez modificada, la lignina Kraft según Li (2011) se puede usar en la mayoría de las mismas aplicaciones en las que se usan los lignosulfonatos. Estos incluyen el uso como agentes emulsionantes/estabilizadores de emulsión, dispersantes de colorantes, aditivos en formulaciones de limpieza alcalinas, agentes complejantes en formulaciones de micronutrientes, como floculantes y como extensores para adhesivos fenólicos.

De acuerdo a Alwadani et al. (2021) la lignina es una macromolécula abundante producida predominantemente en la industria de la pulpa siguiendo los principales procesos al sulfito y Kraft. La lignina formada en la operación Kraft generalmente se quema como fuente de combustible. Esta también es considerada un material relativamente económico con importantes aplicaciones potenciales si se mejoran sus propiedades.

Ruwoldt et al., (2023), sostiene que La lignina por sí sola no es una sustancia hidrofóbica. Tratamientos complejos, modificaciones químicas o ajustes finos a la morfología de la superficie son necesarios para invocar la hidrofobicidad.

Sin embargo, se ha demostrado que la lignina o la lignina modificada proporcionan al material de poliuretano funcionalidades adicionales, como la capacidad de bloqueo UV, hidrofobicidad y retardante de fuego. Sin embargo, la utilización de la lignina ha enfrentado algunos desafíos, como el aislamiento del producto, la heterogeneidad, la agregación, el impedimento estérico y la baja actividad.

Dastpak et al. (2018) menciona que, a pesar de las propiedades bien conocidas de la lignina o lignina modificada, como la impermeabilidad al agua, la hidrofobicidad y la capacidad de formar película, así como su bajo costo y abundancia, no se ha sugerido la lignina pura como recubrimiento polimérico de protección de superficies, por lo que se sugiere que existen muy pocos productos similares a los creados en esta investigación. Hasta ahora, la lignina Kraft sólo se ha estudiado como un aditivo menor en los recubrimientos de barrera desde la perspectiva estructural, mecánica y de inhibición a la corrosión.

Además, la lignina Kraft es comúnmente contenida en poliuretanos derivados usados en la creación de revestimientos, adhesivos y espumas, esto debido precisamente a sus características hidrofóbicas y de adhesión. Las aplicaciones de los poliuretanos se extienden más allá de los adhesivos, revestimientos y espumas estructurales.

Liu et al. (2022) en su estudio y experimentación “Preparación y rendimiento del revestimiento superhidrofóbicos multifuncional a base de lignina” se hace utilización de un polvo superhidrofóbico a base de lignina Kraft previamente modificado en su

composición química para la creación de un revestimiento. Klein et al. (2018) en su trabajo “Lignina Kraft no modificada aislada a temperatura ambiente en forma acuosa para la preparación de recubrimientos de poliuretano transparentes altamente flexibles” también comenta el uso de la lignina Kraft extraída del licor negro producido en la industria papelera precisamente en la producción de poliuretanos a base de esta.

Younyia Mbiada et al. (2018) en su investigación “Controlling surface hydrophobicity of cellulose-lignin composite coatings”, desarrolló recubrimientos compuestos hidrofóbicos de celulosa-lignina y diseñar un método para controlar su hidrofobicidad. Sus hallazgos sugieren la posibilidad de lograr superficies superhidrofobas con recubrimientos compuestos de lignina pura, por lo que despierta la iniciativa de crear revestimientos a base de este componente.

En el estudio “Dispersiones acuosas de partículas de lignina esterificada para recubrimientos hidrófobos”, Hua et al. (2019), sostiene que las partículas a base de lignina mejoraron la hidrofobicidad de los recubrimientos en todos los sustratos probados, lo que resultó en dos revestimientos de buena calidad y desempeño impermeable.

En la investigación actual sobre materiales superhidrofóbicos a base de lignina o lignina modificada, todavía hay una serie de problemas tales como procesos complicados, hidrofobicidad insuficiente, baja tasa de injerto, etc. Por lo tanto, es necesario seguir buscando una manera de simplificar el proceso para preparar a base de lignina materiales con alta superhidrofobicidad.

### **3.4 Materiales comúnmente utilizados en azoteas**

De acuerdo con Padilla J.C. (2021), el INAH en sus manuales establece que en la composición de entresijos y cubiertas (fig. 5), es tradicional encontrar vigas de madera en sentido horizontal, estas se colocan encima de los muros en sentido contrario al claro más largo. Encima de estas vigas, es común encontrar las cuñas de barro rojo recocido tendidas y cubiertas por entortados de mortero de cal, y todo esto recubierto por impermeabilizantes tradicionales y naturales compuestos por jabón y piedra alumbre (Díaz E., Fuentes L., s/f).

### Estructura en un edificio antiguo

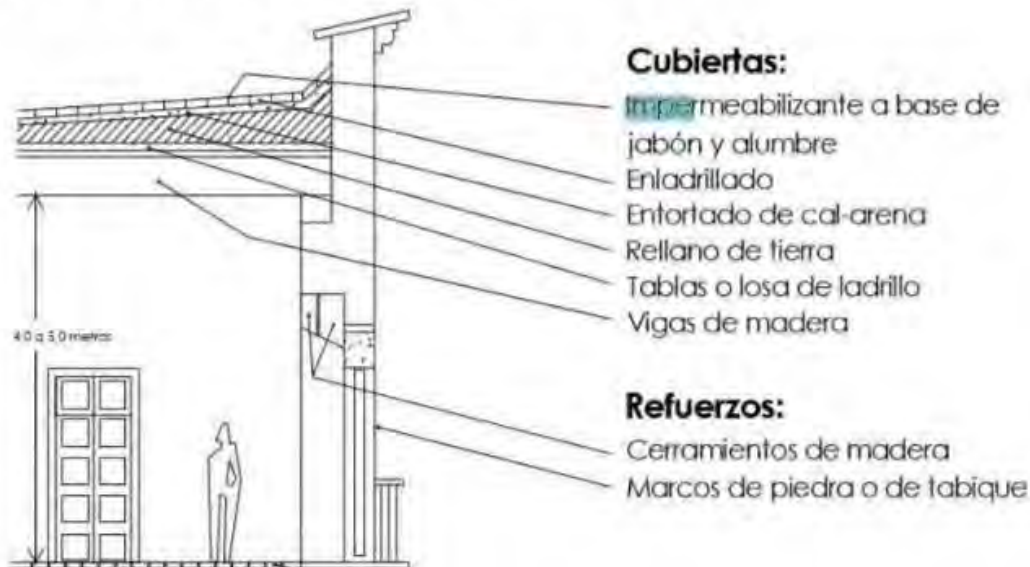


Fig. 5. Superficies comunes en edificios históricos según manual de INAH. Fuente: Padilla J.C. (2021)

**3.4.1 Mortero de Cal.** De acuerdo a Padilla J.C. (2021), el mortero de cal es un elemento que funciona como relleno en azoteas y se puede decir que forma parte de la línea de los morteros, ya que se considera un concreto de bajo peso volumétrico y es comúnmente utilizado como un elemento estratégico para la disminución de cargas por ser un material ligero. Además, es un elemento al que se le han encontrado diversos usos, tales como su utilización en la nivelación en superficies de losas con sistemas de enladrillado, así como también sirve como relleno y nivelador en la colocación de pisos. Es un material que es adaptable y resistente a los diferentes tipos de clima que puedan actuar sobre él, asimismo es elevadamente maleable y manipulable. Ayuda altamente en la colocación de cuñas, ladrillos y pisos, sin embargo, su tarea principal es la disminución de cargas muertas en azoteas.

**3.4.2 Tabique.** El tabique de arcilla roja es uno de los elementos tradicionales empleados en los materiales constructivos más comunes utilizados en la mayoría de construcciones actuales, siendo también de los más antiguos implementados en la construcción. Se considera un material de alta resistencia a la intemperie debido a la gran cantidad de edificios a base de mampostería que han prevalecido hasta el día de hoy (James W.P. Campbell; Will Pryce, 2004), superando cualquier prueba que el tiempo y el hombre hayan impuesto sobre estas obras.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Su uso data desde tiempos medievales y en consecuencia a la longevidad del material, este ha sufrido alteraciones y cambios en su composición, así como también en sus procesos de fabricación, procurando siempre la optimización del material.

Las dimensiones y características del tabique dependerán de los requerimientos estructurales de la edificación, así como su utilización y resistencia, sin embargo, la presentación más común en la que se encuentra un tabique de arcilla es en una forma cúbica rectangular con dimensiones 7x14x28 cm. Esta medida de tabique es comúnmente utilizada en la formación de muros de mampostería, así como también en losas con sistema de enladrillado, el acomodo de estos dependerá también la composición, requerimientos estructurales.

### **3.5 Características a ensayar.**

#### **3.5.1 Permeabilidad**

Es una característica de los materiales que consiste en la capacidad de este para posibilitar que un fluido lo penetre sin modificar su composición interna. Un material es considerado permeable permite la infiltración de una cantidad apreciable de fluido en un cierto período de tiempo, y se considera impermeable si la penetración del fluido es despreciable. Es considerada un parámetro importante en la valoración del desempeño de un manto impermeable, ya que a través de ella se conoce la calidad y eficiencia del producto. La permeabilidad se evaluará a través de procedimientos específicos y funcionales que la comunidad científica ha empleado para establecer sus parámetros y desempeño.

#### **3.5.2 Adherencia**

La adherencia es la capacidad que tiene un cuerpo de mantenerse unido a otro por fuerzas intramoleculares cuando estos entran en contacto. Un manto impermeable con un alto grado de adherencia muestra un producto de gran calidad ya que la adhesión también es considerada un indicativo significativo en la valoración de su desempeño y además permite evaluar su desgaste en relación al tiempo transcurrido desde su aplicación.

Un importante factor que potencialmente añadirá adhesión a la mezcla a base de lechada de cal usada como impermeabilizante, es el agregado del componente lignina. Según Naseem et al. (2016), los biopolímeros de lignina y derivados de lignina tienen varias propiedades, como alta estabilidad térmica, antioxidantes, biodegradabilidad, acciones antimicrobianas, propiedades adhesivas, etc., y por lo tanto pueden usarse ampliamente en una amplia gama de áreas. Y de acuerdo a lo establecido por Alinejad et al. (2019), la lignina generalmente mejora la resistencia mecánica y las propiedades térmicas de mezclas, copolímeros y materiales compuestos, debido a su estructura aromática. La cantidad y la estructura química de la lignina afectarán las propiedades del adhesivo final. Además, se ha informado que la adición de lignina en las formulaciones adhesivas de poliuretanos mejoró la resistencia a la delaminación, la falla cohesiva y mejoró las propiedades de relleno de huecos.

### **3.5.3 Absorción**

La absorción es la capacidad de un material de retener una cierta cantidad de agua y está directamente relacionada con la propiedad impermeable (Padilla J.C., 2021). Las consecuencias de la absorción en materiales utilizados en elementos constructivos pueden llegar a ser perjudiciales, ya que los líquidos que penetran provocan desgaste que puede ocasionar desmoronamiento y baja de resistencia en el material. Proteger materiales constructivos del fenómeno de la absorción de líquidos llega a ser una tarea sumamente compleja, y aunado de que las sustancias impermeables empleadas en monumentos y edificaciones de patrimonio histórico deben sujetarse a las exigencias y requerimientos estrictos por parte del INAH. Por lo tanto, encontrar nuevos métodos en el control y disminución de absorción en materiales constructivos llega a ser una prioridad para evitar el futuro desgastamiento de materiales implementados en elementos constructivos.



## **3.6 Instrumentos de evaluación.**

### **3.6.1 Tubo de Karsten**

La prueba de penetración del tubo de Karsten es una prueba sencilla estandarizada por el RILEM (RILEM test No. II.4 (RILEM Commission 25, 1980:200-204) para medir el grado de penetración del agua en materiales con superficies porosas de construcción. La prueba consiste en un tubo de vidrio lleno de agua, unido al material de prueba con plastilina. La presión del agua se ejerce entonces sobre la superficie. Una escala graduada indica, con el tiempo, la cantidad de agua que ha penetrado en la superficie.

El tubo de Karsten es el ensaye con el que mediante su uso se realiza un procedimiento no destructivo usado para medir la absorción de agua en superficies porosas y que además permite valorar la eficiencia y calidad de un impermeabilizante, evaluando la absorción antes y después de su aplicación.

La efectividad de la prueba aumenta cuando se realizan distintas repeticiones de mediciones en mismos puntos sistemáticamente a través de periodos de tiempo más grandes. Los resultados también pueden variar de acorde al sellado que se forma entre la superficie del material de interés y la base del tubo, en caso de no existir una unión perfecta, la consecuencia será un alto grado de absorción.

Es de gran utilidad en la medición de absorción de líquidos en superficies de materiales porosos utilizados en monumentos y edificios de patrimonio histórico, ya que la gran ventaja que posee como se mencionó previamente es que es una prueba no destructiva y no invade ningún elemento estructural, algo fundamental en edificaciones de preservación y protección del patrimonio histórico.

El tubo de Karsten además tiene la capacidad de reflejar el estado actual, ubicación y comportamiento del material sobre el que es puesto, esto debido a la ventaja de poder realizarse tanto en superficies horizontales como verticales.

### 3.6.2 Método de revisión de desgaste de las superficies (Norma ASTM)

La norma emitida con designación fija D3359-97, evalúa y revisa la calidad en materiales, para esta investigación se pretende enfocar hacia a la ASTM o Standard Test Methods for Measuring Adhesion by Tape Test.

Así como en la investigación de Padilla J.C. (2021), se definieron las mismas observaciones referentes al ASTM:

Consideraciones:

- A. Los métodos de prueba cubren procedimientos de evaluación de adherencia en películas de revestimiento a probetas aplicando y quitando cinta sensible a la presión sobre cortes realizados en la película de recubrimiento.
- B. Este método se diseña primordialmente dos variantes A para la utilización en sitios de trabajo y B para análisis adecuado en laboratorios; la prueba B no es considerada adecuada para películas de más de 5 milésimas de pulgada.
- C. El método es ampliamente utilizado para definir si la adhesión de un recubrimiento a un sustrato esta realizada a un nivel adecuado.
- D. En sistemas multicapa pueden producirse fallas en la adherencia entre capas de modo que la adherencia del sistema de revestimiento del sustrato no está determinada.
- E. Esta norma aborda problemas de seguridad y si los hay, asociarlos con la forma de utilización.

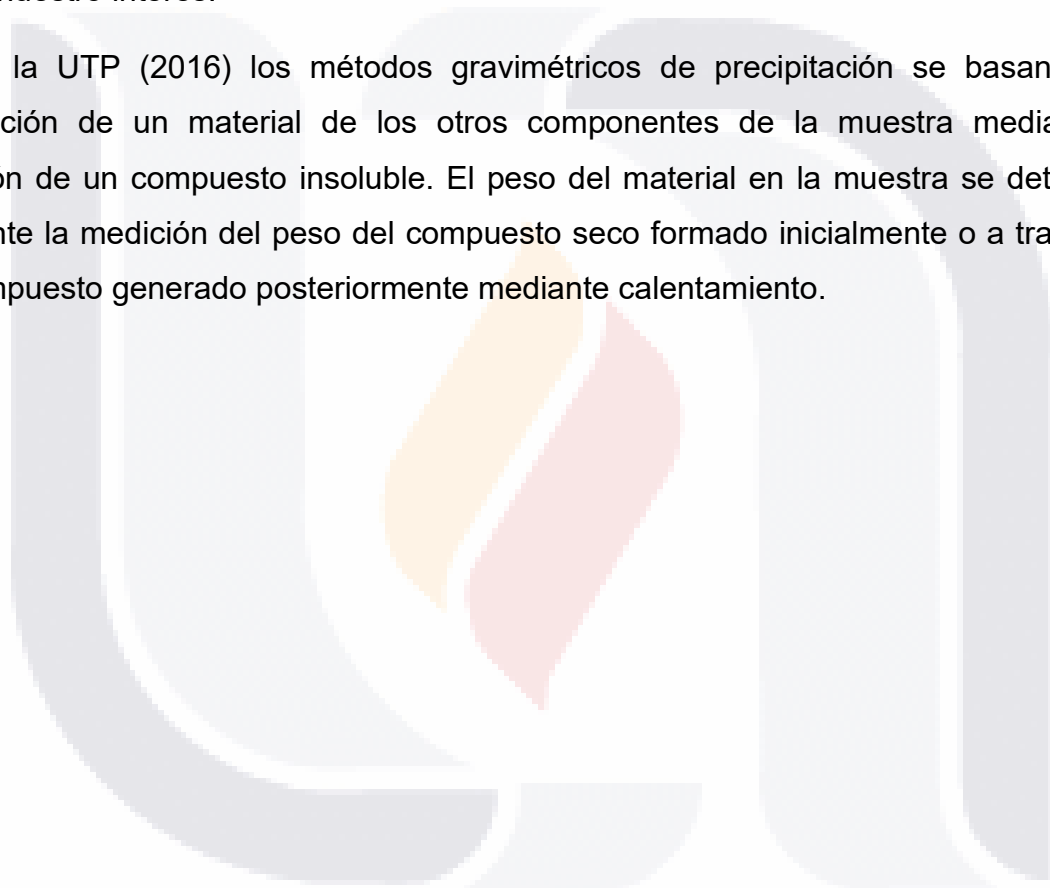
Importancia de utilización en pruebas

- A. Considerando que un revestimiento debe cumplir la función de proteger o decorar una superficie, debe adherirse a él por la vida útil esperada. Debido a que el sustrato y la preparación de la superficie tiene efectos drásticos sobre la adhesión, un método de evaluación de adhesión a sustratos, así como tratamientos es la prueba ASTM.

### 3.6.3 Gravimetría

La gravimetría se comprende cómo un análisis cuantitativo regularmente empleado para obtener la masa o concentración de una sustancia evaluando cambios en la masa. En este estudio lo que se pretende obtener es el peso del material seco y mojado para así determinar la cantidad de agua que este mismo absorbió con y sin la aplicación del impermeabilizante a desarrollar. Los métodos gravimétricos se clasifican en dos categorías: métodos de volatización y métodos de precipitación, siendo estos últimos los de nuestro interés.

Según la UTP (2016) los métodos gravimétricos de precipitación se basan en la separación de un material de los otros componentes de la muestra mediante la creación de un compuesto insoluble. El peso del material en la muestra se determina mediante la medición del peso del compuesto seco formado inicialmente o a través de un compuesto generado posteriormente mediante calentamiento.



## **CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA**

A pesar de que últimamente se ha aumentado la investigación en los usos y aplicaciones de la lignina en la construcción sostenible, aún se encuentran en desarrollo y valoración debido a su complejidad. En esta investigación se evaluará directamente el comportamiento de un impermeabilizante natural a base de la lechada de cal adicionado con el componente lignina aplicado sobre materiales tradicionales comúnmente utilizados en sustratos de azoteas. Para esto es necesario la obtención del componente lignina.

Cómo se mencionó previamente, la lignina es uno de los residuos más abundantes de la industria papelera y de pulpa, siendo esta un producto del licor negro generalmente considerado como desperdicio. Sin embargo, actualmente en México ya no existen fábricas de papel que fabriquen éste desde material virgen, ya que todo el material de papel producido en el país es 100% reciclado, por lo tanto, es complicada la obtención del licor negro generado en los procesos industriales de la creación de papel desde madera o material vegetal virgen.

Además, la comercialización del componente lignina en estado puro llega a ser complicado debido a la complejidad de su extracción desde material virgen, la falta de producto en el país y su difícil transportación internacional (importación).

Con estas previas complicaciones se investigaron alternativas que pudieran funcionar como reactivo principal y contuviera lignina en su composición biológica. En la búsqueda de una alternativa, se llegó a tener contacto con la Dra. Lizzette Torres, jefa de Calidad en la empresa papelera Celulosa y Papel del Bajío S.A. de C.V. (CEyPABASA), que comentó que a pesar del nombre de la empresa no cuentan con procesos de pulpeo a través de astillas, proceso en donde los licores negros obtenidos como subproducto están enriquecidos con derivados de lignina y hemicelulosa. Así como también sería poco probable la disponibilidad de los licores negros enriquecidos con lignina en México debido a que ya desde hace varios años no se produce más celulosa virgen en nuestro país.

En la empresa CEyPABASA, la fabricación de papel se realiza a partir de fibra secundaria (cartón reciclado) que presenta características similares a las de pulpas semiquímicas o mecánicas, por lo que presentan contenidos altos de lignina. Con los

ciclos de reciclaje que presentan las fibras de cartón, éstas llegan a romperse hasta formar estructuras de un tamaño muy reducido ( $>200 \mu\text{m}$ ) a los que hacen llamar “finos”. Durante este proceso de reciclaje se genera una gran cantidad de polvos o finos, que por las características de material de origen que posee un contenido importante de lignina. A continuación, en la figura 6 se puede observar el material en su estado residual en el que fue proporcionado. Así mismo, en las figuras 7 y 8 se puede apreciar a escala microscópica, la composición fibrosa de este material.



*Fig 6. Material de fibra de cartón proporcionado por CEyPABASA. Fuente: Propia.*



*Fig 7. Imagen microscópica de material de fibra de cartón (aumento de 20x). Fuente: Propia.*



*Fig 8. Imagen microscópica de material de fibra de cartón (aumento de 40x). Fuente: Propia.*

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Y. Wang et al. (2021) en su investigación “Compuestos de nano fibrillas de celulosa que contienen ácido poli-láctico/lignina, resistentes, dúctiles y biodegradables, con propiedades térmicas y de barrera mejoradas” utilizó papel periódico viejo para la obtención de nano fibras de celulosa con alto contenido de lignina. Además, menciona que, las películas compuestas por éstas nano fibras exhibieron una excelente protección contra los rayos UV, un rendimiento de barrera al vapor de agua y una buena estabilidad térmica. Por lo tanto, se puede sugerir y confirmar la presencia de lignina en el material brindado por la empresa CEyPABASA. Esta alternativa al compuesto puro resultó de gran ayuda a la investigación.

Gracias al contacto y a la buena relación profesional que se entabló con la Dra. Lizzette Torres y la empresa CEyPABASA, se organizó una visita a la planta de producción de la empresa ubicada en la ciudad de León, Gto. para conocer sus procesos y el material de finos producido en ellos. De nuevo gracias a la gran comunicación y colaboración con la empresa, hicieron favor de proporcionar muestras de sus finos con alto contenido en lignina generados en sus procesos de reciclaje con fin de contribuir a la investigación y además encontrarles un uso positivo a sus residuos.

La Dra. Lizzette Torres además mencionó que, para una mejor incorporación del reactivo proporcionado a la mezcla tradicional de cal, lo ideal sería calcinar el material hasta obtener cenizas, agregando que, a pesar de la combustión, la lignina continúa estando presente en las cenizas. No obstante, de acuerdo a Sahoo et al. (2011), la temperatura de degradación térmica, temperatura máxima de descomposición y el comportamiento térmico general es diferente dependiendo el tipo de lignina que se esté manejando.

Añadiendo a lo anterior, W. J. Liu et al. (2015) sostiene que, la conversión termoquímica de la lignina a los productos químicos o materiales de valor agregado son un enfoque aprobado para tratar la lignina a gran escala, ya que es rentable y fácil de operar. Varios procesos de conversión termoquímica, incluida la pirólisis, carbonización, y gasificación se han utilizado para convertir la biomasa lignocelulósica. Las tecnologías de conversión termoquímica actualmente ofrecen muchas ventajas.

#### 4. 1 Tabla de Operacionalización de Variables.

Tabla 2. Operacionalización de variables. Fuente: Propia.

VARIABLE NOMINAL	DEFINICIÓN DE LA VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	AUTORES
<b>Eficiencia del impermeabilizante</b>	La calidad y resultados del impermeabilizante desarrollado se medirán a través de la cantidad de agua que penetre la superficie del material, así como también su comportamiento a lo largo de un periodo de tiempo.	Permeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> <li>Penetración de agua</li> <li>Absorción-Evaporación</li> </ul>	- Tubo de Karsten - Gravimetría	- Padilla J.C. (2021) - RILEM 25 - NMX-C-037-1986-ONNCE-2005
		Durabilidad	Adhesión	Método de revisión de desgaste de las superficies	Norma ASTM
<b>Formulación de impermeabilizante</b>	La formulación del impermeabilizante natural estará determinada por la cantidad de LK que esta contenga, y por la receta tradicional a base de cal.	Contenido de lignina Kraft	Cantidad de lignina en fórmula	- Tubo de Karsten - Gravimetría	- Padilla J.C. (2021) - RILEM 25 - NMX-C-037-1986-ONNCE-2005
		Formulación base	Cantidad de solvente y soluto	- Tubo de Karsten - Gravimetría	- Padilla J.C. (2021) - RILEM 25 - NMX-C-037-1986-ONNCE-2005
<b>Sustrato de aplicación</b>	El resultado del impermeabilizante puede variar según el material de la superficie sobre la que se es aplicada, así como también por la técnica usada para su aplicación.	Materiales de azotea	<ul style="list-style-type: none"> <li>Porosidad</li> <li>Densidad</li> <li>Absorción</li> </ul>	Gravimetría	- NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 - UTP (2016) -
		Técnica de aplicación	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método de aplicación</li> <li>Cantidad aplicada</li> </ul>	Observación y registro	Padilla J.C. (2021)

## 4.2 Pruebas y caracterización de material de fibras de cartón.

Para determinar la cantidad de cenizas utilizadas en las formulaciones de cal, se realizaron distintas pruebas con las fibras de cartón con alto contenido de lignina para conocer su rendimiento, solubilidad y humedad de origen contenida.

### 4.2.1 Rendimiento

Para obtener un rendimiento promedio de cenizas por el material de fibras calcinado se repitió 3 veces el siguiente proceso: Primeramente, se pesaron 50 gramos del material inalterado

Con el material ya pesado, este se expuso al sol sobre una charola metálica por 15 minutos para lograr pérdida de humedad en el material.

Nuevamente se realizó el pesaje del material (figura 9), en el cual se registró una pérdida de aproximadamente 3 gramos de humedad en cada prueba realizada después de los quince minutos expuesto al sol a una temperatura en la intemperie aproximada de 22° C.



Fig 9. Peso del material con pérdida de humedad. Fuente: Propia.

Posteriormente se calentó una superficie metálica sobre una estufa, manteniendo una temperatura aproximada de 300° C sobre la superficie cómo se puede apreciar en la figura 10, después se colocó el material por alrededor de 10 min hasta obtener un color negro-grisáceo de cenizas producto de la calcinación (figura 10). Según Brebu & Vasile (2010), la lignina se descompone más lentamente en un rango de temperatura más amplio (200-500 °C), que la celulosa y los componentes de hemicelulosa.





*Fig. 10. Calcinación de material en superficie metálica sobre estufa. Fuente: Propia.*

Se buscaba obtener un color negro-grisáceo de las cenizas calcinadas para seguir manteniendo las propiedades que el carbón agrega, además de que cenizas demasiado calcinadas aumentan la solubilidad en agua, lo cual indica todo lo contrario a hidrofobicidad, que es lo que se pretende con la adición de la lignina en el impermeabilizante.



*Fig. 11. Cenizas obtenidas de la calcinación de material de fibras de cartón con alto contenido de lignina. Fuente: Propia.*

A continuación, se procedió a pesar las cenizas negras-grisáceas obtenidas de la calcinación del material de fibras de cartón con alto contenido de lignina sobre el recipiente metálico en la estufa (figura 11). El cuál fue de aproximadamente 5 gramos más 160 gramos del peso del recipiente cómo se observa en la figura 12.



*Fig. 12. Pesaje de las cenizas obtenidas en contenedor. (160 g + 5 g) Fuente: Propia.*

El proceso se repitió 3 veces para obtener un peso promedio certero del rendimiento de cenizas obtenidas del material de fibras de cartón calcinado. Los resultados arrojaron que en muestras de 50 g de material sin considerar pérdida de humedad arrojan un rendimiento de aproximadamente 5 gramos, lo cual significa alrededor de un 10% del peso original.

#### **4.2.2 Solubilidad**

Con las cenizas previamente obtenidas, se procedió a verificar la solubilidad con un refractómetro tipo ABBE de marca ATAGO (figura 13) , esto para evitar un alto grado de solubilidad en las cenizas, pero tampoco tan bajo que no permita su incorporación a las mezclas de cal. Los resultados obtenidos son en grados Brix, dónde cada grado significa un grado porcentual. Los grados brix indican la concentración de sólidos del soluto suspendidos o disueltos. Las lecturas del refractómetro arrojaron que en mezclas incorporadas con 20 gramos de ceniza por litro, esta concentración fue insignificante. Mientras que en mezclas con 35 gramos, las lecturas brindaron valores de 0.25 grados brix y en mezclas con proporción de 50 gramos de ceniza por litro la concentración fue de un grado brix. Sin embargo, estas lecturas pueden ser erróneas debido a las limitaciones del instrumento utilizado y la incapacidad de este para capturar lecturas adecuadas de los solutos incorporados con cenizas.



Fig 13. Refractómetro tipo ABBE marca ATAGO. Fuente: Propia.

#### 4.2.3 Humedad

Para determinar la humedad contenida en el material con alto contenido de lignina proporcionado por la empresa CEyPABASA, se realizó una prueba bajo la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreos y análisis. La humedad en la prueba se determina por medio de estufa de secado, se contará con una masa inicial de la muestra a evaluar, la cual se colocará dentro de la estufa y posteriormente se calentará a 105° C por el tiempo necesario hasta que se logre una masa constante, esto evaluando el material cada 24 horas hasta lograr el secado absoluto del material.

#### 4.2.4 Granulometría.

Para determinar la granulometría de las cenizas ricas en lignina generadas a través de la quema del material de fibras de cartón se realizó un tamizaje de éstas. La granulometría aporta la capacidad de analizar y comprender las dimensiones de las partículas y los sedimentos en una muestra, además de evaluar su relevancia en función de la proporción del sólido que representan.. El proceso de tamizaje se realizó de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM-C-136-05 “Método estándar de ensayo para análisis por tamizado de agregados fino y grueso.” Las mallas utilizadas para la

prueba fueron los números 40 (0.425 mm de abertura), 50 (0.300 mm), 60 (0.250 mm), 100 (0.150 mm) y 200 (0.075 mm) de acuerdo con el estándar TYLER.

Un peso neto de 50 gramos de cenizas fue tamizado para su posterior caracterización. Los resultados del tamizaje y la granulometría obtenida de las cenizas ricas en lignina generadas se pueden observar en la tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Resultados granulométricos de cenizas ricas en lignina obtenidas.

No. de malla	Abertura (mm)	Retenido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa
40	0.425	3.38	6.76 %	6.76%	93.24%
50	0.300	5.805	11.61%	18.37%	81.63%
60	0.250	0.885	1.77%	20.14%	79.86%
100	0.150	14.115	28.23%	48.37%	51.63%
200	0.075	18.285	36.57%	84.94%	15.06%
<b>Pasa 200</b>	-	7.515	15.03%	100%	0%
<b>TOTAL</b>		49.98	100%	-	-

El pesaje de cada material resultante en las mallas fue realizado en una balanza SARTORIUS con precisión de .01 gramo cómo se observa en la figura 14 a continuación.



Fig 14. Balanza SARTORIUS con precisión de .01 g. Fuente: Propia.

Así mismo, el material resultante de cada malla utilizada en la prueba se puede observar en las figuras que se muestran en seguida.



*Fig 15. Material resultante de malla no. 40. (Izquierda). Fuente: Propia.*



*Fig 16. Material resultante de malla no. 50. (Centro). Fuente: Propia.*



*Fig 17. Material resultante de malla no. 60. (Derecha). Fuente: Propia.*



*Fig 18. Material resultante de malla no. 100. (Izquierda). Fuente: Propia.*

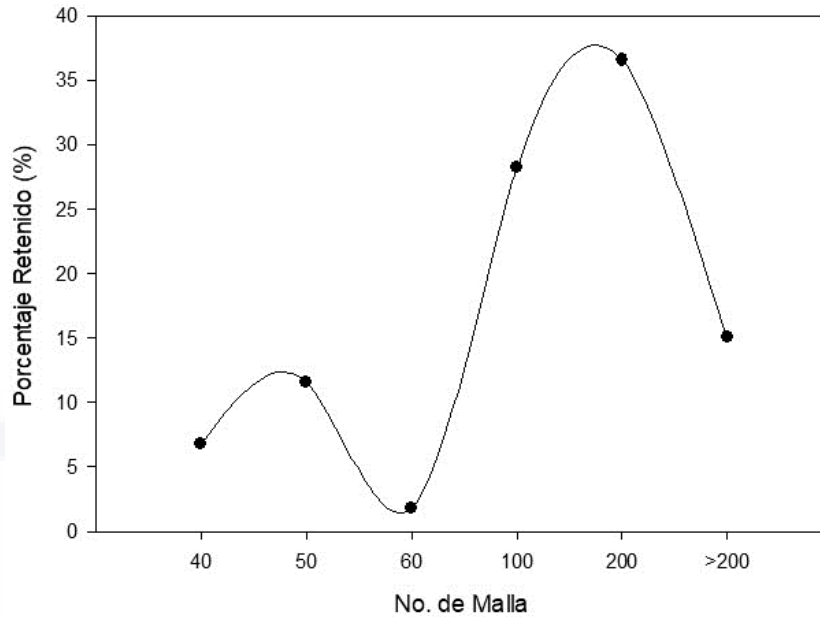


*Fig 19. Material resultante de malla no. 200. (Centro). Fuente: Propia.*



*Fig 20. Material resultante que paso la malla no. 200. (Derecha). Fuente: Propia.*

A través de este tamizaje, se pudo observar que cenizas negras quedan por arriba de la malla no. 100 (figuras 15-18). Mientras que cenizas grisáceas quedan por debajo de la malla no. 100 (figuras 19 y 20 ). Esto demuestra que las cenizas ricas en lignina obtenidas a partir del material de fibra de cartón son invariables en su composición de finos o fibras. La mayor parte de la ceniza quedó concentrada en las mallas no. 100 y 200, lo que significa que aproximadamente un 65% de las cenizas están compuestas por ésta granulometría. La proyección de los resultados se puede observar en la gráfica 1 a continuación.



Gráfica 1. Curva granulométrica de resultados obtenidos del tamizaje de ceniza rica en lignina. Fuente: Propia.

### 4.3 Construcción de Probetas

Los materiales utilizados en la construcción de losas de azoteas suelen ser los más afectados por la humedad provocada por la precipitación. Con base en lo establecido por Padilla J.C. (2021) y los materiales observados, se tiene conocimiento de que las losas utilizadas en azoteas de edificios patrimoniales están compuestas por cuñas, rellenos y recubrimientos simples. Por ello, para esta investigación se utilizará la cuña de barro rojo recocido y marcos de medidas 15 cm x 30 cm x 3 cm de mortero cal-arena 1:2 como probetas de experimentación ya que sus características, así como su composición coinciden en gran parte con las de las cuñas y recubrimientos usados en edificios históricos, difiriendo únicamente su espesor y dimensiones, pero manteniendo una superficie rugosa similar.

Debido a que se necesita solamente un pequeño espacio para poder efectuar las pruebas de permeabilidad y adherencia, se decidió dividir en 6 partes la cara de superficie aplicada con mezcla de cal adicionada con su respectiva proporción de ceniza para llevar a cabo estos ensayos. De las 6 partes, una fracción fue destinada a la prueba de permeabilidad involucrando el tubo de Karsten y otra fracción a la prueba de adherencia empleando el kit correspondiente, éstas en 3 períodos de tiempo diferentes, completando así los espacios faltantes. La distribución de los espacios en probetas con mezcla de cal con adición de cenizas ricas en lignina para pruebas de

permeabilidad y adherencia en 3 períodos distintos de tiempo fue como se muestra a continuación en la figura 21.

<b>A</b> 15 DÍAS	<b>P</b> 30 DÍAS	<b>A</b> 60 DÍAS
<b>P</b> 15 DÍAS	<b>A</b> 30 DÍAS	<b>P</b> 60 DÍAS

*Fig 21. Distribución de espacios para pruebas de permeabilidad y adherencia en probetas sustrato correspondiente.  
Fuente: Propia.*

A= Espacio para prueba de adherencia en período de tiempo correspondiente.

P= Espacio para prueba de permeabilidad en período de tiempo correspondiente.

Esta división se realizó en probetas seleccionadas para pruebas de permeabilidad y adherencia de ambos sustratos a evaluar, aplicadas con los dos tipos de mezcla de cal también a valorar en sus distintas proporciones de adición de ceniza rica en lignina.

De esta manera, se arrojaron tres probetas de mortero de cal-arena 1:2 con mezcla tradicional de cal, una por cada proporción de ceniza agregada a la mezcla, así como otras tres probetas de mortero de cal-arena 1:2 aplicadas con cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali", también utilizando una probeta por cada proporción de ceniza adicionada a la mezcla antes mencionada.

Las mezclas mencionadas anteriormente con las tres proporciones establecidas así mismo fueron aplicadas sobre probetas de cuña de barro recocido, generando otras 6 probetas para la realización de pruebas de adherencia y permeabilidad. Por lo tanto, finalmente se utilizaron doce probetas para la ejecución de los ensayos correspondientes justo mencionados.

Sin embargo, para las pruebas respectivas de absorción no fue posible crear una división en probetas para distintas pruebas ni períodos de tiempo, ya que se necesita una probeta completa por sustrato, mezcla de cal, proporción de ceniza y período de tiempo a causa de que se requiere una probeta completamente cubierta para sumergir en agua para determinar su porcentaje de absorción de cada período a evaluar. Por lo que se requirieron tres probetas por mezcla de cal, proporción de ceniza y sustrato, una de éstas para realizar las pruebas correspondientes de absorción en cada etapa de evaluación (15, 30 y 60 días).

Por lo tanto, para cada proporción de ceniza en cada mezcla de cal y tipo de sustrato, fueron necesarias tres probetas, una por cada período de evaluación. Por ejemplo, para la mezcla tradicional de cal con proporción de 20 gramos por litro aplicada sobre mortero de cal-arena 1:2 se necesitaron 3 probetas de este sustrato completamente cubiertos de la mezcla anterior con la proporción de cenizas indicada para sumergir en agua cada etapa de experimentación. Al contar con dos tipos de sustratos (mortero de cal 1:2 y cuña de barro rojo recocido), dos clases de mezclas de cal comúnmente utilizadas en la preservación y restauración de techos en edificios históricos (mezcla tradicional de cal, jabón y alumbre y cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali”) , tres diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina por litro de mezcla (20 g/lt, 35 g/lt y 50 g/lt) y tres períodos de tiempo (15, 30 y 60 días) a evaluar se necesitaron treinta y seis probetas en total, dieciocho de mortero de cal 1:2 y dieciocho de cuña de barro rojo recocido.

La nomenclatura utilizada en probetas a ensayar fue la que se muestra a continuación:

M= Mortero de cal-arena 1:2.

T= Cuña de Barro Rojo Recocido (T de tabique).

C= Mezcla tradicional de cal, jabón y alumbre.

O= Cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” (O de Oxical).

X1= Proporción de 20 g/lt de ceniza rica en lignina en mezcla de cal correspondiente.

X2= Proporción de 35 g/lt de ceniza rica en lignina en mezcla de cal correspondiente.

X3= Proporción de 50 g/lt de ceniza rica en lignina en mezcla de cal correspondiente.

-1,-2,-3,-4= Número de probeta.

A continuación, se muestran tablas de las probetas consideradas a ensayar y sus características:

Tabla 4. Orden de variables en tablas de probetas. Fuente: Propia.

<b>SUSTRATO</b>
<b>MEZCLA</b>
<b>CANTIDAD CENIZAS</b>
<b>TIPO DE PRUEBA</b>
<b>PERÍODO DE TIEMPO EN DÍAS</b>
<b>NOMENCLATURA DE PROBETA</b>
<b>NÚMERO DE PROBETAS ACUMULADAS</b>



Tabla 5. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en mortero cal-arena 1:2 con cantidad x1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: propia.

