



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS Y
AMBIENTALES DE SUELO COMPRIMIDO ESTABILIZADO CON LIGNINA KRAFT**

POR

Benjamín Antonio Alvial Vildósola

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Luis Merino

Profesores Comisión
Sebastián Calderón
Juan Pedro Elissetche

Diciembre 2025
Concepción (Chile)
© 2025 Benjamín Antonio Alvial Vildósola

© 2025 Benjamín Antonio Alvial Vildósola

No se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Para mis padres, Pilar y Hebert, por el amor incondicional, su guía y confianza. A mis hermanos, Gustavo y Diego por su cariño e inspirarme a siempre dar lo mejor de mí. A mi pareja, Valentina por su amor, paciencia y apoyo a lo largo de este proceso. A mis amigos, por su apoyo, cariño y risas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la empresa OXIQUM por facilitar la lignina Kraft para la presente investigación.

Agradezco al Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, al laboratorista Sr. Carlos Bustos por la ayuda brindada en el desarrollo experimental de mi investigación.

Además, agradezco al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, a los laboratoristas Sr. Alex González Rivas y Sr. Alex Muñoz por la ayuda brindada en el desarrollo experimental de mi investigación.

Agradezco a mi profesor guía y jefe de Laboratorio de Hormigones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción, Sr. Luis Merino, por su confianza, apoyo, empatía, gestión y disposición durante este proceso.

Agradezco a la Srta. Valentina Correa por su valiosa colaboración en mi proyecto, su constante apoyo y disposición durante el desarrollo de esta investigación, lo cual fue fundamental para alcanzar los objetivos propuestos.

Finalmente, agradecer al profesor perteneciente a la comisión evaluadora, profesor Dr. Sebastián Calderón del Departamento de Ingeniería Civil y profesor Dr. Juan Pedro Elissetche por sus comentarios y tiempo dedicado a la lectura de mi trabajo de investigación.

RESUMEN

En el contexto de la reducción de la huella de carbono en el sector de la construcción, el uso intensivo de hormigón armado, albañilería cerámica y estabilización de suelos con cemento y cal se reconoce como una fuente relevante de emisiones de CO₂. Como alternativa, los bloques de suelo comprimido se presentan como una solución de menor impacto energético, siempre que se garantice un desempeño mecánico adecuado. En este marco, la lignina Kraft, subproducto masivo de la industria papelera, surge como agente no convencional con potencial para valorizar un residuo industrial y aportar a la economía circular. Esta memoria tiene por objetivo evaluar experimentalmente las propiedades físico-mecánicas y ambientales de suelo comprimido estabilizado con lignina Kraft, comparando su desempeño con mezclas estabilizadas con cemento y con tecnologías constructivas de uso habitual.

La metodología contempló la caracterización de suelos provenientes de la Universidad de Concepción y del sector Nihuinco. Se realizaron ensayos de hidratación de cemento y cal para definir rangos óptimos de relación agua/ligante y se preparó una solución alcalina para favorecer la incorporación de lignina Kraft. Posteriormente, se aplicó el ensayo Proctor modificado a mezclas suelo-lignina, determinando humedad óptima y densidad seca máxima. Con estas condiciones se confeccionaron probetas cilíndricas de suelo Nihuinco estabilizadas con 5 % de cemento, 5 % de lignina Kraft y una mezcla patrón sin estabilizante, ensayadas a compresión en edades tempranas. En paralelo, se estimó la huella de carbono de bloques de suelo-lignina, suelo-cemento, hormigón y albañilería cerámica.

Los resultados muestran que las probetas con 5 % de lignina Kraft alcanzan resistencias a la compresión del orden de 0,50 MPa, superiores a las obtenidas con 5 % de cemento (0,44 MPa) y mayores que el patrón sin estabilización (0,34 MPa). Evidenciando que la lignina mejora la cohesión y el comportamiento mecánico de un suelo limoso, incluso frente a un estabilizante convencional bajo la misma dosificación. Desde el punto de vista ambiental, el bloque de suelo-lignina presenta un balance de carbono negativo, es decir, captura más CO₂ del que emite, mientras que el bloque de suelo sin lignina, el hormigón y la albañilería cerámica exhiben emisiones varias veces superiores.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que la lignina Kraft se perfila como un estabilizante no convencional, técnica y ambientalmente atractivo, para unidades de suelo comprimido, constituyendo una alternativa sustentable frente a soluciones constructivas tradicionales.

ABSTRACT

In the context of reducing the carbon footprint of the construction sector, the intensive use of reinforced concrete, fired clay masonry, and soil stabilization with cement and lime is recognized as a significant source of CO₂ emissions. As an alternative, compressed earth blocks emerge as a lower-energy-impact solution, provided that adequate mechanical performance is ensured. Within this framework, Kraft lignin—a massive by-product of the pulp industry—arises as a non-conventional agent with the potential to valorize an industrial residue and contribute to the circular economy. This thesis aims to experimentally evaluate the physical, mechanical, and environmental properties of compressed soil stabilized with Kraft lignin, comparing its performance with cement-stabilized mixtures and with construction technologies currently in use.

The methodology included the characterization of soils sourced from the University of Concepción and the Nihuinco area. Cement and lime hydration tests were conducted to define optimal water-to-binder ratios, and an alkaline solution was prepared to facilitate the incorporation of Kraft lignin. Subsequently, the modified Proctor test was applied to soil–lignin mixtures to determine optimum moisture content and maximum dry density. Under these conditions, cylindrical specimens of Nihuinco soil stabilized with 5% cement, 5% Kraft lignin, and an unstabilized reference mixture were fabricated and tested in compression at early ages. In parallel, the carbon footprint of soil–lignin blocks, soil–cement blocks, concrete, and fired clay masonry was estimated.

The results show that specimens containing 5% Kraft lignin achieved compressive strengths on the order of 0.50 MPa, higher than those obtained with 5% cement (0.44 MPa) and greater than the unstabilized reference (0.34 MPa). This demonstrates that lignin enhances the cohesion and mechanical behavior of a silty soil, even when compared to a conventional stabilizer at the same dosage. From an environmental perspective, the soil–lignin block exhibits a negative carbon balance—that is, it sequesters more CO₂ than it emits—while the soil block without lignin, concrete, and fired clay masonry display emissions several times higher.

Overall, these findings indicate that Kraft lignin stands out as a technically and environmentally attractive non-conventional stabilizer for compressed soil units, constituting a sustainable alternative to traditional construction solutions.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	7
1.1. Motivación	7
1.2. Objetivos	8
1.2.1 Objetivo general	8
1.2.2 Objetivos específicos.....	8
1.3. Alcance del estudio	8
1.4. Plan de trabajo	9
1.5. Principales resultados	9
1.6. Organización de la memoria de título	10
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES TEÓRICOS DE MATERIALES ESTABILIZADORES DE SUELOS 11	
2.1. Introducción	11
2.2. Suelo.....	11
2.2.1 Suelo UDEC	12
2.2.2 Suelo Nihuinco	12
2.3. Bloques de suelo comprimido (BSC).....	14
2.4. Normativa.....	14
2.5. Estabilizadores convencionales	16
2.5.1 Cemento	17
2.5.2 Cal	18
2.6. Estabilizadores no convencionales.....	19
2.6.1 Lignina	20
2.6.2 Estabilizantes alternativos al uso de lignina.....	23
2.7. Impacto ambiental	25
2.8. Conclusión.....	28
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOS	30

3.1.	Introducción	30
3.2.	Ensayos de hidratación.....	30
3.2.1	Hidratación de cemento.....	30
3.2.2	Hidratación de cal.....	33
3.3.	Solución de lignina.....	35
3.4.	Densidad de suelo-lignina	37
3.5.	Ensayos de probetas de suelo	38
3.5.1	Ensayos de probetas de suelo-cemento	38
3.5.2	Ensayos de probetas de suelo-lignina.....	42
3.6.	Análisis ambiental	44
3.7.	Conclusión.....	46
CAPÍTULO 4:	RESULTADOS	48
4.1.	Introducción	48
4.2.	Ensayos de hidratación.....	48
4.2.1	Hidratación del cemento.....	48
4.2.2	Hidratación de cal.....	55
4.3.	Densidad de suelo-lignina	58
4.4.	Resultados de probetas de suelo estabilizado.....	58
4.4.1	Probetas de suelo-cemento	59
4.4.2	Probetas de suelo-lignina	61
4.5.	Análisis ambiental	63
4.6.	Conclusión.....	65
CAPÍTULO 5:	CONCLUSIONES.....	68
GLOSARIO	71	
REFERENCIAS	73	
ANEXO 1.1	CONTRIBUCIÓN A LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE....	76
ANEXO 2.1	CLASIFICACIÓN DE SUELO UDEC.....	77

ANEXO 2.2 CLASIFICACIÓN DE SUELO NIHUINCO	79
ANEXO 2.3 NORMATIVA INTERNACIONAL	80
ANEXO 2.4 NORMA NCH1534/2 OF.2008: DETERMINACIÓN DE DENSIDAD Y CONTENIDO DE HUMEDAD DE SUELOS COMPACTADOS	83
ANEXO 4.1 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PRIMERA CONFECCIÓN ANÁLISIS HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.....	86
ANEXO 4.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SEGUNDA CONFECCIÓN ANÁLISIS HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.....	87
ANEXO 4.3 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE TERCERA CONFECCIÓN ANÁLISIS HIDRATACIÓN DEL CEMENTO.....	89
ANEXO 4.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PRIMERA CONFECCIÓN ANÁLISIS HIDRATACIÓN DEL CAL	91
ANEXO 4.5 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SEGUNDA CONFECCIÓN ANÁLISIS HIDRATACIÓN DEL CAL	93
ANEXO 4.6 PROCTOR DE SUELO-LIGNINA	95
ANEXO 4.7 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PROBETAS SUELO-CEMENTO CON SUELO UDEC	96
ANEXO 4.8 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PROBETAS SUELO-CEMENTO CON SUELO NIHUINCO.....	98
ANEXO 4.9 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE PROBETAS SUELO-LIGNINA CON SUELO NIHUINCO.....	99

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros técnicos normativa colombiana NTC 5324.....	15
Tabla 2.2 Requisitos de resistencia a compresión norma chilena NCh 169-1	16
Tabla 3.1 Materiales y especímenes confeccionados para hidratación de cemento.....	32
Tabla 3.2 Materiales y especímenes confeccionados para segunda etapa de hidratación de cemento	32
Tabla 3.3 Materiales y especímenes confeccionados para tercera etapa de hidratación de cemento.	33
Tabla 3.4 Materiales y especímenes confeccionados para hidratación de cal	34
Tabla 3.5 Materiales y especímenes confeccionados para segunda etapa de hidratación de cal	34
Tabla 3.6 Materiales incorporados para formar solución.....	37
Tabla 3.7 Dosificación de probetas para ensayo Proctor modificado	38
Tabla 3.8 Materiales y especímenes confeccionados para elaboración de probetas suelo-cemento..	40
Tabla 3.9 Materiales y especímenes confeccionados en segunda etapa para elaboración de probetas suelo-cemento.....	42
Tabla 3.10 Materiales y especímenes confeccionados para elaboración de probetas suelo-lignina ..	44
Tabla 3.11 Emisiones de CO ₂ por kg de cemento y cal	45
Tabla 4.1 Densidad promedio de probetas para hidratación de cemento	49
Tabla 4.2 Densidad promedio de probetas para segunda etapa de hidratación de cemento	50
Tabla 4.3 Densidad promedio de probetas para tercera etapa de hidratación de cemento.....	52
Tabla 4.4 Densidad promedio de probetas para hidratación de cal.....	55
Tabla 4.5 Densidad promedio de probetas para segunda etapa de hidratación de cal	56
Tabla 4.6 Densidad promedio de probetas para probetas de suelo-cemento	59
Tabla 4.7 Cantidad de cemento para confección de muro	63
Tabla 4.8 Cantidad de ladrillos y cemento necesarias para confección de muro.....	64
Tabla 4.9 Cantidad de BSC y BSC-lignina necesarios para confección de muro.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Curva Proctor modificado suelo UDEC	12
Figura 2.2 Curva Proctor modificado suelo Nihuinco	13
Figura 2.3 Proceso de confección de bloques de suelo comprimido	14
Figura 2.4 Resistencia a compresión de BTC con adición de cemento y cal.....	18
Figura 2.5 Resistencia a compresión de BTC con adición de cal y cemento.....	19
Figura 2.6 Esquema proceso de obtención de lignina y proceso LignoBoost.....	21
Figura 2.7 Relación entre la resistencia a compresión y la densidad seca de BSC con lignina, comparados con hormigones livianos	23
Figura 2.8 Resistencia a compresión de BTC con reemplazo de ladrillo triturado.....	24
Figura 2.9 Resistencia a compresión de BTC con adición de WTSF	25
Figura 2.10 Comparación de emisiones de CO ₂ en ciclos de vida de ladrillo cerámico e ICEB.....	27
Figura 2.11 Emisiones de CO ₂ de bloques hechos a partir de lignina.....	28
Figura 3.1 Cemento utilizado para la confección de probetas	31
Figura 3.2 Moldes utilizados para confección de probetas	31
Figura 3.3 Mezcladora utilizada para confección de probetas	31
Figura 3.4 a) Equipo de ensayo a flexión b) Equipo de ensayo a compresión.....	33
Figura 3.5 Cal utilizada para la confección de probetas	33
Figura 3.6 <i>Dregs</i> utilizado para alcalinización del agua	35
Figura 3.7 Escala de pH	36
Figura 3.8 Alcalinización de agua mediante incorporación de <i>dregs</i>	36
Figura 3.9 Solución alcalina.....	37
Figura 3.10 a) Suelo UDEC b) Cemento utilizado para la confección de probetas.....	38
Figura 3.11 Materiales utilizados para confección de probetas	39
Figura 3.12 Probetas de suelo-cemento.....	39
Figura 3.13 Prensa hidráulica para ensayo a compresión	41
Figura 3.14 a) Suelo Nihuinco b) Lignina Kraft en solución.....	43
Figura 4.1 Resistencia a compresión de probetas confeccionadas para hidratación de cemento a la edad de siete días.....	49
Figura 4.2 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento.....	51

Figura 4.3 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento.....	51
Figura 4.4 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento.....	53
Figura 4.5 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento.....	53
Figura 4.6 Desempeño mecánico del cemento para distintas relaciones agua/cemento	54
Figura 4.7 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cal para distintas relaciones agua/cemento	55
Figura 4.8 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cal para distintas relaciones agua/cemento.....	56
Figura 4.9 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cal-cemento para distintas relaciones agua/cemento.....	57
Figura 4.10 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cal-cemento para distintas relaciones agua/cemento	57
Figura 4.11 Curva Proctor modificado para suelo con adición de lignina.....	58
Figura 4.12 Evolución de resistencia a compresión de probetas de suelo-cemento con distintas relaciones agua/cemento	60
Figura 4.13 Falla de probeta de suelo Udec -cemento	60
Figura 4.14 Evolución de resistencia a compresión de probetas de suelo estabilizadas con cemento, lignina y suelo natural	62
Figura 4.15 a) Falla de probeta de suelo Nihuinco-cemento b) Falla de probeta de suelo Nihuinco-lignina.....	62
Figura 4.16 Gráfico de resistencia a compresión de probetas y su variabilidad de resultados	63
Figura 4.17 kgCO ₂ generados por cada materialidad en muro de 1m ²	65

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Es bien sabido que algunos de los principales problemas que aquejan actualmente a nuestra sociedad están directamente relacionados con la contaminación ambiental y el aumento sostenido de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, el presente estudio surge de la necesidad de alternativas constructivas que aseguren desempeño y, al mismo tiempo, reduzcan de forma significativa la huella de carbono del sector edificatorio en Chile. Entre 2019 y 2022, según la base de datos indicadores para el seguimiento de la construcción en Chile, se autorizaron más de 20 millones de m² de muros, mayoritariamente en hormigón armado (44 %), albañilería (27,3 %) y madera (7,2 %). Considerando que el hormigón armado emite del orden de 33 kg CO₂/m² y la albañilería 19 kg CO₂/m², frente a un balance aproximado de -8 kg CO₂/m² en madera, se evidencia una oportunidad concreta para promover materiales de menor impacto.

En este contexto, los estabilizadores tradicionales como el cemento y la cal generan emisiones significativas. En el caso del cemento, su proceso de producción libera aproximadamente 0,9 toneladas de CO₂ por tonelada de cemento, valor equivalente a 0,9 kg CO₂ por kilogramo, mientras que la cal presenta factores cercanos a 0,785 kg CO₂ por kilogramo. Estas cifras cobran especial relevancia si se considera que la industria cementera aporta entre 5 % y 8 % de las emisiones globales de CO₂, constituyéndose como la segunda mayor fuente emisora a nivel mundial. Frente a este escenario, resulta pertinente replantear las formulaciones de bloques de tierra comprimida (BSC), una tecnología que, al no requerir procesos de cocción, presenta ventajas energéticas importantes. No obstante, su desempeño mecánico y su balance ambiental dependen de manera directa del tipo y la cantidad de estabilizante incorporado.

La lignina Kraft, subproducto masivo de la industria papelera, emerge, así como un insumo no convencional con potencial para la economía circular, al reintroducir un residuo en ciclos productivos y reducir impactos. Sobre esta base, se propone un análisis experimental sistemático de su uso como estabilizante en BTC, con el fin de aportar evidencia aplicada que amplíe el abanico de soluciones constructivas sustentables en Chile.

El Anexo 1.1 muestra la contribución de la Memoria de Título a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar experimentalmente las propiedades físico-mecánicas y ambientales de suelo comprimido estabilizado con agentes no convencionales.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Determinar los agentes estabilizadores no convencionales a utilizar a partir de la revisión bibliográfica.
2. Determinar los procedimientos experimentales de evaluación de suelo comprimido.
3. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de suelo comprimido con agentes estabilizadores no convencionales.
4. Analizar comparativamente la huella de carbono de bloques de suelo comprimido con respecto a otras tecnologías constructivas.

1.3. Alcance del estudio

El presente estudio se enmarca en la evaluación experimental de las propiedades físico–mecánicas de suelo comprimido, incorporando lignina Kraft como agente estabilizador no convencional. El trabajo considera además la confección de probetas de suelo estabilizados con cemento, utilizados como referencia para establecer comparaciones directas en términos de resistencia a compresión y densidad seca.

El alcance del estudio comprende las etapas de preparación de materiales, caracterización del suelo, confección y curado de probetas, así como la ejecución de ensayos de resistencia a compresión bajo condiciones controladas de laboratorio. El análisis se limita a la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas a edades tempranas, sin abordar aspectos de durabilidad a largo plazo, comportamiento higrotérmico ni variaciones en condiciones ambientales extremas.

Asimismo, se realiza una aproximación inicial al impacto ambiental asociado al uso de lignina Kraft como sustituto parcial del cemento, tomando como referencia estudios previos y factores de emisión conocidos, sin desarrollar aún un análisis de ciclo de vida completo.

1.4. Plan de trabajo

El desarrollo de la investigación se estructuró en diversas etapas, orientadas a evaluar el potencial de la lignina Kraft como agente estabilizante no convencional en bloques de suelo comprimida (BSC).

En primer lugar, se llevó a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva sobre estabilizantes no convencionales, con el fin de identificar antecedentes técnicos y experiencias previas relevantes. A partir de esta revisión, se realizó además un análisis de la disponibilidad de dichos agentes, considerando aspectos de factibilidad y acceso a nivel local.

En paralelo, se estudiaron los estabilizantes convencionales comúnmente utilizados en la estabilización de suelos, efectuándose ensayos de verificación que permitieron contrastar su efectividad. Dentro de esta etapa, se incluyó la medición del proceso de hidratación de los agentes convencionales, con el propósito de optimizar sus condiciones de aplicación y contar con un punto de referencia sólido para la comparación posterior.

Con el foco en la lignina Kraft, se generó una solución destinada a su activación, lo que posibilitó su incorporación en mezclas de suelo bajo condiciones controladas. Posteriormente, se aplicó el ensayo Proctor modificado al suelo combinado con lignina Kraft, con el objetivo de determinar la relación humedad–densidad y establecer las condiciones óptimas de compactación.

Finalmente, se fabricaron probetas de suelo con lignina y probetas de suelo con cemento, utilizando para su confección el molde y la energía de compactación correspondientes al ensayo Proctor modificado. Estas probetas fueron curadas bajo condiciones controladas y posteriormente sometidas a ensayos de resistencia a compresión, con el fin de comparar el desempeño mecánico de las probetas estabilizadas con un agente convencional (cemento) frente a la alternativa no convencional (lignina Kraft).

1.5. Principales resultados

Los ensayos de hidratación permitieron establecer la relación agua/cemento óptima para maximizar la resistencia mecánica inicial del material. Se observó que las probetas con relaciones comprendidas entre 0,25 y 0,30 presentaron los mayores valores de resistencia a compresión, evidenciando una hidratación eficiente. En contraste, las mezclas con relaciones más altas entre 0,35 y 0,40 mostraron una disminución progresiva de la resistencia debido al aumento de la porosidad. Estos resultados

coinciden con lo planteado por Czernin (1962), quien estimó una capacidad teórica de combinación de agua cercana al 28% en peso para el cemento. En el caso de la cal, las resistencias iniciales fueron menores, aunque el material presentó una evolución más estable en el tiempo.

Con respecto a la confección de probetas de suelo Nihuinco se obtuvieron probetas de 11,6 cm de altura y 10,1 cm de diámetro con densidades promedio cercanas a $1,5 \text{ g/cm}^3$. Los resultados mostraron que para adición del 5% de cemento respecto al peso seco del suelo se obtuvo una resistencia máxima a compresión de 0,44 MPa. Con respecto a las probetas con adición de 5% de lignina respecto al peso del suelo se obtuvo una resistencia máxima a compresión de 0,50 MPa. Para la probeta patrón confeccionada sin estabilizante se obtuvo una resistencia a compresión de 0,34 MPa. De esta manera queda en evidencia que el uso de lignina como estabilizante de suelo genera un aumento en la resistencia a la compresión superior a la del cemento.