MORTERO CAL ARENA 1:2								
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL								
X1= 20 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
MCX1-1	MCX1-1	MCX1-1	MCX1-1	MCX1-1	MCX1-1	MCX1-2	MCX1-3	MCX-4
TOTAL = 4								

Tabla 6. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

MORTERO CAL ARENA 1:2								
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL								
X2= 35 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
MCX2-1	MCX2-1	MCX2-1	MCX2-1	MCX2-1	MCX2-1	MCX2-2	MCX2-3	MCX2-4
TOTAL = 8								

Tabla 7. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

MORTERO CAL ARENA 1:2								
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL								
X3= 50 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
MCX3-1	MCX3-1	MCX3-1	MCX3-1	MCX3-1	MCX3-1	MCX3-2	MCX3-3	MCX3-4
TOTAL = 12								

Tabla 8. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

MORTERO CAL ARENA 1:2								
CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI								
X1= 20 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
MOX1-1	MOX1-1	MOX1-1	MOX1-1	MOX1-1	MOX1-1	MOX1-2	MOX1-3	MOX1-4
TOTAL = 16								

Tabla 9. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

MORTERO CAL ARENA 1:2								
CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI								
X2= 35 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
MOX2-1	MOX2-1	MOX2-1	MOX2-1	MOX2-1	MOX2-1	MOX2-2	MOX2-3	MOX2-4
TOTAL = 20								

Tabla 10. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en mortero cal-arena 1:2 con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

MORTERO CAL ARENA 1:2								
CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI								
X3= 50 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
MOX3-1	MOX3-1	MOX3-1	MOX3-1	MOX3-1	MOX3-1	MOX3-2	MOX3-3	MOX3-4
TOTAL = 24								

Tabla 11. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en cuña de barro rojo recocido con cantidad X1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO								
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL								
X1= 20 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
TCX1-1	TCX1-1	TCX1-1	TCX1-1	TCX1-1	TCX1-1	TCX1-2	TCX1-3	TCX1-4
TOTAL = 4								

Tabla 12. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en cuña de barro rojo recocido con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO								
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL								
X2= 35 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
TCX2-1	TCX2-1	TCX2-1	TCX2-1	TCX2-1	TCX2-1	TCX2-2	TCX2-3	TCX2-4
TOTAL = 8								

Tabla 13. Probetas consideradas de la mezcla tradicional de cal en cuña de barro rojo recocido con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO								
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL								
X3= 50 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
TCX3-1	TCX3-1	TCX3-1	TCX3-1	TCX3-1	TCX3-1	TCX3-2	TCX3-3	TCX3-4
TOTAL = 12								

Tabla 14. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en cuña de barro rojo recocido con cantidad X1 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO								
CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI								
X1= 20 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
TOX1-1	TOX1-1	TOX1-1	TOX1-1	TOX1-1	TOX1-1	TOX1-2	TOX1-3	TOX1-4
TOTAL = 16								

Tabla 15. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en cuña de barro rojo recocido con cantidad X2 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO								
CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI								
X2= 35 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
TOX2-1	TOX2-1	TOX2-1	TOX2-1	TOX2-1	TOX2-1	TOX2-2	TOX2-3	TOX2-4
TOTAL = 20								

Tabla 16. Probetas consideradas de la mezcla cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en cuña de barro rojo recocido con cantidad X3 de cenizas con alto contenido en lignina. Fuente: Propia.

CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO								
CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI								
X3= 50 g/lt								
ADHERENCIA			PERMEABILIDAD			ABSORCIÓN		
15	30	60	15	30	60	15	30	60
TOX3-1	TOX3-1	TOX3-1	TOX3-1	TOX3-1	TOX3-1	TOX3-2	TOX3-3	TOX3-4
TOTAL = 24								

Se elaboraron en el laboratorio probetas de uno de los materiales usados comúnmente en la construcción de azoteas de edificios patrimoniales, este fue el mortero cal-arena con una proporción de 1:2, del cual se realizaron marcos de este material con dimensiones de 15 X 30 X 3 cm para su manejo accesible dentro del laboratorio, su proceso de elaboración se puede observar en las figuras 22 y 23 a continuación.



*Fig. 22. Elaboración de mezcla de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia.*



*Fig. 23. Construcción de probetas de mortero cal-arena 1:2 a mayor escala. Fuente: Propia.*

Así mismo, otro de los materiales tradicionalmente usado en cubiertas de techos en edificios patrimoniales e históricos es la cuña de barro rojo recocido (figura 24), la cual se recurrió a proveedores comerciales locales para su adquisición.



*Fig. 24. Cuña de barro rojo recocido (5 cm x 10 cm x 20 cm)*

Las dimensiones de las probetas fueron elegidas por la necesidad de manejo adecuado en laboratorio, las medidas de la cuña del barro rojo recocido son medidas estándar usadas en la industria ladrillera (5 cm x 10 cm x 20 cm).

**4.4 Elaboración de mezclas tradicionales de cal.**

Al contar con las cenizas del material con alto contenido de lignina, así como las probetas necesarias para la campaña experimental se procedió a continuar con la elaboración de la mezcla tradicional de cal basada en la formula documentada en la investigación de Espinoza A.C. (2016) adicionada con las cenizas y la mezcla de cal comercial “CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA TEOCALI” también adicionada con las cenizas con alto contenido de lignina.

**4.4.1 Mezcla tradicional a base de cal, jabón y alumbre.**

Para realizar esta mezcla, se tomó como referencia la fórmula utilizada por Espinoza A.C. (2016). Ésta se elaboró en laboratorio realizando una mezcla de agua, cal, jabón en barra amarillo y piedra alumbre (figura 25) de acuerdo a la dosificación en la tabla 17 que muestra a continuación propuesta por Espinoza A.C. (2016). Los volúmenes fueron convertidos a pesos de acuerdo a la densidad de cada reactivo para llegar a cantidades exactas y medibles.

*Tabla 17. Dosificación de fórmula de mezcla tradicional de cal-jabón-alumbre.*

UNIDAD	COMPONENTE	PROPORCIÓN (g/litro)
g	Jabón en barra	40
g	Piedra Alumbre	50
g	Agua	760
g	Cal	150
<b>TOTAL =</b>		<b>1000</b>



*Fig. 25. Componentes de mezcla tradicional de cal. Fuente: Propia.*

Se realizó una solución de 350 mililitros de jabón en agua, para ello se disolvió el jabón previamente triturado como se observa en la figura 26. El jabón se disuelve en agua a una temperatura aproximada de 60 °C.



*Fig. 26. Disolución a 60° C de componentes jabón y alumbre en agua. Fuente: Propia.*

Por otra parte, la piedra alumbre fue pulverizada para luego disolverse en el agua a una temperatura de 60 °C, y así obtener una mezcla homogénea, según lo establecido por el manual del INAH.

Finalmente, se incorporaron las dos mezclas resultantes, se agregó la cal requerida (150 g) y se ajustó con agua el volumen a 1000 g/litro logrando una mezcla homogénea entre todos los componentes como se muestra en la figura 27.



*Figura 27. Resultado de mezcla tradicional de cal. Fuente: Propia.*

#### 4.4.2 Cal de alta pureza en forma de pasta Teocali.

La otra mezcla de cal es de una marca comercial llamada como el componente “cal de alta pureza en forma de pasta Teocali” de la empresa llamada “OXICAL” pero que bien puede ser empleada como referencia de las mezclas tradicionales de cal generadas en laboratorio, esta mezcla es una solución creada industrialmente que consiste en su mayoría de cal, de ahí proviene su color blanco. Sus productos se distinguen por cumplir con altos estándares de calidad y pureza, con procesos tradicionales y soluciones con bajo impacto ambiental. Es comúnmente usada en cubiertas, bóvedas, techos, cúpulas, muros, etc. de monumentos históricos, sistemas constructivos naturales y tradicionales. La cal de alta pureza ha resistido con éxito la prueba del tiempo, siendo el cementante por excelencia; su utilidad, desempeño y durabilidad - desde épocas antiguas lo avalan como el único aglomerante que en la actualidad sigue otorgando seguridad, cohesión y compatibilidad en sistemas constructivos tradicionales. Un ejemplo visual de esta pasta se puede apreciar a continuación en la figura 28.



*Fig. 28. Cal de alta pureza en forma de pasta. Fuente: OXICAL.*

#### 4.5 Prueba Piloto

Para poder desarrollar una formulación que nos aproximara a los resultados deseados, previamente a la campaña experimental, fue necesario realizar una prueba piloto que permitiera determinar una cantidad de partida de cenizas del material con alto contenido de lignina, así como de formulación base del impermeabilizante tradicional a base de lechada de cal (solvente + soluto).

Por ello, la prueba piloto consistió en aplicar las formulaciones de cal previamente mencionadas con un contenido establecido de cenizas del material con alto contenido de lignina mezcladas con la lechada de cal tradicional y Cal de alta pureza en forma de pasta Teocali utilizadas como impermeabilizantes sobre la superficie de una probeta de tabique de barro rojo recocido y otra de Mortero Cal Arena 1:2 hasta obtener resultados significativos que permitan diferenciar una mejora en la fórmula para así poder determinar un contenido base o de partida de material calcinado.

Para esto, primeramente, fue necesario elaborar las lechadas bases de cal previamente establecidas; la mezcla tradicional de cal y la mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta Teocali. Se obtuvieron 3 diferentes muestras de cada mezcla de 250 ml cada una, una muestra sin cenizas agregadas para poder diferenciar resultados significativos entre la fórmula original y modificada. A los otras dos restantes se les agregó una cantidad de 10 g/litro y 20 g/litro respectivamente para obtener dos diferentes proporciones por litro, estas cantidades se toman con base en la investigación de Padilla J.C, (2021). Al final se arrojan un total de 6 muestras de mezclas distintas, como muestra la tabla 18 a continuación:

Tabla 18. Dosificación de cenizas en muestras de mezclas de cal. Fuente: Propia.

NO. DE MUESTRA	PROPORCIÓN DE CENIZAS	
	POR LITRO	
1	0 g	TRADICIONAL DE CAL
2	10 g	TRADICIONAL DE CAL
3	20 g	TRADICIONAL DE CAL
4	0 g	CAL EN PASTA TEOCALI
5	10 g	CAL EN PASTA TEOCALI
6	20 g	CAL EN PASTA TEOCALI



Al contar con las mezclas de cal naturales previamente mencionadas, se procedió a incorporar las cenizas con alto contenido de lignina a las mezclas correspondientes de acuerdo a su dosificación mostrada en la tabla anterior. El proceso de incorporación de cenizas a la cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” se observa a continuación en las figuras 29 a 32.



Figura 29. Pesaje de cenizas con alto contenido de lignina para incorporación en mezclas de cal. Fuente: Propia.



Fig. 30. Mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta teocali. Fuente: Propia.



Fig. 31. Incorporación de cenizas con alto contenido en lignina a mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali”. Fuente: Propia.

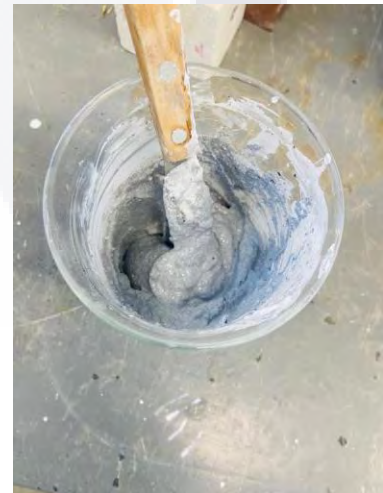


Fig. 32. Cal de alta pureza en forma de pasta teocali con 20 g/litro de ceniza con alto contenido de lignina. Fuente: Propia.

Posteriormente al contar con todas las muestras de mezclas de cal necesarias con y sin cenizas agregadas, inmediatamente se procedió a la aplicación de los impermeabilizantes naturales de cal sobre las probetas de Mortero Cal - Arena 1:2 y de cuña de barro rojo recocido. Se aplicó cada una de las 3 muestras con proporciones de ceniza distintos de cada mezcla de cal sobre una probeta de los dos tipos de sustrato. El método de aplicación fue con brocha y 2 capas constantes de impermeabilizante aplicada. Algo importante a considerar es la humectación previa del sustrato, esto se realizó impregnando un trapo regular con agua y aplicándolo sobre las superficies de la probeta a cubrir, esto se hace para evitar absorción del impermeabilizante hacia los poros del sustrato. La aplicación de las mezclas de cal con distintas proporciones fue distribuida de la siguiente manera como se aprecia en la tabla 19. Así mismo, las mezclas tradicionales de cal con jabón y alumbre resultantes con distintas proporciones de ceniza se pueden observar en las figuras 33 a 35.

Tabla 19. Distribución de muestras de mezclas de cal sobre sustrato. Fuente: Propia.

<b>MUESTRA DE MEZCLA DE CAL CON 0 g/litro.</b>	<b>MUESTRA DE MEZCLA DE CAL CON 10 g/litro.</b>	<b>MUESTRA DE MEZCLA DE CAL CON 20 g/litro.</b>
--------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------



Fig. 33. Mezcla tradicional de cal. Fuente: Propia.



Fig. 34. Mezcla tradicional de cal adicionada con 10 g/lit. De cenizas con alto contenido de lignina. Fuente: Propia.



Fig. 35. Mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit. De cenizas con alto contenido de lignina. Fuente: Propia.

En las figuras 36 a 40 a continuación, se logran distinguir las distintas mezclas aplicadas sobre los sustratos de mortero cal-arena y cuña de barro rojo recocido en la primer prueba piloto.



*Fig. 36. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla tradicional de cal sobre sustrato de cuña de tabique de barro rojo recocido. Fuente: Propia.*



*Fig. 37. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla tradicional de cal sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia.*



Fig. 38. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre sustrato de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.



Fig. 39. Aplicación de muestras con diferentes proporciones de cenizas con alto contenido de lignina de la mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia.



Fig. 40. Probetas de prueba piloto cubiertas por mezclas de cal. (mezcla tradicional de cal-parte superior; mezcla de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali"- parte inferior) (sustratos de cuña de barro rojo recocido- parte izquierda; sustratos de mortero cal-arena 1:2- parte derecha). Fuente: Propia.

Después, con las probetas cubiertas por las muestras de las mezclas de cal, se les otorgó un período de fraguado de 14 días. Las probetas cubiertas fueron simplemente expuestas a la intemperie del laboratorio para lograr su fraguado.

Al pasar este período de fraguado se hizo aplicación de las pruebas de adherencia y permeabilidad previamente descritas con el objetivo de descubrir resultados significativos en cuanto a la cantidad de cenizas por litro a emplear en las mezclas de cal tradicionales utilizadas para la protección y conservación de edificios patrimoniales e históricos catalogados por el INAH.

**4.6 Características a ensayar.**

**4.6.1 Permeabilidad por tubo de Karsten. (Normativa RILEM 25)**

La permeabilidad es la capacidad que tiene la superficie de cualquier tipo de material de permitir el paso de cualquier fluido a través de él, debido a esto, esta propiedad se convierte en el parámetro más importante en la evaluación de las mezclas impermeabilizantes a ensayar. Para lograr obtener datos que permitan conocer la permeabilidad de la superficie cubierta de impermeabilizante se emplea el uso del tubo de Karsten, una prueba no destructiva que permite recrear y representar condiciones reales de infiltración de fluidos para los tipos de sustratos a ensayar. Un ejemplo visual de la prueba se puede observar en la figura 41.

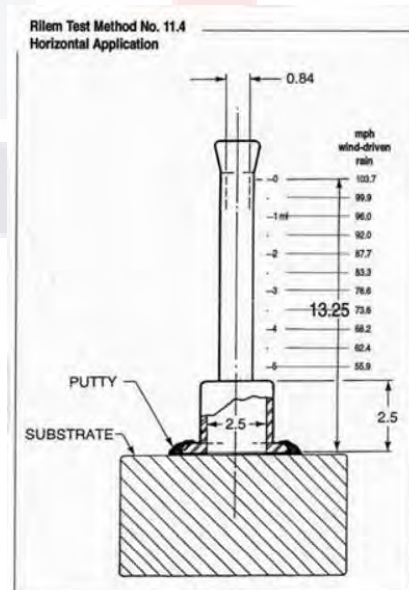


Fig. 41. Permeabilidad por Tubo de Karsten. Fuente: Hendrickx (2013)

Para realizar la prueba, se comenzó colocando el tubo de Karsten (figura 42) sobre la superficie a ensayar y para asegurar una adherencia que evite fugas del fluido se colocó alrededor de la base del tubo plastilina tipo putt. Posteriormente se vertió agua dentro del tubo provocando una presión hidrostática que simula acción de lluvia estática con viento como se muestra en la figura 43.



Fig. 42. Tubos de Karsten. Fuente: Propia.



Fig. 43. Tubo de Karsten sobre probeta. Fuente: Propia

La prueba es comúnmente utilizada para conocer la infiltración de agua sobre cualquier material y la absorción de este. Ayuda a determinar la calidad y efectividad del impermeabilizante sobre el sustrato y de acuerdo a C.A. Espinoza (2016) es factible para derivar parámetros fundamentales de humedad en materiales porosos.

Las mediciones de filtración de agua se realizan en períodos de 5, 10, 20, 30 y 60 minutos, registrando parámetros cada período y rellenando cada tubo con la cantidad de agua infiltrada para mantener la presión hidrostática.

**4.6.2 Adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies. (Norma ASTM)**

La adherencia es la capacidad que tiene un cuerpo de mantenerse unido a otro por fuerzas intramoleculares cuando estos entran en contacto.

Para determinar la adherencia de los impermeabilizantes al sustrato se realizó la prueba de adherencia de acuerdo a la normativa Adhesión and Flexibility Tests to meet the standards of ASTM Test method D-3359. Para llevar a cabo el ensaye es necesario contar con kit de adherencia especial para el tipo de prueba que se muestra en la figura 44.



*Fig. 44. Kit de adherencia para revisión de desgaste de las superficies. Fuente: Propia.*

Se selecciona un área pequeña de la superficie a estudiar a la cual no se le observen imperfecciones ni discontinuidades y sobre esta, con la navaja especial del kit de adherencia, manteniendo una presión constante se realizan dos cortes perpendiculares de aproximadamente 25 mm de longitud cada uno como se observa en la figura 45 y 46. Posteriormente con el cepillo especial se retiran excedencias escarificadas y se revisa la superficie cuidando que no haya alcanzado la superficie del sustrato. En seguida se cortan aproximadamente 7.5 cm del tape especial del kit del método y se adhiere sobre los cortes previamente realizados. Después de esperar un tiempo estimado de 90 segundos, se retira la cinta para realizar los registros correspondientes de acuerdo a la clasificación de resultados de la normativa ASTM.



Fig. 45 y 46. Aplicación de método de revisión de desgaste de las superficies. (Norma ASTM). Fuente: Propia.

Los resultados de adherencia se clasifican de la siguiente manera de acuerdo a la figura 47 según la normativa ASTM.

Example Appearance		Description	Classification	
Minimum Removal	Maximum Removal		ISO/JIS	ASTM
		The edges of the cuts are completely smooth; none of the squares of the lattice is detached.	0	5B
		Detachment of flakes of the coating at the intersections of the cuts. A cross cut area not greater than 5% is affected.	1	4B
		The coating has flaked along the edges and/or at the intersections of the cuts. A cross cut area greater than 5%, but not greater than 15% is affected.	2	3B
		The coating has flaked along the edges of the cuts partly or wholly in large ribbons, and/or it has flaked partly or wholly on different parts of the squares. A cross cut area greater than 15%, but not greater than 35%, is affected.	3	2B
		The coating has flaked along the edges of the cuts in large ribbons and/or some squares have detached partly or wholly. A cross cut area greater than 35%, but not greater than 65%, is affected.	4	1B
		Any degree of flaking that cannot be classified even by classification 4 or 1B	5	0B

Fig. 47. Clasificación de resultados de adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies.

Fuente: Normativa ASTM.



#### 4.6.3 Absorción.

La capacidad de absorción se refiere a la propiedad de los materiales para retener o atraer una cierta cantidad de agua o líquido, y esta propiedad está directamente vinculada a la permeabilidad, que es la capacidad de un material para evitar que el agua pase a través de sus paredes. Por lo tanto, la absorción es una característica relevante en las muestras que se analizan de acuerdo con el procedimiento establecido en la Norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 (D.O.F., 2005).

Esta prueba fue realizada en primera instancia a 3 probetas de cuña de barro rojo recocido y 2 probetas de mortero de cal y arena con proporción 1:2, todas estas sin ningún tipo de recubrimiento aplicado para obtener un parámetro inicial de la cantidad de agua que estas pueden absorber sin ninguna intervención sobre la superficie del material. Más adelante se realizaron las pruebas correspondientes de absorción sobre las demás probetas ya teniendo un dato base de absorción sin algún tipo de impermeabilizante o recubrimiento.

#### 4.7 Procedimiento de prueba de absorción en probetas secas.

Las probetas a ensayar son secadas en horno a una temperatura de 100 °C. Después de 24 horas dentro del horno estas son pesadas como se muestra en la figura 48. El proceso se repite hasta que la diferencia de masas pesadas no sea mayor al 2% de acuerdo a la norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005. Se registra el peso de las probetas lo más secas posibles y posteriormente para obtener el peso en condiciones de saturación se sumergen en un contenedor de agua que cubra todas las superficies de la probeta (figura 49). Al pasar un lapso de 24 horas, se retiran las probetas del contenedor de agua y con un trapo se procede a secar rápidamente la probeta superficialmente y nuevamente registrar su peso en condición de saturado (figura 50).



Fig. 48. Secado de probetas en horno a 100 °C. Fuente: Propia.



Fig. 49 y 50. Probetas sumergidas dentro de contenedor de agua y Pesaje de probetas saturada. Fuente: Propia.

#### 4.7.1 Cálculo y expresión de resultados

#### 4.7.2 Resultados de absorción en probetas sin recubrimiento.

Los resultados obtenidos de las pruebas de absorción realizadas a las probetas de cuña de barro rojo recocido y mortero cal-arena 1:2 se expresan en la tabla 20 a continuación:

Tabla 20. Resultados de absorción en probetas sin recubrimiento. Fuente: Propia

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (g)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (g)	Porcentaje %
Cuña de barro rojo recocido	20	10	5	1461	1801	340	23.27%
	20	10	5	1444	1785	341	23.61%
	20	10	5	1406	1794	388	27.59%
Mortero de Cal-Arena 1:2	30	15	3	2142	2536	394	18.39%
	30	15	3	2333	2747	414	17.74%

De la prueba de absorción realizada en probetas de cuña de barro rojo recocido y mortero de cal-arena 1:2 sin recubrimiento se obtuvo una media de porcentaje de absorción de 24.823% y desviación estándar 2.40203 de absorción en las probetas de cuña de barro rojo recocido, mientras que las probetas de mortero cal-arena 1:2 tuvieron una absorción media de 18.065% y una desviación estándar de 0.21125 de la masa original seca.

## 4.8 Resultados de primer prueba piloto

### 4.8.1 Permeabilidad

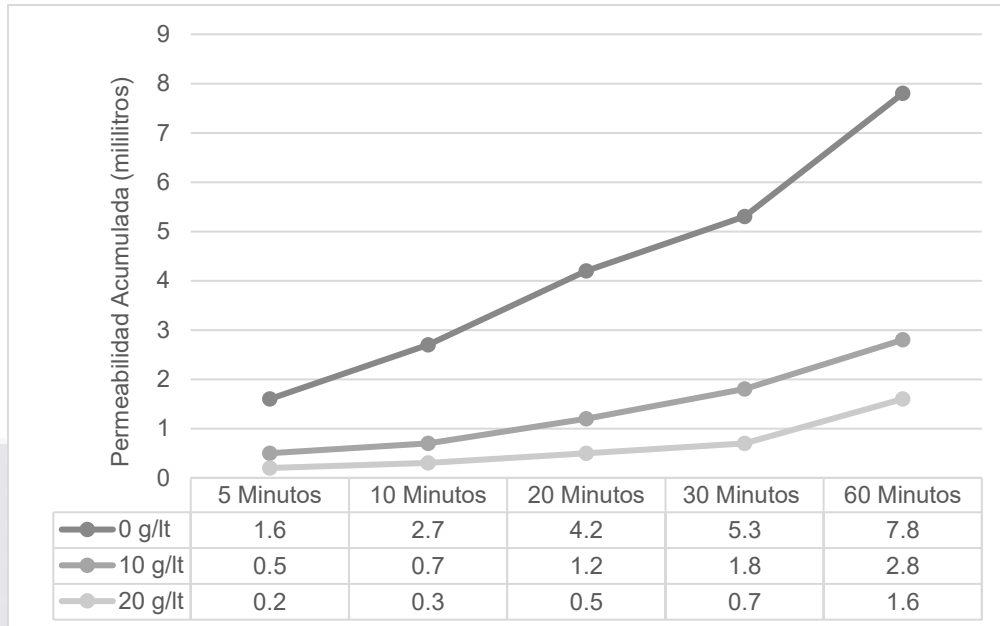
Para la prueba piloto, se colocaron los tubos de Karsten sobre las 3 partes de la probeta cubierta con las mezclas con cantidades distintas de cenizas con alto contenido de lignina. Los resultados de la prueba piloto en cuanto a permeabilidad aparecen a continuación en la tabla 21 y en gráficos (Gráfica 2 a 5) para su mejor comprensión.:

Tabla 21. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de prueba piloto. Fuente: Propia

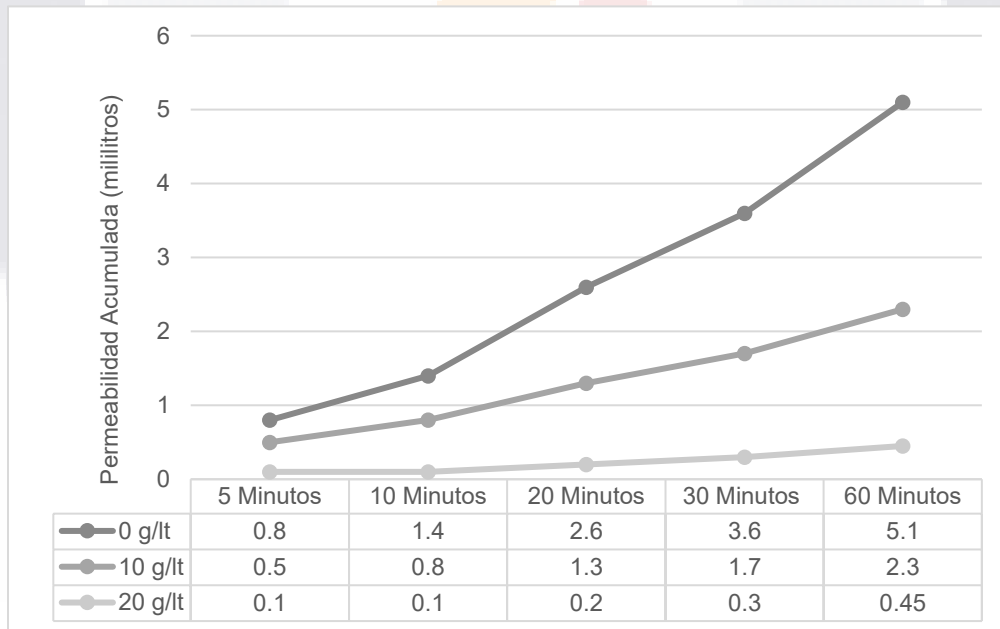
ELEMENTO DE SUSTRATO	MEZCLA	CENIZAS POR LITRO	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
			5 Min.		10 Min.		20 Min.		30 Min.		60 Min.	
			Lect.	Acum.	Lect.	Acum.	Lect.	Acum.	Lect.	Acum.	Lect.	Acum.
<b>MORTERO DE CAL 1:2</b>	Tradicional de Cal	0 g	1.60	1.60	1.10	2.70	1.50	4.20	1.10	5.30	2.50	7.80
		10 g	0.50	0.50	0.20	0.70	0.50	1.20	0.60	1.80	1.00	2.80
		20 g	0.20	0.20	0.10	0.30	0.20	0.50	0.20	0.70	0.90	1.60
	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali	0 g	3.80	3.80	3.60	7.40	7.90	15.30	8.40	23.70	N/A	N/A
		10 g	3.00	3.00	2.80	5.80	5.80	11.60	5.60	17.20	N/A	N/A
		20 g	2.00	2.00	2.00	4.00	4.80	8.80	5.00	13.80	N/A	N/A
<b>CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO</b>	Tradicional de Cal	0 g	0.80	0.80	0.60	1.40	1.20	2.60	1.00	3.60	1.50	5.10
		10 g	0.50	0.50	0.30	0.80	0.50	1.30	0.40	1.70	0.60	2.30
		20 g	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.20	0.10	0.30	0.15	0.45
	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali	0 g	3.80	3.80	3.20	7.00	5.00	12.00	4.60	16.60	N/A	N/A
		10 g	1.60	1.60	1.00	2.60	1.30	3.90	0.80	4.70	N/A	N/A
		20 g	0.50	0.50	0.30	0.80	0.40	1.20	0.20	1.40	N/A	N/A

N/A= Valores que no aplican debido a resultados satisfactorios de lecturas en periodos de tiempo anteriores.

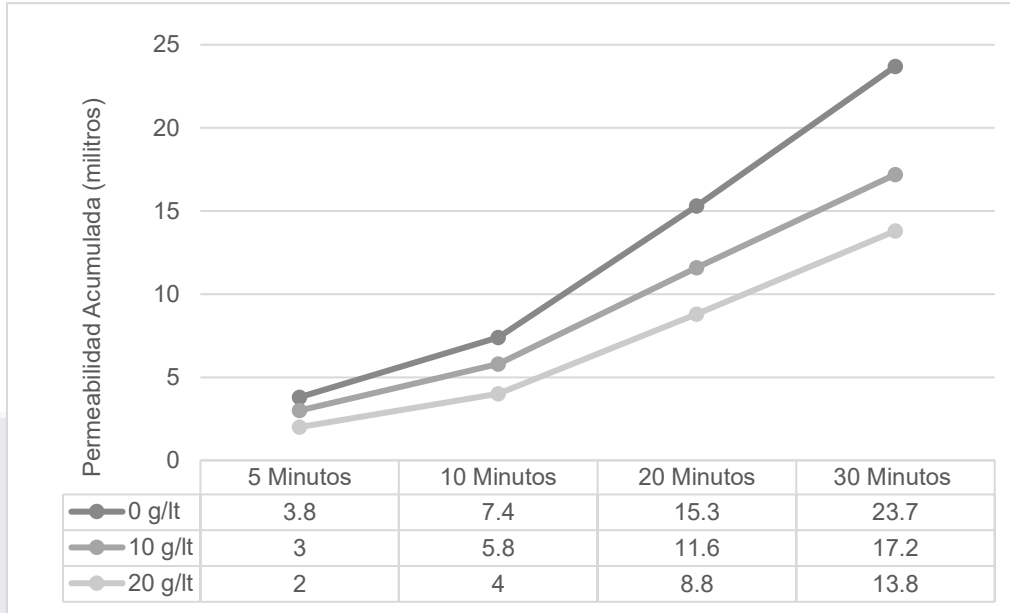
A partir de los resultados obtenidos de permeabilidad se puede interpretar que la adición de cenizas con alto contenido de lignina las mezclas tradicionales de cal si añadió características hidrófobas e impermeables a partir de una proporción base de 10 gramos por litro, sin embargo, la mezcla impermeabilizante tradicional de cal muestra que evita mejor la infiltración de agua a través de superficies.



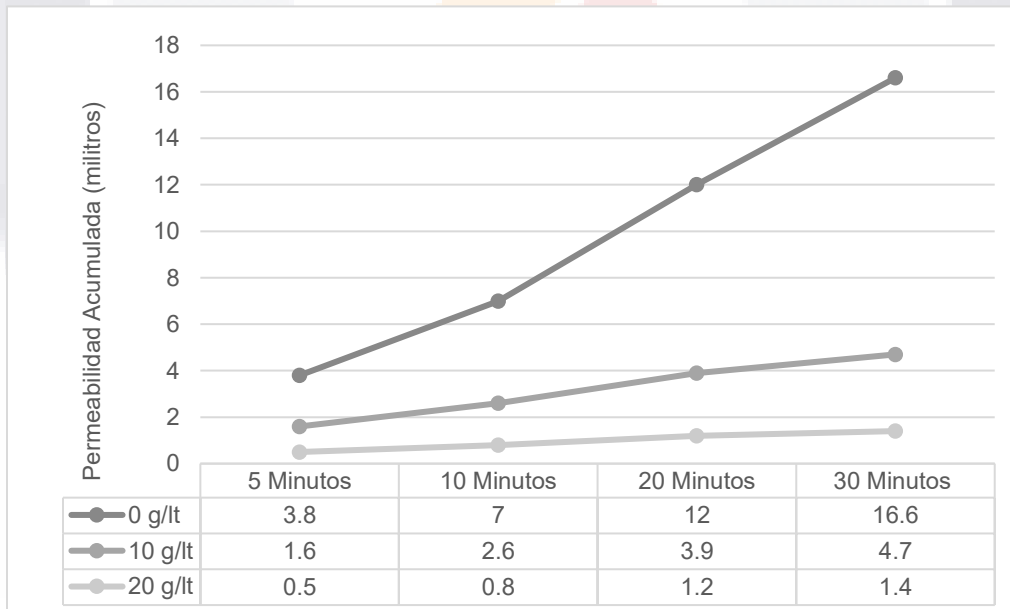
Gráfica 2. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de mezcla tradicional de cal sobre mortero 1:2. Fuente: Propia.



Gráfica 3. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de mezcla tradicional de cal sobre cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.



Gráfica 4. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.



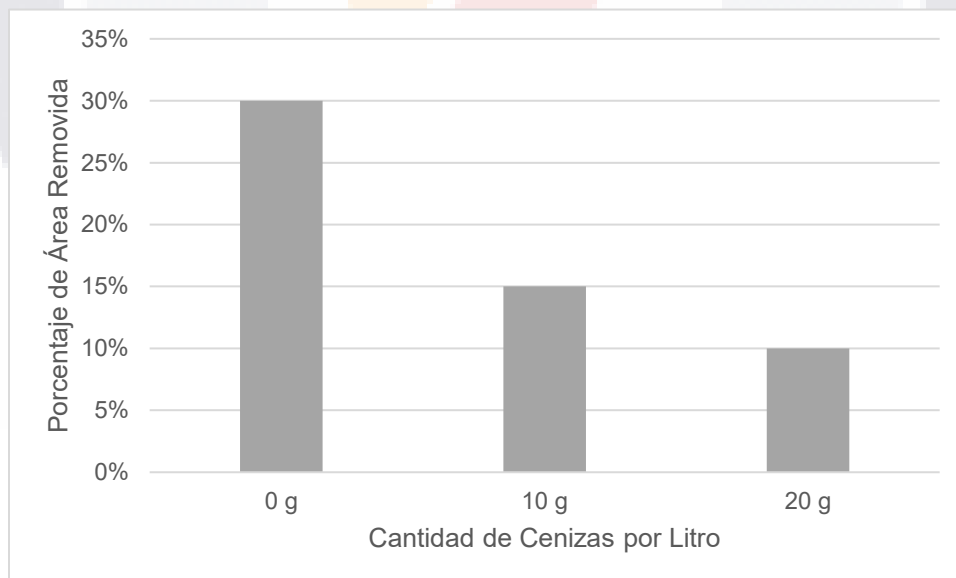
Gráfica 5. Resultados de prueba piloto de permeabilidad de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” sobre cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.

### 4.8.2 Adherencia

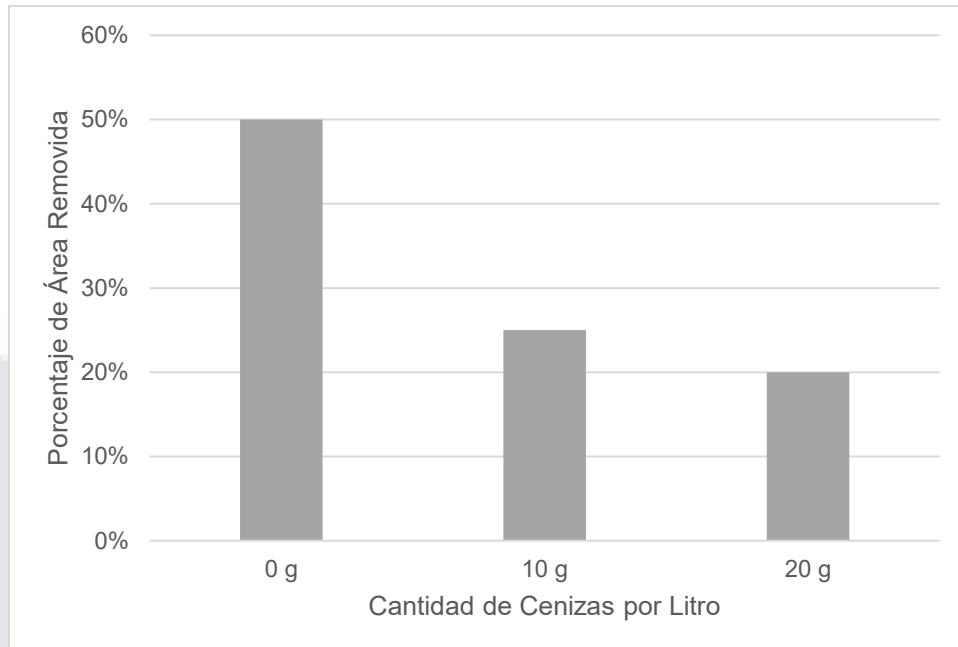
Para realizar la prueba piloto, se repitió el método previamente mencionado sobre la superficie cubierta de cada una de las mezclas incorporadas con cenizas con alto contenido de lignina (figuras 51 y 52). Los resultados obtenidos se expresan en la siguiente tabla 22 y en las gráficas 6 a 9:

Tabla 22. Resultados de adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies. (norma ASTM) de prueba piloto. Fuente: Propia.

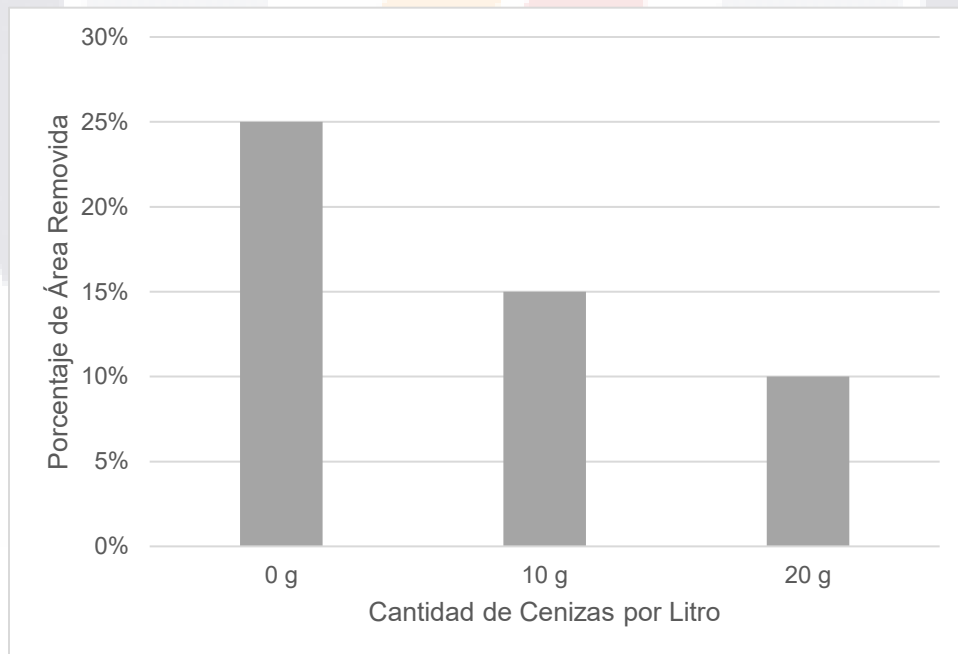
ELEMENTO DE SUSTRATO	MEZCLA	CANTIDAD DE CENIZAS POR LITRO	ÁREA REMOVIDA	
			Clasificación	Porcentaje
MORTERO DE CAL 1:2	Tradicional de Cal	0 g	2B	30%
		10 g	3B	15%
		20 g	3B	10%
	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali	0 g	2B	25%
		10 g	3B	15%
		20 g	3B	10%
CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO	Tradicional de Cal	0 g	1B	50%
		10 g	2B	25%
		20 g	2B	20%
	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali	0 g	2B	20%
		10 g	3B	15%
		20 g	3B	10%



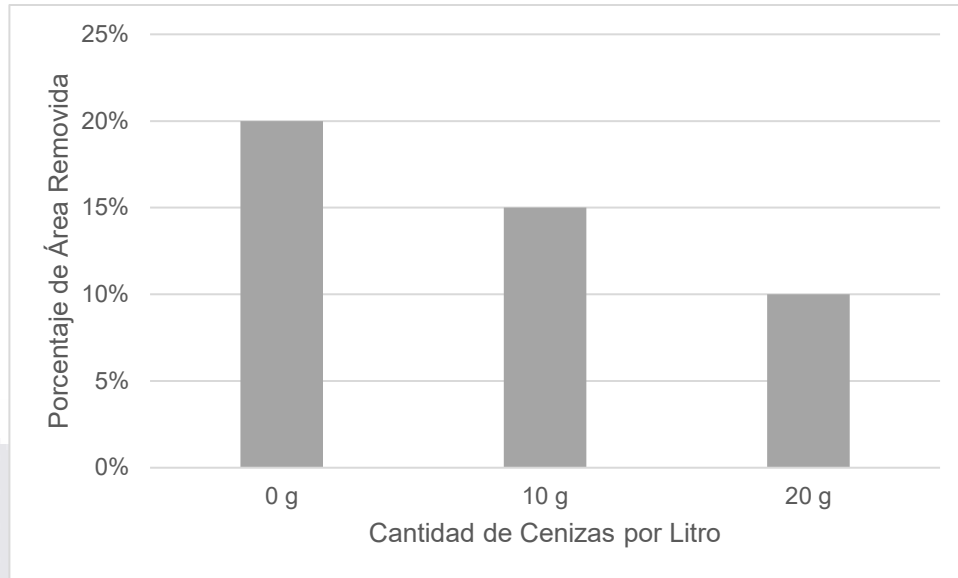
Gráfica 6. Resultados de prueba piloto de adherencia de mezcla tradicional de cal sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.