Desde el punto de vista ambiental, los resultados muestran un comportamiento igualmente favorable. El análisis comparativo de emisiones evidenció que el bloque de suelo–lignina (BSC-lignina) presenta un balance de carbono negativo de $-0,6 \text{ kgCO}_2$, lo que significa que captura más dióxido de carbono del que emite durante su ciclo de vida. En contraste, el bloque de suelo comprimido convencional (BSC) genera $18,6 \text{ kgCO}_2$, el hormigón $27,7 \text{ kgCO}_2$, y la albañilería tradicional alcanza $33,9 \text{ kgCO}_2$. En términos relativos, el hormigón emite cerca de 46 veces más CO_2 , la albañilería aproximadamente 57 veces más, e incluso el BSC sin lignina alrededor de 31 veces más que el bloque con lignina.

1.6. Organización de la memoria de título

Esta memoria se compone de cinco capítulos. El capítulo 2 presenta los antecedentes teóricos sobre los materiales estabilizadores de suelos, abordando el comportamiento del suelo, la tecnología de los bloques de suelo comprimido, la normativa vigente y los distintos tipos de estabilizadores, tanto convencionales como no convencionales, junto con su impacto ambiental. El Capítulo 3 describe los materiales y métodos utilizados, incluyendo los ensayos de hidratación, la preparación de la solución de lignina, la caracterización del suelo y la confección de las probetas estabilizadas. El Capítulo 4 expone los resultados obtenidos en las distintas etapas experimentales, abarcando los ensayos de hidratación, la caracterización de suelos y el desempeño mecánico de las probetas estabilizadas. Finalmente, el Capítulo 5 presenta las conclusiones generales del estudio y las proyecciones del trabajo desarrollado.

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES TEÓRICOS DE MATERIALES ESTABILIZADORES DE SUELOS

2.1. Introducción

Los Bloques de Suelo Comprimido (BSC) son una alternativa constructiva sostenible por su eficiencia, bajo impacto ambiental y uso de recursos locales. Su desempeño depende del suelo y de los aditivos empleados para mejorar resistencia y durabilidad. Tradicionalmente se han utilizado cemento y cal, cuyos procesos de hidratación y reacciones puzolánicas otorgan cohesión al material. No obstante, surge el interés en agentes no convencionales como la lignina Kraft y los *dregs*, que podrían reducir costos y huella ambiental, aunque requieren análisis comparativos frente a los estabilizadores tradicionales.

2.2. Suelo

Los suelos son grupos formados por partículas de diferentes tamaños y formas producto de la degradación de las rocas; su composición es de sólidos, líquidos y gases. Las características de los suelos son variadas y dependen de las partículas que los conforman (Addleson, 1983).

Para poder facilitar la identificación y propiedades de cada suelo se han creado sistemas de clasificación, el más aceptado en la actualidad es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (S.U.C.S) que por medio de pruebas de laboratorio ya establecidas caracteriza, clasifica y da nombre al suelo.

Existen dos grandes grupos en los que se pueden clasificar los suelos dependiendo de su tamaño, suelos gruesos (gravas y arenas) y suelos finos (limos y arcillas). Las gravas son suelos gruesos con un tamaño mayor a 4.75mm y las arenas menores a 4.75mm, pero mayores a 0.075mm. Los suelos finos se tienen cuando el 50% de las partículas son de tamaño menores a 0.075mm, en este grupo la diferencia entre limos y arcillas radica en las características de plasticidad de cada uno. Los limos presentan baja o nula plasticidad, lo que significa que apenas cambian sus propiedades al variar su contenido de humedad, siendo más susceptibles a la erosión y con limitada cohesión entre partículas. En cambio, las arcillas exhiben alta plasticidad, es decir, una marcada capacidad de moldearse en estado húmedo y endurecerse al secarse, producto de su mineralogía y la presencia de partículas de tamaño coloidal.

2.2.1 Suelo UDEC

En relación al suelo proveniente de la Universidad de Concepción, se le realizó una clasificación de suelos utilizando el sistema universal USCS desarrollado por Casagrande, que clasifica a los suelos en función de la granulometría, plasticidad y otras propiedades.

En base al sistema utilizado se obtuvo que el suelo UDEC corresponde a una SM-Arena limosa.

La humedad óptima de compactación se obtuvo, a través del ensayo Proctor modificado, un valor de 12% y una densidad seca máxima de $1,92 \text{ g/cm}^3$. Lo anterior se muestra a continuación en la Figura 2.1

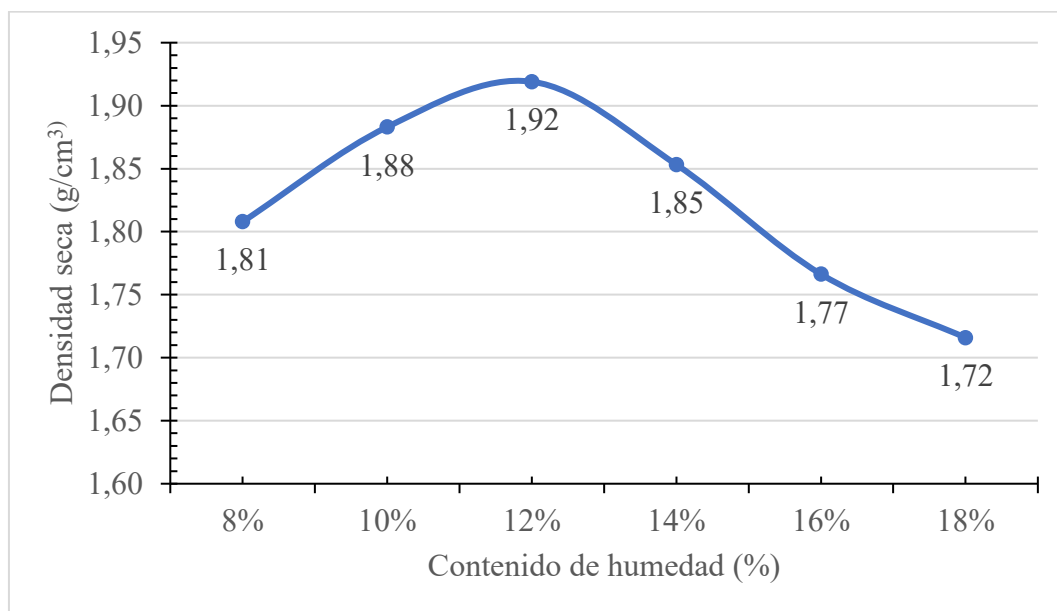


Figura 2.1 Curva Proctor modificado suelo UDEC

Los detalles sobre cada uno de los apartados necesarios para generar la clasificación se presentan en el Anexo 2.1.

2.2.2 Suelo Nihuinco

Para el suelo proveniente del sector Nihuinco, se tiene una clasificación que incorpora un análisis detallado, utilizando el Sistema de Clasificación de Suelos Revisado (RSCS) de Santamarina para mezclas gruesas y fina. Con este sistema, se puede complementar la clasificación de suelos utilizando el sistema universal USCS desarrollado por Casagrande.

En base a los sistemas de clasificación se obtuvo que el suelo Nihuinco corresponde a un suelo MH - Limo de alta plasticidad, donde la clasificación F(F) corrobora el análisis de la granulometría (98% de finos) indicando que tanto el comportamiento mecánico como hidráulico están completamente controlados por la fracción fina. La sigla (H) confirma el análisis de los límites de Atterberg avanzados. Con un LLbrine de 81%, el suelo se clasifica en la zona de alta plasticidad. (L) confirma que la variación entre los límites líquidos (LLdw, LLbrine y LLkor) es pequeña, lo que se traduce en baja sensibilidad a la química del agua. Su comportamiento está dominado por una alta compresibilidad y una baja permeabilidad, con propiedades estables ante cambios en la salinidad o la presencia de fluidos orgánicos.

Luego la humedad óptima de compactación se obtuvo, a través del ensayo Proctor modificado, un valor de 47% y una densidad seca máxima de 1 g/cm³. Lo anterior se muestra a continuación en la Figura 2.2.

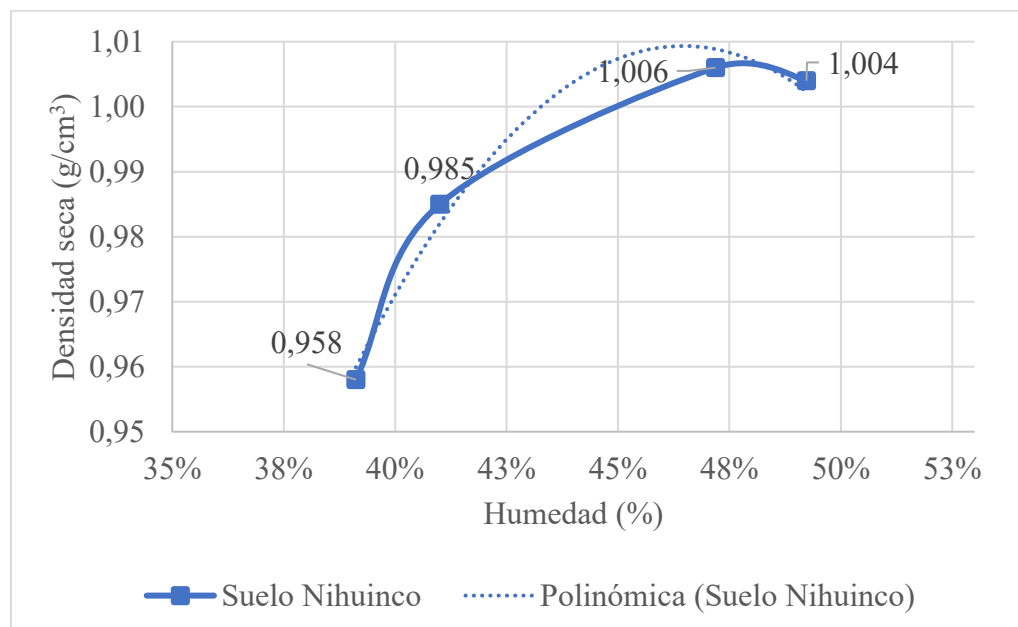


Figura 2.2 Curva Proctor modificado suelo Nihuinco

Los detalles sobre cada uno de los apartados necesarios para generar la clasificación se presentan en el Anexo 2.2.

2.3. Bloques de suelo comprimido (BSC)

Los bloques de suelo comprimido corresponden a unidades fabricadas a partir de suelo compactado en moldes de manera manual o mecánica, a los cuales se le puede incorporar aditivos de manera de mejorar su resistencia y durabilidad. Tras su confección se someten a un proceso de curado al aire libre, permitiendo el desarrollo de propiedades físicas y mecánicas que otorgaran mayor uniformidad en comparación con otros métodos de construcción con suelo. El proceso de confección se muestra en la Figura 2.3



Figura 2.3 Proceso de confección de bloques de suelo comprimido

La tecnología del BSC inició su desarrollo en Colombia a comienzos de la década de los 50, de la mano del Centro Interamericano de Vivienda y Planeamiento (CINVA), como una alternativa económica de elementos constructivos que, actualmente, se considera una de las tecnologías latinoamericanas más difundidas en el mundo (Angulo Jaramillo y Carreño Charry, 2019)

Se debe tener en cuenta que al igual que las demás técnicas de construcción con suelo los BSC presentan ciertas limitaciones como puede ser que si las características de la tierra empleada para su fabricación no son las adecuadas, su resistencia a compresión no será suficiente para cumplir funciones estructurales (Ouedraogo *et al.*, 2020), por otro lado, independientemente del tipo de tierra empleada para su fabricación, exhiben algunos problemas de durabilidad, degradándose frente a ciertos fenómenos atmosféricos, en especial el agua (Laborel-Préneron *et al.*, 2017).

Ambas limitaciones pueden minimizarse e, incluso, eliminarse empleando pequeños porcentajes de estabilizantes químicos durante su fabricación, los cuales mejoran sus propiedades físico-mecánicas, aumentando su resistencia y durabilidad (Sebastián Guzmán y Mateo Iñiguez, 2016).

2.4. Normativa

La regulación normativa en torno a los Bloques de Suelo Comprimido (BSC) resulta fundamental para establecer criterios de calidad, desempeño mecánico y durabilidad que garanticen su uso seguro en la construcción. A diferencia de materiales como el hormigón o el ladrillo cocido, los BSC carecen en

Chile de una normativa específica, lo que obliga a recurrir a referencias internacionales y a comparaciones con normativas aplicables a otros materiales. Se presentan en el Anexo 2.3 un resumen de normativas internacionales. Esta ausencia constituye una limitación, pero también refuerza la necesidad de investigaciones que entreguen antecedentes técnicos que puedan orientar futuras regulaciones nacionales.

En este contexto, la normativa colombiana NTC 5324 (ICONTEC, 2009) se ha consolidado como un referente en Latinoamérica. Esta norma establece parámetros técnicos estandarizados para evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los bloques de suelo comprimido permitiéndonos contar con un marco comparativo para valorar los resultados experimentales obtenidos en esta investigación. Estos parámetros se resumen en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Parámetros técnicos normativa colombiana NTC 5324

Propiedad	Valor exigido por norma	Observaciones
Resistencia mínima a compresión	$\geq 2,0 \text{ MPa}$	Para bloques no portantes en muros de una planta.
	$\geq 4,0 \text{ MPa}$	Para muros portantes de hasta dos plantas.
	$\geq 6,0 \text{ MPa}$	Para muros portantes de más de dos plantas.
Absorción de agua (24h)	$\leq 20\%$	Determinada como porcentaje de absorción de masa
Densidad seca mínima	1700 kg/m^3	Relacionada con la compactación óptima del bloque.
Durabilidad (ciclos humedad-seco)	Pérdida de masa $\leq 7\%$	Después de 10 ciclos estándar.

Fuente: ICONTEC (2009)

En contraste, en Chile la normativa vigente se encuentra orientada a ladrillos de arcilla cocida, específicamente la NCh169-1 (Instituto Nacional de Normalización [INN], 2006), que regula requisitos de resistencia a compresión, absorción de agua y dimensiones para este tipo de unidades de albañilería. Si bien no corresponde directamente a los BSC, esta normativa puede utilizarse como una guía de referencia en ausencia de estándares nacionales propios, sirviendo de base para evaluar la factibilidad de su aplicación en la industria local.

A continuación, se muestra un resumen sobre los valores de resistencia a compresión de la norma NCh169-1 en la Tabla 2.2

Tabla 2.2 Requisitos de resistencia a compresión norma chilena NCh 169-1

Propiedad	Requisitos según norma
Clasificación	Ladrillos macizos, perforados y huecos.
Grado de calidad	Grado 1 - estructurales exigentes, como muros portantes en edificaciones Grado 2 - muros portantes de una o dos plantas Grado 3 - tabiquería interior o cerramientos secundarios
Resistencia a compresión	Grado 1: ≥ 15 MPa Grado 2: ≥ 11 MPa Grado 3: ≥ 5 MPa

Fuente: INN (2001)

En la estabilización de suelos y la fabricación de bloques de tierra comprimida resulta esencial determinar la relación humedad–densidad óptima del material. Para ello se utiliza el Ensayo Proctor, el cual evalúa la energía de compactación necesaria para alcanzar la máxima densidad seca posible del suelo a un contenido de humedad dado.

Este procedimiento se encuentra normalizado en la NCh1534/2 (INN, 2008). En el contexto de esta investigación se empleó el método Proctor modificado, el cual aplica una mayor energía de compactación que el ensayo estándar, siendo más representativo de las condiciones de densificación requeridas en la confección de bloques de suelo comprimido.

Los resultados obtenidos mediante este ensayo permiten establecer las condiciones de compactación que deben replicarse durante la fabricación de las probetas, asegurando uniformidad, control de calidad y comparabilidad en los ensayos de resistencia mecánica posteriores.

En el Anexo 2.4 se presentan con mayor detalle los parámetros normativos, equipos utilizados y procedimiento experimental asociado al Ensayo Proctor, así como la energía específica aplicada y el cálculo de la densidad seca máxima correspondiente.

2.5. Estabilizadores convencionales

Se entiende por estabilizadores convencionales a aquellos materiales y/o técnicas ampliamente utilizadas que, al incorporarse o aplicarse al suelo, modifican sus propiedades fisicoquímicas para mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad. Entre ellos destacan principalmente el cemento y la cal, históricamente empleados en la estabilización de suelos y en la fabricación de unidades de mampostería. En términos generales, los estabilizadores convencionales se clasifican en físicos, que

actúan por mejora granulométrica y densificación, y químicos, que actúan por reacciones de hidratación, puzolánicas y/o carbonatación.

2.5.1 Cemento

El cemento es un material aglomerante hidráulico, generalmente en forma de polvo fino, que al mezclarse con agua forma una pasta capaz de fraguar y endurecer tanto en el aire como en contacto con agua. Su variedad más utilizada en la construcción es el cemento Portland, compuesto principalmente por silicatos y aluminatos de calcio obtenidos a partir de la calcinación de piedra caliza y arcilla (Neville, 2011).

La hidratación del cemento es el proceso mediante el cual los compuestos del Clinker reaccionan con el agua, originando productos cementantes responsables de la resistencia mecánica del material. Los silicatos de calcio constituyen las fases más relevantes: el silicato tricálcico (C_3S) se hidrata rápidamente, generando silicato de calcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), lo que aporta resistencia temprana; mientras que el silicato dicálcico (C_2S) reacciona más lentamente, contribuyendo al desarrollo de la resistencia a largo plazo.

En el caso de los aluminatos, el aluminato tricálcico (C_3A) y el ferritoaluminato tetracálcico (C_4AF) intervienen en procesos secundarios, especialmente en presencia de yeso, que regula la reacción inicial del C_3A mediante la formación de etringita. Estos compuestos también influyen en la durabilidad frente a agentes externos.

De manera general, se estima que la hidratación del cemento bordea el 28%, valor que asegura una hidratación adecuada de sus fases principales (Czernin, 1962).

En relación con el uso de cemento como estabilizador de bloques de suelo comprimido (Cabrera *et al.*, 2020) evaluaron el uso de cemento en porcentajes que iban desde un 0% a un 20%, estableciendo que la resistencia a compresión aumenta significativamente y una mejora considerable para porcentajes superiores al 5%, como se puede ver en la Figura 2.4.

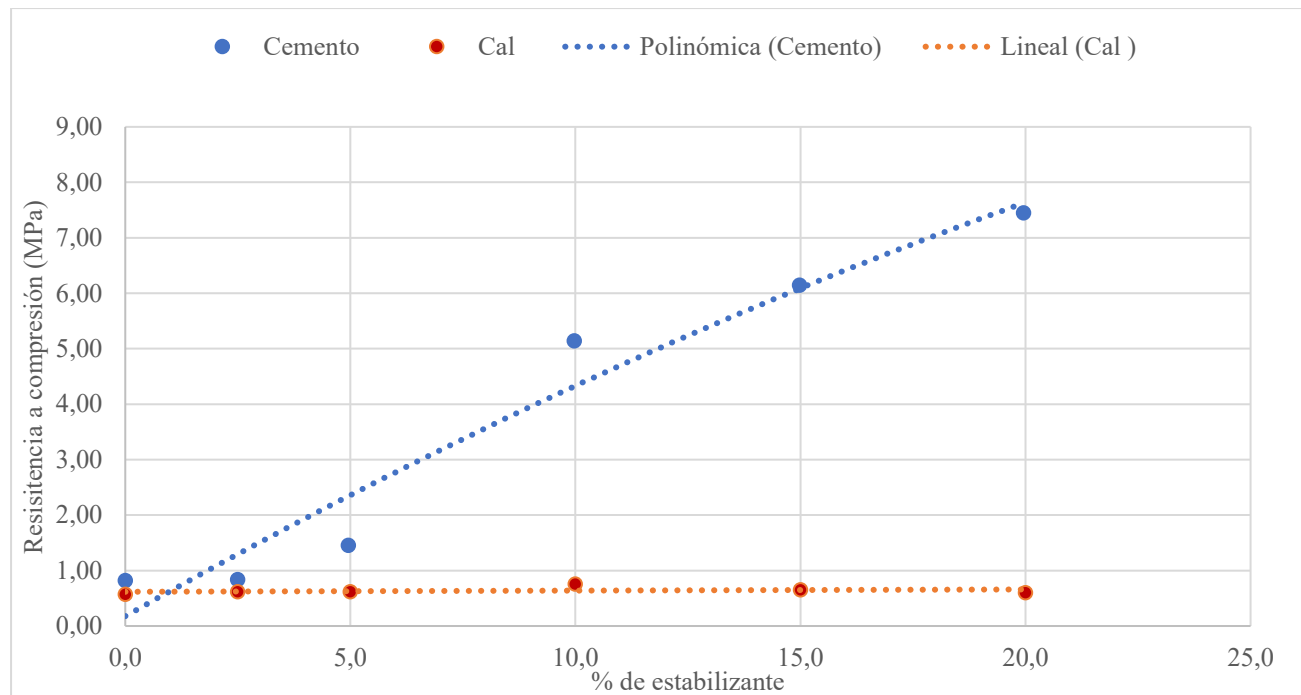


Figura 2.4 Resistencia a compresión de BTC con adición de cemento y cal

Fuente: Cabrera (2020)

2.5.2 Cal

La cal es un material aglomerante obtenido a partir de la calcinación de rocas calizas ricas en carbonato de calcio (CaCO_3), que al ser sometidas a altas temperaturas producen óxido de calcio (CaO), conocido como cal viva. Posteriormente, mediante su hidratación con agua, se forma hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), denominado cal apagada, compuesto que puede reaccionar con los componentes arcillosos del suelo a través de reacciones puzolánicas, dando lugar a productos cementantes estables (Neville, 2011).