Gráfica 7. Resultados de prueba piloto de adherencia de mezcla tradicional de cal sobre cuña de barro rojo recocido fuente: Propia.



Gráfica 8. Resultados de prueba piloto de adherencia cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.



Gráfica 9. Resultados de prueba piloto de adherencia cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” sobre cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia



Fig. 51 y 52. Prueba de adherencia sobre probetas. Fuente: Propia.

Los resultados pobres de la mezcla tradicional de cal en la prueba piloto de adherencia se deben a la falta de hidratación de las probetas empleadas para tales mezclas. Éstas a falta de humedad, absorbieron el agua contenida dentro de las mezclas impermeabilizantes por lo que provocó un agrietamiento en la superficie cubierta y un debilitamiento de la mezcla impermeabilizante. Aun así, según los resultados vistos de la prueba de adherencia fueron significativos en cuanto a la incorporación de las cenizas con alto contenido de lignina a la mezcla tradicional de cal usada para la preservación y restauración de edificios patrimoniales. Para el caso de la cal de alta pureza en forma de pasta Teocali, ésta mostró mejores resultados de adherencia en comparación a mezcla tradicional, una razón puede deberse a la correcta hidratación



de las probetas sobre las que fue aplicada, sin embargo, en ambos casos se observó que estas cenizas con alto contenido de lignina añadieron propiedades adherentes como previamente se había supuesto a partir de una proporción de 20 gramos por litro, por lo que se establece como la cantidad base.

Aunque la cal de alta pureza en forma de pasta Teocali demostró mejores resultados significativos de adherencia que su contraparte la mezcla tradicional de cal, éste impermeabilizante fue superado por la mezcla impermeabilizante tradicional de cal en la prueba de Permeabilidad por lo que se puede decir que una mezcla es mejor en cierta propiedad que otra, sin embargo, todo estará sujeto a las pruebas próximas en la campaña experimental.

#### **4.9 Segunda prueba piloto.**

Con base en los resultados obtenidos de la primer prueba piloto se puede deducir que, cualquiera de las dos mezclas a base de cal con 20 gr de ceniza mostró excelentes resultados en comparación con las mezclas con menor cantidad de cenizas y las mezclas sin cenizas. Sin embargo, al comprobar que las cenizas si añaden hidrofobicidad a las mezclas tradicionales de cal usadas en la conservación y preservación de inmuebles del carácter histórico y patrimonial, aún queda la duda si esta cantidad de cenizas es la proporción óptima en las mezclas de cal previamente mencionadas. Por ello, se procedió a verificar si una mayor proporción de cenizas por litro arrojaba mejores resultados de hidrofobicidad en los parámetros establecidos en cuanto a las mezclas anteriores, todo esto a través de una segunda prueba piloto, en la cual se evaluaron dos proporciones sumamente mayores a los 20 gramos por litro, siendo estas cantidades 50 gramos de ceniza por litro y 100 gramos por litro en las mismas mezclas a base de cal enunciadas anteriormente. Para ello se realizó el mismo procedimiento de preparación de mezclas, siendo la única diferencia, la cantidad de cenizas contenidas por litro de mezcla.

Las pruebas se realizaron al igual que las anteriores utilizando las mismas mezclas tradicionales de cal anteriormente empleadas, sin embargo, por efectos prácticos únicamente se aplicaron sobre sustrato de mortero de cal 1:2 (figura 55 y 56). Las pruebas correspondientes de permeabilidad a través del tubo de Karsten (figura 57) y de adherencia mediante el método de revisión de desgaste de las superficies (figura 58 y 59) se realizaron a los quince días de haber aplicado la mezcla tradicional de cal y cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” incorporadas con la proporción de cenizas por litro establecido según la mezcla. En las figuras se puede apreciar el proceso de obtención de cenizas y elaboración de mezclas para su posterior mezcla (figura 53 y 54).



*Fig. 53. Incineración de material de fibras de cartón y elaboración de mezcla tradicional de cal Fuente: Propia.*



*Fig. 54. Incorporación de ceniza de material de fibra de cartón en mezcla a base de cal. Fuente: Propia.*



*Fig. 55. Aplicación de mezcla tradicional de cal con proporciones de cenizas correspondientes a segunda prueba piloto sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia.*



*Fig. 56. Aplicación de cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con proporciones de cenizas correspondientes a segunda prueba piloto sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2. Fuente: Propia.*



Fig. 57. Prueba de permeabilidad de segunda prueba piloto a través de tubos de Karsten. Fuente: Propia.



Fig. 58. Prueba de adherencia de segunda prueba piloto a través de método de revisión de desgaste. Fuente: Propia.



Fig. 59. Probeta de segunda prueba piloto después de aplicación del método de revisión de desgaste. Fuente: Propia.

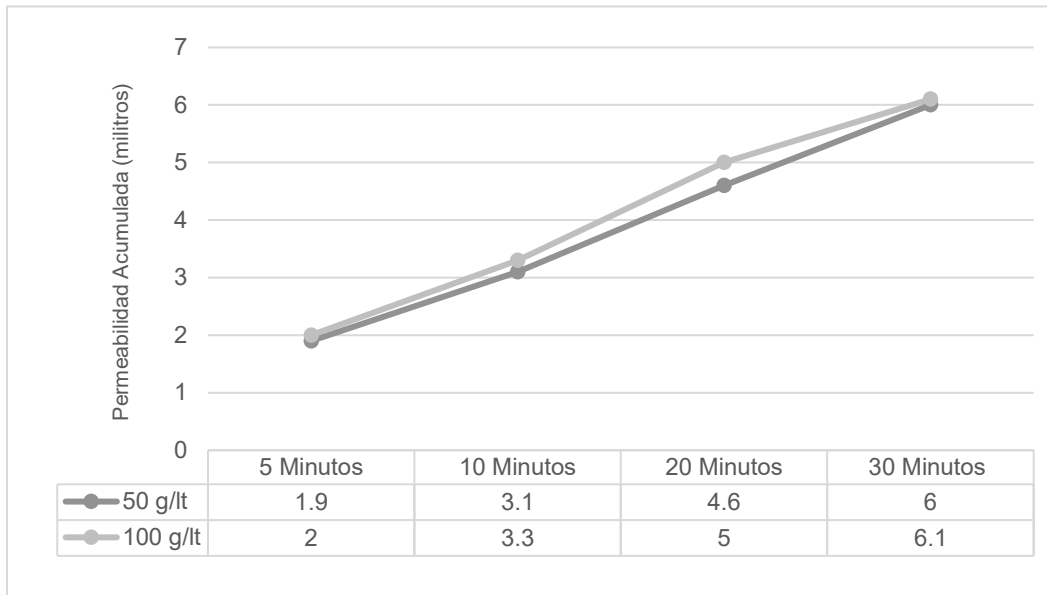
Los resultados de la segunda prueba piloto en cuanto a permeabilidad y adherencia empleando la mezcla tradicional de cal y la cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” con proporciones de 50 y 100 gramos de ceniza de fibra de cartón con alto contenido en lignina por litro respectivamente aplicadas sobre el sustrato mortero de cal y arena 1:2 se expresan en las tablas y gráficas que se muestran a continuación:

#### 4.10 Resultados de Segunda Prueba Piloto

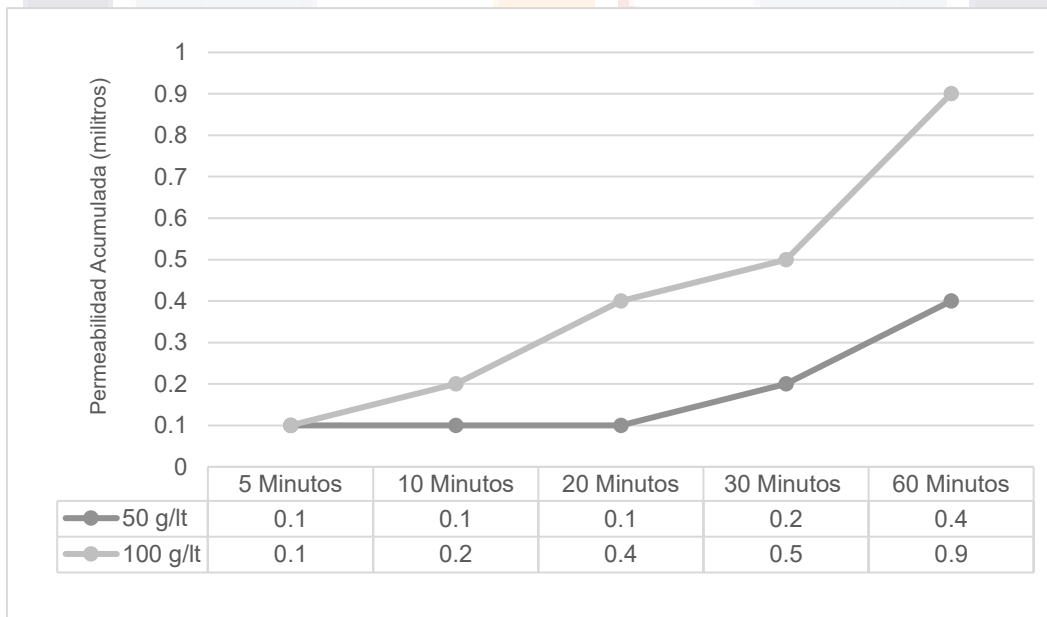
##### 4.10.1 Permeabilidad.

Tabla 23. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de segunda prueba piloto. Fuente: Propia.

ELEMENTO DE SUSTRATO	MEZCLA	CANTIDAD DE CENIZAS POR LITRO	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
			5 Min.		10 Min.		20 Min.		30 Min.		60 Min.	
			Lect.	Acum.	Lect.	Acum.	Lect.	Acum.	Lect.	Acum.	Lect.	Acum.
MORTERO DE CAL 1:2	Tradicional de Cal	50 g	0.10	0.10	0.00	0.10	0.00	0.10	0.10	0.20	0.20	0.40
		100 g	0.10	0.10	0.10	0.20	0.20	0.40	0.10	0.50	0.40	0.90
	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali	50 g	1.90	1.90	1.20	3.10	1.50	1.40	1.40	2.80	N/A	N/A
		100 g	2.00	2.00	1.30	3.30	1.70	5.00	1.10	6.10	N/A	N/A



Gráfica 9. Resultados de segunda prueba piloto de permeabilidad de mezcla tradicional de cal sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.

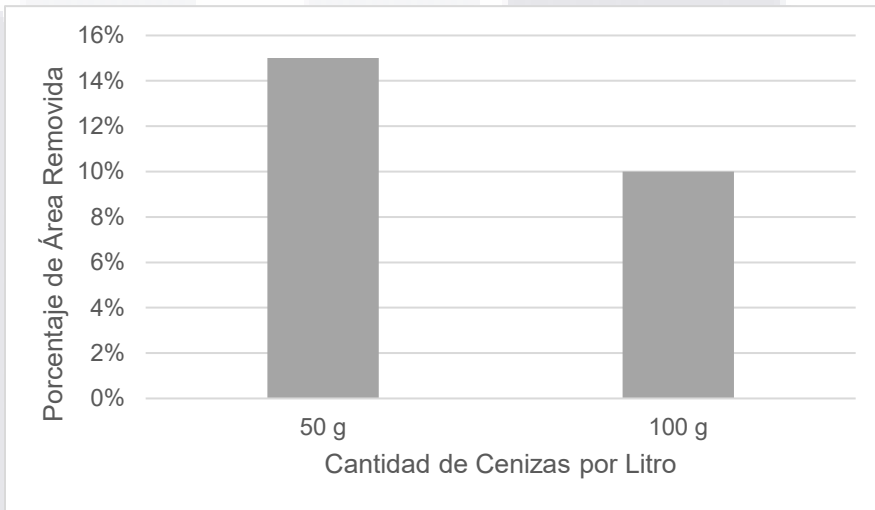


Gráfica 10. Resultados de segunda prueba piloto de permeabilidad de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.

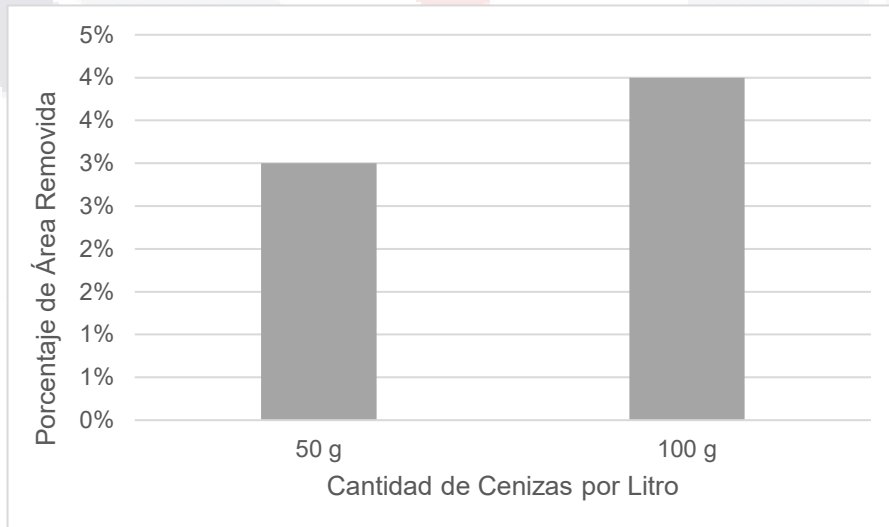
### 4.10.2 Adherencia

Tabla 24. Resultados de adherencia por método de revisión de desgaste de las superficies. (norma ASTM) de prueba piloto. Fuente: Propia

ELEMENTO DE SUSTRATO	MEZCLA	CANTIDAD DE CENIZAS POR LITRO	ÁREA REMOVIDA	
			Clasificación	Porcentaje
<b>MORTERO DE CAL 1:2</b>	Tradicional de Cal	50 g	3B	50%
		100 g	3B	60%
	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali	50 g	4B	<5%
		100 g	4B	<5%



Gráfica 10. Resultados de segunda prueba piloto de adherencia de mezcla tradicional de cal sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.



Gráfica 11. Resultados de segunda prueba piloto de adherencia de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" sobre mortero de cal 1:2. Fuente: Propia.

Mediante los resultados de permeabilidad y adherencia arrojados de la segunda prueba piloto en un período de quince días se pudo interpretar que la impermeabilidad y adherencia de las mezclas tradicionales de cal aumentó con una proporción de 50 gramos de cenizas respecto a los 20 gramos de cenizas por litro de mezcla a base de cal empleados en la prueba piloto anterior. Sin embargo, los resultados obtenidos de las mezclas a base de cal con una proporción de 100 gramos de ceniza por litro son muy similares a los de proporción de 50 gramos por litro, incluso hasta relativamente peores, siendo esto debido a que llega ser un tanto complicado incorporar tanta cantidad de ceniza en un litro de mezcla, brindando una mezcla sumamente viscosa y de difícil aplicación sobre el sustrato. Debido a esto, se complica cubrir toda la superficie del sustrato, permitiendo que a través de espacios pequeños descubiertos se filtre el paso de agua además de una pobre adherencia.

Debido a la semejanza entre los resultados de las proporciones de 50 y 100 gramos de ceniza de fibra de cartón con alto contenido en lignina por litro de mezcla a base de cal, se optó por seleccionar la cantidad de 50 gramos de ceniza con alto contenido de lignina por litro para la campaña experimental, ya que se consideró que esta proporción es la cantidad límite que arroja los mejores resultados posibles, siendo que la proporción de 100 gramos de ceniza llega a ser complicada de incorporar a las mezclas tradicionales a base cal y produce una mezcla muy viscosa y difícil de aplicar y sus resultados no difieren mucho a la proporción anterior, siendo inclusive relativamente peores.

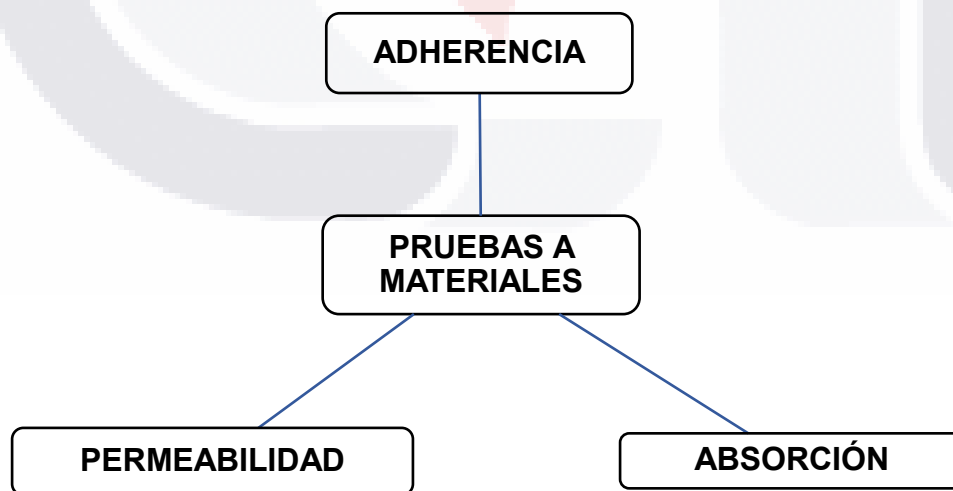
Con base en los resultados obtenidos de las pruebas piloto realizadas, se deduce que la mejor proporción de cenizas con alto contenido de lignina por litro de mezcla a base de cal sería la de 50 gramos por litro, superando a la de 100 por los motivos enunciados previamente. No obstante, la proporción de 20 gramos de ceniza por litro de mezcla, arroja resultados no tan diferidos de la cantidad anterior, por lo que también se tomará en cuenta para la campaña experimental, considerando que posiblemente a través de un lapso de tiempo mayor a quince días pueda adquirir el desempeño de las mezclas con una proporción de 50 gramos de ceniza por litro, así necesitando incorporar menor cantidad de cenizas por litro. Así mismo, también se considerará una

nueva proporción de 35 gramos de ceniza por litro de mezcla tradicional a base de cal, ya que se evaluará una cantidad entre las dos mencionadas previamente. Esto para comprobar el mejor desempeño de mezcla a base de cal por litro utilizando menor cantidad de cenizas posible.

## **CAPÍTULO 5. CAMPAÑA EXPERIMENTAL**

Si bien hoy en día existen estudios y observaciones sobre las propiedades hidrofóbicas y adherentes que proporciona la lignina, en esta investigación se evaluará y observará el comportamiento de su incorporación mediante cenizas producidas de la calcinación del material de fibra de cartón con alto contenido de lignina a las mezclas tradicionales de cal utilizadas en la conservación, protección y restauración de edificios históricos y patrimoniales catalogados por el INAH, procurando emplear técnicas naturales para producir una eficiente aplicación de uso. El material previamente mencionado fue obsequiado para la presente investigación por la empresa CEyPABASA.

La campaña experimental se desarrolló durante 60 días y se evaluó la eficiencia de los impermeabilizantes producidos analizando sus propiedades mediante 3 tipos de pruebas distintas que son Adherencia, Permeabilidad y Absorción como se muestra en la figura 60 a continuación.



*Fig. 60. Mapa conceptual de ensayos de probetas. Fuente: Propia*

Las mezclas de cal a emplear en la investigación se pueden apreciar enlistadas en la tabla 24 mostrada en seguida.

Tabla 25. Impermeabilizantes a ensayar. Fuente: Propia

ID	IMPERMEABILIZANTE TIPO	COMPONENTES
I-1	Tradicional (Cal)	Cal, Agua, Jabón Neutro, Alumbre
I-2	Comercial	Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta

Estas lechadas de cal fueron aplicadas sobre probetas de materiales normalmente utilizados en superficies de construcciones del índole patrimonial e histórico como lo son el mortero de cal-arena y el ladrillo petatillo, las probetas de mortero fueron elaboradas en el laboratorio y las cuñas de barro rojo recocidos fueron obtenidas comercialmente.

### 5.1 Objetos de Estudios

- I. Muestras de cenizas obtenidas a partir de material de fibra de cartón con alto contenido de lignina obsequiado por la empresa CEyPABASA (Celulosa y Papel del Bajío S.A. de C.V.)
- II. Comportamiento de la mezcla tradicional de cal, así como de la Cal de Alta Pureza en forma de Pasta, adicionadas con las cenizas provenientes del material de fibra de cartón con alto contenido de lignina.
  - a. Técnica tradicional de Impermeabilización.
    - i. Mezcla Tradicional de Cal utilizada como Impermeabilizante Natural en bóvedas, terrados y superficies de cuña en edificios patrimoniales.
      1. Calidra
      2. Agua
      3. Jabón Neutro
      4. Piedra Alumbre
    - ii. Cal de Alta Pureza en Forma de Pasta Teocali.



- TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS
- III. Probetas que se analizan sin aplicación de impermeabilizantes, también probetas con aplicación de mezcla de impermeabilizante sin adicionar cenizas y probetas con aplicación de mezclas con porcentajes de masa de cal sustituidos por la misma masa de cenizas.
    - a. Superficies propuestas:
      - i. Mortero Cal-Arena 1:2
      - ii. Cuña de Barro Rojo Recocido

## **5.2 Objetivos de la Campaña Experimental**

- A. Recolectar 24 probetas de cuña de barro rojo recocido.
- B. Elaborar 24 probetas de mortero Cal-Arena 1:2.
- C. Obtener cenizas masivamente a partir de material de fibra de cartón con alto contenido de lignina proporcionado por la empresa CEyPABASA (Celulosa y Papel del Bajío S.A. de C.V.)
- D. Analizar características de absorción, permeabilidad y adherencia de las probetas de mortero cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido.
- E. Recolectar Cal de Alta Pureza em Forma de Pasta Teocali.
- F. Elaborar mezcla tradicional de cal.
- G. Aplicar los impermeabilizantes elaborados a las probetas de mortero Cal-Arena1:2 y cuña de barro rojo recocido.
- H. Someter los impermeabilizantes desarrollados a ensayos de absorción, permeabilidad y adherencia.

### 5.3 Variables Experimentales

Las variables experimentales de esta investigación fueron los materiales tradicionalmente empleados en la construcción de superficies de bóvedas, terrados y de cuña en edificios históricos y patrimoniales catalogados por el INAH cómo lo son el mortero de cal-arena y el ladrillo de barro rojo recocido. Se utilizó una mezcla de cal de procesamiento tradicional y otra de procedencia comercial, la cantidad de cenizas con alto contenido de lignina será otra de las variables a tomar en cuenta. Otra variable importante a considerar es la edad de aplicación de los impermeabilizantes producidos sobre los sustratos previamente mencionados. Estas variables sujetas a la investigación se pueden observar en la próxima figura 61.

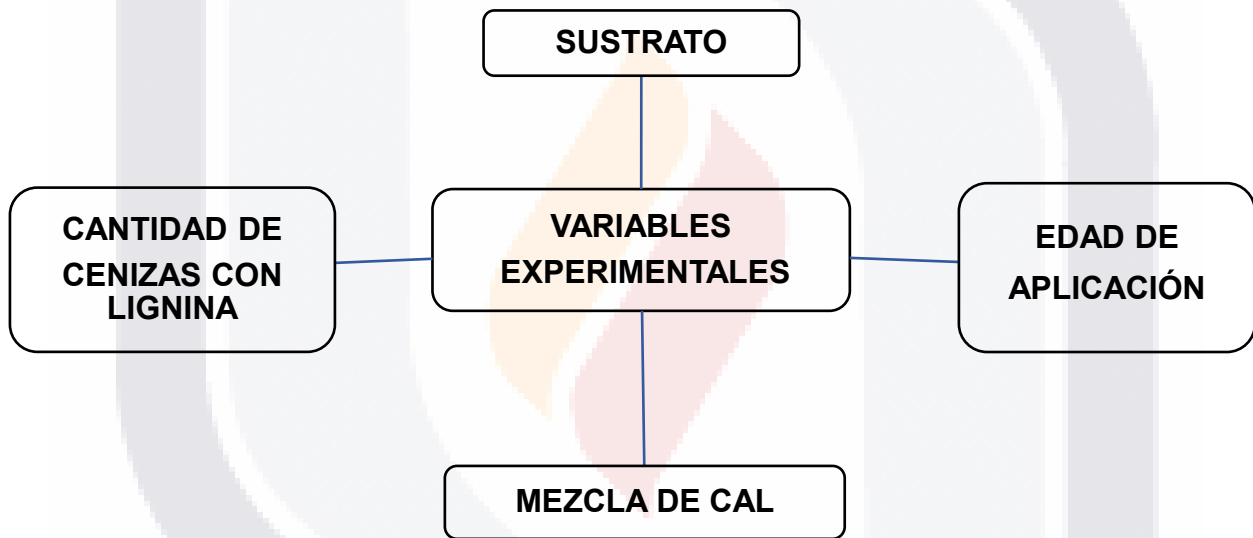


Fig. 61. Mapa Conceptual de Variables Experimentales. Fuente: Propia

## 5.4 Plan de Trabajo

La campaña experimental se llevó a cabo de febrero 2023 a abril 2023. Se aplicaron las pruebas a probetas de acuerdo a la tabla 26:

Tabla 26. Pruebas, Probetas y Ensayes. Fuente: Propia

Probeta	Mezcla	Cantidad		Pruebas Realizadas		
		de Cenizas	Edad (días)	Absorción	Permeabilidad	Absorción
Mortero Cal- Arena 1:2	Tradicional	20 g	15	X	X	X
	de Cal	35 g	30	X	X	X
	Cal de Alta Pureza En forma de Pasta Teocali	50 g	60	X	X	X
Cuña de Barro Rojo Recocado	Tradicional	20 g	15	X	X	X
	de Cal	35 g	30	X	X	X
	Cal de Alta Pureza En forma de Pasta Teocali	50 g	60	X	X	X

Compatibilidad con las técnicas tradicionales de restauración y conservación

## CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE CAMPAÑA EXPERIMENTAL

En este capítulo se demuestran los resultados experimentales de las pruebas a las que sometieron las probetas aplicadas con las mezclas tradicionales de cal utilizadas para la conservación, restauración y protección de edificios de carácter patrimonial e histórico en su incorporación con cenizas ricas en fibras con alto contenido en lignina según lo planteado en la campaña experimental descrita en el capítulo anterior (5).

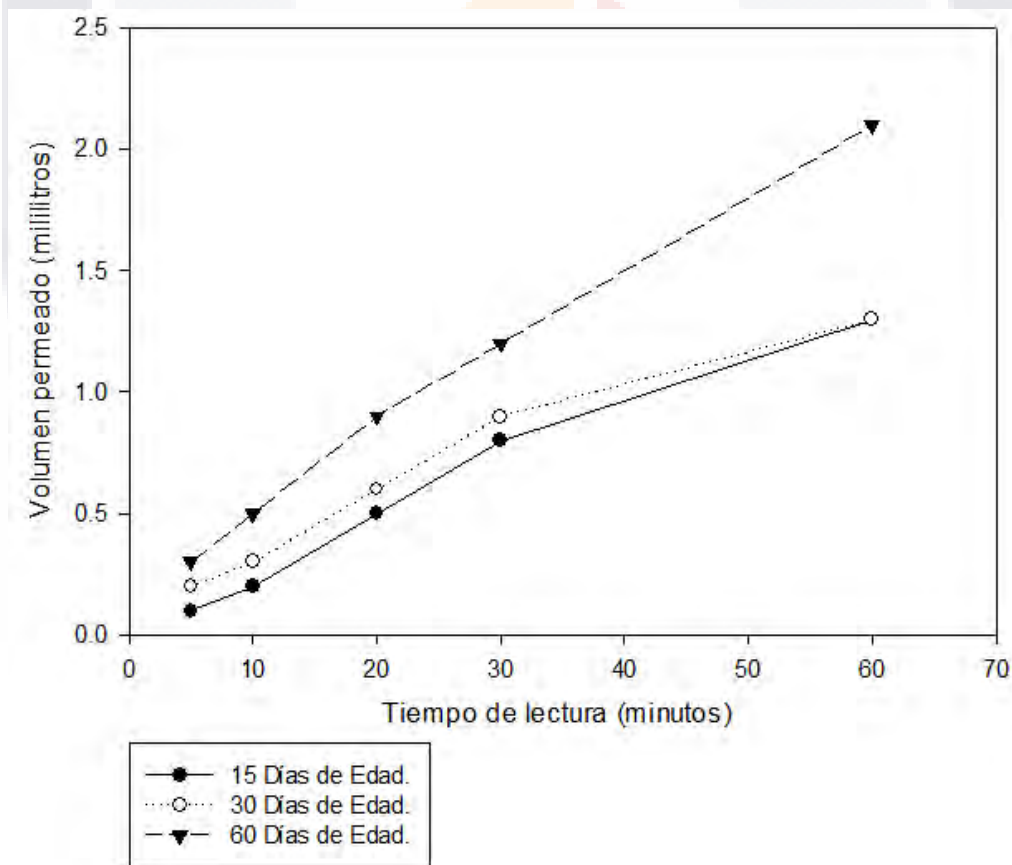
Así mismo, se muestran los resultados de las pruebas de absorción, los resultados de las pruebas de permeabilidad y los resultados de las pruebas de adherencia.

### 6.1 Permeabilidad

A continuación, se pueden apreciar los resultados obtenidos de la campaña experimental en cuanto a permeabilidad mediante ensayos con tubos de Karsten en tablas 27-42 y gráficos 12 a 29 para su mejor comprensión.

Tabla 27. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

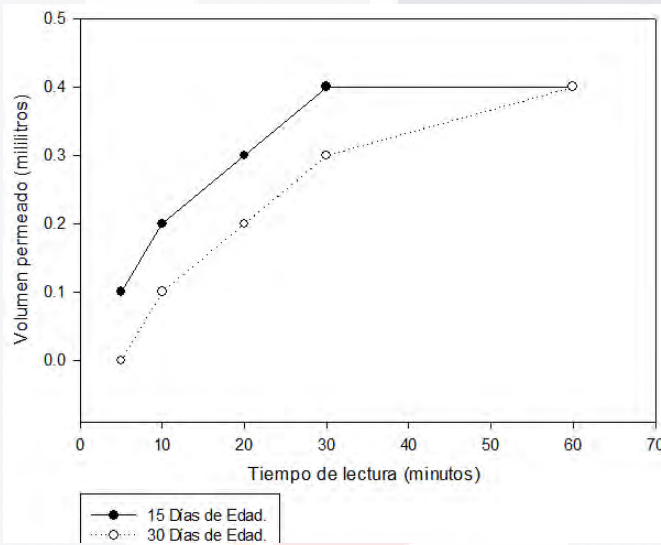
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	MCX1-1	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30	0.50	0.30	0.80	0.50	1.30
30	MCX1-1	0.20	0.20	0.10	0.30	0.30	0.60	0.30	0.90	0.40	1.30
60	MCX1-1	0.30	0.30	0.20	0.50	0.40	0.90	0.30	1.20	0.90	2.10



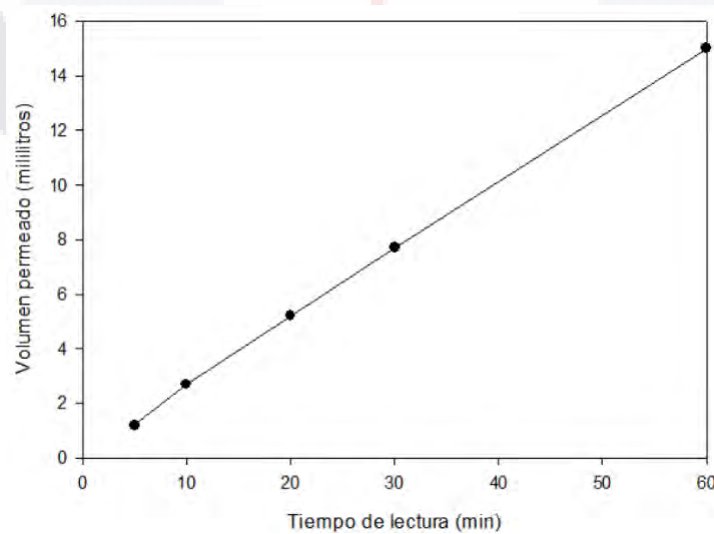
Gráfica 12. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 28. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	MCX2-1	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.30	0.10	0.40	0.00	0.40
30	MCX2-1	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.30	0.10	0.40
60	MCX2-1	1.20	1.20	1.50	2.70	2.50	5.20	2.50	7.70	7.30	15.00



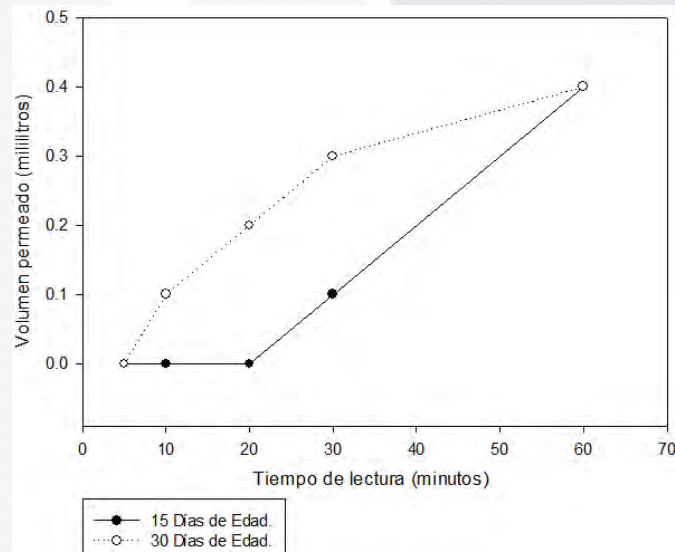
Gráfica 13. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15 y 30 días de edad. Fuente: Propia.



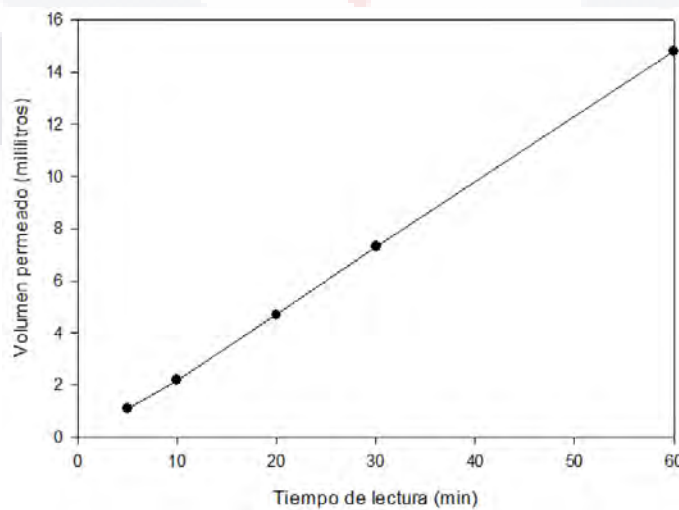
Gráfica 14. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 29. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

		PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
Días	Probeta	5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	MCX3-1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.10	0.10	0.30	0.40
30	MCX3-1	0.00	0.00	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.30	0.10	0.40
60	MCX3-1	1.10	1.10	1.10	2.20	2.50	4.70	2.60	7.30	7.50	14.80



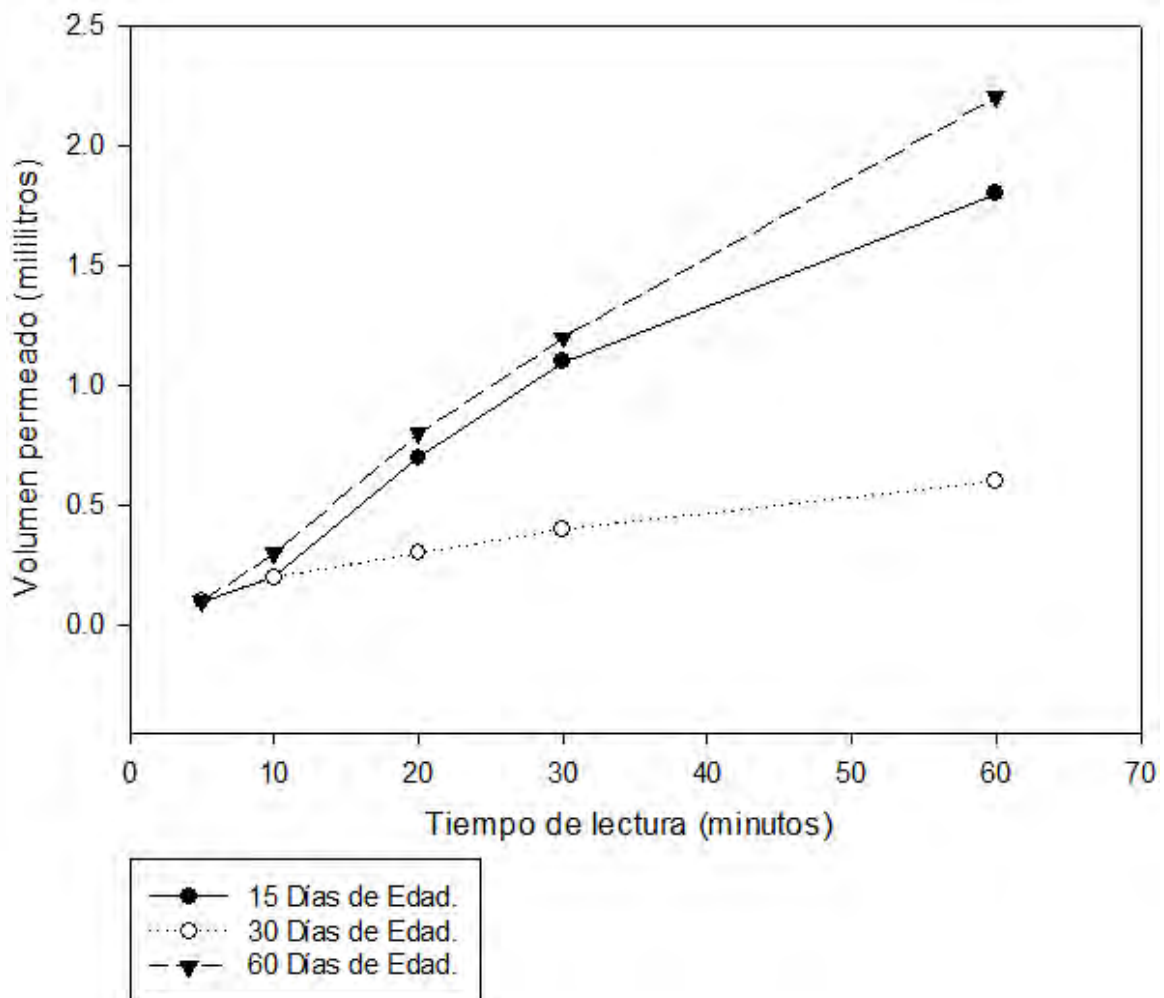
Gráfica 15. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15 y 30 días de edad. Fuente: Propia.