En relación con el uso de la cal como estabilizador en bloques de suelo comprimido (Cabrera *et al.*, 2020) evaluaron su incorporación en porcentajes desde un 0% a un 20% con el objetivo de determinar su efecto sobre las propiedades mecánicas del material. Los resultados obtenidos muestran que la estabilización con cal no produce incrementos significativos en la resistencia a compresión de los bloques, lo que limita su efectividad frente a otros aditivos convencionales como el cemento. Adicionalmente, se constató que la producción y utilización de cal en estas aplicaciones aumenta de manera considerable el impacto ambiental asociado, principalmente debido a las emisiones de CO_2 generadas durante su proceso de calcinación.

En un estudio experimental con bloques de suelo comprimido, (Nagaraj *et al.*, 2014) evaluaron la incorporación de 6% de cemento y 2% de cal como agentes estabilizadores combinados, comparando su desempeño con bloques elaborados únicamente con cemento. Los resultados, presentes en la Figura 2.5 demostraron que la mezcla de ambos materiales mejora de manera más efectiva el desarrollo de la resistencia a largo plazo, en comparación con la adición exclusiva de cemento. Este comportamiento se explica porque el cemento actúa principalmente sobre la fracción arenosa del suelo, generando productos de hidratación que aportan cohesión, mientras que la cal reacciona con la fracción arcillosa, promoviendo reacciones puzolánicas que refuerzan la estructura del bloque. En conjunto, ambos estabilizadores generan una sinergia que incrementa la resistencia y durabilidad de los BTC, lo que se traduce en un mejor desempeño mecánico y una mayor vida útil de las edificaciones construidas con este tipo de material.

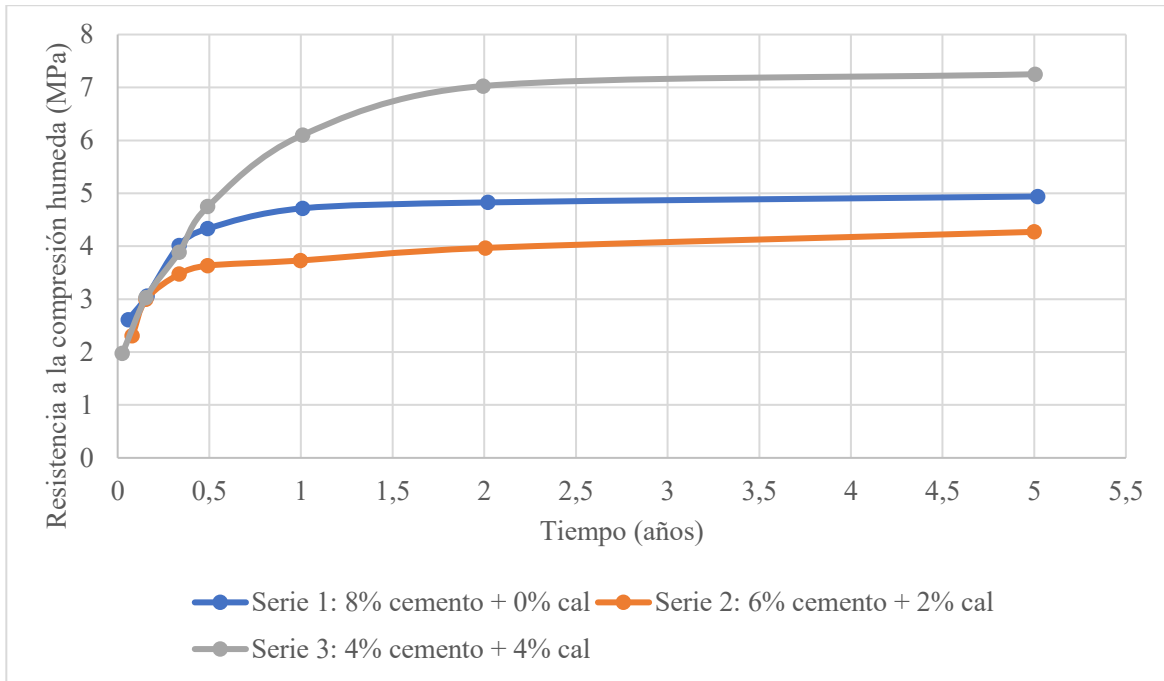


Figura 2.5 Resistencia a compresión de BTC con adición de cal y cemento

Fuente: Nagaraj (2014)

2.6. Estabilizadores no convencionales

Los estabilizantes no convencionales corresponden a aquellos materiales alternativos a los tradicionalmente empleados (como el cemento o la cal), que se incorporan al suelo con el objetivo de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y su durabilidad. Se caracterizan por provenir principalmente de residuos industriales, subproductos o materiales reciclados. En términos generales,

estos estabilizantes se agrupan en físicos, que actúan por mejora granulométrica, densificación o refuerzo discreto, y químicos, que modifican el comportamiento del suelo mediante interacciones orgánicas o reacciones puzolánicas.

Su uso se justifica porque permiten reducir la dependencia de aditivos de alta huella ambiental, valorizan residuos que de otra manera constituirían un problema de disposición, y ofrecen una opción más sostenible y potencialmente económica en la construcción con tierra.

2.6.1 Lignina

La lignina, el biopolímero aromático más abundante del planeta, es un componente estructural de la pared celular vegetal que cementa microfibrillas de celulosa y hemicelulosas; se forma por polimerización radicalaria de tres monolignoles, p-cumárico (H), coniferílico (G) y sinapílico (S), cuyas proporciones dependen del origen botánico (coníferas: G dominante; latifoliadas: S+G; gramíneas: H+G+S). En la industria, se separa durante la fabricación de pulpa o biocombustibles, originando ligninas técnicas con químicas y morfologías particulares que condicionan su desempeño como estabilizante en suelos y BSC.

La lignina Kraft se obtiene como subproducto del proceso de pulpeo químico Kraft, tecnología dominante en la industria de la celulosa a nivel mundial y también en Chile, tanto para maderas coníferas como latifoliadas. En este proceso, las astillas de madera se cocinan en un licor blanco fuertemente alcalino, compuesto principalmente por hidróxido de sodio (NaOH) y sulfuro de sodio (Na₂S), a alta temperatura y presión. Bajo estas condiciones, se rompen los enlaces éter y carbono-carbono que unen la lignina a la celulosa y hemicelulosas, solubilizando la lignina y parte de los polisacáridos en el medio alcalino.

El licor resultante, denominado licor negro, contiene fragmentos de lignina disuelta, productos de degradación de hemicelulosas (azúcares, ácidos orgánicos), compuestos orgánicos menores y los químicos inorgánicos del proceso. Tradicionalmente, este licor se concentra por evaporación y se quema en una caldera de recuperación, con el doble propósito de generar energía térmica y eléctrica para la planta y recuperar los compuestos inorgánicos que luego se reconstituyen como licor blanco. En este esquema convencional, la lignina se oxida por completo y su potencial como materia prima se desaprovecha.

La separación de lignina Kraft desde el licor negro se realiza mediante tecnologías específicas de recuperación, entre las que destacan procesos comerciales como LignoBoost y LignoForce. En términos generales, estos esquemas consideran la acidificación controlada del licor negro concentrado mediante dióxido de carbono y/o ácido fuerte, lo que reduce el pH y provoca la precipitación de la lignina disuelta. Posteriormente, la lignina precipitada se separa por filtración, se lava para remover parte de los iones sodio y otras sales solubles, y se seca hasta obtener un polvo sólido con contenidos de humedad y cenizas controlados. El producto resultante es una lignina técnica con masa molar media–alta, presencia de azufre “ligado” en su estructura y una fracción de sodio y otros inorgánicos remanentes, características que dependen de las condiciones de precipitación, lavado y del tipo de licor negro de origen. La Figura 2.6 muestra el proceso industrial de obtención de lignina Kraft mediante la tecnología *LignoBoost*, la cual se integra al ciclo químico del proceso Kraft.

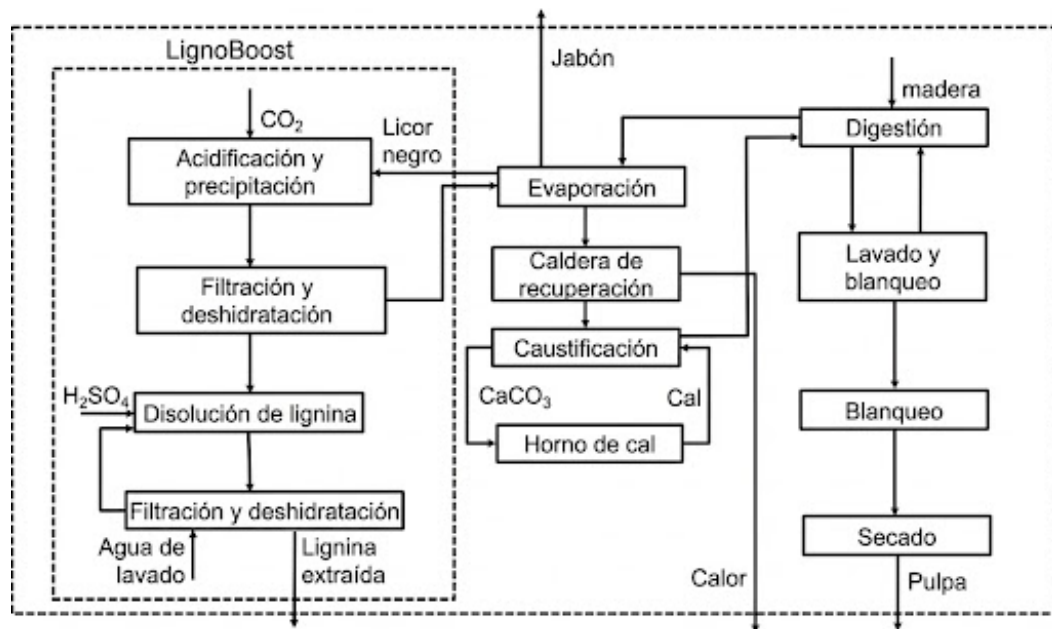


Figura 2.6 Esquema proceso de obtención de lignina y proceso LignoBoost

Fuente: Hermansson (2020)

En el contexto chileno, la fuerte presencia de plantas de celulosa Kraft para producción de pulpa blanqueada implica que la lignina técnica disponible proviene mayoritariamente de este proceso. Esta condición no solo favorece su uso como insumo local de bajo costo relativo, sino que también la posiciona como un candidato natural para estrategias de valorización de subproductos dentro de esquemas de economía circular en el sector forestal–celulósico.

Como aglomerante biopolimérico, la lignina puede formar películas y puentes entre partículas finas, modificar la superficie de los granos y la estructura de poros; a escala microestructural recubre partículas, rellena vacíos y favorece la atracción entre agregados, lo que se traduce en reducciones de plasticidad y aumentos de resistencia cuando la compactación y el curado son adecuados (Cai *et al.*, 2016). En suelos limosos, además, puede alterar los límites de Atterberg y la distribución granular aparente por floculación/agregación, reduciendo el volumen de poros y promoviendo una distribución porosa más favorable al desempeño mecánico (Zhang *et al.*, 2018).

En términos de propiedades, se han reportado resistencias a compresión del orden de 1,6–8,1 MPa en compuestos suelo–lignina específicamente diseñados, rango suficiente para aplicaciones no estructurales y de albañilería de baja exigencia cuando el diseño de mezcla y la compactación son consistentes (Miao *et al.*, 2024). Según el análisis densidad–resistencia presentado por estos autores, el cual se muestra a en la Figura 2.7, los bloques estabilizados con lignina se ubican típicamente en el intervalo de 1300–1600 kg/m³, posicionándose dentro del rango de materiales livianos. Al compararse con los criterios normativos ASTM (*American Society for Testing and Materials*), estos valores superan el mínimo exigido por ASTM C129 (3,45 MPa) para unidades no portantes, pero quedan por debajo de los 17,2 MPa requeridos por ASTM C55 para unidades portantes, lo que confirma su potencial para usos no estructurales. Para suelos limosos compactados, un contenido óptimo cercano al 12% de lignina mostró mejoras de UCS, CBR y módulo resiliente respecto a testigos y, en condiciones comparables, un CBR 16,3–22,2% mayor que un suelo estabilizado con 8% de cal viva (Zhang *et al.*, 2018).

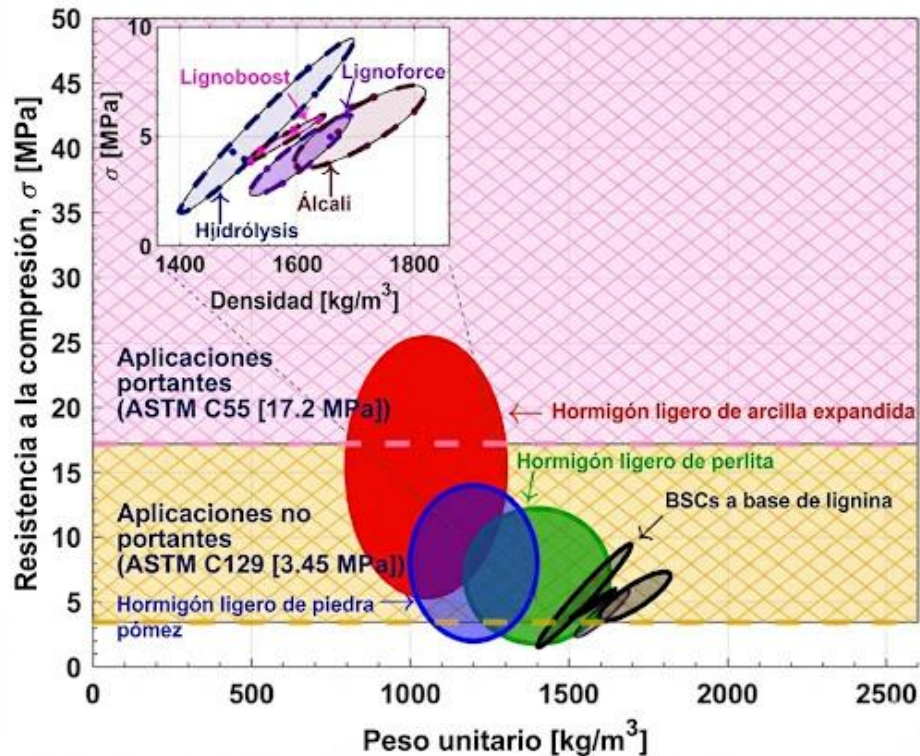


Figura 2.7 Relación entre la resistencia a compresión y la densidad seca de BSC con lignina, comparados con hormigones livianos

Fuente: Miao (2024)

Como consideraciones, el desempeño depende de la química y procedencia de la lignina (biomasa, proceso industrial), por lo que se recomienda caracterizar el producto y ensayar la dosificación para el suelo local (Cai *et al.*, 2016). El curado en ambiente controlado y una compactación que alcance el grado objetivo son críticos para consolidar la película polimérica. En suelos extremadamente arenosos o de muy alta plasticidad, puede ser necesaria la co-estabilización para asegurar rigidez inicial y reducir sensibilidad a humedad (Miao *et al.*, 2024).

2.6.2 Estabilizantes alternativos al uso de lignina

Se tiene el ladrillo triturado, que actúa principalmente por mecanismos físicos de mejora granulométrica, y cuando existe fracción fina reactiva, aporta una actividad puzolánica parcial que densifica la microestructura al combinarse con los hidróxidos y aluminatos disponibles (Kasinikota y Tripura, 2021). La textura rugosa y el carácter poroso del árido cerámico favorecen el entrelazamiento con la matriz y pueden contribuir al refinamiento de poros cuando se controla el tamaño de partícula y el contenido de finos (Kasinikota y Tripura, 2021).

En bloques de suelo comprimido, la sustitución controlada con 24% de ladrillo triturado mostró el mayor incremento de resistencia a compresión en relación a la mezcla que no contiene, como se puede observar en la Figura 2.8. Además, los autores destacan que la presencia de polvo cerámico fino es relevante para el desempeño: al removerlo en la mezcla CM (0,15–4,75 mm, sin la fracción <0,15 mm) la resistencia se vio perjudicada; en cambio, al sustituir parte de la arena por muy finos en la mezcla CL (<0,15 mm, polvo cerámico muy fino) hasta en un 20% se observó un efecto favorable para la matriz (Kasinikota y Tripura, 2021)

Como limitaciones, el material cerámico reciclado presenta alta absorción y gran variabilidad, lo que eleva la demanda de agua y puede afectar la compactación si no se recalibra el contenido óptimo de humedad. Asimismo, porcentajes de reemplazo superiores al óptimo tienden a reducir las resistencias por las propiedades intrínsecas del árido cerámico (Kasinikota y Tripura, 2021). De allí que sea indispensable generar una clasificación en base a granulometría, controlar el contenido de finos y ajustar la dosificación de agua.

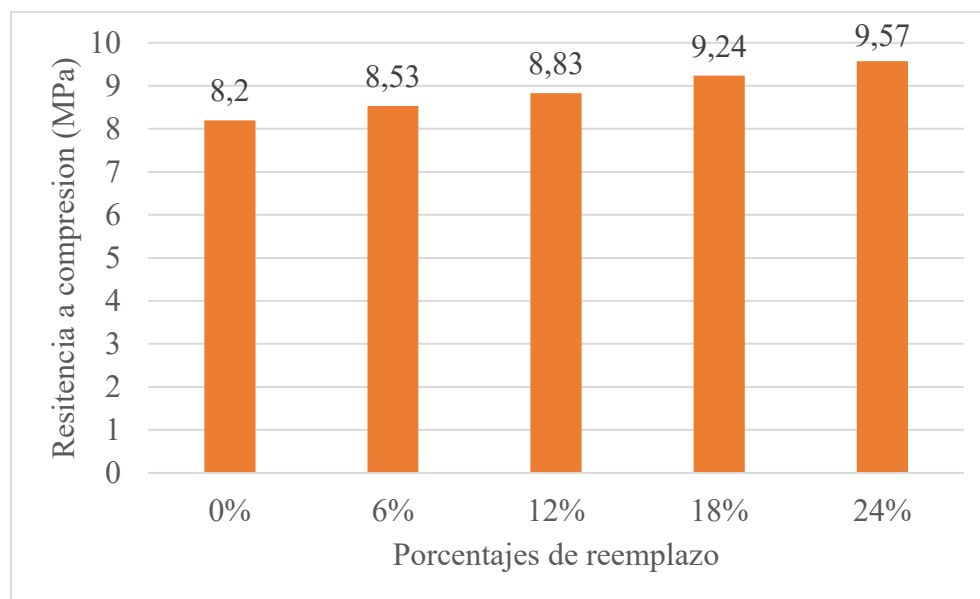


Figura 2.8 Resistencia a compresión de BTC con reemplazo de ladrillo triturado

Fuente: Adaptado de Kasinikota y Tripura (2021)

Por otro lado, se tiene las fibras de acero recuperadas de neumáticos fuera de uso (WTSF) que operan como un refuerzo que puentea micro fisuras, aumenta resistencia a flexión y mejora la respuesta a cargas dinámicas cuando se incorporan a matrices suelo-cemento o bloques de suelo comprimido

estabilizados. Este mecanismo de micro armadura mejora la ductilidad del elemento, complementando el rol del ligante y reduciendo la fragilidad típica de matrices granulares cementadas (Rocha *et al.*, 2022).

En bloques suelo-cemento con 10% de cemento en base a su masa, la incorporación de 1,5% de WTSF, en base al volumen de suelo, produjo un aumento promedio 20% de la resistencia a compresión respecto del control, mientras que 0,75% no mostró cambios estadísticamente significativos, como se muestra en la Figura 2.9; todos los grupos cumplieron además con requisitos normativos mínimos. El mayor salto de resistencia se observó entre los 7 y 14 días de curado. Más allá de la compresión, la literatura técnica sobre matrices cementicias con fibras de acero coincide en el aumento de ductilidad y en la mejora del comportamiento post fisuración, atributos también buscados en bloques de suelos comprimido (Rocha *et al.*, 2022).

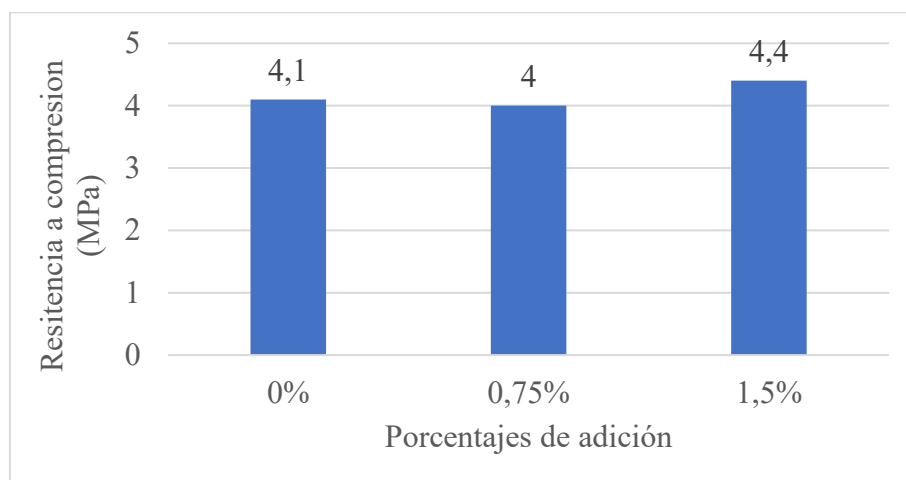


Figura 2.9 Resistencia a compresión de BTC con adición de WTSF

Fuente: Adaptado de Rocha (2022)

Se debe tener en cuenta que, dosificaciones elevadas de fibras pueden dificultar la mezcla y compactación, por lo que se recomienda ajustar humedad de moldeo y secuencia de mezclado. Además, es clave caracterizar la distribución de longitudes y la limpieza del refuerzo reciclado, dado que tales variables condicionan la adherencia y la eficiencia del puesteo (Rocha *et al.*, 2022). Cuando se incorporan fracciones de caucho, puede aumentar la porosidad y disminuir la compresión.