Gráfica 16. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 30. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

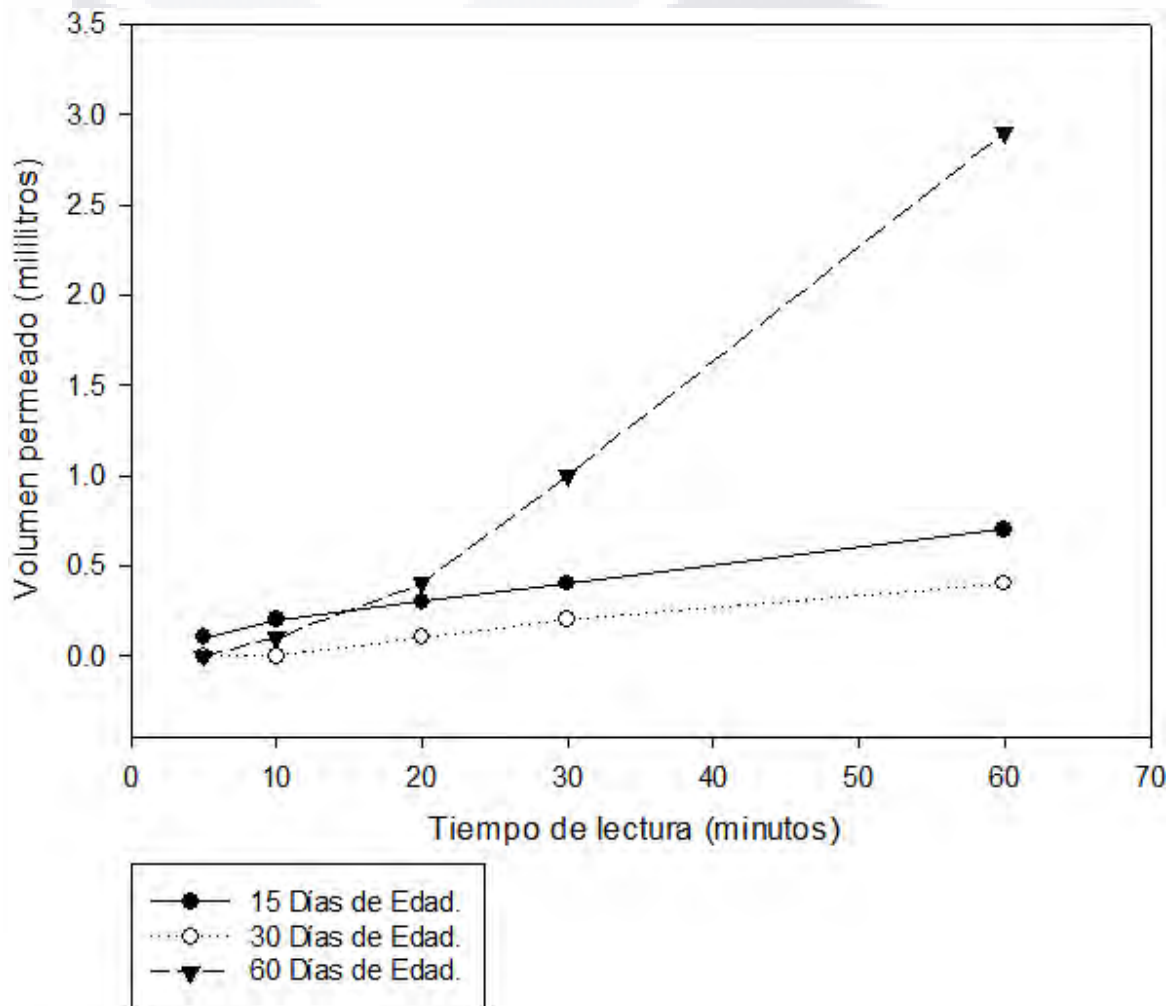
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	TCX1-1	0.10	0.10	0.10	0.20	0.50	0.70	0.40	1.10	0.70	1.80
30	TCX1-1	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.30	0.10	0.40	0.20	0.60
60	TCX1-1	0.10	0.10	0.20	0.30	0.50	0.80	0.40	1.20	1.00	2.20



Gráfica 17. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 31. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	TCX2-1	0.10	0.10	0.10	0.20	0.10	0.30	0.10	0.40	0.30	0.70
30	TCX2-1	0.00	0.00	0.10	0.10	0.00	0.10	0.10	0.20	0.20	0.40
60	TCX2-1	0.00	0.00	0.10	0.10	0.40	0.50	0.50	1.00	1.90	2.90

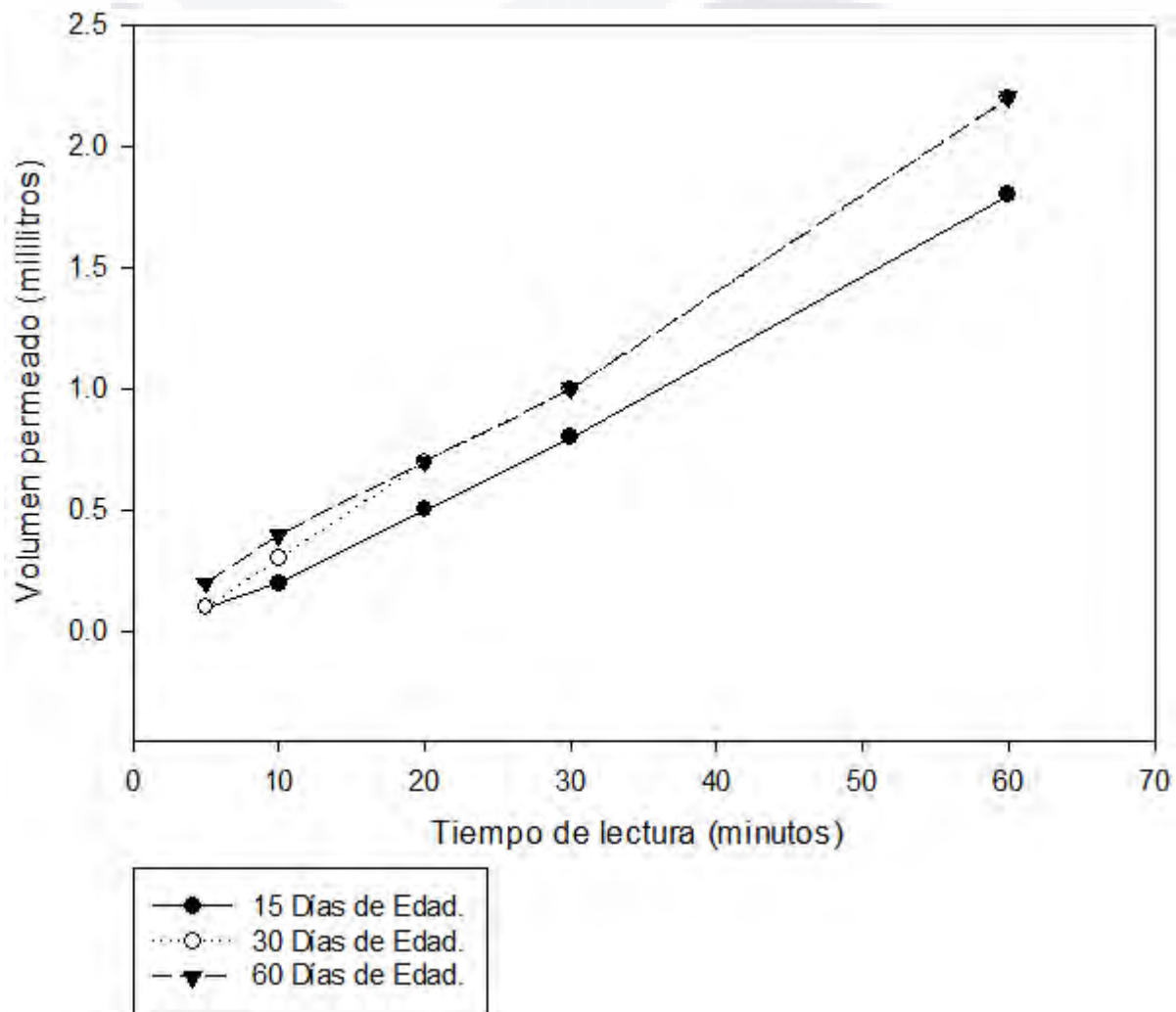


Gráfica 18. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.



Tabla 32. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

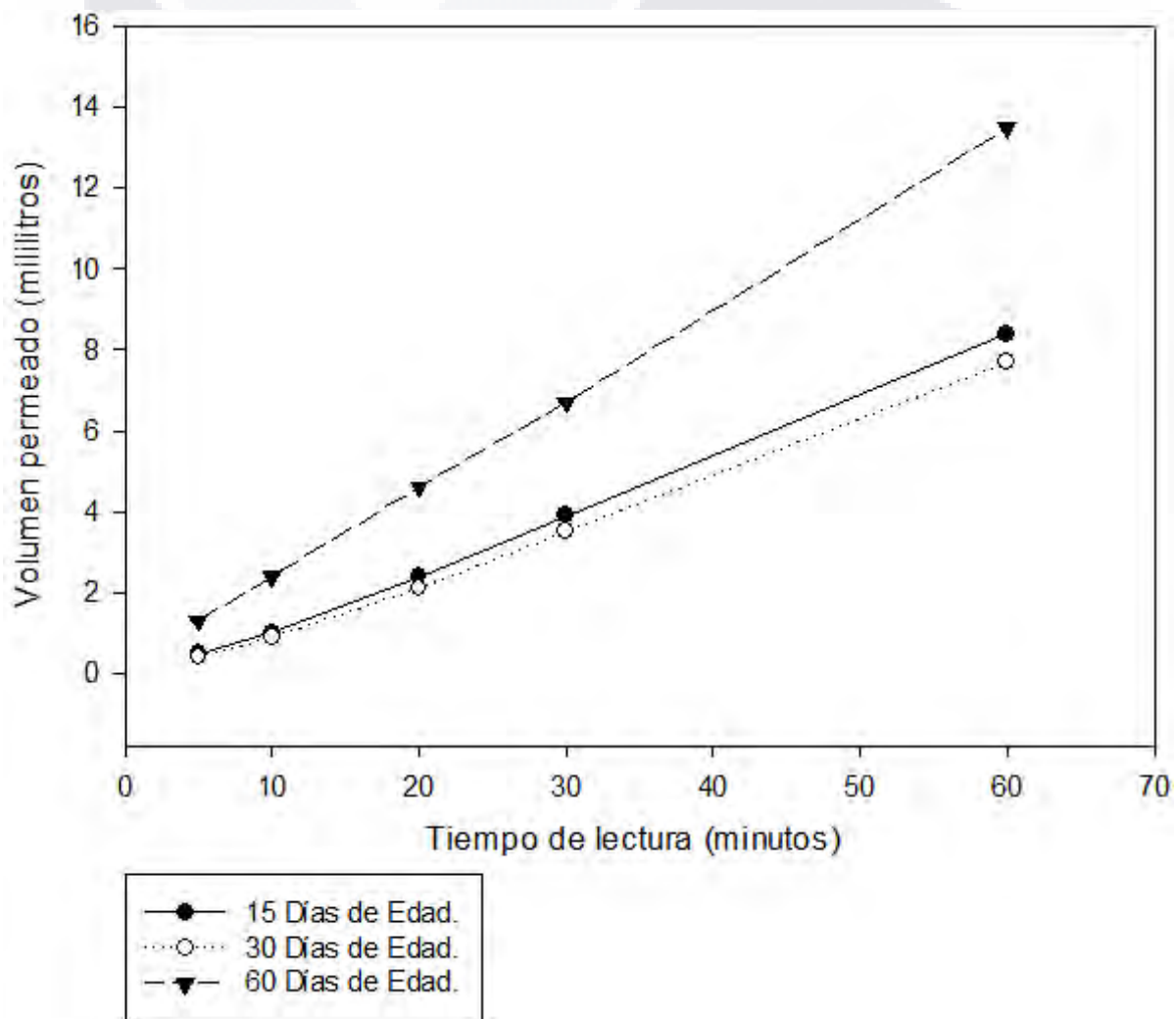
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	TCX3-1	0.10	0.10	0.10	0.20	0.30	0.50	0.30	0.80	1.00	1.80
30	TCX3-1	0.10	0.10	0.20	0.30	0.40	0.70	0.30	1.00	1.20	2.20
60	TCX3-1	0.20	0.20	0.20	0.40	0.30	0.70	0.30	1.00	1.20	2.20



Gráfica 19. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 33. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

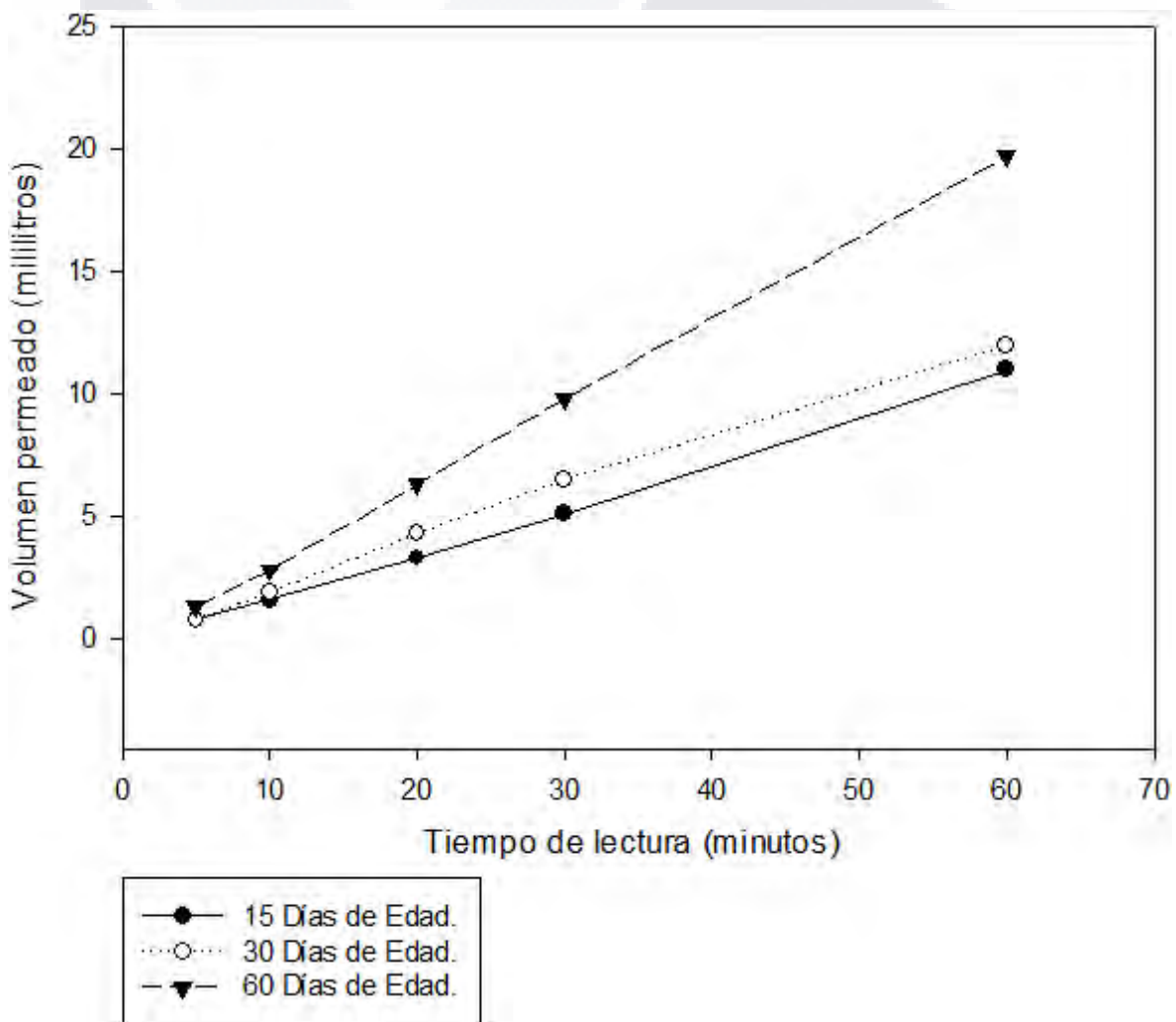
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	MOX1-1	0.50	0.50	0.50	1.00	1.40	2.40	1.50	3.90	4.50	8.40
30	MOX1-1	0.40	0.40	0.50	0.90	1.20	2.10	1.40	3.50	4.20	7.70
60	MOX1-1	1.30	1.30	1.10	2.40	2.20	4.60	2.10	6.70	6.80	13.50



Gráfica 20. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 34. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15,30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

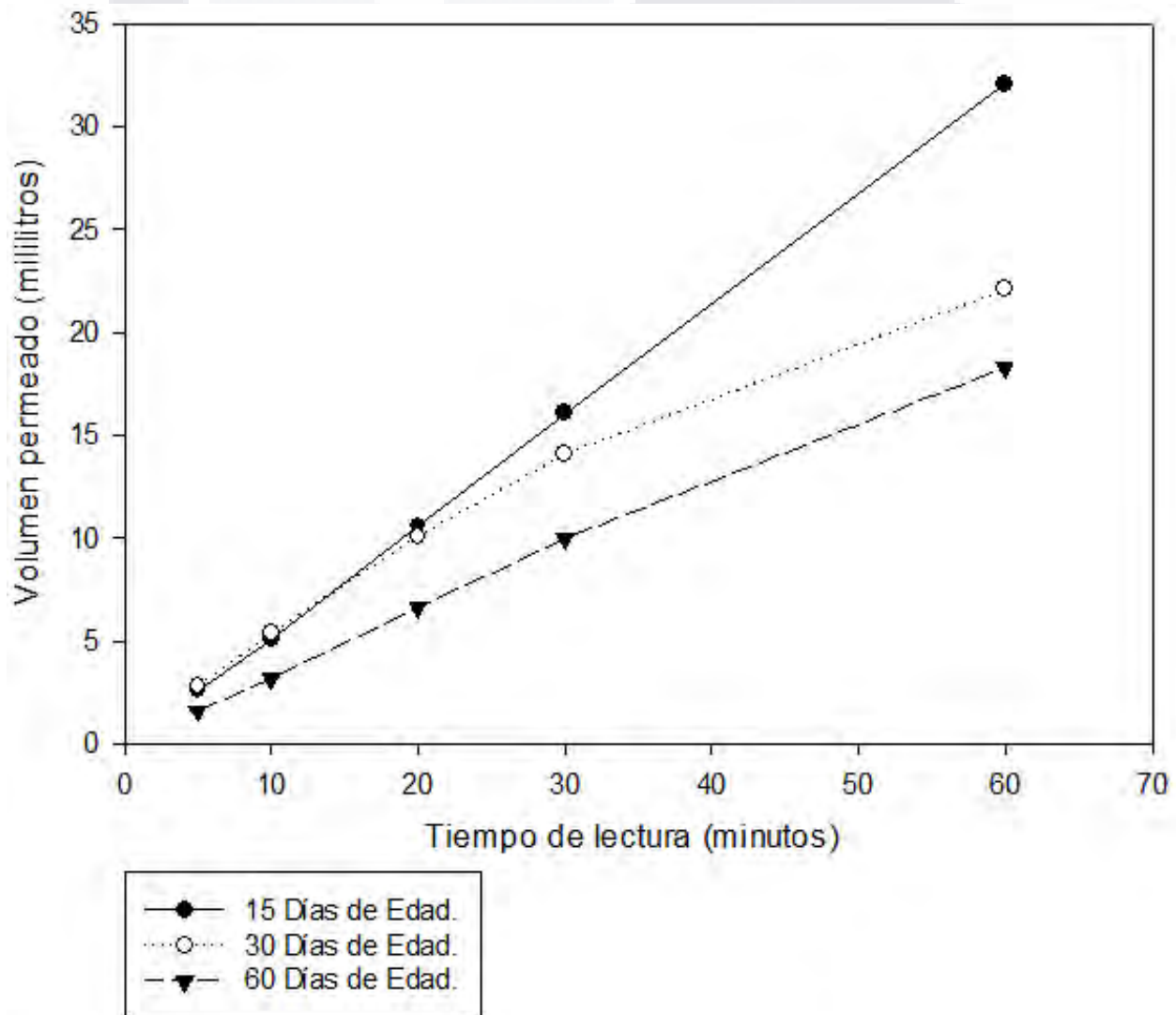
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	MOX2-1	0.80	0.80	0.80	1.60	1.70	3.30	1.80	5.10	5.90	11.00
30	MOX2-1	0.80	0.80	1.10	1.90	2.40	4.30	2.20	6.50	5.50	12.00
60	MOX2-1	1.30	1.30	1.50	2.80	3.50	6.30	3.50	9.80	9.90	19.70



Gráfica 21. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 35. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15 días de edad. Fuente: Propia.

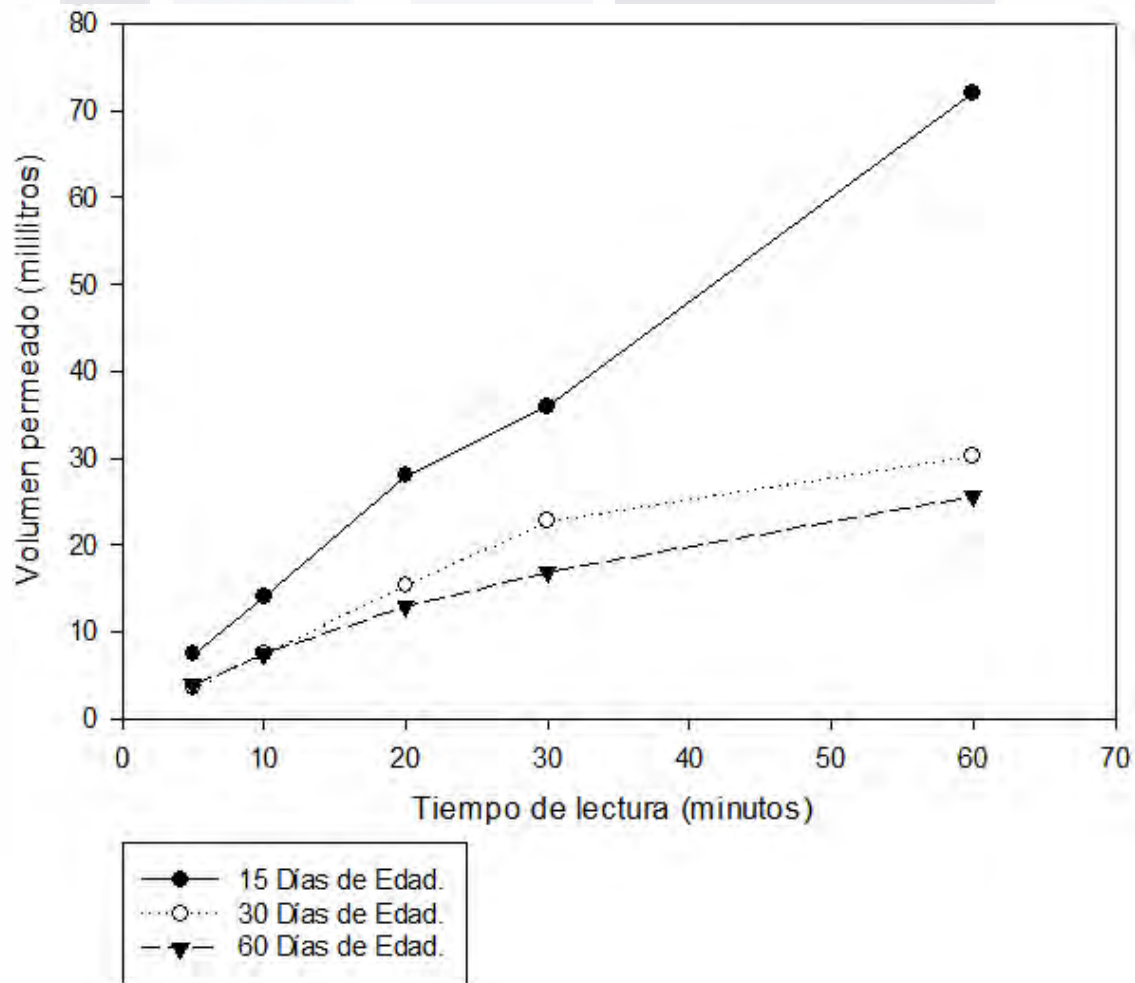
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	MOX3-1	2.60	2.60	2.50	5.10	5.50	10.60	5.50	16.10	16.00	32.10
30	MOX3-1	2.80	2.80	2.60	5.40	4.70	10.10	4.00	14.10	8.00	22.10
60	MOX3-1	1.60	1.60	1.60	3.20	3.40	6.60	3.40	10.00	8.30	18.30



Gráfica 22. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre mortero de cal-arena 1:2 a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 36. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

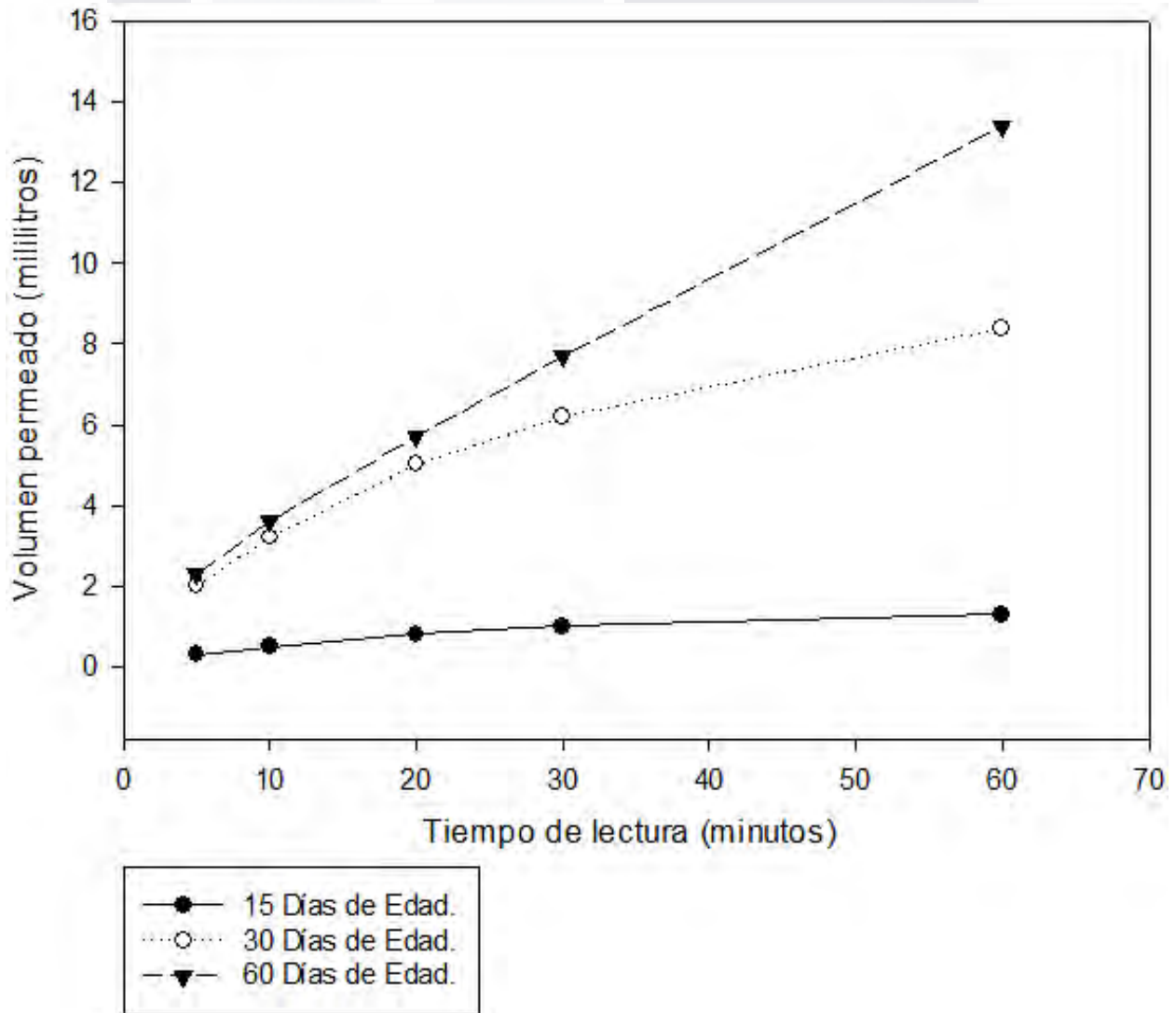
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	TOX1-1	7.50	7.50	6.50	14.00	14.00	28.00	8.00	36.00	36.00	72.00
30	TOX1-1	3.50	3.50	4.00	7.50	7.80	15.30	7.40	22.70	7.50	30.20
60	TOX1-1	4.00	4.00	3.50	7.50	5.40	12.90	4.00	16.90	8.70	25.60



Gráfica 23. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15,30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 37. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

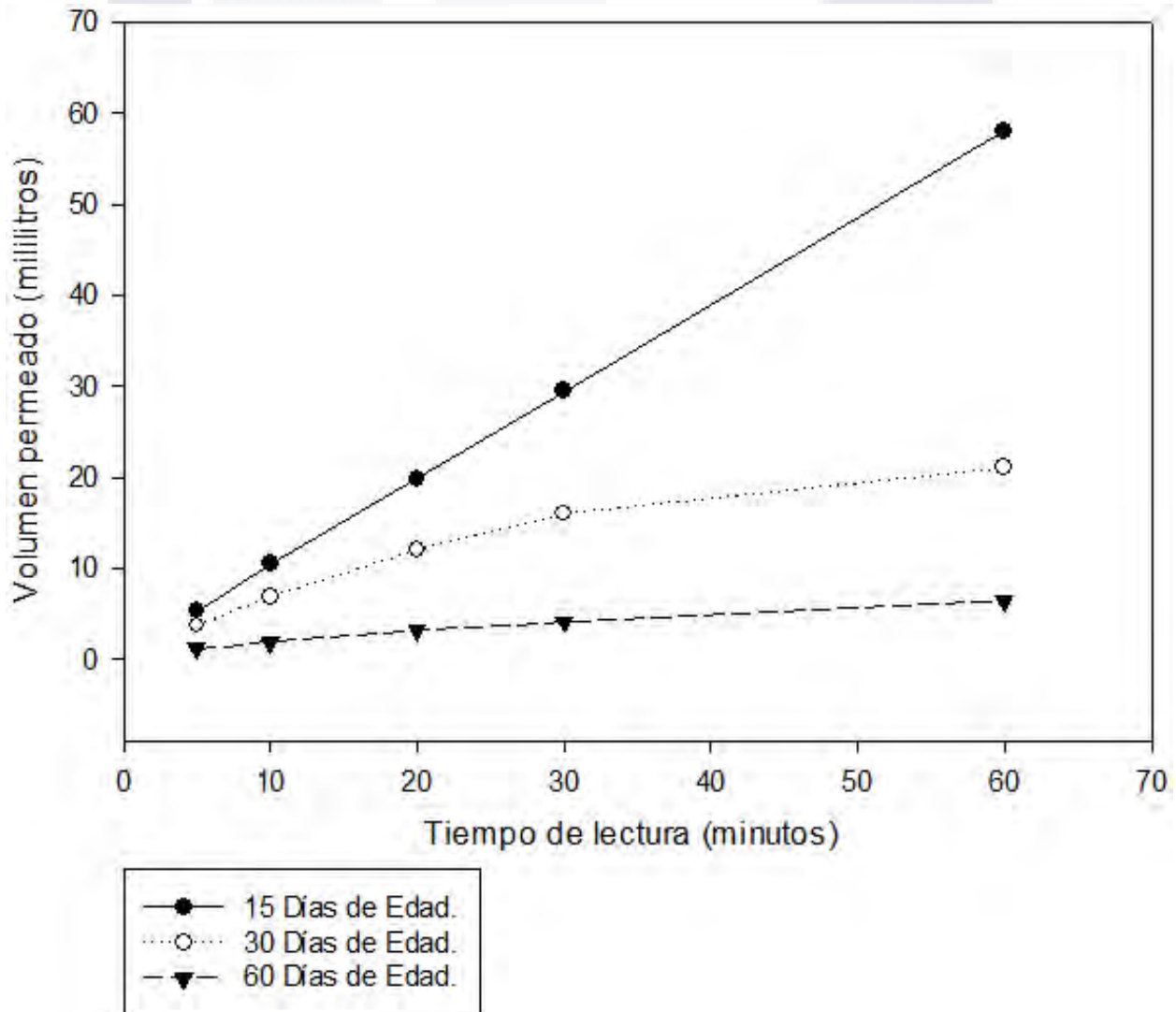
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	TOX2-1	0.30	0.30	0.20	0.50	0.30	0.80	0.20	1.00	0.30	1.30
30	TOX2-1	2.00	2.00	1.20	3.20	1.80	5.00	1.20	6.20	2.20	8.40
60	TOX2-1	2.30	2.30	1.30	3.60	2.10	5.70	2.00	7.70	5.70	13.40



Gráfica 24. Resultados comparativos de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 38. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

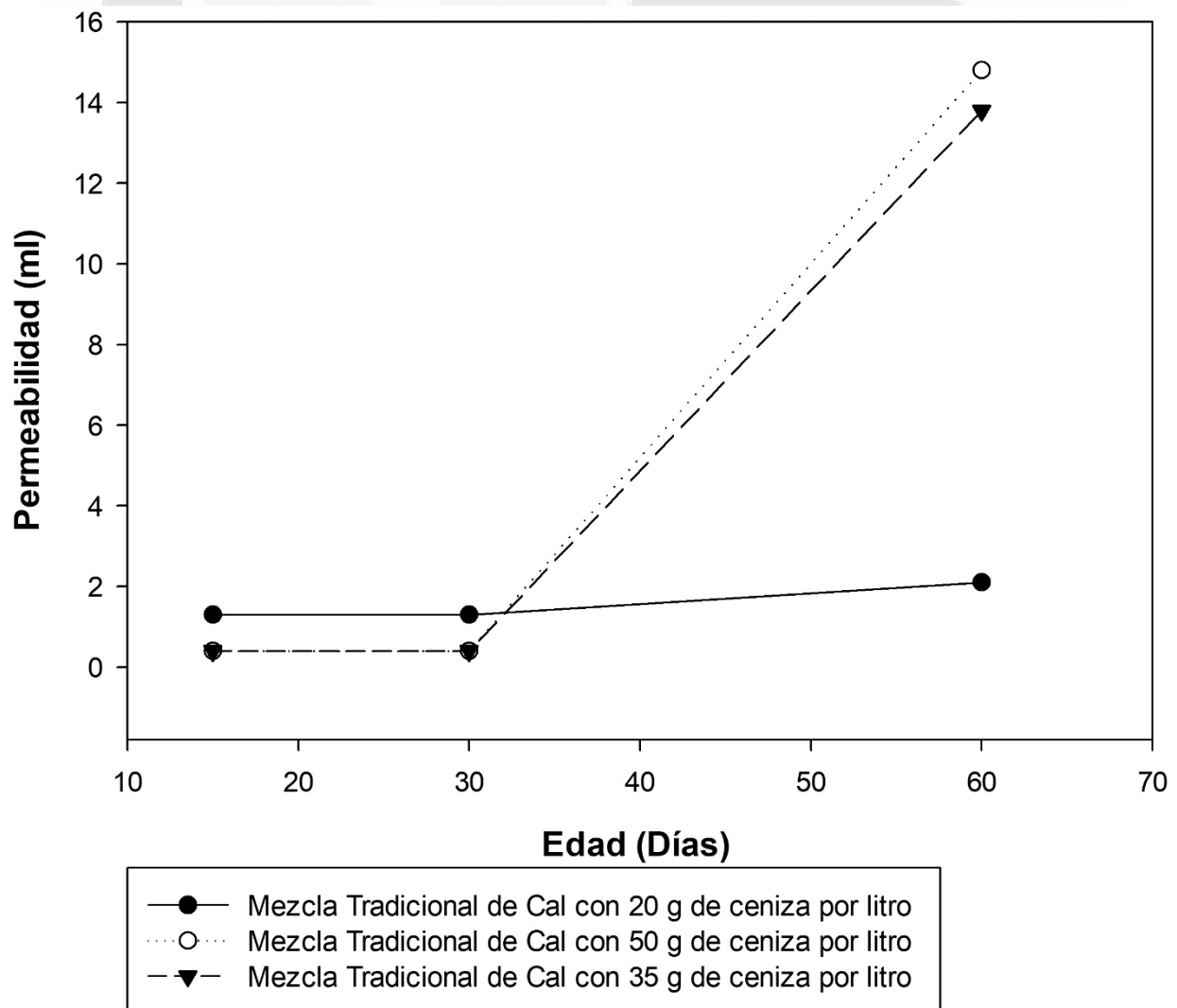
Días	Probeta	PERMEABILIDAD ACUMULADA (mililitros)									
		5 Minutos		10 Minutos		20 Minutos		30 Minutos		60 Minutos	
		Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.	Lectura	Acum.
15	TOX3-1	5.30	5.30	5.10	10.40	9.40	19.80	9.70	29.50	28.50	58.00
30	TOX3-1	3.70	3.70	3.20	6.90	5.10	12.00	4.00	16.00	5.00	21.00
60	TOX3-1	1.10	1.10	0.80	1.90	1.20	3.10	1.00	4.10	2.30	6.40



Gráfica 25. Resultados de permeabilidad por tubo de Karsten de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre cuña de barro rojo recocido a 15, 30 y 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 39. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

MEZCLA TRADICIONAL DE CAL SOBRE MORTERO CAL-ARENA 1:2				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	ml. acum.	20	50	35
15		1.30	0.40	0.40
30		1.30	0.40	0.40
60		2.10	14.80	13.80

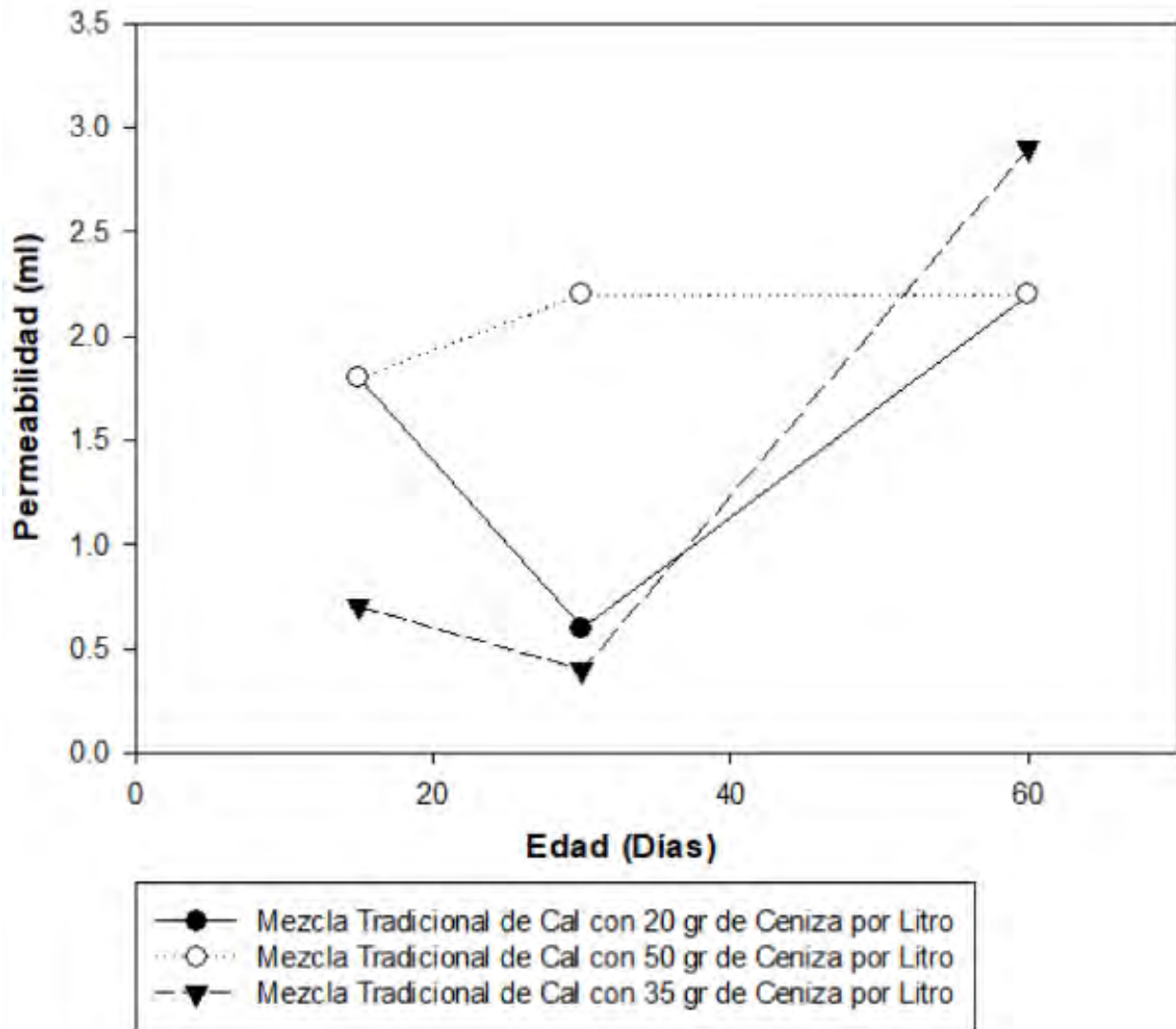


Gráfica 26. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia.