2.7. Impacto ambiental

El impacto ambiental se define como el conjunto de alteraciones que una determinada actividad, proceso o producto genera sobre el entorno natural y social, afectando componentes como el aire, el

agua, el suelo, la biodiversidad y la salud humana. Dichos impactos pueden ser de carácter positivo o negativo, directo o indirecto, temporal o permanente, y su magnitud depende de la naturaleza y escala de la intervención. En el ámbito de la ingeniería y la construcción, la evaluación del impacto ambiental permite identificar, cuantificar y proponer medidas de mitigación frente a los efectos asociados al uso de materiales, consumo energético, generación de residuos y emisiones de gases de efecto invernadero.

En este contexto, la huella de carbono surge como uno de los indicadores más relevantes, ya que mide la cantidad total de dióxido de carbono (CO_2) liberada directa o indirectamente durante el ciclo de vida de un producto o proceso. Su estimación permite evaluar el aporte de cada material o actividad al cambio climático y comparar alternativas en términos de sostenibilidad.

Los gases de efecto invernadero (GEI) son compuestos presentes en la atmósfera que tienen la capacidad de retener parte de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, generando el denominado efecto invernadero natural que mantiene la temperatura del planeta dentro de rangos habitables. Sin embargo, las actividades humanas, especialmente las relacionadas con la industria, la energía y la construcción, han incrementado de manera significativa la concentración de estos gases, intensificando el calentamiento global. Entre los principales GEI se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los gases fluorados, siendo el CO_2 el más abundante y relevante en el sector de la construcción debido a las emisiones derivadas de la producción de cemento, el transporte de materiales y el consumo energético en los procesos industriales. En este contexto, la cuantificación de los GEI mediante el cálculo de la huella de carbono permite estimar el impacto climático asociado a cada material o técnica constructiva.

El sector de la construcción es responsable de cerca del 40 % del consumo energético mundial y de aproximadamente un tercio de las emisiones globales de gases de efecto invernadero (GEI), lo que lo convierte en uno de los mayores contribuyentes al cambio climático (Cabrera *et al.*, 2021). Este impacto proviene principalmente del uso extensivo de materiales convencionales, como el cemento y los ladrillos cerámicos, cuya fabricación implica procesos térmicos intensivos y un elevado consumo de recursos naturales. Se estima que la producción de cemento libera 0,86 toneladas de CO_2 por cada tonelada producida, y requiere temperaturas de hasta 1.450 °C durante la calcinación del Clinker, lo que explica la alta huella de carbono asociada a su uso en edificaciones (Cabrera *et al.*, 2020).

En este contexto, los Bloques de Tierra Comprimida (BTC) surgen como una alternativa sostenible, al ser fabricados sin procesos de cocción y utilizando suelos locales. (Cabrera *et al.*, 2021) destacan que esta tecnología permite reducir de forma significativa la energía incorporada en el ciclo de vida del material, gracias al uso de materias primas naturales y al bajo requerimiento energético en su manufactura. Además, los BTC pueden elaborarse con estabilizantes de menor impacto ambiental, como la cal o aditivos de origen biogénico, manteniendo resistencias mecánicas suficientes para aplicaciones en muros estructurales y no estructurales.

La reducción de emisiones ha sido cuantificada en distintos estudios de análisis de ciclo de vida. (Asman *et al.*, 2020), al evaluar edificaciones en Malasia, determinaron que el uso de *Interlocking Compressed Earth Bricks* (ICEB), una variante del BSC, disminuye en 35 % la huella de carbono en comparación con construcciones de ladrillo cocido convencional, pasando de 405,75 kg CO₂/m² a 264,50 kg CO₂/m², en la Figura 2.10 se muestran estos resultados. Esta mejora se debe a la eliminación del proceso de cocción, la menor cantidad de cemento empleada y la posibilidad de producir los bloques in situ, reduciendo las emisiones por transporte. Los autores concluyen que el uso de BTC representa una estrategia viable para la transición hacia edificaciones de bajo carbono.

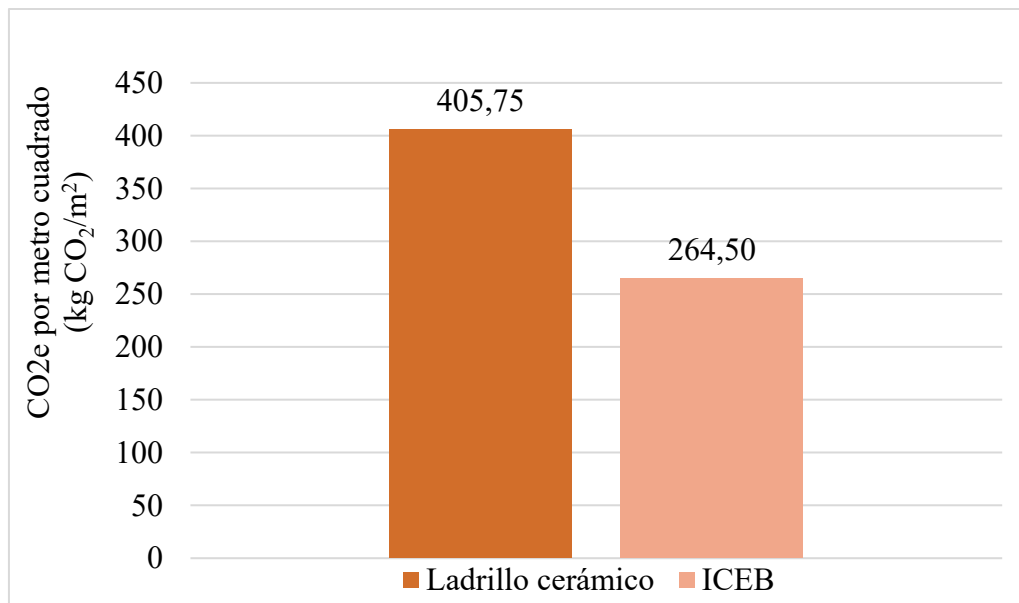


Figura 2.10 Comparación de emisiones de CO₂ en ciclos de vida de ladrillo cerámico e ICEB

Fuente: Asman (2020)

La lignina Kraft presenta un valor ambiental particularmente relevante debido a su alto contenido de carbono biogénico, cercano al 60 % de su masa total. Este carbono, originalmente fijado por la

biomasa vegetal, permanece retenido en los bloques durante toda su vida útil, generando un potencial directo de secuestro de CO_2 . De esta manera, la incorporación de lignina no solo actúa como estabilizante, sino que también convierte al material en un sistema capaz de almacenar carbono atmosférico a largo plazo.

Según el análisis de ciclo de vida desarrollado por Miao *et al.* (2024), la cantidad de carbono retenido en los BSC puede compensar las emisiones asociadas a las etapas productivas del material, incluyendo transporte, mezclado y secado. El balance neto obtenido por los autores oscila entre $-0,14$ y $-0,23$ kg CO_2/kg de bloque, ubicando a estas formulaciones dentro del rango de emisiones negativas. En contraste, tecnologías convencionales como el hormigón liviano reportan impactos positivos del orden de $0,17$ – $0,34$ kg CO_2/kg .

La Figura 2.11 ilustra este comportamiento, diferenciando las contribuciones positivas de la contribución negativa asociada al carbono secuestrado en la lignina.

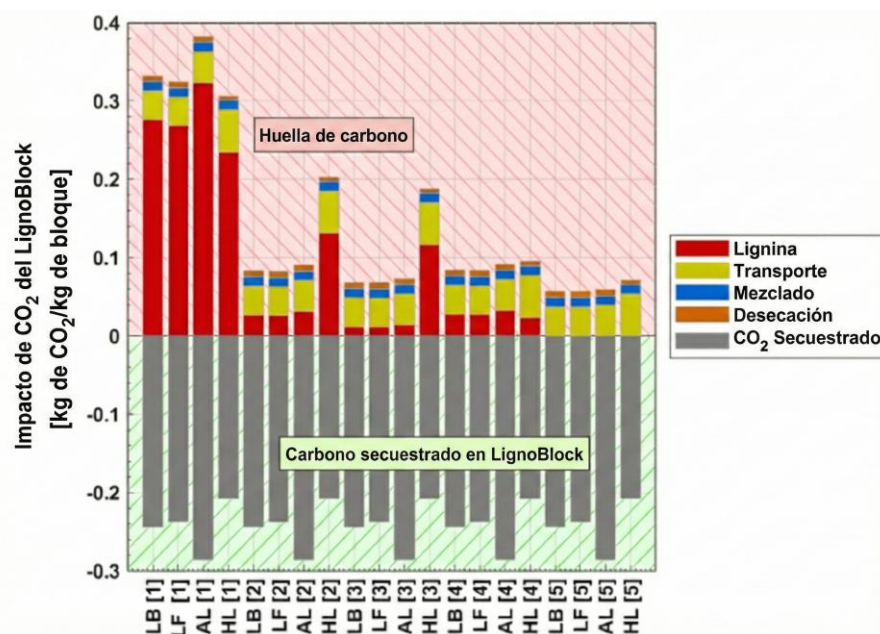


Figura 2.11 Emisiones de CO_2 de bloques hechos a partir de lignina

Fuente: Miao (2024)

2.8. Conclusión

Se lograron delimitar los mecanismos que gobiernan la estabilización de suelos y, con ello, los factores críticos del desempeño de los BSC. En los estabilizantes convencionales, el cemento aporta cohesión principalmente por la formación de C-S-H y $\text{Ca}(\text{OH})_2$, mientras que la cal actúa por floculación inicial

y reacciones puzolánicas más lentas, fuertemente dependientes de la mineralogía arcillosa. Este marco explica la importancia de la compactación, la relación agua/agente y el curado condicionan densidad seca y resistencia, y justifica su control estricto en la fase experimental.

En paralelo, se identificó a la lignina Kraft como estabilizador no convencional con potencial técnico-ambiental, esta tiene un rol esperable que combina efectos fisicoquímicos de adhesión entre partículas, posible modificación de la humectabilidad y sellado parcial de poros, lo que podría traducirse en resistencias compatibles con aplicaciones no portantes y en una reducción del impacto de carbono frente a ligantes hidráulicos. La literatura también advierte que su desempeño es sensible a tipo de lignina, dosis, disolvente/activación y a la curva de compactación del suelo, por lo que resulta imprescindible un diseño experimental que explore dichas variables bajo condiciones controladas.