Tabla 40. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

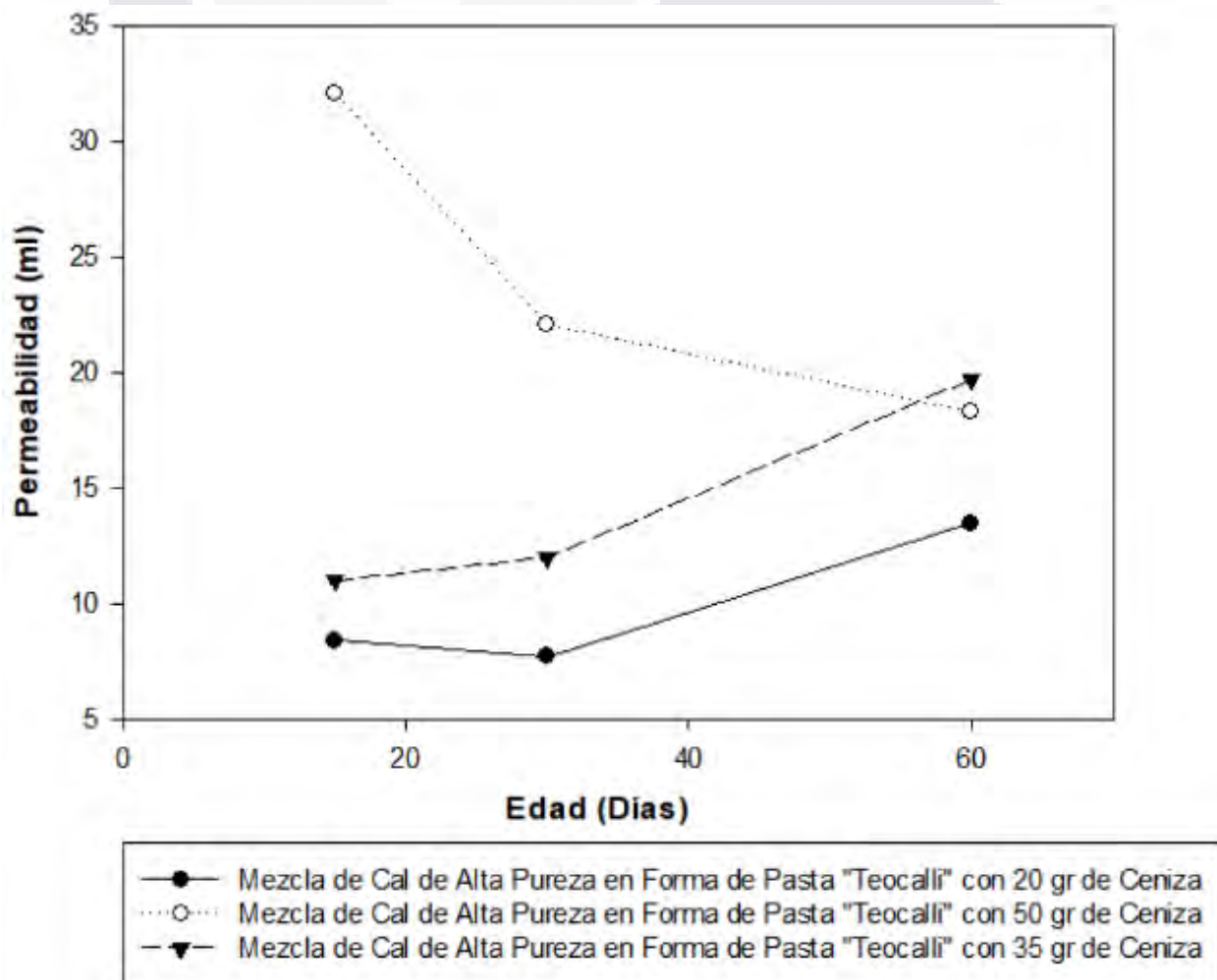
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL SOBRE CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO				
EDAD (DÍAS)	ml. acum.	CENIZAS POR LITRO (gr)		
		20	50	35
15	1.80	1.80	0.70	
30	0.60	2.20	0.40	
60	2.20	2.20	2.90	



Gráfica 27. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

Tabla 41. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

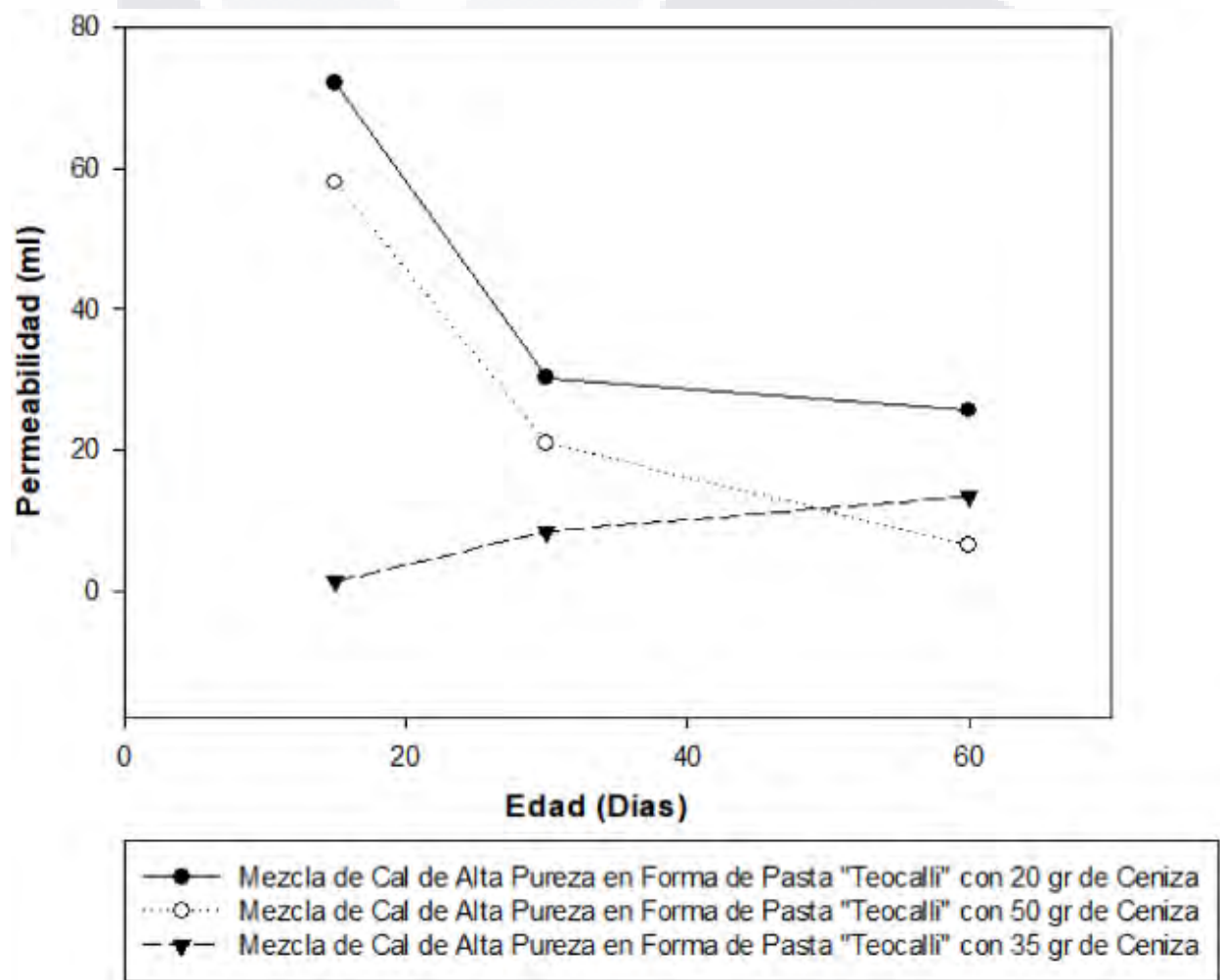
MEZCLA DE CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI" SOBRE MORTERO CAL-ARENA 1:2				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	ml. acum.	20	50	35
15		8.40	32.10	11.00
30		7.70	22.10	12.00
60		13.50	18.30	19.70



Gráfica 28. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

Tabla 42. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

MEZCLA DE CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI" SOBRE CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	ml. acum.	20	50	35
15		72.00	58.00	1.30
30		30.20	21.00	8.40
60		25.60	6.40	13.40



Gráfica 29. Resultados comparativos de permeabilidad acumulada de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por tubo de Karsten. Fuente: Propia.

## 6.2 Adherencia

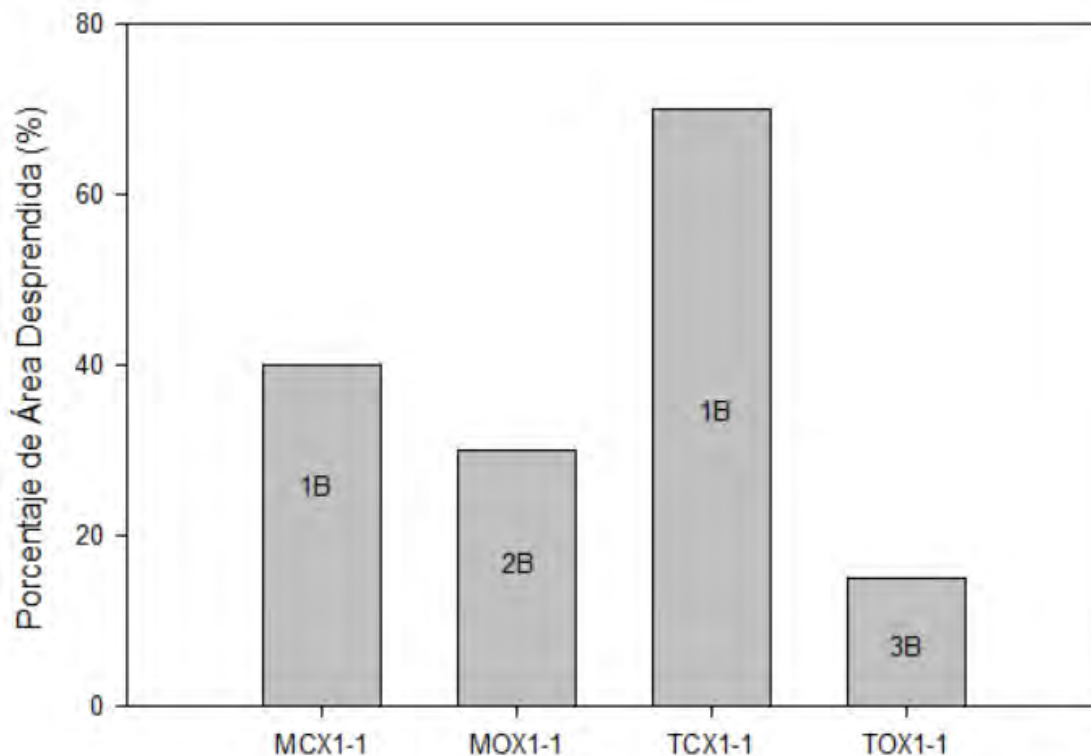
A continuación, mediante las tablas y gráficos demostrados se pueden observar los resultados obtenidos a través de la campaña experimental del parámetro de adherencia en las tablas 43 a 64 y gráficos 30 a 42.

Tabla 43. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

15 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX1-1	1B	40%
	TCX1-1	1B	70%

Tabla 44. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

15 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX1-1	2B	30%
	TOX1-1	3B	15%



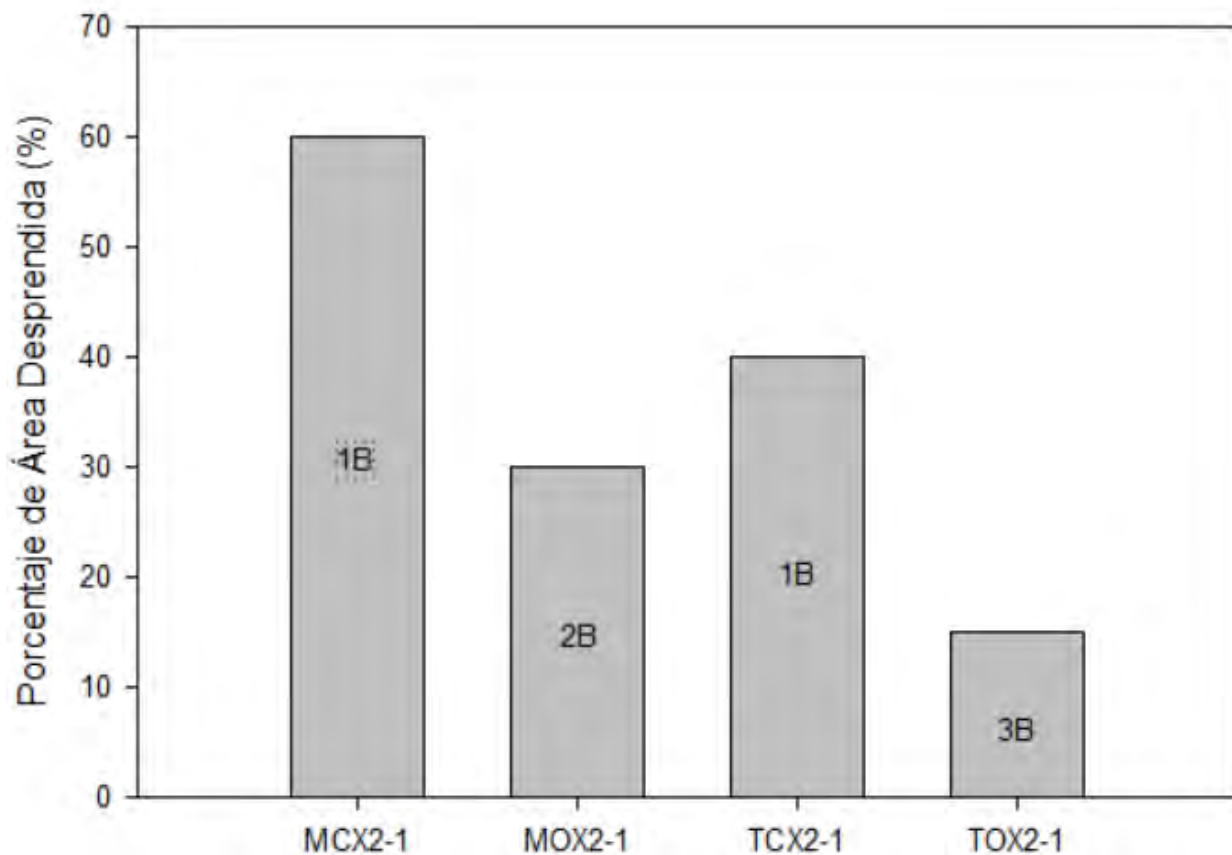
Gráfica 30. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 45. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

15 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX2-1	1B	60%
	TCX2-1	1B	40%

Tabla 46. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocal" adicionada con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

15 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX2-1	2B	30%
	TOX2-1	3B	15%



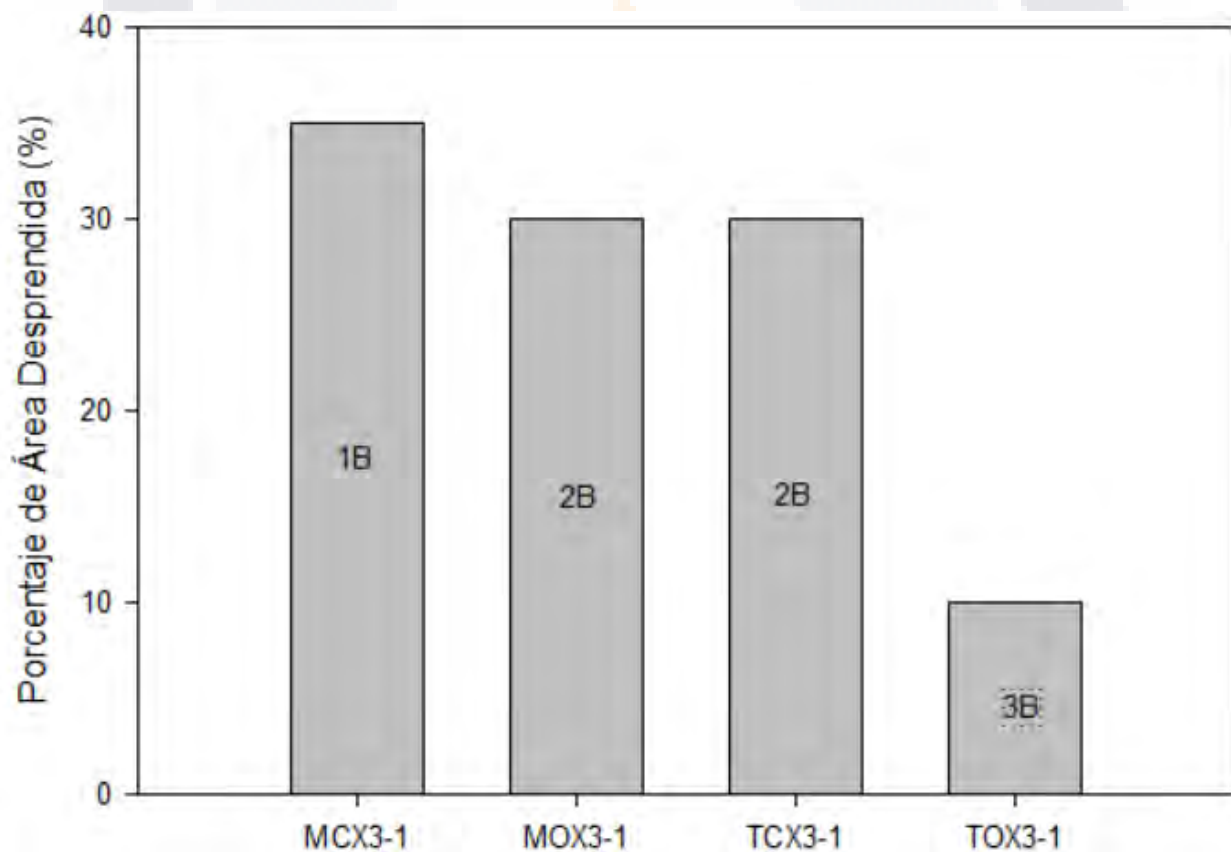
Gráfica 31. Resultados de Adherencia de Campaña Experimental de Mezclas de Cal adicionadas con 35 g/lit de Ceniza por Método de Revisión de Desgaste de las Superficies (Norma ASTM) sobre superficies de Mortero de Cal-Arena 1:2 y Cuña de Barro Rojo Recocido a 15 días de Edad. Fuente: Propia.

Tabla 47. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

15 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX3-1	1B	35%
	TCX3-1	2B	30%

Tabla 48. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocal" adicionada con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

15 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX3-1	2B	30%
	TOX3-1	3B	10%



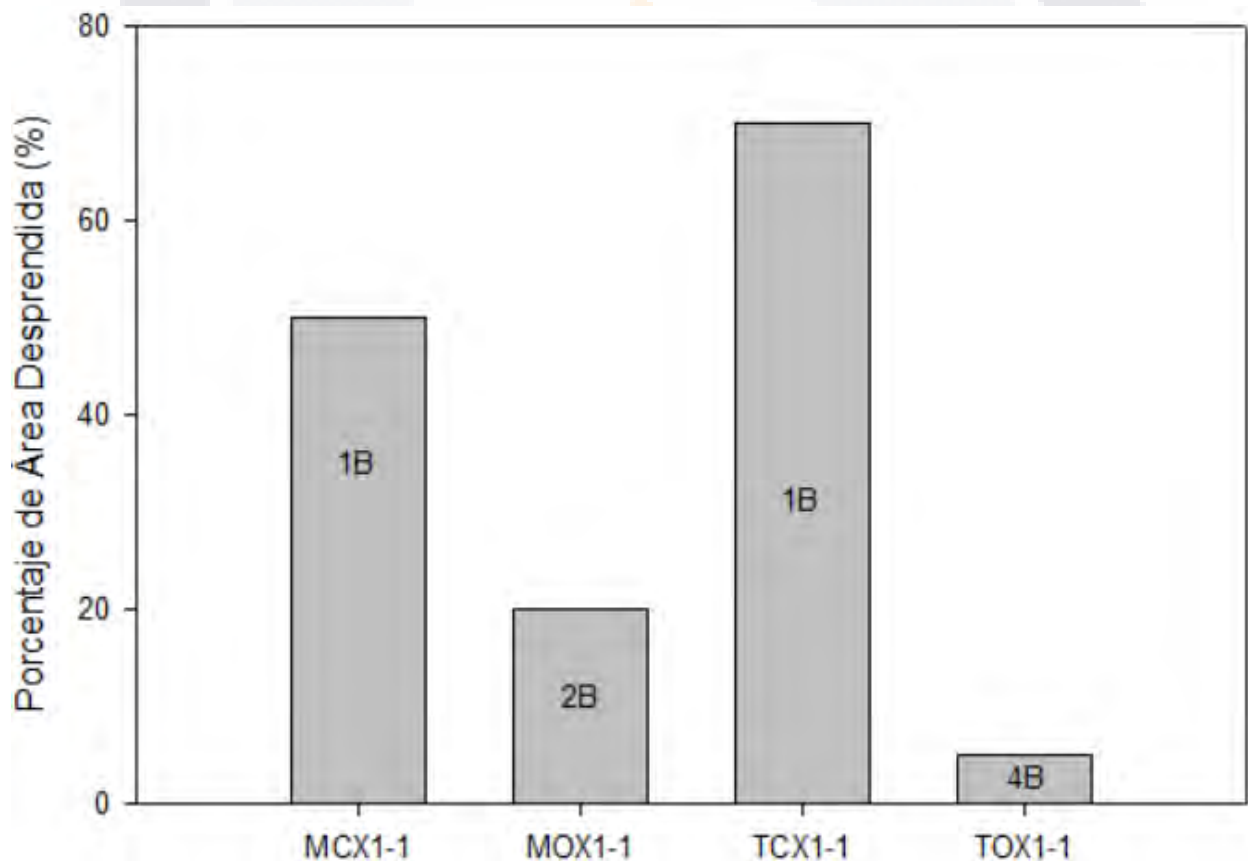
Gráfica 32. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 49. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

30 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX1-1	1B	50%
	TCX1-1	1B	70%

Tabla 50. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

30 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX1-1	2B	20%
	TOX1-1	4B	<5%



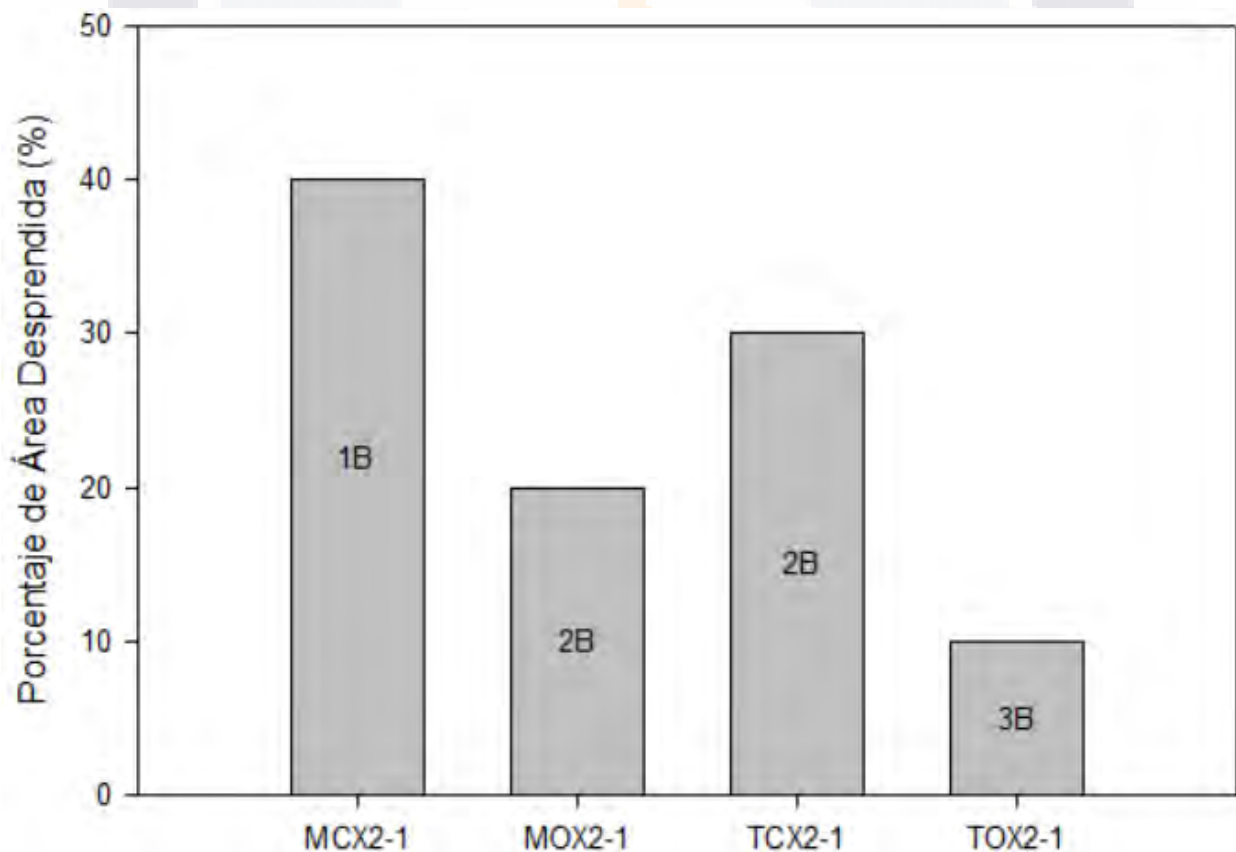
Gráfica 33. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 51. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

30 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX2-1	1B	40%
	TCX2-1	2B	30%

Tabla 52. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocal" adicionada con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

30 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX2-1	2B	20%
	TOX2-1	3B	10%



Gráfica 34. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lt de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

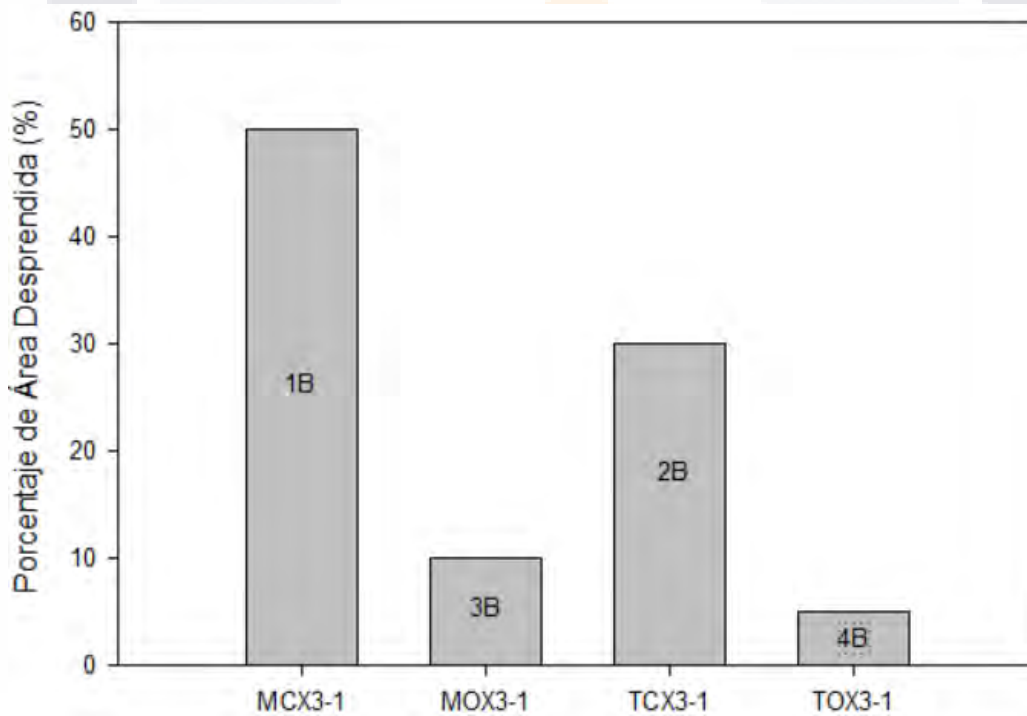


Tabla 53. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

30 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX3-1	1B	50%
	TCX3-1	2B	30%

Tabla 54. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocal" adicionada con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

30 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX3-1	3B	10%
	TOX3-1	4B	5%



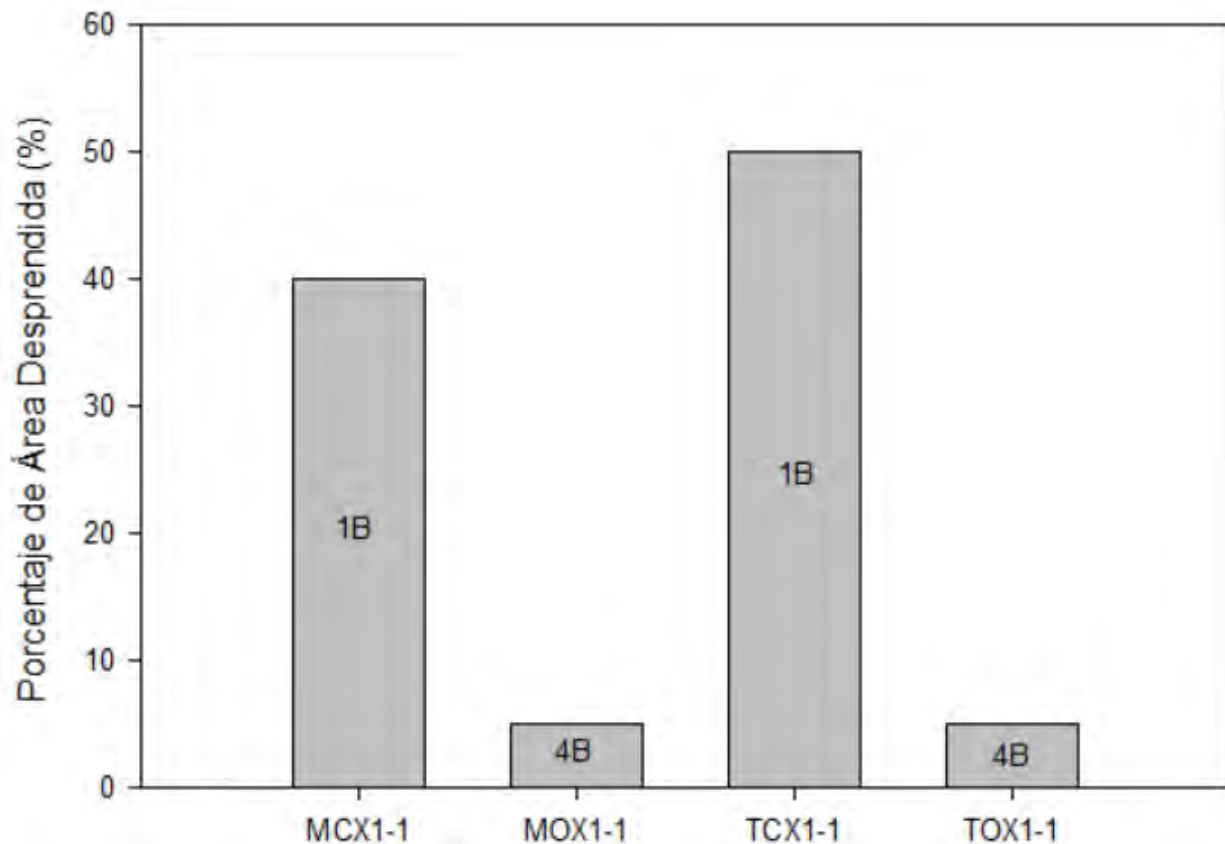
Gráfica 35. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma astm) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 55. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

60 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX1-1	1B	40%
	TCX1-1	1B	50%

Tabla 56. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocal" adicionada con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

60 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX1-1	4B	5%
	TOX1-1	4B	<5%



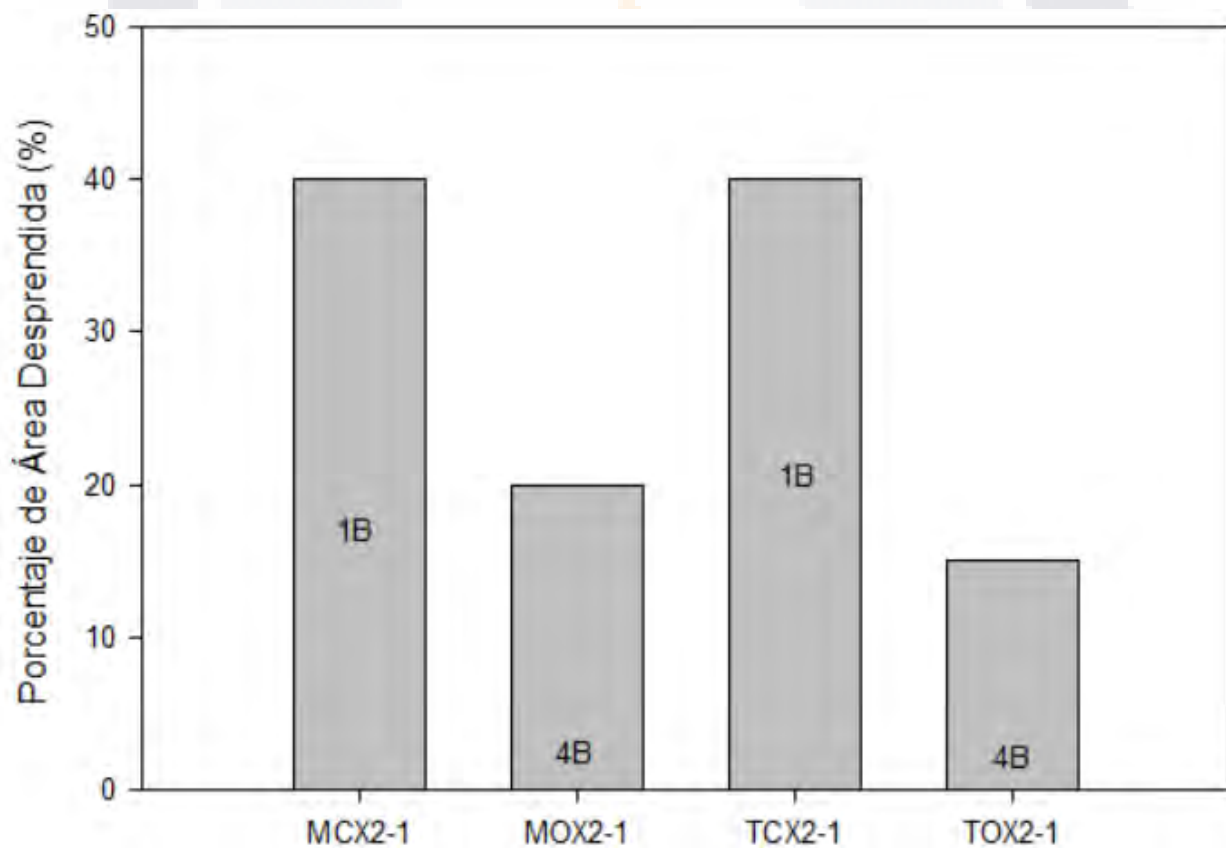
Gráfica 36. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 57. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

60 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX2-1	1B	40%
	TCX2-1	1B	40%

Tabla 58. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

60 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX2-1	2B	20%
	TOX2-1	3B	15%



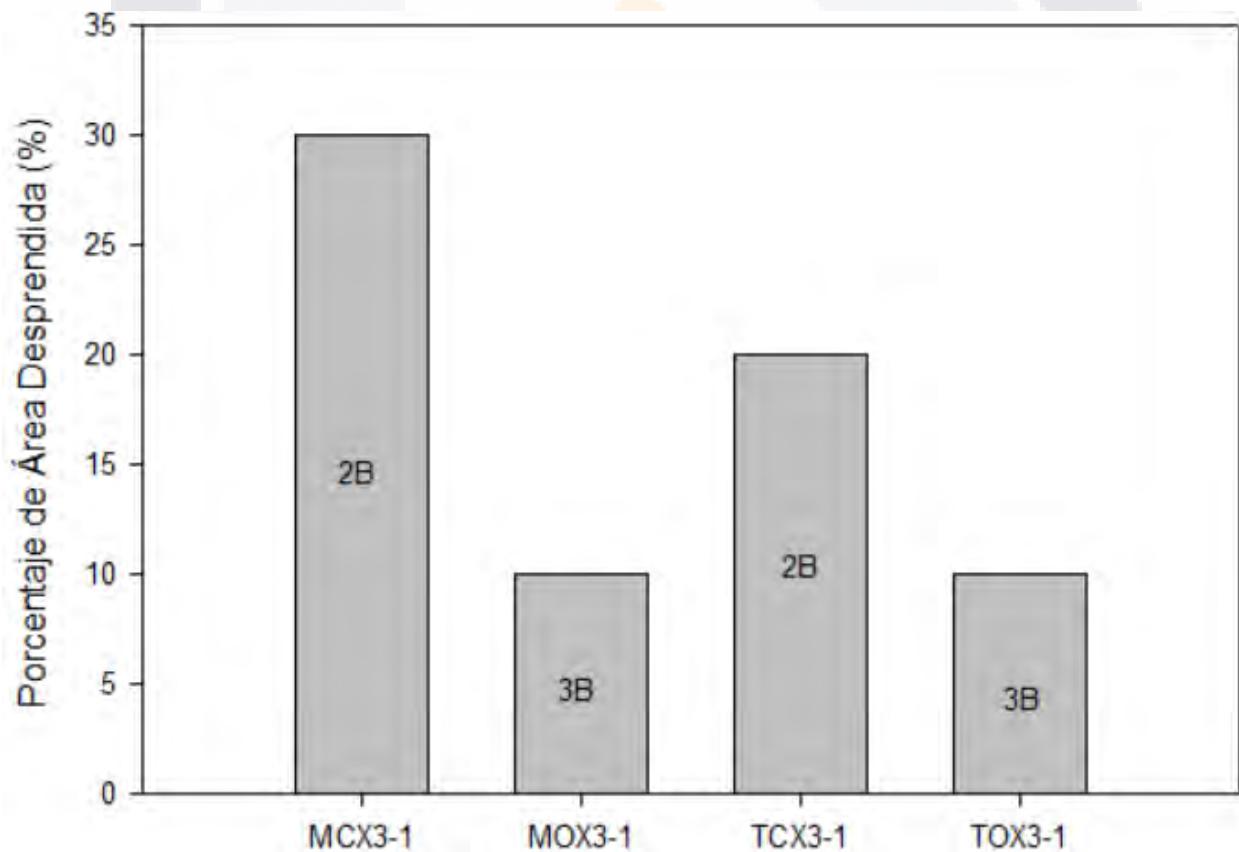
Gráfica 37. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 59. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

60 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MCX3-1	2B	30%
	TCX3-1	2B	20%

Tabla 60. Resultados de adherencia de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocal" adicionada con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

60 DÍAS	PROBETA	ÁREA REMOVIDA	
		Clasificación	Porcentaje
	MOX3-1	3B	10%
	TOX3-1	3B	10%

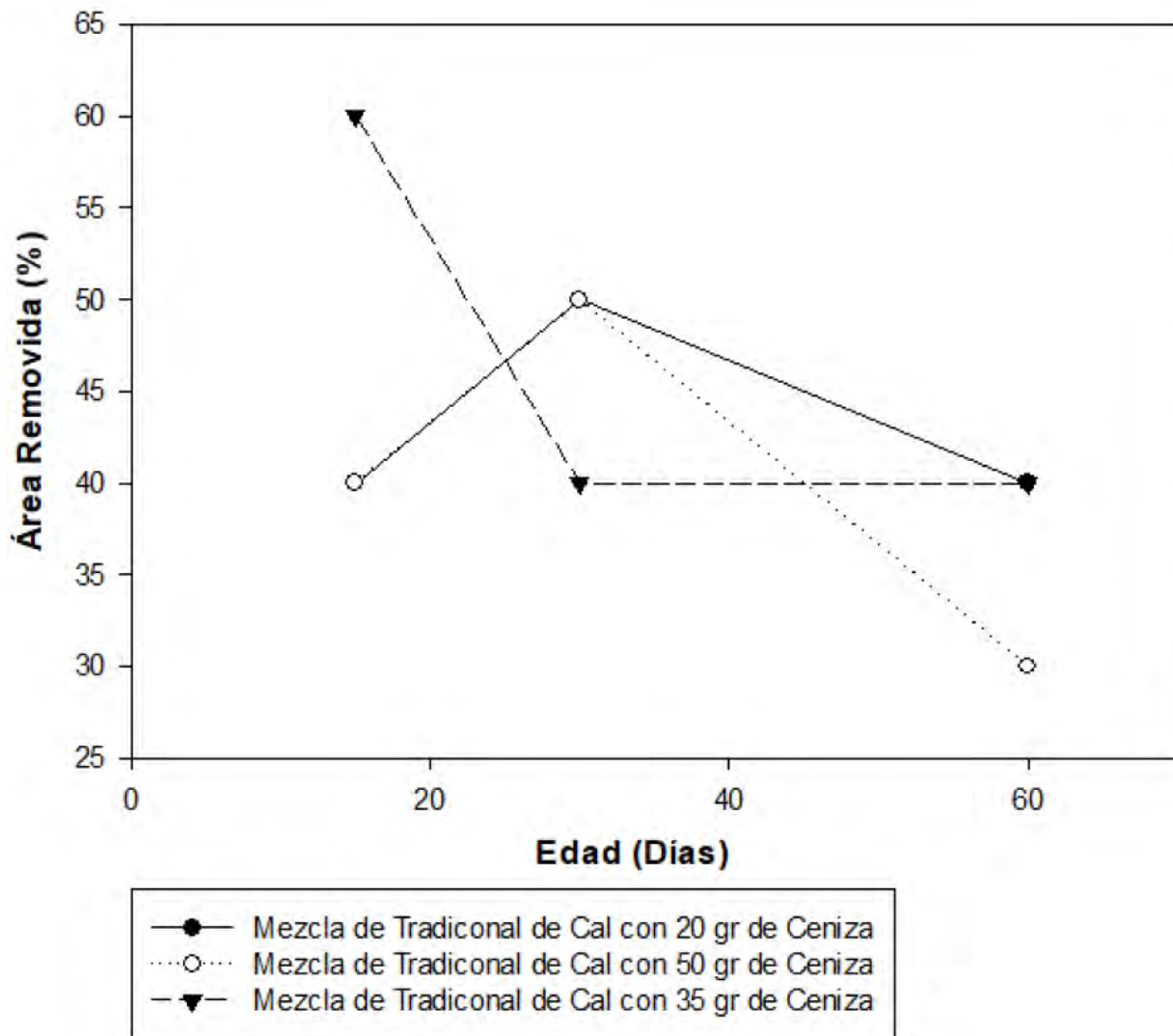


Gráfica 38. Resultados de adherencia de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM) sobre superficies de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 61. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

MEZCLA TRADICIONAL DE CAL SOBRE MORTERO CAL-ARENA 1:2				
CENIZAS POR LITRO (gr)				
EDAD (DÍAS)	% DP	20	50	35
15		40%	35%	60%
30		50%	50%	40%
60		40%	30%	40%

% DP: Porcentaje de área desprendida.

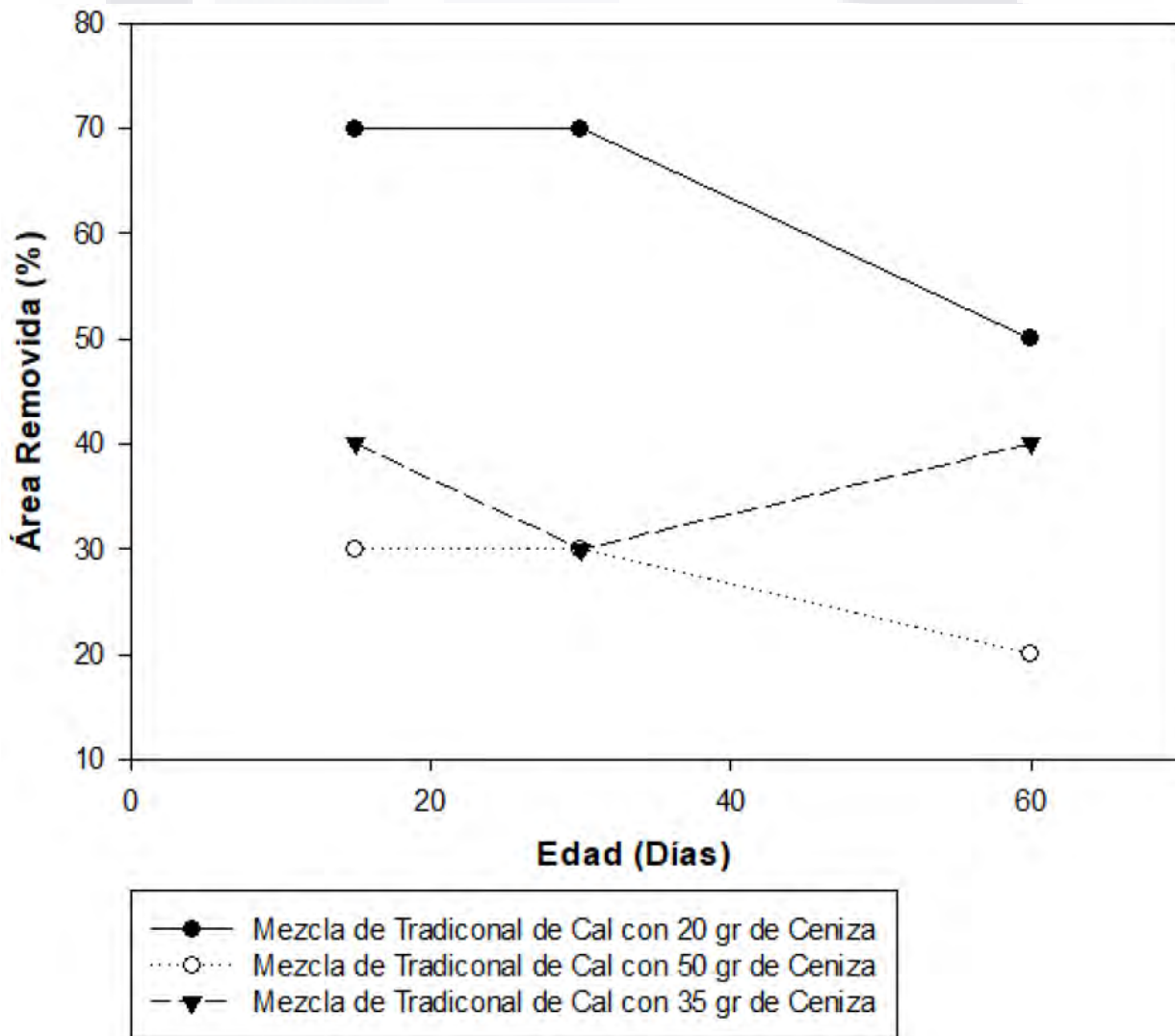


Gráfica 39. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

Tabla 62. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

MEZCLA TRADICIONAL DE CAL SOBRE CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	% DP	20	50	35
15		70%	30%	40%
30		70%	30%	30%
60		50%	20%	40%

% DP: Porcentaje de área desprendida.

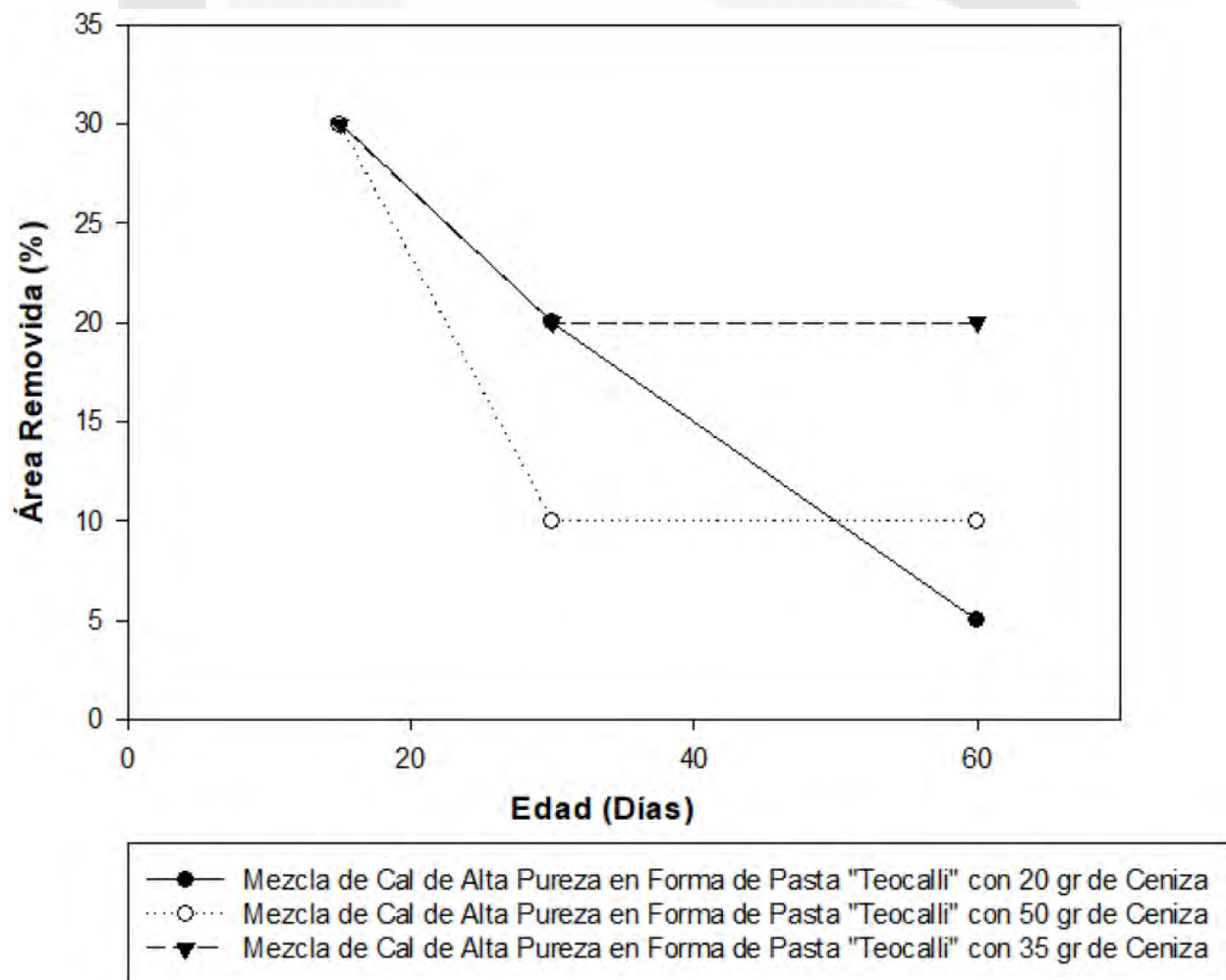


Gráfica 40. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

Tabla 63. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

MEZCLA DE CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI" SOBRE MORTERO CAL-ARENA 1:2					
		GENIZAS POR LITRO (gr)			
		% DP	20	50	35
EDAD (DÍAS)	15		30%	30%	30%
	30		20%	10%	20%
	60		5%	10%	20%

% DP: Porcentaje de área desprendida.

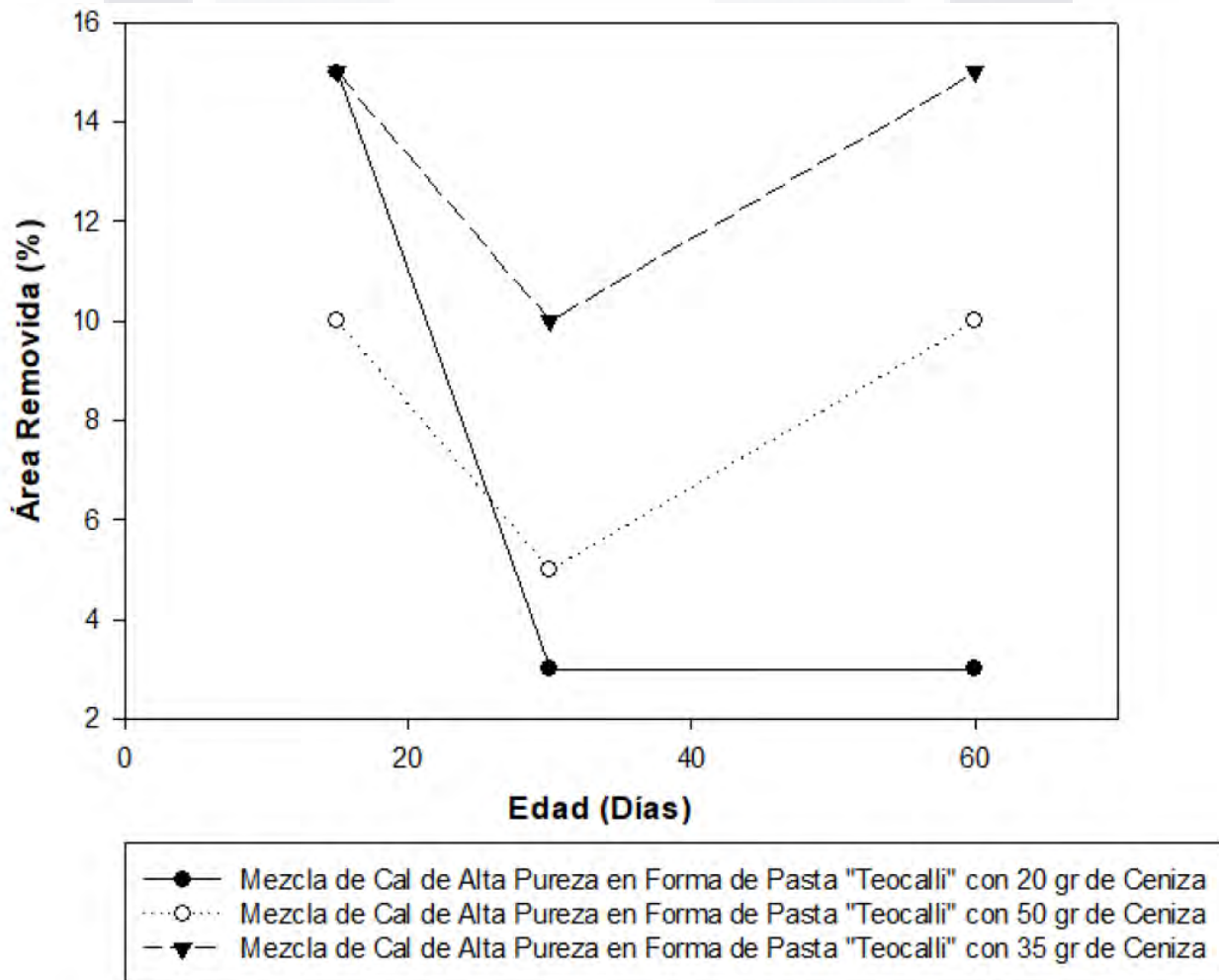


Gráfica 41. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre mortero cal-arena 1:2 por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

Tabla 64. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.

MEZCLA DE CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI" SOBRE CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO				
CENIZAS POR LITRO (gr)				
EDAD (DÍAS)	% DP	20	50	35
15		15%	10%	15%
30		<5%	5%	10%
60		<5%	10%	15%

% DP: Porcentaje de área desprendida.



Gráfica 42. Resultados comparativos de porcentaje de área desprendida de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo sobre cuña de barro rojo recocido por método de revisión de desgaste de las superficies (norma ASTM). Fuente: Propia.



### 6.3 Absorción

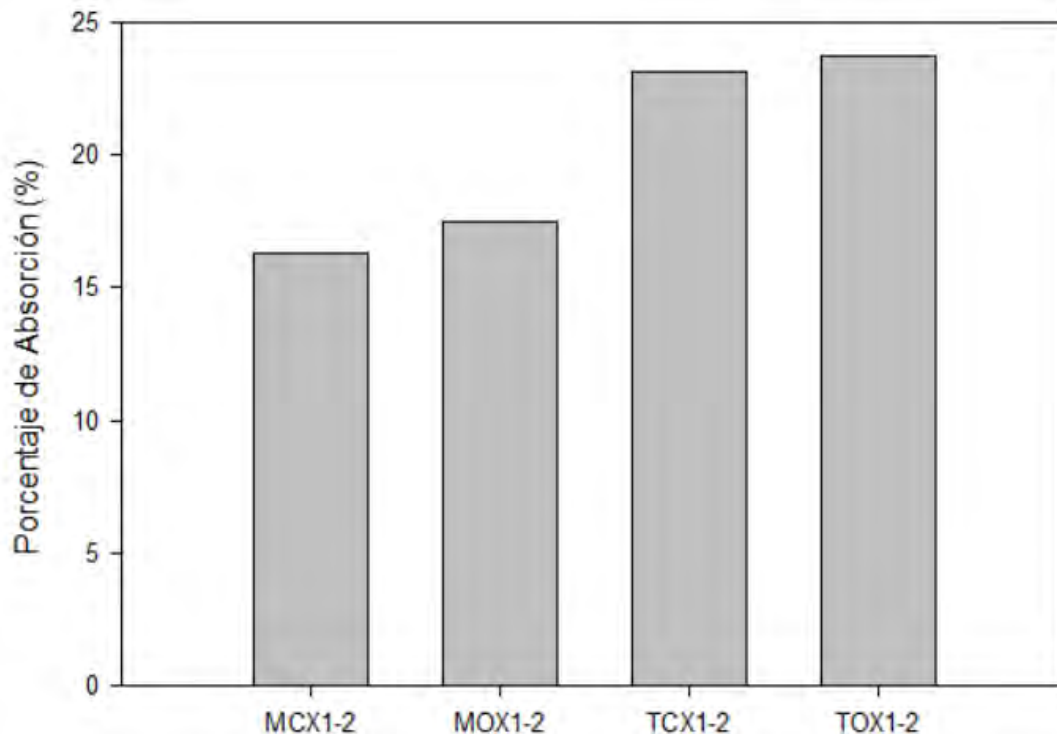
Los datos obtenidos de la campaña experimental del parámetro absorción se pueden apreciar mediante las tablas 65 a y gráficas 43 a que se muestran a continuación.

Tabla 65. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX1-2	30	15	3	2680	3117	437	16.3%
TCX1-2	20	10	5	1493	1838	345	23.1%

Tabla 66. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX1-2	30	15	3	2572	3022	450	17.5%
TOX1-2	20	10	5	1456	1802	346	23.8%



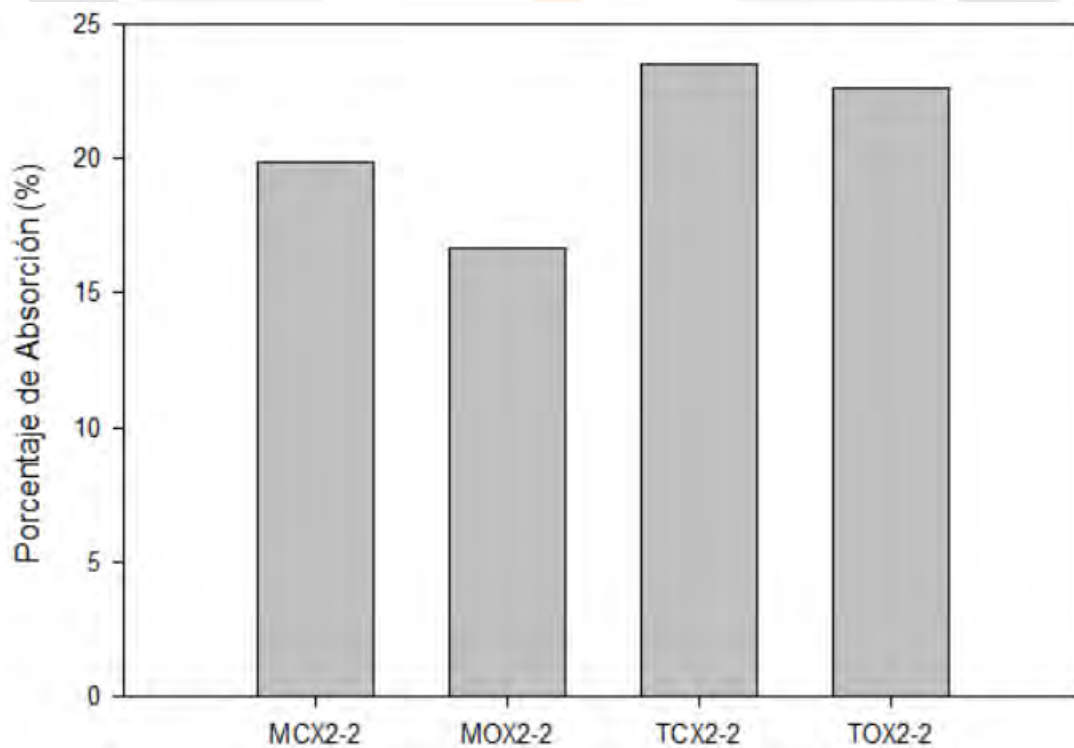
Gráfica 43. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 67. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX2-2	30	15	3	2346	2812	466	19.9%
TCX2-2	20	10	5	1430	1766	336	23.5%

Tabla 68. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX2-2	30	15	3	2346	2843	406	16.7%
TOX2-2	20	10	5	1430	1754	324	22.7%



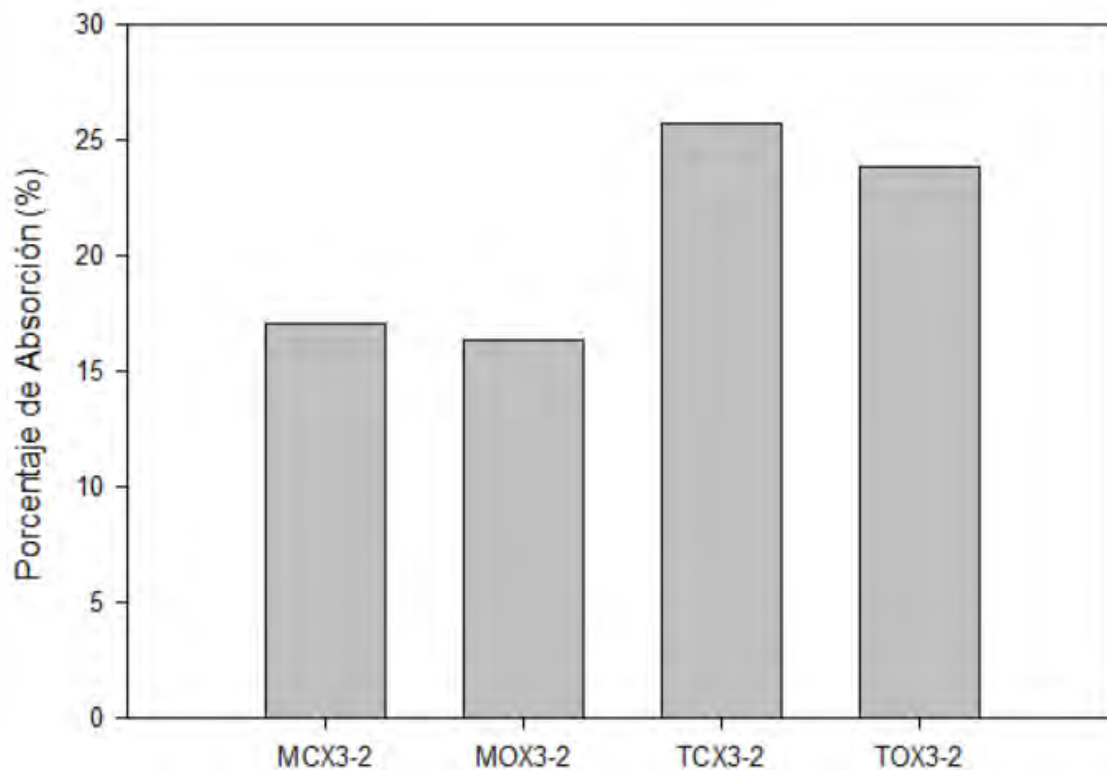
Gráfica 44. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 69. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocado a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX3-2	30	15	3	2479	2902	423	17.1%
TCX3-2	20	10	5	1514	1904	390	25.8%

Tabla 70. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocado a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX3-2	30	15	3	2442	2841	399	16.3%
TOX3-2	20	10	5	1530	1895	365	23.9%



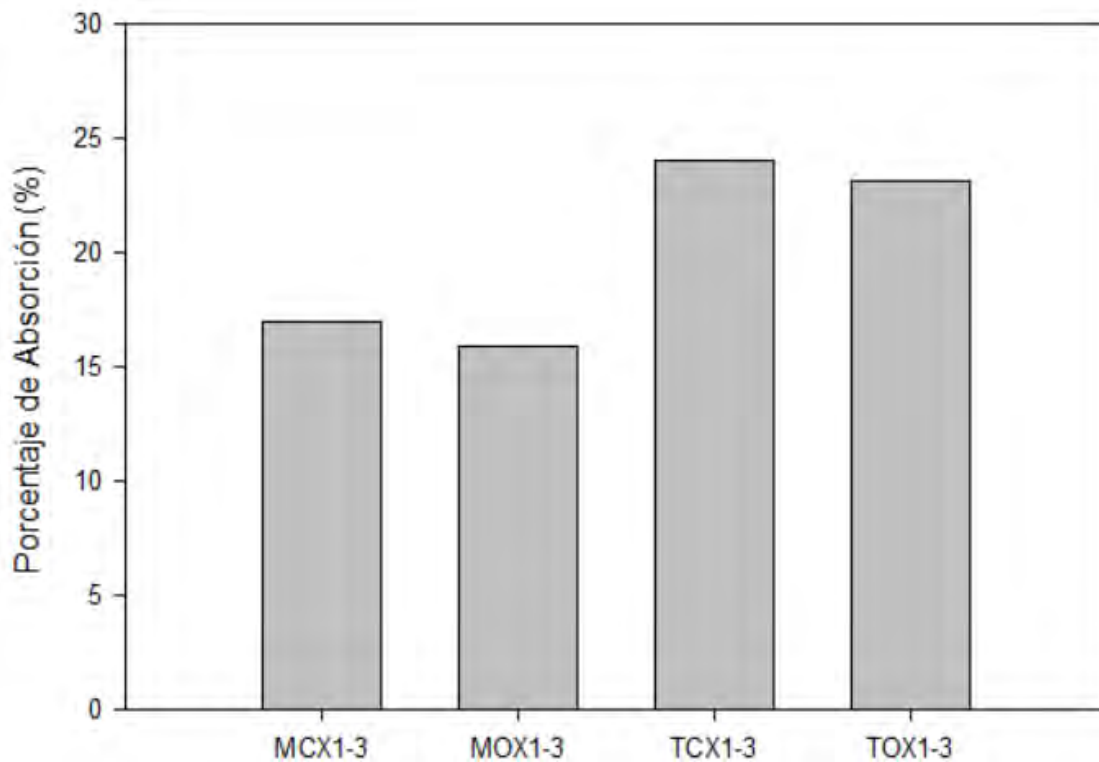
Gráfica 45. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocado a 15 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 71. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX1-3	30	15	3	2410	2818	408	16.9%
TCX1-3	20	10	5	1478	1833	355	24.0%

Tabla 72. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX1-3	30	15	3	2461	2853	392	15.9%
TOX1-3	20	10	5	1459	1796	337	23.1%



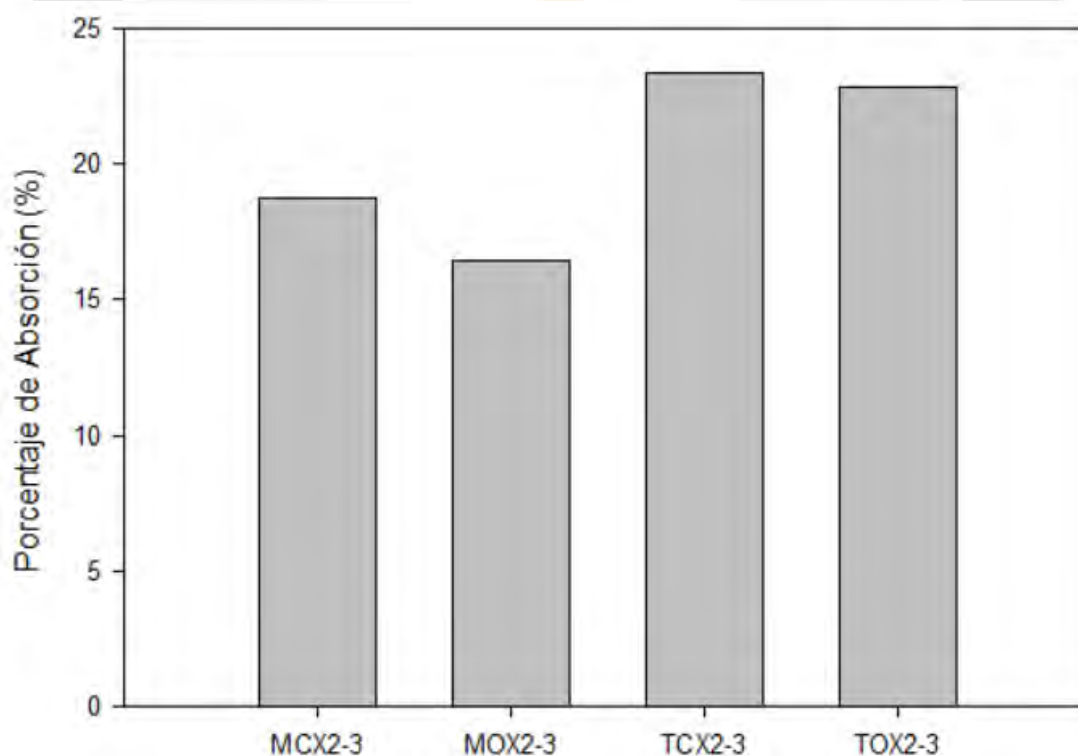
Gráfica 46. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 73. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX2-3	30	15	3	2300	2732	432	18.8%
TCX2-3	20	10	5	1430	1764	334	23.4%

Tabla 74. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX2-3	30	15	3	2602	3030	428	16.4
TOX2-3	20	10	5	1552	1907	355	22.9%



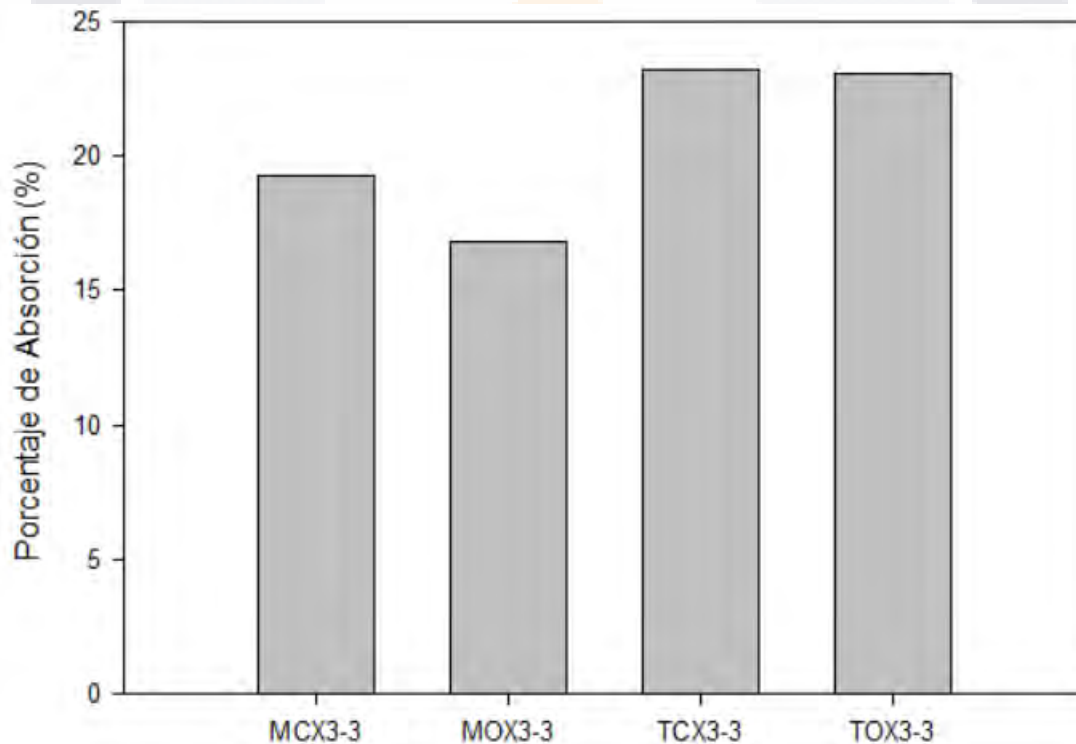
Gráfica 47. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lt de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 75. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX3-3	30	15	3	2125	2535	410	19.3%
TCX3-3	20	10	5	1528	1883	355	23.2%

Tabla 76. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX3-3	30	15	3	2576	3010	434	16.8%
TOX3-3	20	10	5	1364	1679	315	23.1%



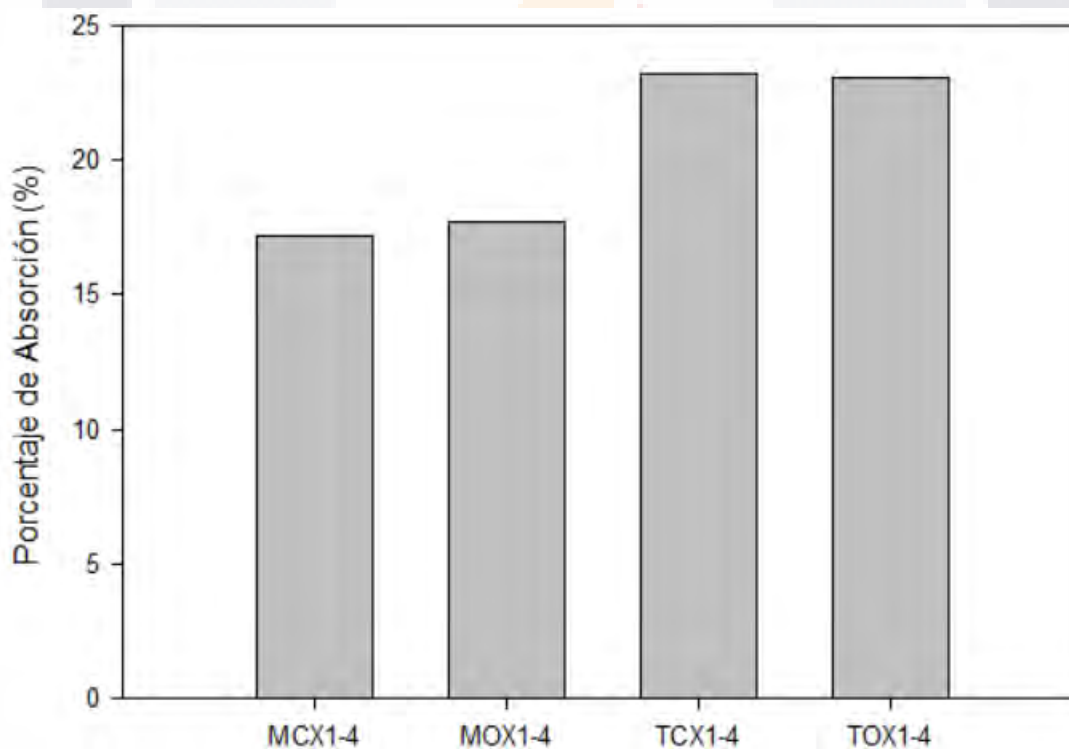
Gráfica 48. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 30 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 77. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocado a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX1-4	30	15	3	2734	3205	471	17.2%
TCX1-4	20	10	5	1437	1771	334	23.2%

Tabla 78. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocado a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX1-4	30	15	3	2266	2667	401	17.7%
TOX1-4	20	10	5	1488	1831	343	23.1%



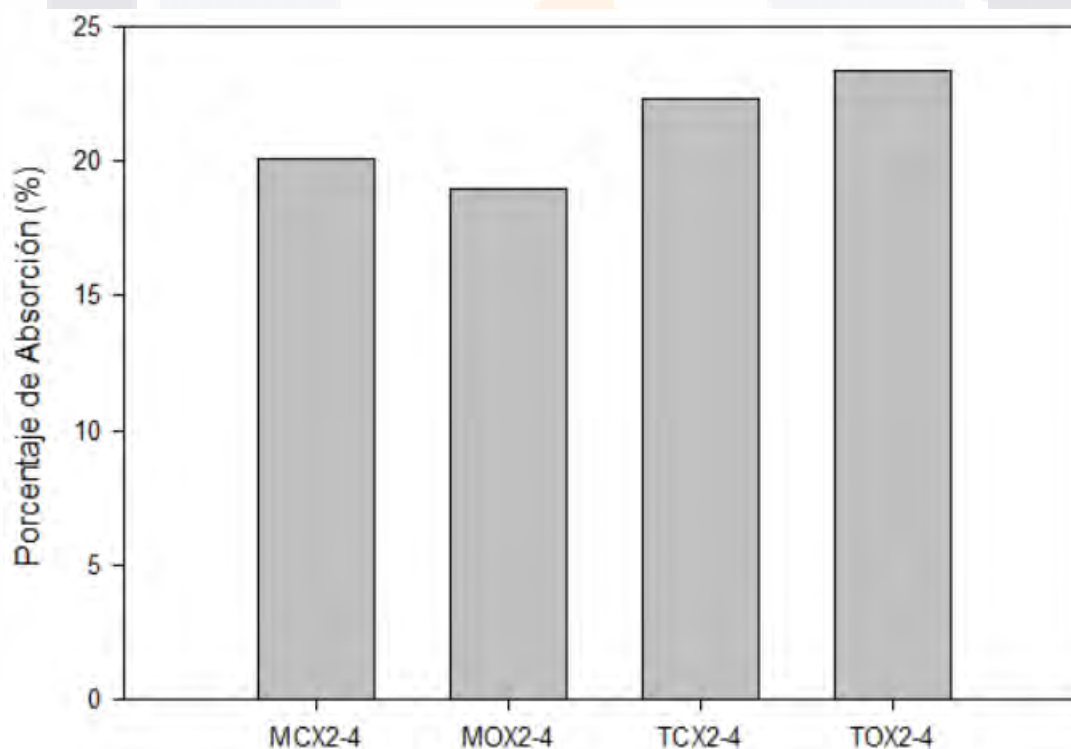
Gráfica 49. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 20 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocado a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 79. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX2-4	30	15	3	2187	2626	439	20.1%
TCX2-4	20	10	5	1471	1799	328	22.3%

Tabla 80. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX2-4	30	15	3	2155	2564	409	19.0%
TOX2-4	20	10	5	1453	1793	340	23.4%



Gráfica 50. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 35 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

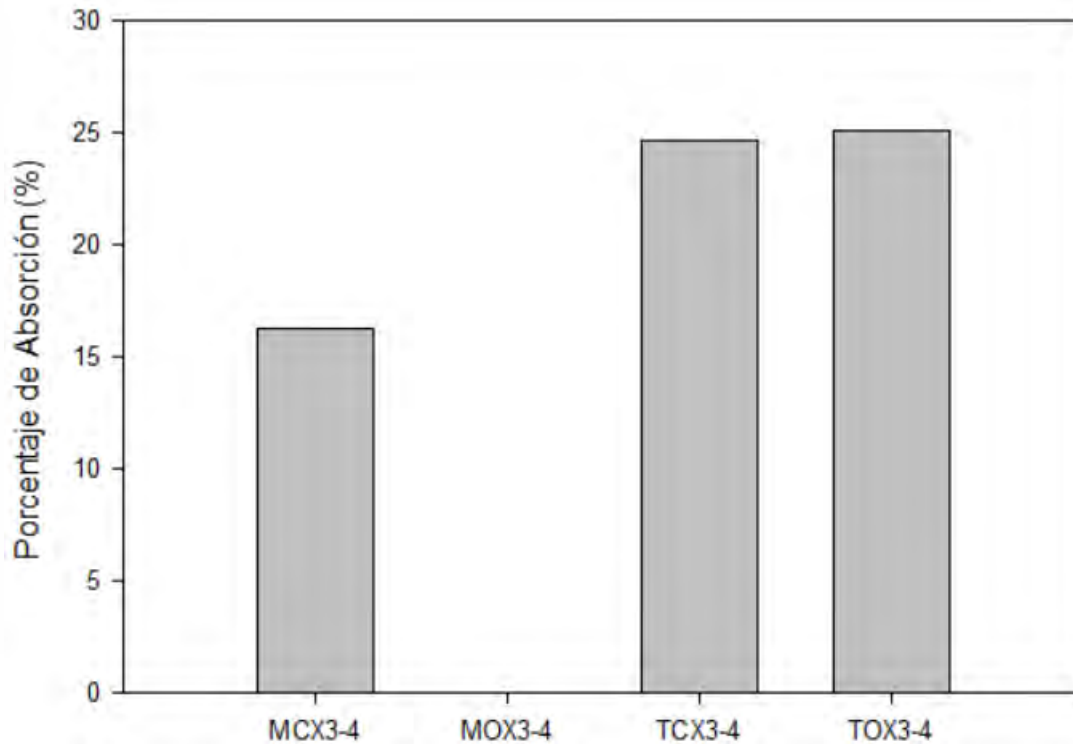


Tabla 81. Resultados de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MCX3-4	30	15	3	2714	3155	441	16.2%
TCX3-4	20	10	5	1453	1803	358	24.6

Tabla 82. Resultados de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

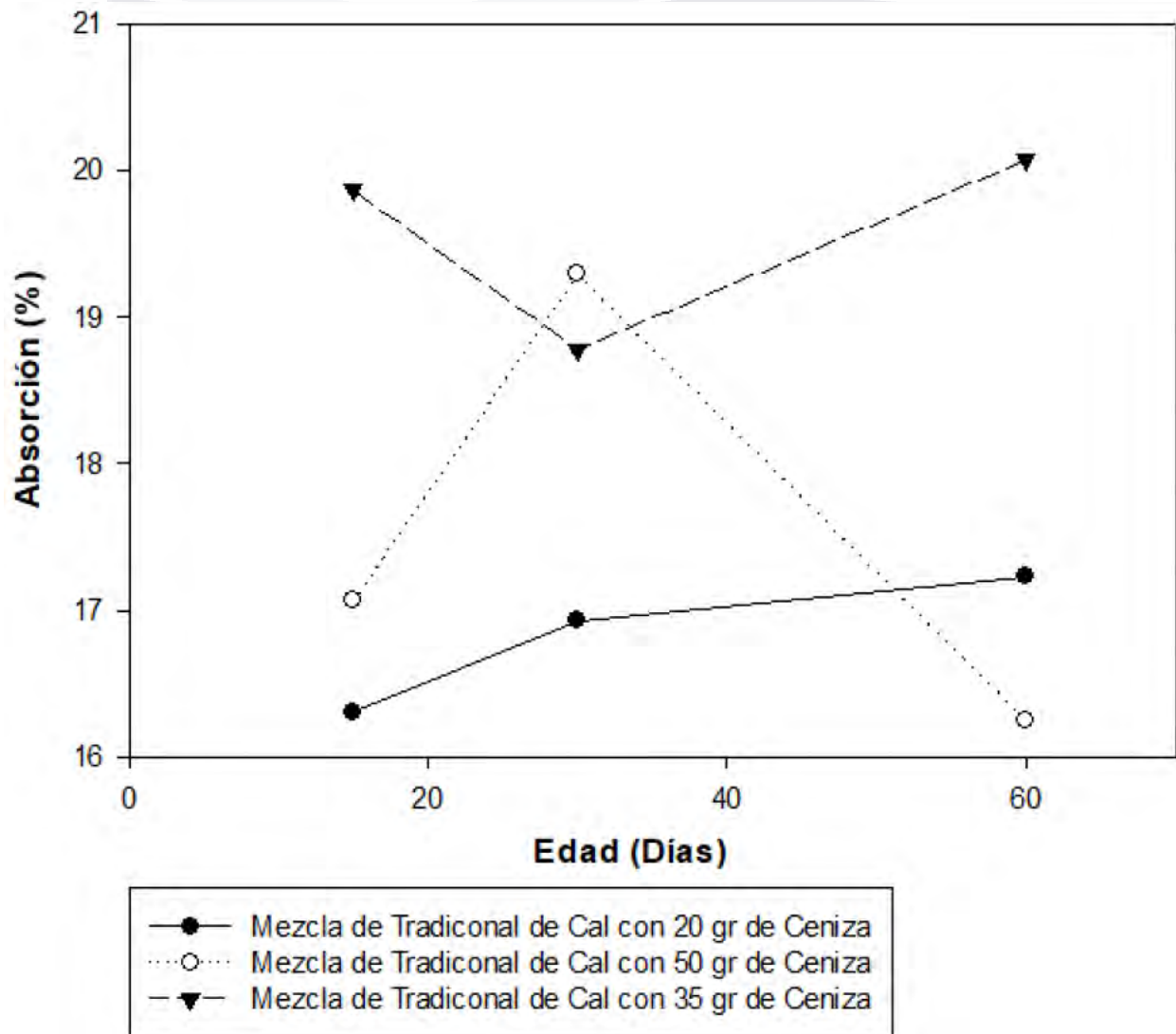
Probeta	Dimensiones (cm)			Peso (gr)		Absorción	
	Largo	Ancho	Espesor	Seco (horno)	Saturado	Masa (gr)	Porcentaje %
MOX3-4	30	15	3	2435	-	-	-
TOX3-4	20	10	5	1441	1803	362	25.1%



Gráfica 51. Resultados de absorción de campaña experimental de mezclas de cal adicionadas con 50 g/lit de ceniza por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido a 60 días de edad. Fuente: Propia.

Tabla 83. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia.

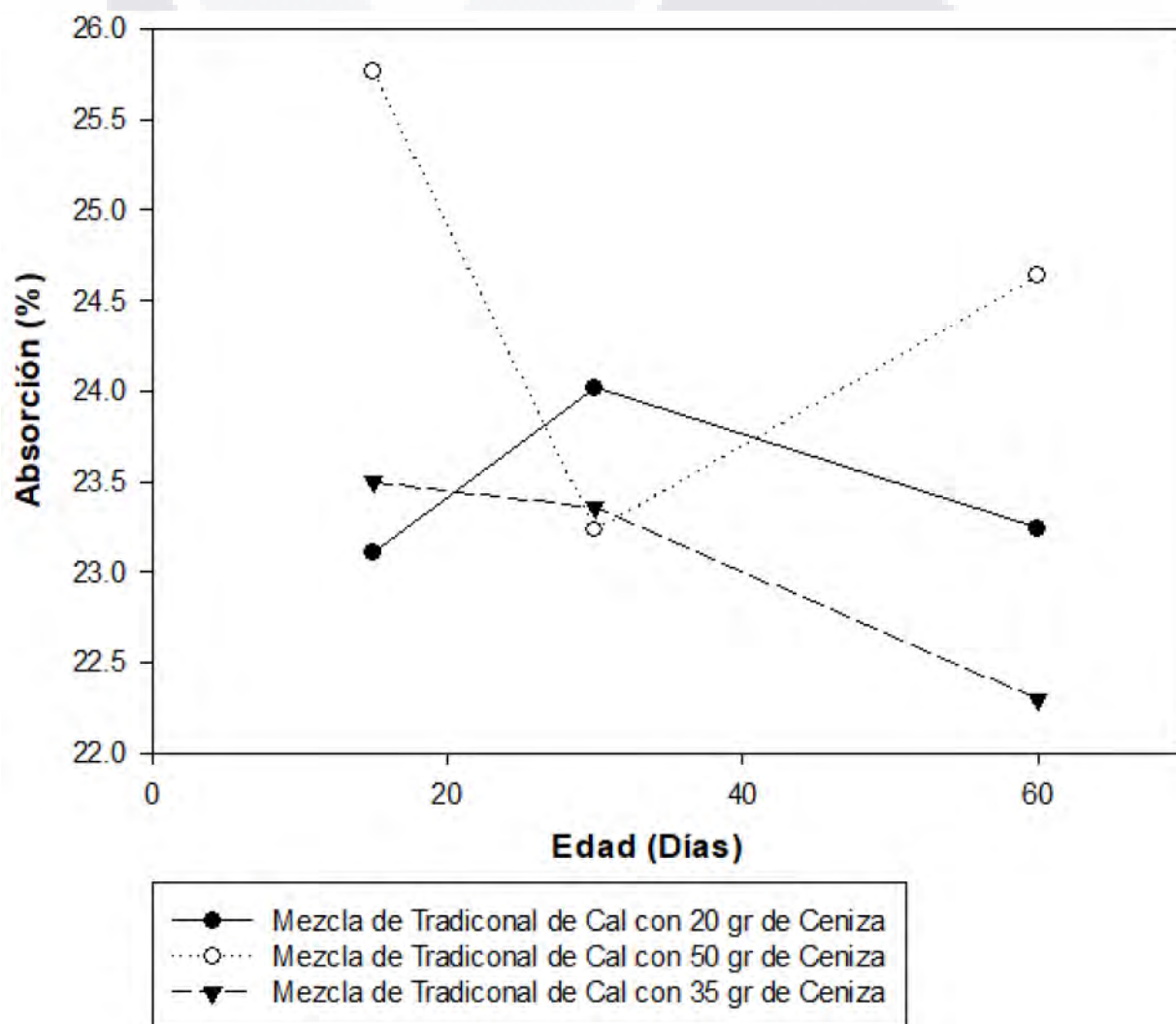
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL SOBRE MORTERO CAL-ARENA 1:2				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	% ABS	20	50	35
15		16.3	17.1	19.9
30		16.9	19.3	18.8
60		17.2	16.2	20.1



Gráfica 52. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes períodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia.

Tabla 84. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.

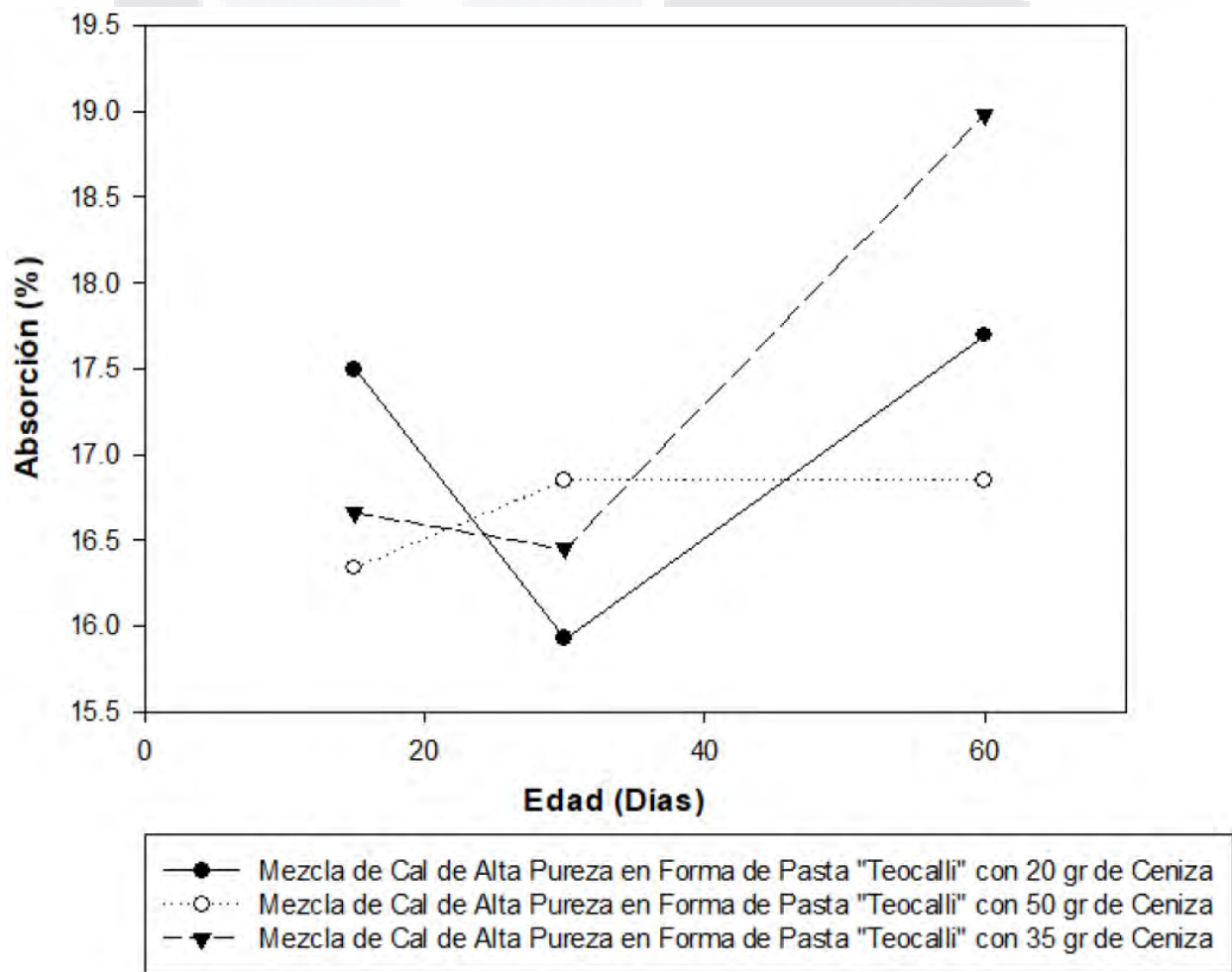
MEZCLA TRADICIONAL DE CAL SOBRE CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	% ABS	20	50	35
	15	23.1	25.8	23.5
30	24.0	23.2	23.4	
60	23.2	24.6	22.3	



Gráfica 53. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de mezcla tradicional de cal con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.

Tabla 85. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia.

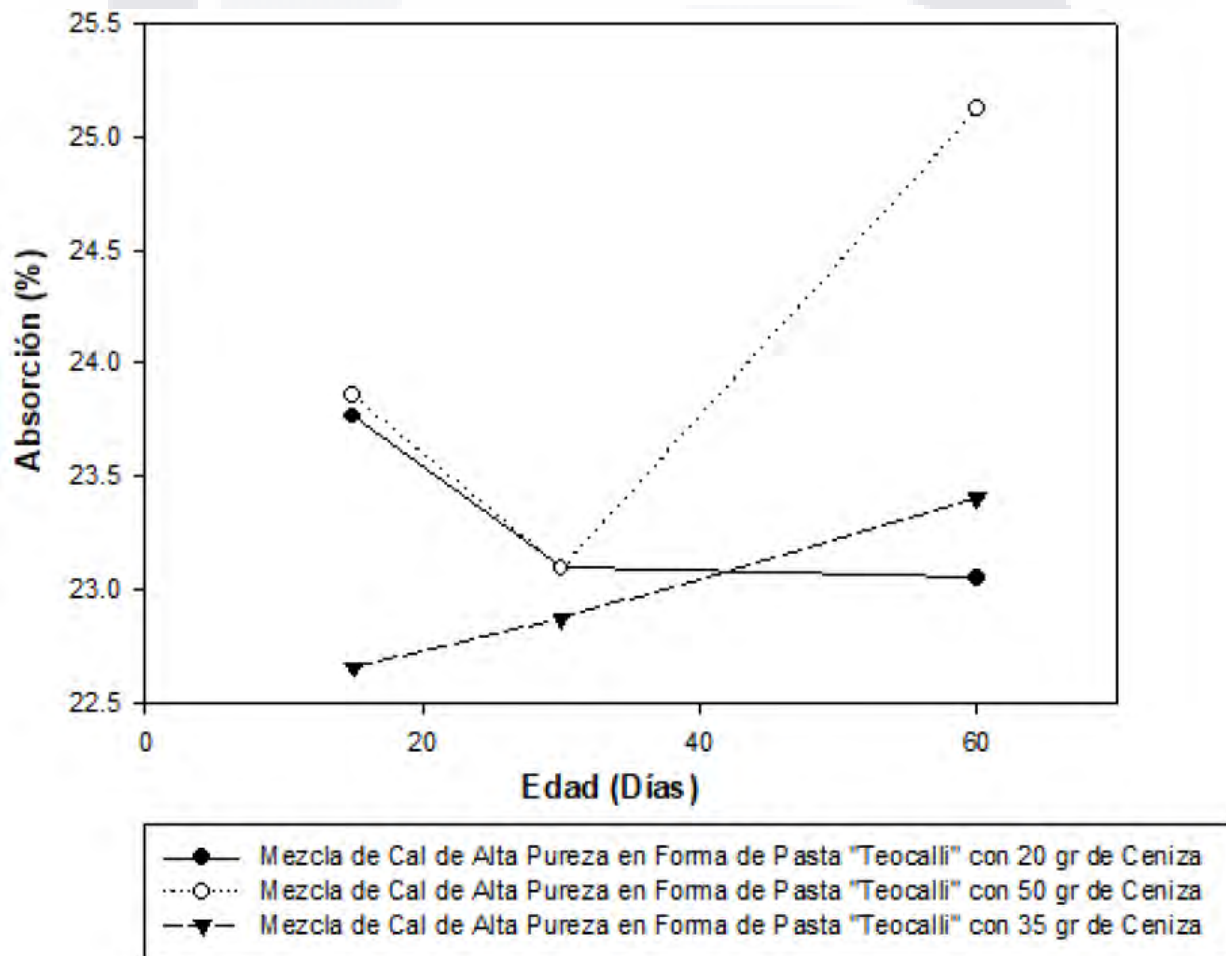
MEZCLA DE CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI" SOBRE MORTERO CAL-ARENA 1:2				
EDAD (DÍAS)	CENIZAS POR LITRO (gr)			
	% ABS	20	50	35
15		17.5	16.3	16.7
30		15.9	16.8	16.4
60		17.7	-	19.0



Gráfica 54. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de mortero de cal-arena 1:2. Fuente: Propia.

Tabla 86. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.

MEZCLA DE CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TEOALLI" SOBRE CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO					
		CENIZAS POR LITRO (gr)			
		% ABS	20	50	35
EDAD (DÍAS)	15		23.8	23.9	22.7
	30		23.1	23.1	22.9
	60		23.1	25.1	23.4



Gráfica 55. Resultados comparativos de porcentajes de absorción de campaña experimental cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" con diferentes proporciones de ceniza en diferentes periodos de tiempo por norma NMX-C-037-1986-ONNCE-2005 en probetas de cuña de barro rojo recocido. Fuente: Propia.

## **CAPÍTULO 7. DISCUSIONES**

En el marco de la investigación sobre materiales de construcción sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, se ha llevado a cabo un estudio que arroja luz sobre el impacto positivo de la incorporación de cenizas ricas en lignina en mezclas de cal. Este estudio ha demostrado resultados notables en términos de permeabilidad y absorción, superando las observaciones previas realizadas por Padilla (2021) y Espinoza (2016) en investigaciones anteriores.

En el pasado, las mezclas de cal eran objeto de estudio para mejorar la resistencia y durabilidad de materiales de construcción tradicionales. Sin embargo, las investigaciones recientes han ampliado esta perspectiva al considerar la inclusión de cenizas ricas en lignina, un subproducto de la quema de biomasa y materiales lignocelulósicos.

Los resultados de este estudio indican que la adición de cenizas ricas en lignina a las mezclas de cal no solo mejora la resistencia estructural, sino que también tiene un impacto altamente beneficioso en la permeabilidad y la absorción de agua de los materiales resultantes. Esto sugiere que estos nuevos compuestos pueden ser especialmente útiles en aplicaciones donde la resistencia al agua y la permeabilidad son consideraciones críticas, como en la construcción de edificios históricos o la restauración de estructuras antiguas. De Haro et al. (2019) desarrolló y caracterizó nuevos recubrimientos de poliuretano de base biológica con alto contenido de lignina. En su estudio, De Haro et al. (2019) encontró que, una caracterización en profundidad de los recubrimientos de PU obtenidos destacó su alto contenido de biomasa, reticulación efectiva, estabilidad térmica mejorada, carácter hidrofóbico, buena rendimiento de adhesión en diferentes tipos de sustratos y respuesta mecánica ajustable. Por lo anterior, es factible encontrar semejanzas y realizar comparaciones con esta investigación.

Los resultados obtenidos en este estudio desafían las observaciones anteriores de Padilla (2021) y Espinoza (2016), lo que abre nuevas oportunidades y perspectivas en el campo de los materiales de construcción sostenibles. A medida que continuamos explorando formas de reducir el impacto ambiental de la construcción, la incorporación

de cenizas ricas en lignina en mezclas de cal emerge como una opción prometedora que merece una atención más detallada en futuras investigaciones y aplicaciones prácticas.

Aunque a grandes rasgos, las mezclas empleadas demostraron mejores resultados, existen algunas particularidades a discutir sobre los resultados obtenidos en la investigación.

Mediante un análisis de promedios de los resultados anteriores se obtuvieron los siguientes datos que se muestran en las tablas a continuación:

Tabla 87. Promedios de Permeabilidad Acumulada en Ciclo de 60 días. Fuente: Propia.

PERMEABILIDAD			
SUSTRATO	MEZCLA	GRAMOS POR LITRO	PROMEDIO ML (CICLO 60 DÍAS)
MORTERO DE CAL 1:2	TRADICIONAL	20	1.57
		35	4.87
		50	5.20
	CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI"	20	9.87
		35	14.23
		50	24.17
CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO	TRADICIONAL	20	1.53
		35	1.33
		50	2.07
	CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI"	20	42.60
		35	7.70
		50	28.47

Tabla 88. Promedios de Porcentaje Desprendido en Superficie en Ciclo de 60 días. Fuente: Propia.

ADHERENCIA			
SUSTRATO	MEZCLA	GRAMOS POR LITRO	PROMEDIO %DP (CICLO 60 DÍAS)
MORTERO DE CAL 1:2	TRADICIONAL	20	0.43
		35	0.47
		50	0.38
	CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI"	20	0.18
		35	0.23
		50	0.17
CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO	TRADICIONAL	20	0.63
		35	0.37
		50	0.27
	CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI"	20	0.08
		35	0.13
		50	0.08

Tabla 89. Promedios de Porcentaje Absorbido en Ciclo de 60 días. Fuente: Propia.

ABSORCIÓN			
SUSTRATO	MEZCLA	GRAMOS POR LITRO	PROMEDIO % ABS (CICLO 60 DÍAS)
MORTERO DE CAL 1:2	TRADICIONAL	20	16.82
		35	19.57
		50	17.54
	CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI"	20	17.04
		35	17.36
		50	16.59
CUÑA DE BARRO ROJO RECOCIDO	TRADICIONAL	20	23.46
		35	23.05
		50	24.54
	CAL DE ALTA PUREZA EN FORMA DE PASTA "TECOALLI"	20	23.30
		35	22.98
		50	24.02



De los datos promedios anteriores, se interpreta que, en cuanto a permeabilidad, las mezclas de cal que mostraron una mejor resistencia a la filtración de agua sobre la superficie fueron aquellas de 20 gramos de ceniza rica en lignina por litro sobre sustrato de mortero cal-arena 1:2 y las de 35 g/litro sobre la cuña de barro rojo recocido respectivamente. Esto particularmente se puede deber a las diferentes propiedades que cada sustrato puede presentar, tales como su rugosidad o porosidad. No obstante, de las dos lechadas de cal evaluadas, la mezcla tradicional de cal, jabón y alumbre en su adición con las cenizas requeridas dependiendo la superficie mostró una mayor impermeabilización en comparación a la cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" incorporada con las cenizas ricas en lignina.

Mientras que los promedios de adherencia demostraron que las mezclas de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" en cualquier porcentaje proporcionaron una mejor significativamente una mejor adherencia a su contraparte, sobre todo en superficie de cuña de barro rojo recocido.

Los valores promedio de absorción en la tabla demostraron que las mezclas de cal añadidas con 20 g/litro de ceniza sobre mortero cal-arena 1:2 permitieron un menor porcentaje de absorción, sin embargo, en superficie de cuña de barro rojo recocido aquellas mezclas incorporadas con 35 g/litro de ceniza arrojaron mejores datos.

Por lo tanto, se confiere que aquellas mezclas incorporadas con 20 y 35 gr de ceniza por litro son las que mostraron mejores resultados de impermeabilidad ante la infiltración de agua en las superficies que cubren, ya que estas mezclas con estas proporciones son las que presentaron un desempeño superior en los parámetros de permeabilidad y absorción (demostrando que estas propiedades son similares y van de la mano) en comparación con las mezclas con proporción de 50 g/litro de ceniza.

No obstante, la información obtenida de las pruebas de adherencia indica que con una proporción mayor de ceniza por litro se obtienen datos más óptimos en cuanto a este parámetro. Sin embargo, la cantidad de cenizas influye en las lechadas de cal en su desempeño como impermeabilizante, esto debido a que una cantidad alta de cenizas (mayor a 35 g/litro) se vuelve difícil de incorporar a estas lechadas de cal tradicionalmente

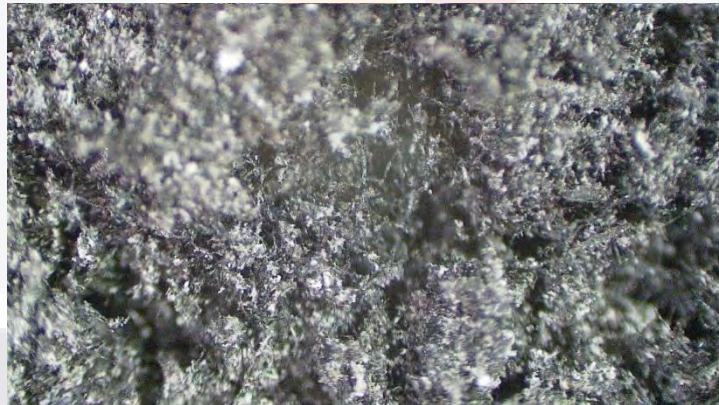
utilizadas sobre superficies de edificios patrimoniales e históricos. Bergamasco et al. (2022), expresa que, la concentración de lignina afectó la apariencia general de los recubrimientos vistos en su estudio, los cuales presentaron muchas grietas por mayores contenidos de lignina.

Esta complicada incorporación de cenizas a las mezclas de cal tradicionales genera grumos y convierte la lechada de cal en una pasta difícil de aplicar sobre superficies, provocando una mayor atención y detalle a su aplicación, lo que explica una mayor adherencia. Así mismo, debido a esta compleja incorporación de mezclas de cal con cantidades altas de ceniza, se crea una heterogeneidad en las mezclas, limitando la distribución de las cenizas ricas en lignina por toda la mezcla y por ende sobre la superficie.

Esta falta de uniformidad en las cenizas por toda la mezcla en su aplicación vuelve la mezcla irregular, ya que como se mencionó previamente, no existe una correcta distribución de las pequeños finos que componen la ceniza con alto contenido en lignina en las mezclas de cal y por lo tanto existen variabilidades e inestabilidades a lo largo del área que pueda cubrir estas mezclas de cal con proporciones de 50 g/lit de ceniza o mayores, muy diferente a las mezclas añadidas con 20 y 35 g/lit de ceniza, en donde existe una mayor homogeneidad entre los elementos de la mezcla y por lo tanto una mejor repartición de las fibras componentes de la ceniza con alto contenido en lignina.

Así mismo, esto se puede deber a lo establecido por Qu et al. (2021); se necesita una combinación de pretratamiento de lignina, modificación de lignina y optimización del procesamiento para obtener las propiedades requeridas para el producto a desarrollar y además, superar las actuales limitaciones de calidad de las fibras de carbono obtenidas a partir de lignina. Esto al ser una investigación relativamente nueva en el campo de la construcción sustentable involucrando el componente lignina obtenido a través de la incineración de biomásas llega a ser un nuevo reactivo completamente desconocido a empelar, por lo mismo, aunado los alcances de la investigación no se logra manipular el compuesto para obtener un producto derivado de acuerdo a las necesidades de la investigación por las complicaciones químicas y biológicas que conlleva ese proceso. Se necesitan más estudios que investiguen los tipos de cenizas, para evaluar los

efectos de las cenizas en la formación de carbono grafitico y la calidad de las fibras de carbón obtenidas a partir de lignina. Otro factor a considerar por mismo autor, es que, la solubilidad, propiedades térmicas, comportamiento reológico y los mecanismos de conversión de la lignina se ven influenciados durante la producción de las fibras de carbón obtenidas a partir de lignina. La limitación de la fibra de carbono obtenida a partir de lignina es la heterogeneidad y diversidad de lignina que resulta en diferentes características de la fibra producida (Misra, 2020). Estas fibras constituyentes de las cenizas ricas en lignina son difíciles de percibir a simple vista ya que se puede creer que es un material compuesto únicamente por finos, sin embargo, como finalidad de analizar a rasgos más amplios y microscópicos las ceniza obtenidas, muestras de ésta ceniza rica en lignina obtenida en la investigación fueron analizadas a través de un microscopio del cual se obtuvieron las imágenes (figuras 62 y 63) que se muestran a continuación. En éstas se pueden observar éstas fibras que componen las cenizas ricas en lignina.



*Fig 62. Fibras en muestra de ceniza rica lignina vistas a través de microscopio con aumento de 30x. Fuente: Propia.*



*Fig 63. Fibras en muestra de ceniza rica lignina vistas a través de microscopio con aumento de 40x. Fuente: Propia.*

Así mismo, éstas variabilidades en las superficies cubiertas tal vez pueden ser complicadas de observar, sin embargo, gracias a la ayuda del microscopio, se pudieron analizar las probetas cubiertas por las mezclas empleadas para la investigación. En las que se puede observar de una manera más cercana la distribución de las fibras antes mencionadas dentro de las mezclas de cal sobre las superficies de estas probetas de mortero cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido y sobre todo, se puede comprobar la irregularidad y pobre distribución de ceniza compuesta por fibras ricas en lignina en las mezclas con proporción de 50 g/lit de ceniza causando así una impermeabilidad variable a lo largo del área cubierta, lo que también explica la varianza en los resultados, sobre todo en los datos obtenidos en la campaña experimental de las pruebas correspondientes realizadas a las probetas cubiertas por aquellas mezclas de cal con la proporción previamente mencionada.

Sin embargo, estas varianzas en los resultados se pueden deber a diferentes tipos de ceniza obtenidos a través de la incineración, ya que debido a los alcances y limitaciones del laboratorio de ingeniería civil de la universidad, estas cenizas no se pudieron obtener en un solo momento por lo que se recurrió a la quema de material en diferentes tiempos, lo que llegó a provocar un error en la uniformidad de las cenizas, debido a que las propiedades del material de origen varían al ser modificado térmicamente. Cada paso puede influir en el rendimiento terminal de las fibras de carbón obtenidas a partir de lignina (Fang et al., 2018). Brebu & Vasile (2010) sostienen que, la degradación térmica de la lignina es un proceso complejo en el cual los materiales tienen muchos componentes con diferentes vías de descomposición, incluido reacciones competitivas y/o consecutivas. Así mismo, Brebu & Vasile (2010) mencionan que, debido a su compleja composición y estructura, la degradación térmica de la lignina es fuertemente influenciada por su naturaleza y contenido de humedad, temperatura de reacción y atmósfera de degradación, procesos de transferencia de calor y masa, con un efecto considerable en la conversión y el rendimiento del producto, así como por las propiedades físicas y la calidad de los procesos de incineración. La lignina llega a ser un componente complicado de manipular y estabilizar al ser obtenida, esto debido a su continuo cambio en su composición. Su estructura química variable y la mala procesabilidad limitan las aplicaciones adecuadas. (Chung & Washburn, 2012)

Otro factor influyente a considerar, que con frecuencia se puede descuidar, es la biodegradabilidad que ofrecen los materiales constituyentes de lignina. Según Moreno et al., (2020), la mayoría de los materiales de alto valor, se basan en la modificación química de la lignina, lo que probablemente altera el proceso de degradabilidad. Por lo tanto, durante la modificación del material a cenizas, este pudo haber sufrido cambios en sus propiedades de degradación. Se necesitaría recopilar más información acerca de la biodegradabilidad de los materiales inteligentes a base de lignina y la naturaleza de los productos de degradación.

En las próximas figuras se pueden observar las imágenes microscópicas obtenidas, en las cuáles se pueden observar grumos e irregularidades en mezclas de cal con 50 g/lt de ceniza que a simple vista no son sencillas de observar confirmando lo antes establecido, así como también una mejor uniformidad de fibras en las mezclas incorporadas con 20 y 35 g/lt de ceniza rica en lignina respectivamente.

En primer instancia, se presentan las fotografías microscópicas obtenidas de las mezclas tradicionales de cal y cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionadas con 20 g/lt de ceniza aplicadas sobre superficies de probeta de mortero cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido, aumentadas a tres y cuatro veces con ayuda de un microscopio estereoscópico LABOMED LUXEO 6Z (4146203-800) con un lente óptico de 10x.



*Figura 64. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia.*



Figura 65. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia.



Figura 66. Imagen microscópica 1 de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia.



Figura 67. Imagen microscópica 2 de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia.

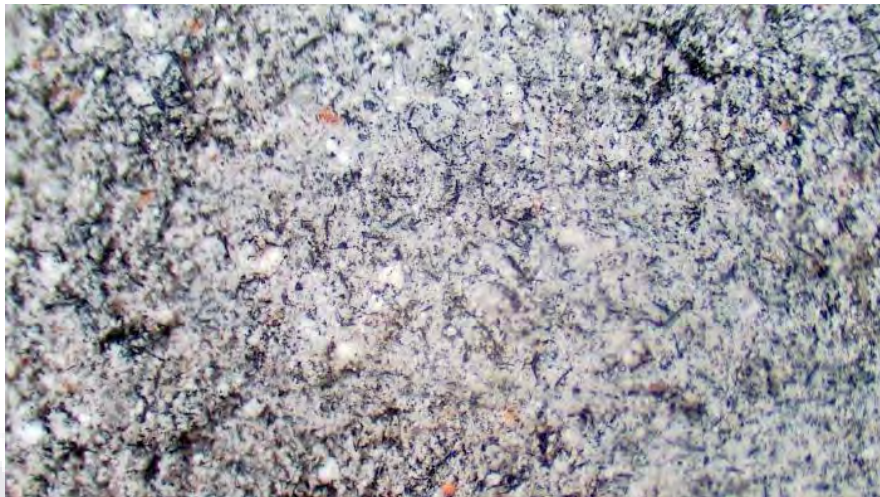


Figura 68. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia.

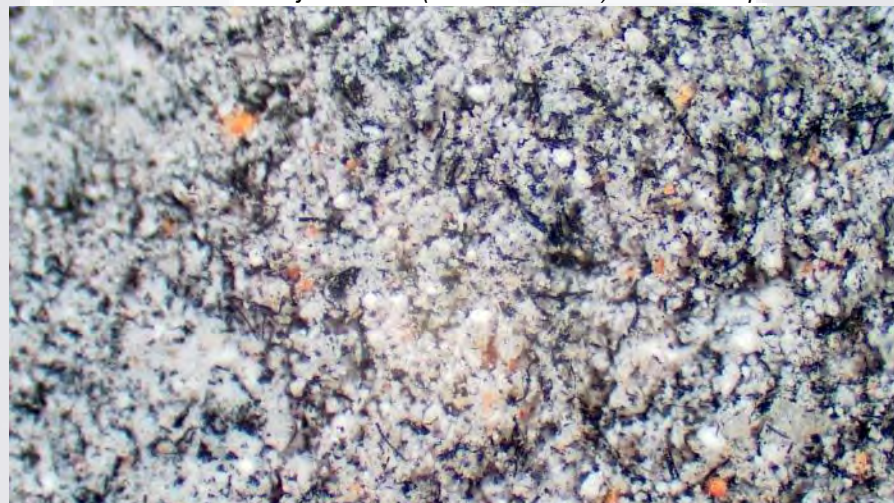


Figura 69. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.

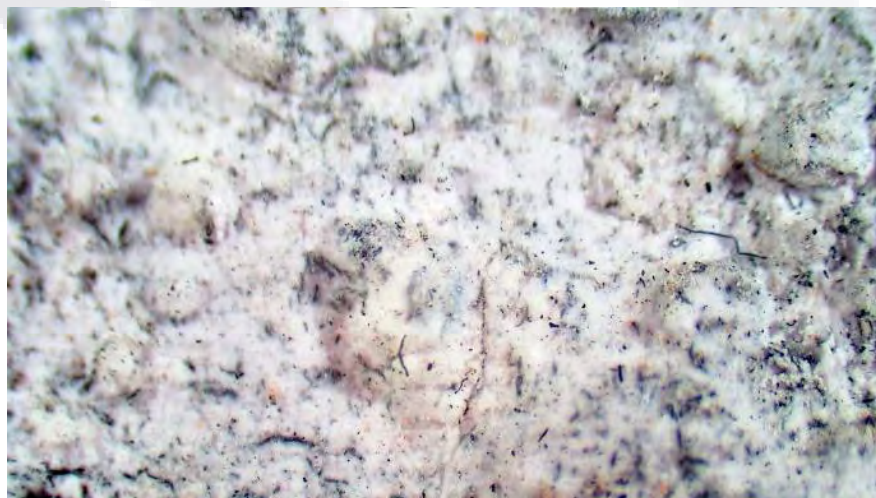
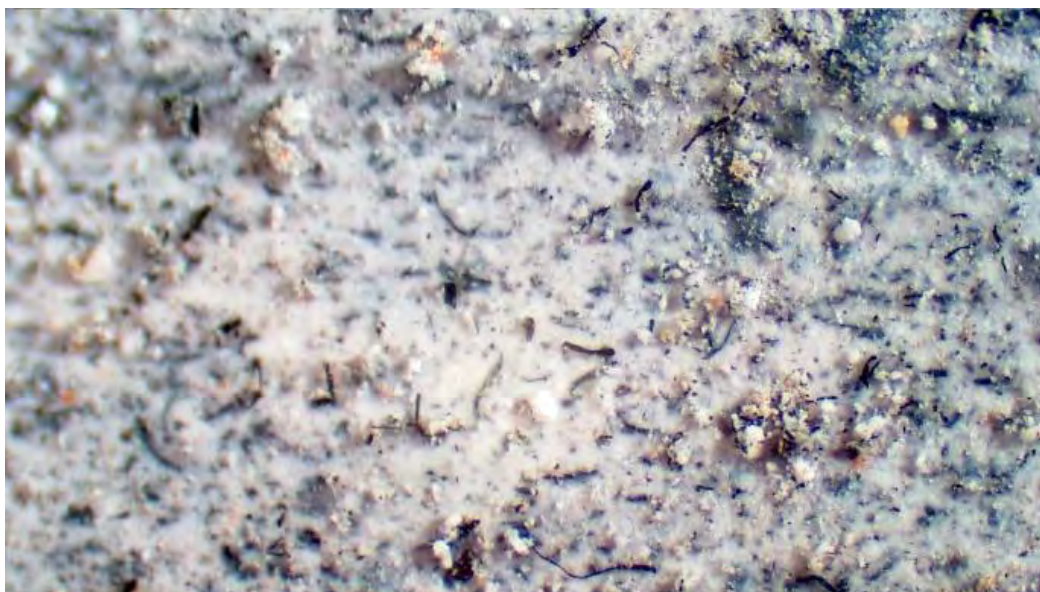


Figura 70. Imagen microscópica 1 cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo Recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.



*Figura 71. Imagen microscópica 2 cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 20 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo Recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.*

La observación y análisis de la distribución de cenizas de fibra rica en lignina en una superficie proporciona una valiosa visión microscópica de la estructura y composición de diversos materiales. Estas imágenes revelan la disposición espacial de las fibras, resaltando la presencia y distribución de la lignina, un componente crucial en la bioquímica de las plantas. A través de esta descripción visual, es posible obtener información detallada sobre la composición y propiedades de los materiales estudiados. Las imágenes anteriores capturan de manera vívida la intrincada red de fibras en la ceniza rica en lignina que se extiende sobre la superficie. Las fibras, visibles como estructuras alargadas y entrelazadas, presentan una coloración distintiva que sugiere su composición rica en carbón. Entre todos los polímeros de origen biológico, la lignina ha atraído considerable atención debido a sus ventajas de alto contenido de carbón. Esta sustancia, fundamental en la formación de paredes celulares en las plantas, confiere rigidez y resistencia a las fibras. (S. Wang et al., 2022)

Mediante estas figuras se logró observar y apreciar el comportamiento de las cenizas ricas en lignina dentro de las mezclas de cal tradicionalmente utilizadas en la preservación y restauración de techados de construcciones patrimoniales en una proporción de 20 g/lit. El cuál, al ser una cantidad relativamente baja de cenizas (20 g/lit) dentro de las mezclas, se puede percibir una distribución "uniforme" de las fibras que conforman la ceniza a lo largo de la superficie cubierta por la mezcla de cal.



En las imágenes (fig. 72-79) a continuación, de áreas de superficies pequeñas que corresponden a las mezclas tradicionales de cal y cal de alta pureza en forma de pasta “Teocali” adicionadas con 35 g/lt de ceniza aplicadas sobre probetas de mortero cal-arena 1:2 y cuña de barro rojo recocido se logran distinguir la presencia de estas fibras mencionadas anteriormente en mayor escala, proporcionando un color grisáceo más oscuro a la mezcla de cal aplicada sobre la superficie en cuestión.



*Figura 72. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 20x). Fuente: Propia.*



*Figura 73. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia.*



Figura 74. Imagen microscópica 1 de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 20x). Fuente: Propia.

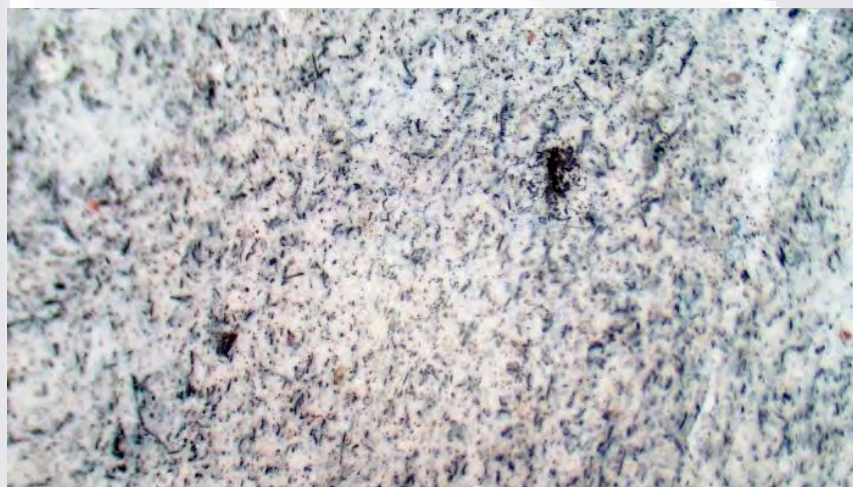


Figura 75. Imagen microscópica 2 de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia.

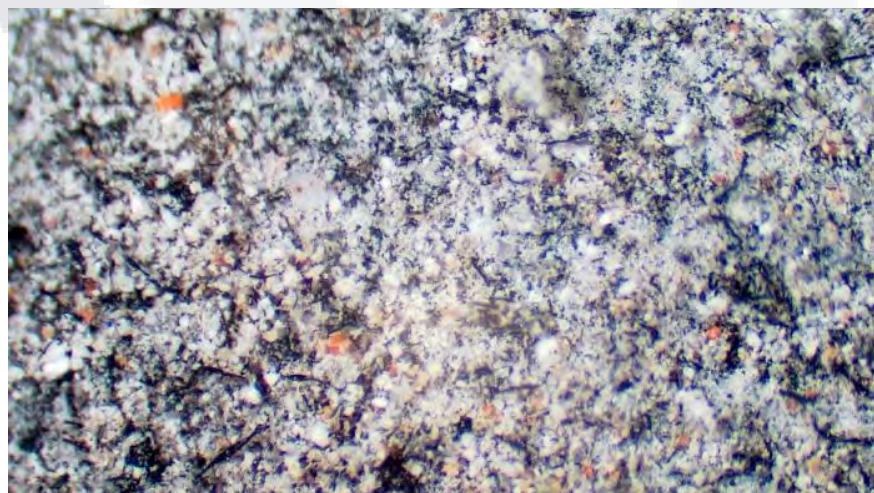


Figura 76. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.



Figura 77. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia

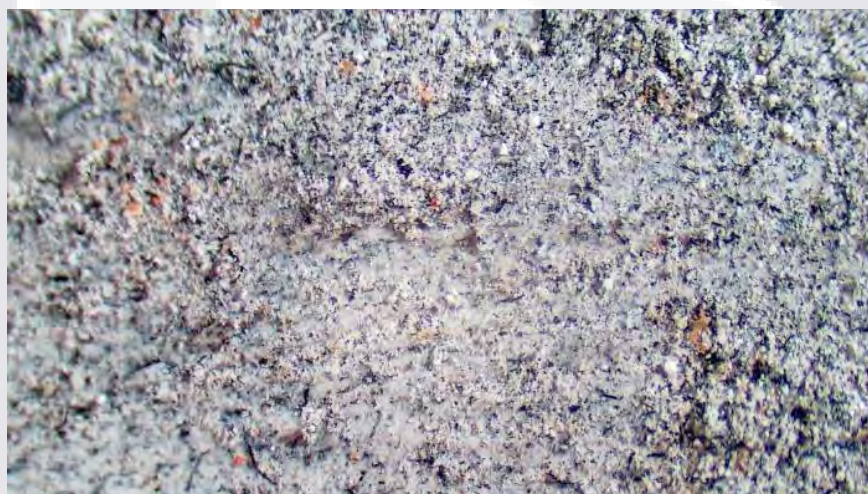


Figura 78. Imagen microscópica 1 cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x) (izquierda). Fuente: Propia.

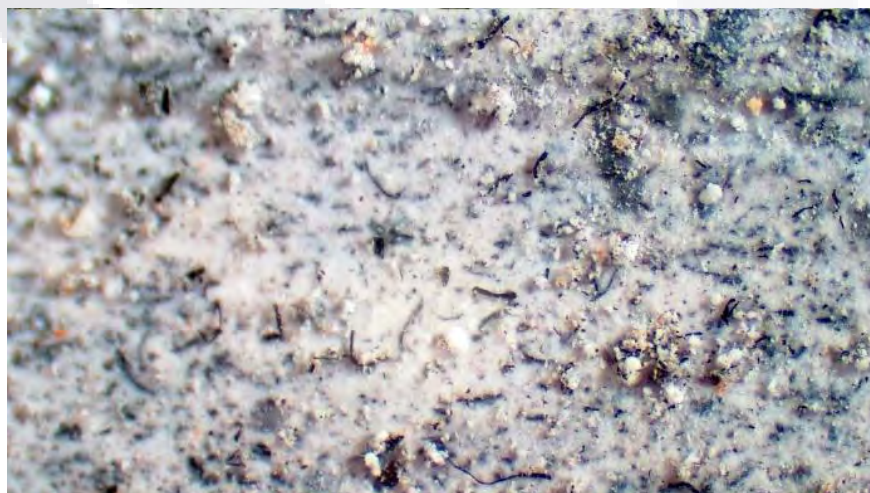


Figura 79. Imagen microscópica 2 cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 35 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.

TESIS TESIS TESIS TESIS TESIS

Estas imágenes microscópicas han revolucionado la comprensión de los materiales y sus propiedades a una escala minúscula. Un ejemplo fascinante de esto es la capacidad de observar las fibras dentro de la ceniza rica en lignina en una mezcla con cal. Este proceso de observación a nivel microscópico ofrece una visión profunda de las características de los materiales compuestos y sus componentes individuales.

La lignina es un componente estructural clave en las plantas que confiere rigidez y resistencia a sus tejidos. A través de estas interpretaciones visuales se puede confirmar que cuando los residuos papeleros ricos en lignina son sometidos a procesos de incineración, se obtiene ceniza que retiene rastros de esta macromolécula. La mezcla de esta ceniza con cal crea un sistema con propiedades únicas y beneficiosas para diversas aplicaciones, como la construcción sostenible.

La observación detallada de la distribución cenizas de fibras rica en lignina es esencial para comprender cómo estas estructuras contribuyen a las propiedades físicas y mecánicas de los materiales. La lignina, al reforzar las fibras celulosa en su matriz natural del vegetal del que provengan, puede aumentar su capacidad para resistir tensiones y compresiones. Además, esta caracterización visual puede ayudar en la identificación de posibles patrones de degradación o irregularidades en la distribución, lo que tiene implicaciones importantes para aplicaciones industriales y científicas. Como por ejemplo, en las figuras que se muestran a continuación (fig. 80-87) se puede hacer distinción de estas irregularidades mencionadas en las mezclas de cal que tienen adicionadas 50 gramos de ceniza por litro de impermeabilizante.

La distribución de estas fibras no es uniforme en la superficie, revelando patrones y agrupaciones interesantes. Algunas áreas muestran una mayor densidad de fibras, mientras que otras presentan una disposición más dispersa.



Figura 80. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 20x). Fuente: Propia.



Figura 81. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 30x). Fuente: Propia.



Figura 82. Imagen microscópica 1 de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia.

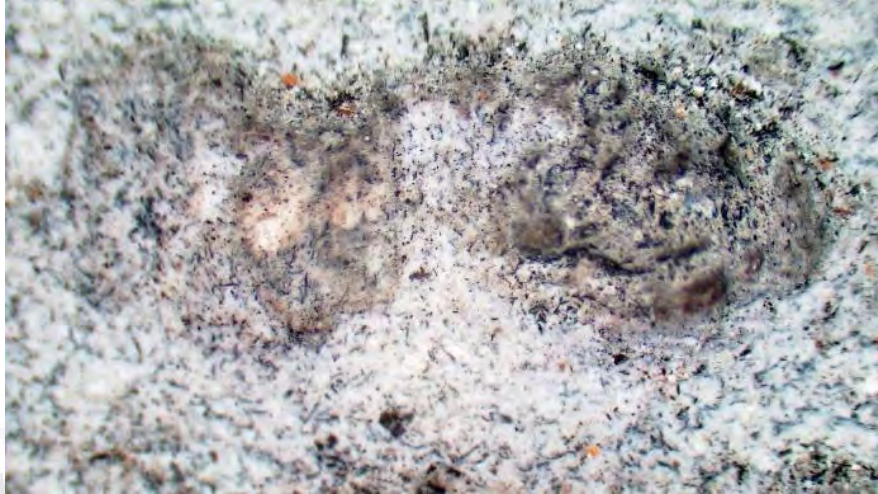


Figura 83. Imagen microscópica 2 de cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de mortero cal-arena 1:2 (aumento de 40x). Fuente: Propia.



Figura 84. Imagen microscópica 1 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia.



Figura 85. Imagen microscópica 2 de mezcla tradicional de cal adicionada con 50 g/lit de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.

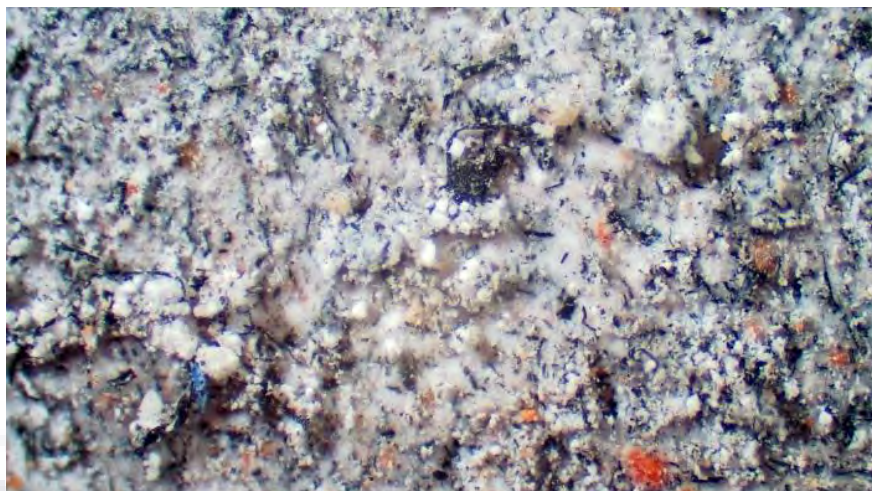


Figura 86. Imagen microscópica 1 cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 30x). Fuente: Propia.

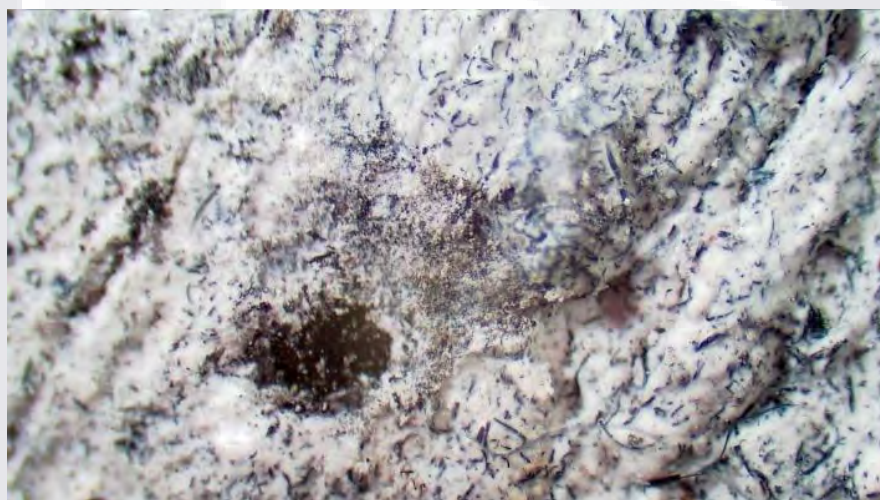


Figura 87. Imagen microscópica 2 cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" adicionada con 50 g/lt de ceniza sobre superficie de cuña de barro rojo recocido (aumento de 40x). Fuente: Propia.

## **CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES**

### **8.1 Conclusión general.**

A través de esta investigación se logró llevar a cabo la elaboración y desarrollo de un impermeabilizante a base de lechada de cal tradicionalmente utilizado para la protección y preservación de bóvedas, terrados y superficies de cuña en edificios patrimoniales enriquecido en su propiedad hidrofóbica con la adición del componente de lignina. Además, se evaluó la mezcla en su desempeño como impermeabilizante mediante pruebas estandarizadas en las cuáles se comprobó que, las fibras de ceniza con alto contenido en lignina si añaden impermeabilidad e hidrofobicidad a las mezclas tradicionales de cal empleadas en la conservación y protección de edificios de patrimonio histórico como se llegó a determinar en esta investigación. Esto debido a todas las propiedades y características que este biopolímero ofrece a estas mezclas, tales como su hidrofobicidad, adhesividad y biodegradabilidad.

Por lo tanto, se confirma que, la adición del componente lignina modificado en un porcentaje específico a las mezclas de impermeabilizante natural basadas en lechada de cal utilizadas en bóvedas, terrados y superficies de cuña de edificios patrimoniales, mejora significativamente sus propiedades hidrofóbicas y proporciona un impermeabilizante de buena calidad en comparación con productos similares.

El éxito del producto obtenido mezclando las lechadas tradicionales de cal empleadas para la protección y preservación de techados en edificios patrimoniales con las cenizas obtenidas a partir de la modificación térmica de las fibras de cartón proporcionadas por la empresa papelera CEyPABASA S.A. de C.V. se debe en mayor medida al componente principal a la cual es enfocada la investigación: la lignina. Ésta, al estar presente en la composición de las fibras de carbón que conforman las cenizas obtenidas a partir de la carbonización del material con fibras de cartón proporciona hidrofobicidad, adhesión y rigidez en la película aplicada. Kadla et al. (2002) contribuye a esto, concluyendo que, las fibras de carbono producidas a partir de lignina Kraft ofrecen propiedades mecánicas adecuadas para estándares de rendimiento general en productos de valor agregado. Además, Kadla et al. (2002) establece que las propiedades mecánicas de las fibras de carbono Kraft basadas en lignina son



equivalentes o superiores a las producidas a partir de ligninas producidas de forma comercial. Las ligninas son materias primas ideales como precursores de fibras de carbón debido a su bajo coste y alto contenido de carbono. (Ma et al., 2021)

En resumen, el estudio ha demostrado de manera concluyente que la incorporación precisa de lignina en proporciones específicas en las mezclas de impermeabilizante natural a base de lechada de cal, utilizadas en la preservación de estructuras históricas como bóvedas, terrados y superficies de cuña en edificios patrimoniales, conlleva a una mejora substancial en sus propiedades hidrofóbicas. Esta mejora resulta en un producto impermeabilizante de alta calidad que sobresale en comparación con alternativas similares en el mercado. Estos resultados no solo ofrecen una solución efectiva para la protección de patrimonio arquitectónico, sino que también abren nuevas posibilidades en el campo de la conservación y restauración de edificios históricos utilizando materiales naturalmente compatibles y mejorados. Confirmando lo documentado por Dastpak et al. (2018), estos hallazgos sugieren que los materiales a base de lignina podrían transformar el campo de los recubrimientos orgánicos hacia alternativas más sostenibles al reemplazar los recubrimientos poliméricos no renovables tradicionales.

## **8.2 Conclusiones particulares.**

Durante el presente estudio se efectuó una extensa revisión bibliográfica en la que se analizaron investigaciones previas basadas en los sistemas de impermeabilización naturales aplicables en edificios patrimoniales, características y propiedades de lignina, así como también de sus cualidades hidrofóbicas y adhesivas, métodos de extracción y la aplicación de ésta en la construcción sostenible.

Posteriormente, con la información obtenida a partir de la investigación bibliográfica, los alcances definidos y una excelente comunicación con la empresa papelera CEyPABASA con sede en León Gto., se desarrolló una metodología para la obtención del componente lignina desde residuos de la industria papelera.

Con la fuente de lignina establecida y físicamente disponible se procedió a elaborar distintas mezclas a base de cal usadas comúnmente en superficies de techos de edificios patrimoniales e históricos formulación adecuada de un impermeabilizante con la adición del componente lignina obtenido.

Finalmente, mediante una campaña experimental con duración de 60 días, se caracterizó y evaluó el comportamiento de las mezclas tradicionales de cal enriquecidas en su propiedad hidrofóbica con la adición del componente de lignina en distintos porcentajes dependiendo de la formulación seleccionada, tomando como parámetros únicamente la adherencia, permeabilidad y la absorción.

A través de los resultados obtenidos de la campaña experimental se concluyó que, la proporción óptima de fibras de ceniza rica en lignina particularmente para esta investigación fue de entre 20 y 35 gramos por litro en la mezcla tradicional de cal, jabón y alumbre siendo la que mejor resultados demostró dependiendo el sustrato sobre el que se aplicará, ya que esta muestra mejor característica de impermeabilidad e infiltración de agua sobre la superficie.

No obstante, sobre superficies de sustratos considerados impermeables se recomienda la cal de alta pureza en forma de pasta "Teocali" añadido con la proporción adecuada de cenizas de fibra ya que garantiza un elemento de gran protección y adherencia.

La cantidad de cenizas puede variar dependiendo la mezcla que se emplee, así siendo mezclas tradicionales que no se hayan visto en esta investigación, como aquellas que emplean la baba de nopal o algún otro elemento natural. Así cómo también pueden variar las propiedades y cantidades de la lignina utilizada, debido a que la composición de esta varía dependiendo de la fuente que sea extraída, así como de la especie de planta o madera de la cual provenga.

En síntesis, la investigación ha confirmado de manera concluyente que la incorporación de cenizas de fibra rica en lignina en proporciones específicas, en el rango de 20 a 35 gramos por litro, en las mezclas tradicionales de cal, jabón y alumbre, resulta en una mejora notoria de las propiedades de impermeabilidad e infiltración de agua en diversas superficies. Este descubrimiento ofrece una solución prometedora y práctica para la creación de impermeabilizantes de alta calidad y desempeño, adaptados a diferentes sustratos y condiciones. Como resultado, se abre un camino hacia la preservación más efectiva y sostenible de estructuras históricas y patrimoniales, al mismo tiempo que se abre espacio para futuras investigaciones y aplicaciones en el ámbito de la restauración y conservación arquitectónica.

### **8.3 Nichos de investigación.**

No hay duda de que este componente comúnmente visto como desperdicio continúa siendo desaprovechado en el mundo actual, esto probablemente debido a su difícil extracción en estado puro. No obstante, al ser un elemento que constituye las paredes celulares en todas las plantas y maderas en el planeta aun cuando éstas puedan “morir”, actualmente existen biomásas que a menudo suelen ser consideradas como basura y desecho natural tales como las hojas de palma, sargazo, árboles caídos etc. que aún contienen este biopolímero conocido como lignina, él cual aún se podría aprovechar. Por cuestiones empíricas a través de la investigación, considero que toda biomasa calcinada mantiene la lignina en su composición de cenizas, de la cuál pudiera servir para distintas aplicaciones, tanto en la construcción cómo en otras áreas de estudio. De acuerdo a Mu et al. (2013) existe una gran oferta potencial de energías biomasa renovable y sostenible procedente de bosques y tierras agrícolas en todo el mundo. La biomasa es vista como una potencial fuente natural sólida de carbono que protege la naturaleza y tiene un gran suministro global y una amplia distribución. Con la creciente preocupación medioambiental en los últimos años, la biomasa ha ganado atractivo como materia prima para la producción de fibras de carbón a partir de materias lignocelulósicas (Vinod et al., 2023). Queda mucho por descubrir de este componente y sus aplicaciones en las diversas disciplinas del mundo actual, así como su basto potencial en el ámbito de la construcción.

La lignina, un polímero complejo y resistente, se encuentra en las paredes celulares de las plantas, desempeñando un papel crucial en la estructura y rigidez de los tejidos vegetales. Es uno de los componentes principales de la biomasa lignocelulósica, que incluye maderas, tallos, hojas y otros residuos vegetales.

La existencia de lignina en biomásas es una característica común en una amplia variedad de ecosistemas en todo el mundo. Se encuentra en una diversidad de plantas, desde árboles forestales hasta plantas herbáceas y cultivos agrícolas. La cantidad y composición de lignina varían entre especies y tipos de plantas, influenciadas por factores genéticos y ambientales.

La presencia de lignina en la biomasa ha impulsado el interés en su uso como recurso renovable para la producción de biocombustibles y productos químicos. Sin embargo,

su resistencia y complejidad hacen que su descomposición y procesamiento sean desafiantes. Actualmente, se están desarrollando diversas tecnologías y enfoques para descomponer la lignina y aprovechar sus componentes para usos industriales. Aunado, se continúan investigando las propiedades y características que las fibras de carbón obtenidas a partir de la degradación térmica de lignina pueden ofrecer a productos de alta valoración tales como adhesivos y recubrimientos.

Resumiendo, la lignina es un componente universalmente presente en diversas biomásas en todo el mundo, desde los bosques hasta los campos de cultivo. Su presencia ofrece oportunidades para la investigación y la innovación en la utilización sostenible de recursos vegetales para aplicaciones industriales y ambientales.

La utilización de lignina en la construcción presenta numerosos beneficios, ha demostrado ser una alternativa prometedora en diversos campos de la construcción. Sus propiedades como aglutinante, adhesivo e impermeabilizante la convierten en una opción versátil y sostenible. Además, al ser un subproducto de la industria papelera y de la producción de bioetanol, su uso en la construcción puede contribuir a reducir la dependencia de materiales de origen fósil. La lignina también posee propiedades ignífugas, lo que la hace atractiva en términos de seguridad contra incendios. A medida que se investiga y se perfeccionan las tecnologías de extracción y aplicación de la lignina, su papel en la construcción puede expandirse aún más, ofreciendo soluciones eficientes, respetuosas con el medio ambiente y sostenibles a largo plazo.

En conclusión, la lignina tiene un potencial significativo en el mundo actual debido a sus propiedades únicas y su versatilidad en diversas aplicaciones. El potencial de la lignina en el mundo actual es amplio y diverso. Su capacidad para sustituir materiales petroquímicos, su disponibilidad renovable y su contribución a la transición hacia una economía más sostenible la convierten en un recurso valioso en múltiples industrias y sectores.

## CAPÍTULO 9. GLOSARIO

**Alumbre:** Sulfato de alúmina y potasa que se halla en algunas rocas y tierras, y que se emplea para aclarar aguas turbias, como mordiente en tintorería y como astringente en medicina. (Real Academia Española, 2023)

**Biomasa:** Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía. (Real Academia Española, 2023)

**Biopolímero:** Compuesto químico, natural o sintético, formado por polimerización y que consiste esencialmente en unidades estructurales repetidas. (Real Academia Española, 2023)

**Cal:** Sustancia alcalina constituida por óxido de calcio, de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto del agua se hidrata o se apaga, con desprendimiento de calor, y mezclada con arena forma la argamasa o mortero. (Real Academia Española, 2023)

**Celulosa:** Polisacárido que forma la pared de las células vegetales y es el componente fundamental del papel. (Real Academia Española, 2023)

**Eflorescencia:** Conversión espontánea en polvo de diversas sales al perder el agua de cristalización. (Real Academia Española, 2023)

**Hemicelulosa:** Es un término colectivo para las mezclas de polisacáridos, que se producen en la masa vegetal en composiciones variables. Las hemicelulosas son componentes de las paredes celulares de las plantas cuya matriz consiste en celulosa fibrilar parcialmente cristalina. (Real Academia Española, 2023)

**Hidrófilo:** Dicho de una materia o una sustancia: Que adsorbe el agua con gran facilidad. (Real Academia Española, 2023)

**Hidrófobo:** Dicho de una materia o una sustancia: Que no adsorbe el agua. Lámina hidrófoba, compuesto hidrófobo. (Real Academia Española, 2023)

**Hidrófugo:** Dicho de una sustancia: Que evita la humedad o las filtraciones. (Real Academia Española, 2023)

**Ignífugo:** Que no se inflama ni propaga la llama o el fuego. (Real Academia Española, 2023)

**Licór negro:** El licor negro es un subproducto formado durante el proceso Kraft cuando se convierte madera en pulpa de celulosa al quitarle lignina, hemicelulosas y otros extractivos a la madera liberando así a las fibras de celulosas. (Real Academia Española, 2023)

**Lignina:** Compuesto orgánico básico de los tejidos leñosos de las plantas. (Real Academia Española, 2023)

**Lignina Kraft:** Es un tipo de lignina industrial derivada de la pulpa Kraft. (Real Academia Española, 2023)

**Lignosulfonatos:** Son polímeros poli electrolíticos aniónicos solubles en agua. Son subproductos de la industria papelera, obtenidos en la producción de la pulpa de celulosa usando de partida la pasta o pulpa de sulfito. (Real Academia Española, 2023)

**Lipofílico:** Es el comportamiento de toda molécula que tiene afinidad por los lípidos. (Real Academia Española, 2023)

**Macromolécula:** Molécula de gran tamaño, generalmente de muy elevado peso molecular. (Real Academia Española, 2023)

**Mampostería:** Obra hecha con mampuestos colocados y ajustados unos con otros sin sujeción a determinado orden de hiladas o tamaños. (Real Academia Española, 2023)

**Petatillo:** Tejido de palma o de carrizo. (Real Academia Española, 2023)

**Poliuretano:** Resina sintética de baja densidad obtenida por condensación de poliésteres. (Real Academia Española, 2023)

**Sulfito:** Sal mineral u orgánica del ácido sulfuroso. (Real Academia Española, 2023)

**Tableros de partículas:** Subproductos de madera que se obtienen a partir de astillas de madera. (Real Academia Española, 2023)

**Terrado:** Terraza (cubierta de un edificio). (Real Academia Española, 2023)

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Alinejad, M., Nikafshar, S., Gondaliya, A., Bagheri, S., Chen, N., Singh, S. K., Hodge, D. B., & Nejad, M. (2019). Lignin-Based Polyurethanes: Opportunities for Bio-Based Foams, Elastomers, Coatings and Adhesives. *Polymers*, *11*(7), 1202.
- Alwadani, N., Ghavidel, N., & Fatehi, P. (2021). Surface and interface characteristics of hydrophobic lignin derivatives in solvents and films. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, *609*(July 2020), 125656. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2020.125656>
- Bergamasco, S., Tamantini, S., Zikeli, F., Vinciguerra, V., Mugnozza, G. S., & Romagnoli, M. (2022). Synthesis and Characterizations of Eco-Friendly Organosolv Lignin-Based Polyurethane Coating Films for the Coating Industry. *Polymers*, *14*(3). <https://doi.org/10.3390/polym14030416>
- Brebu, M., & Vasile, C. (2010). *THERMAL DEGRADATION OF LIGNIN – A REVIEW*. *44*(9), 353–363.
- Cao, K. L. A., Kitamoto, Y., Iskandar, F., & Ogi, T. (2021). Sustainable porous hollow carbon spheres with high specific surface area derived from Kraft lignin. *Advanced Powder Technology*, *32*(6), 2064–2073. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.04.012>
- Chaves, F. A., & Jiménez, D. (2018). Accepted Manuscript. *Nanotechnology*, *29*(27).
- Chung, H., & Washburn, N. R. (2012). *Chemistry of lignin-based*. *1*, 137–160.
- Dastpak, A., Yliniemi, K., Monteiro, M. C. de O., Höhn, S., Virtanen, S., Lundström, M., & Wilson, B. P. (2018). From waste to valuable resource: Lignin as a sustainable anti-corrosion coating. *Coatings*, *8*(12). <https://doi.org/10.3390/COATINGS8120454>
- De Haro, J. C., Allegretti, C., Smit, A. T., Turri, S., D'Arrigo, P., & Griffini, G. (2019). Biobased Polyurethane Coatings with High Biomass Content: Tailored Properties by Lignin Selection. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, *7*(13), 11700–11711. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b01873>
- Espinoza C. A. (2016). Caracterización técnica económica para la implementación de impermeabilizantes naturales en viviendas de autoconstrucción, popular y de interés social. Tesis de Maestría en Ing. Civil en el área de construcción. U. A. de Aguascalientes.
- Fang, W., Yang, S., Wang, X., Yuan, T., & Sun, R. (2018). As featured in: <https://doi.org/10.1039/c6gc03206k>
- Ganasen, N., & Bahrami, A. (2023). *buildings A Scientometric Analysis Review on Agricultural Wastes Used*.
- Gutiérrez Villanueva, A., Guirola Céspedes, C., de Armas Martínez, A. C., Albernas Carvajal, Y., & Villanueva Ramos, G. (2020). Valorización De La Lignina En El Concepto De Biorrefinería (I). *Centro Azúcar*, *47*(4), 78–89.

- Hua, Q., Liu, L. Y., Karaaslan, M. A., & Renneckar, S. (2019). Aqueous Dispersions of Esterified Lignin Particles for Hydrophobic Coatings. *Frontiers in Chemistry*, 7(July), 1–10. <https://doi.org/10.3389/fchem.2019.00515>
- Jędrzejczak, P., Collins, M. N., Jesionowski, T., & Klapiszewski, Ł. (2021). The role of lignin and lignin-based materials in sustainable construction – A comprehensive review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 187(July), 624–650. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.125>
- Kadla, J. F., Kubo, S., Venditti, R. A., Gilbert, R. D., & Compere, A. L. (2002). *Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications*. 40, 2913–2920.
- Khan, T. A., Lee, J. H., & Kim, H. J. (2019). Lignin-Based Adhesives and Coatings. *Lignocellulose for Future Bioeconomy*, 153–206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816354-2.00009-8>
- Klein, S. E., Rumpf, J., Kusch, P., Albach, R., Rehahn, M., Witzleben, S., & Schulze, M. (2018). Unmodified kraft lignin isolated at room temperature from aqueous solution for preparation of highly flexible transparent polyurethane coatings. In *RSC Advances* (Vol. 8, Issue 71, pp. 40765–40777). <https://doi.org/10.1039/C8RA08579J>
- Li, J. (2011). *Isolation of lignin from wood*. 57. <https://theseus17-kk.lib.helsinki.fi/handle/10024/37903>
- Liu, W. J., Jiang, H., & Yu, H. Q. (2015). Thermochemical conversion of lignin to functional materials: a review and future directions. *Green Chemistry*, 17(11), 4888–4907. <https://doi.org/10.1039/c5gc01054c>
- Liu, X., Gao, C., Fu, C., Xi, Y., Fatehi, P., Zhao, J. R., Wang, S., Gibril, M. E., & Kong, F. (2022). Preparation and Performance of Lignin-Based Multifunctional Superhydrophobic Coating. *Molecules*, 27(4), 1–11. <https://doi.org/10.3390/molecules27041440>
- Lora, J. H., & Glasser, W. G. (2002). Recent industrial applications of lignin: A sustainable alternative to nonrenewable materials. *Journal of Polymers and the Environment*, 10(1–2), 39–48. <https://doi.org/10.1023/A:1021070006895>
- Luzardo, L. M. (2017). Capítulo 4 - Gravimetría. *Química Analítica Para Ingenieros Químicos*, 1–14.
- Ma, C., Kim, T., Liu, K., Ma, M., & Choi, S. (2021). *Multifunctional Lignin-Based Composite Materials for Emerging Applications*. 9(July), 1–12. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.708976>
- Magalhães, S., Alves, L., Medronho, B., Fonseca, A. C., Romano, A., Coelho, J. F. J., & Norgren, M. (2019). Brief overview on bio-based adhesives and sealants. *Polymers*, 11(10). <https://doi.org/10.3390/polym11101685>
- Maraveas, C. (2020). Production of sustainable construction materials using agro-wastes. *Materials*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/ma13020262>



- Martínez, P., & César, J. (2021). Desarrollo de impermeabilizante natural de techos en edificios históricos a base de cenizas de origen vegetal. <http://bdigital.dgse.uaa.mx:8080/xmlui/handle/11317/218>
- Martone, P. T., Estevez, J. M., Lu, F., Ruel, K., Denny, M. W., Somerville, C., & Ralph, J. (2009). Discovery of Lignin in Seaweed Reveals Convergent Evolution of Cell-Wall Architecture. *Current Biology*, 19(2), 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2008.12.031>
- Misra, M. (2020). *Processing , Carbonization , and Characterization of Lignin Based Electrospun Carbon Fibers :* 8(September). <https://doi.org/10.3389/fenrg.2020.00208>
- Moreno, A., Sipponen, M. H., & Moreno, A. (2020). *Materials Horizons processing and synthesis for current and future applications.* 2237–2257. <https://doi.org/10.1039/d0mh00798f>
- Mu, W., Ben, H., Ragauskas, A., & Deng, Y. (2013). *Lignin Pyrolysis Components and Upgrading — Technology Review.* February, 1183–1204. <https://doi.org/10.1007/s12155-013-9314-7>
- Naseem, A., Tabasum, S., Zia, K. M., Zuber, M., Ali, M., & Noreen, A. (2016). Lignin-derivatives based polymers, blends and composites: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 296–313. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.08.030>
- Park, Y., Doherty, W. O. S., & Halley, P. J. (2008). Developing lignin-based resin coatings and composites. *Industrial Crops and Products*, 27(2), 163–167. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2007.07.021>
- Qu, W., Yang, J., Sun, X., Bai, X., Jin, H., & Zhang, M. (2021). International Journal of Biological Macromolecules Towards producing high-quality lignin-based carbon fibers: A review of crucial factors affecting lignin properties and conversion techniques. *International Journal of Biological Macromolecules*, 189(June), 768–784. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.187>
- Radotić, K., & Mičić, M. (2016). *Methods for Extraction and Purification of Lignin and Cellulose from Plant Tissues.* 365–376. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3185-9\\_26](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3185-9_26)
- REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.<sup>a</sup> ed., [versión 23.6 en línea]. <<https://dle.rae.es>> (2023).
- RODRÍGUEZ-URIBE, J. C., SERRANO-ARELLANO, J., & TREJO-TORRES, Z. B. (2021). Sistema de impermeabilizante con base a mortero y mucilago de nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Arquitectura y Sustentabilidad Handbook T-I*, 69–82. <https://doi.org/10.35429/h.2021.14.1.69.82>
- Ruwoldt, J., Blindheim, F. H., & Chinga-Carrasco, G. (2023). Functional surfaces, films, and coatings with lignin - a critical review. *RSC Advances*, 13(18), 12529–12553. <https://doi.org/10.1039/d2ra08179b>

- Sahoo, S., Seydibeyoğlu, M. Ö., Mohanty, A. K., & Misra, M. (2011). Characterization of industrial lignins for their utilization in future value added applications. *Biomass and Bioenergy*, 35(10), 4230–4237. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.07.009>
- Suota, M. J., Kochevka, D. M., Ganter Moura, M. G., Pirich, C. L., Matos, M., Magalhães, W. L. E., & Ramos, L. P. (2021). Lignin functionalization strategies and the potential applications of its derivatives – A Review. *BioResources*, 16(3), 6471–6511. <https://doi.org/10.15376/biores.16.3.suota>
- Tribot, A., Amer, G., Abdou Alio, M., de Baynast, H., Delattre, C., Pons, A., Mathias, J. D., Callois, J. M., Vial, C., Michaud, P., & Dussap, C. G. (2019). Wood-lignin: Supply, extraction processes and use as bio-based material. *European Polymer Journal*, 112(January), 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.01.007>
- UTP. (2016). Análisis Gravimétrico. *Curso de Análisis Químico - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales*, 17, 12. [https://www.uv.es/baeza/Tema\\_4\\_Análisis\\_gravimétrico\\_2016.pdf](https://www.uv.es/baeza/Tema_4_Análisis_gravimétrico_2016.pdf)
- Vinod, A., Pulikkalparambil, H., Jagadeesh, P., Rangappa, S. M., & Siengchin, S. (2023). Recent advancements in lignocellulose biomass-based carbon fiber: Synthesis, properties, and applications. *Heliyon*, 9(3), e13614. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13614>
- Wang, S., Bai, J., Innocent, M. T., Wang, Q., Xiang, H., Tang, J., & Zhu, M. (2022). Lignin-based carbon fibers: Formation, modification and potential applications. *Green Energy and Environment*, 7(4), 578–605. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2021.04.006>
- Wang, Y., Liu, S., Wang, Q., Ji, X., Yang, G., Chen, J., & Fatehi, P. (2021). Strong, ductile and biodegradable polylactic acid/lignin-containing cellulose nanofibril composites with improved thermal and barrier properties. *Industrial Crops and Products*, 171(February), 113898. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113898>
- Wang, Y. Y., Meng, X., Pu, Y., & Ragauskas, A. J. (2020). Recent advances in the application of functionalized lignin in value-added polymeric materials. *Polymers*, 12(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/polym12102277>
- Younyia Mbiada, A. A., Musa, S., Richter, O., Kneer, A., & Barbe, S. (2018). Controlling surface hydrophobicity of cellulose-lignin composite coatings. *Polymers from Renewable Resources*, 9(2), 51–58. <https://doi.org/10.1177/204124791800900201>
- Yu, O., & Kim, K. H. (2020). Lignin to materials: A focused review on recent novel lignin applications. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(13). <https://doi.org/10.3390/app10134626>