Desde el punto de vista ambiental, diversos estudios coinciden en que la estabilización con cemento y cal eleva la energía embebida y las emisiones de CO₂ del material, mientras que los bloques de suelo comprimido sin cocción reducen estas en más del 80 % respecto de los ladrillos cerámicos. El uso de aditivos lignínicos refuerza esta tendencia, ya que los biopolímeros derivados de lignina pueden incluso alcanzar balances de carbono negativos al incorporar carbono biogénico en su estructura. En términos comparativos, los bloques de suelo con lignina podrían disminuir la huella de carbono entre 60 % y 90 % en relación con los de cemento, al eliminar la etapa de calcinación y aprovechar un subproducto industrial renovable.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOS

3.1. Introducción

El presente capítulo describe los materiales utilizados y los procedimientos experimentales aplicados en la confección y ensayo de probetas de suelo estabilizado con cemento, cal y lignina Kraft. Se detallan las etapas de preparación de mezclas, curado y ensayos mecánicos, junto con los ensayos de hidratación realizados para determinar las condiciones óptimas de reacción de los estabilizantes.

Asimismo, se incluye la preparación de la solución de lignina como aditivo alternativo y la caracterización del suelo base, con el propósito de garantizar la reproducibilidad de los resultados y permitir la comparación entre estabilizaciones convencionales y no convencionales.

3.2. Ensayos de hidratación

Los ensayos de hidratación se realizaron con el propósito de determinar el comportamiento químico inicial de los agentes estabilizadores convencionales utilizados como referencia en este estudio, cemento y cal hidratada. La comprensión de su hidratación es fundamental, ya que, el desarrollo de productos cementantes y la evolución de su microestructura, influyen directamente en la resistencia mecánica de las probetas utilizadas como punto de comparación frente a la alternativa no convencional basada en lignina Kraft.

3.2.1 Hidratación de cemento

El presente apartado describe los procedimientos y fundamentos utilizados para estudiar la hidratación del cemento empleado como estabilizante convencional en la fabricación de probetas de suelo comprimido. El objetivo del ensayo fue determinar la relación agua/cemento (a/c) que permite alcanzar un grado adecuado de hidratación y, por ende, una resistencia mecánica óptima, considerando los principios teóricos expuestos por Czernin (1963) y las condiciones experimentales propias del laboratorio.

En la elaboración de probetas se utilizó cemento y agua potable proveniente de la red, la cual, según la norma NCh1498 (INN, 2022), se considera adecuada para este fin. La Figura 3.1, corresponde al cemento utilizado en la confección.



Figura 3.1 Cemento utilizado para la confección de probetas

Todas las probetas se confeccionaron en moldes prismáticos de 4 x 4 x 16cm, los cuales se muestran la Figura 3.2.



Figura 3.2 Moldes utilizados para confección de probetas

Cada mezcla se preparó en la mezcladora de mortero modelo Bell-MezclAuto5lts hasta lograr una consistencia homogénea, procurando mantener la misma energía de mezclado y compactación para todos los especímenes. En la Figura 3.3 se muestra la mezcladora utilizada.



Figura 3.3 Mezcladora utilizada para confección de probetas

Se moldearon tres probetas por cada relación a/c, las cuales fueron curadas en cámara húmeda a temperatura ambiente (24 ± 2 °C) y humedad relativa del 95 %, según la Norma NCh 1017 ((INN, 2009), durante la totalidad de los días previos a su ensayo.

En primera instancia se tomó el rango de [0.20 a 0.40], donde se analizó la resistencia a compresión a una edad de 7 días. Se analizaron 3 probetas por cada relación agua-cemento. En la Tabla 3.1 se muestra el resumen de materiales y especímenes confeccionados.

Tabla 3.1 Materiales y especímenes confeccionados para hidratación de cemento

Relación Agua-Cemento	Cemento (g)	Agua (g)	Especímenes confeccionados
0,20	1295,4	259,1	3
0,25	1295,4	323,8	3
0,30	1295,4	388,6	3
0,35	1295,4	453,4	3
0,40	1295,4	518,1	3

En una segunda etapa se analizó el rango de [0.22 a 0.30], donde se analizó la resistencia a flexión y compresión a 3 edades de ensayo, lo cuales corresponden a 2, 5 y 8 días. Se analizaron 2 probetas por cada una de las relaciones agua-cemento y edad de ensayo. La Tabla 3.2 muestra el resumen de materiales y especímenes confeccionados.

Tabla 3.2 Materiales y especímenes confeccionados para segunda etapa de hidratación de cemento

Relación Agua-Cemento	Cemento (g)	Agua (g)	Especímenes confeccionados
0,22	2,700	0,594	6
0,25	2,700	0,675	6
0,28	2,700	0,756	6
0,30	2,700	0,810	6

En una tercera etapa se estudió el rango de [0.25 a 0.30], donde se analizó la resistencia a flexión y compresión en 3 edades de ensayo, lo cuales corresponden a 3, 7 y 14 días. Se analizaron 2 probetas por cada una de las relaciones agua-cemento y edad de ensayo. La Tabla 3.3 presenta el resumen de materiales y especímenes confeccionados.

Cada una de las probetas fue sometida a ensayo de flexión, según la Norma NCh 158 (INN, 2019), dividiendo cada prisma en dos. Luego, a cada una de las mitades se les aplicó el ensayo de compresión simple, según la Norma NCh 158 (INN, 2019), utilizando una máquina universal con velocidad de carga controlada. Previo a estos ensayos se determinó la densidad de cada una de las probetas, calculada a partir del peso seco y el volumen de cada una. En la Figura 3.4 se muestran los instrumentos necesarios para cada uno de los ensayos.

Tabla 3.3 Materiales y especímenes confeccionados para tercera etapa de hidratación de cemento

Relación Agua-Cemento	Cemento (g)	Agua (g)	Especímenes confeccionados
0,25	2,700	0,675	6
0,28	2,700	0,756	6
0,30	2,700	0,810	6



a)



b)

Figura 3.4 a) Equipo de ensayo a flexión b) Equipo de ensayo a compresión

3.2.2 Hidratación de cal

Con respecto a la hidratación de la cal, se siguió un procedimiento bastante similar al del cemento. Para la elaboración de la mezcla se utilizó cal hidráulica n°6 y agua potable proveniente de la red. En la Figura 3.5 se muestra la cal utilizada.

**Figura 3.5 Cal utilizada para la confección de probetas**

La totalidad de las probetas se confeccionaron en moldes prismáticos de 4 x 4 x 16cm, idénticos a los mostrados anteriormente en la Figura 3.2.

Cada mezcla se preparó en la mezcladora de mortero modelo Bell-MezclAuto5lts, idéntica a la que presentada anteriormente en la Figura 3.3 hasta lograr una consistencia homogénea, procurando mantener la misma energía de mezclado y compactación para todos los especímenes.

Se moldearon tres probetas por cada relación a/c, estas no fueron curadas ya que, en el caso de la cal hidráulica, el proceso de fraguado y endurecimiento resulta de la combinación de reacciones de hidratación y carbonatación. En su lugar, las muestras se mantuvieron a temperatura ambiente ($24 \pm 2^\circ\text{C}$) y humedad relativa del $60 \pm 10\%$, protegidas de la radiación solar directa, lo que favoreció un curado mixto, proporcionando una hidratación inicial y una carbonatación progresiva.

En una primera etapa se confeccionó el rango de [0.25 a 0.35], donde se analizó la resistencia compresión a 3 edades de ensayo, lo cuales corresponden a 14, 21 y 28 días. Se analizaron 2 probetas por cada una de las relaciones agua-cemento y edad de ensayo. La Tabla 3.4 muestra el resumen de materiales y especímenes confeccionados.

Tabla 3.4 Materiales y especímenes confeccionados para hidratación de cal

Relación Agua – Cal	Cal (g)	Agua (g)	Especímenes confeccionados
0,25	2700	675	6
0,30	2700	810	6
0,35	2700	945	6

En una segunda etapa se confeccionó una mezcla en partes iguales de cal y cemento, con el fin de analizar la reacción de hidratación de ambos estabilizantes en conjunto. El rango seleccionado fue de [0.25 a 0.30], donde se analizó la resistencia compresión a 3 edades de ensayo, lo cuales corresponden a 3, 7 y 14 días. Se analizaron 2 probetas por cada una de las relaciones agua-cemento y edad de ensayo. La Tabla 3.5 muestra el resumen de materiales y especímenes confeccionados.

Tabla 3.5 Materiales y especímenes confeccionados para segunda etapa de hidratación de cal

Relación Agua - Cal	Cal (g)	Cemento (g)	Agua (g)	Especímenes confeccionados
0,25	1350	1350	675	6
0,30	1350	1350	756	6
0,35	1350	1350	810	6

Cada una de las probetas fue sometida a ensayo de flexión, dividiendo cada prisma en dos. Luego, a cada una de las mitades se les aplicó el ensayo de compresión simple, utilizando una máquina

universal con velocidad de carga controlada. Previo a estos ensayos se determinó la densidad de cada una de las probetas, calculada a partir del peso seco y el volumen de cada una. Los instrumentos utilizados corresponden a los mismos previamente presentados en la Figura 3.4.

3.3. Solución de lignina

La lignina utilizada corresponde a lignina Kraft, un biopolímero de naturaleza hidrofóbica, cuya baja solubilidad en agua se debe a su estructura aromática y al escaso número de grupos polares en su composición. Sin embargo, este material puede alcanzar cierta solubilidad cuando se emplean disolventes orgánicos polares o medios de pH altamente alcalino.

Considerando esta característica, la solución empleada en los ensayos fue preparada mediante la adición de *dregs*, residuo alcalino generado durante el proceso de purificación del licor verde en la industria de la celulosa, agua y lignina Kraft. Se generó una muestra control que contenía solo agua potable y muestras que incluían una concentración de 1%, 5%, 10% y 20% de *dregs*. En la Figura 3.6 se muestra el *dregs* utilizado.



Figura 3.6 Dregs utilizado para alcalinización del agua

Desde el punto de vista experimental, este procedimiento busca reproducir un medio parcialmente soluble análogo al que se obtiene cuando la lignina es disuelta en disolventes polares como dimetilsulfóxido (DMSO), empleado en estudios internacionales de materiales lignínicos. Dichos solventes permiten concentraciones superiores al 20% de lignina y facilitan la formación de una matriz biopolimérica homogénea dentro del suelo. A continuación, se muestra en la Figura 3.7 la escala de pH y en la figura 3.8 los valores alcanzados en la solución preparada.

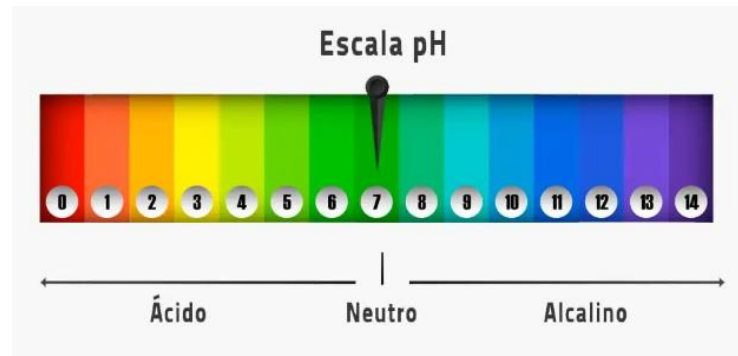
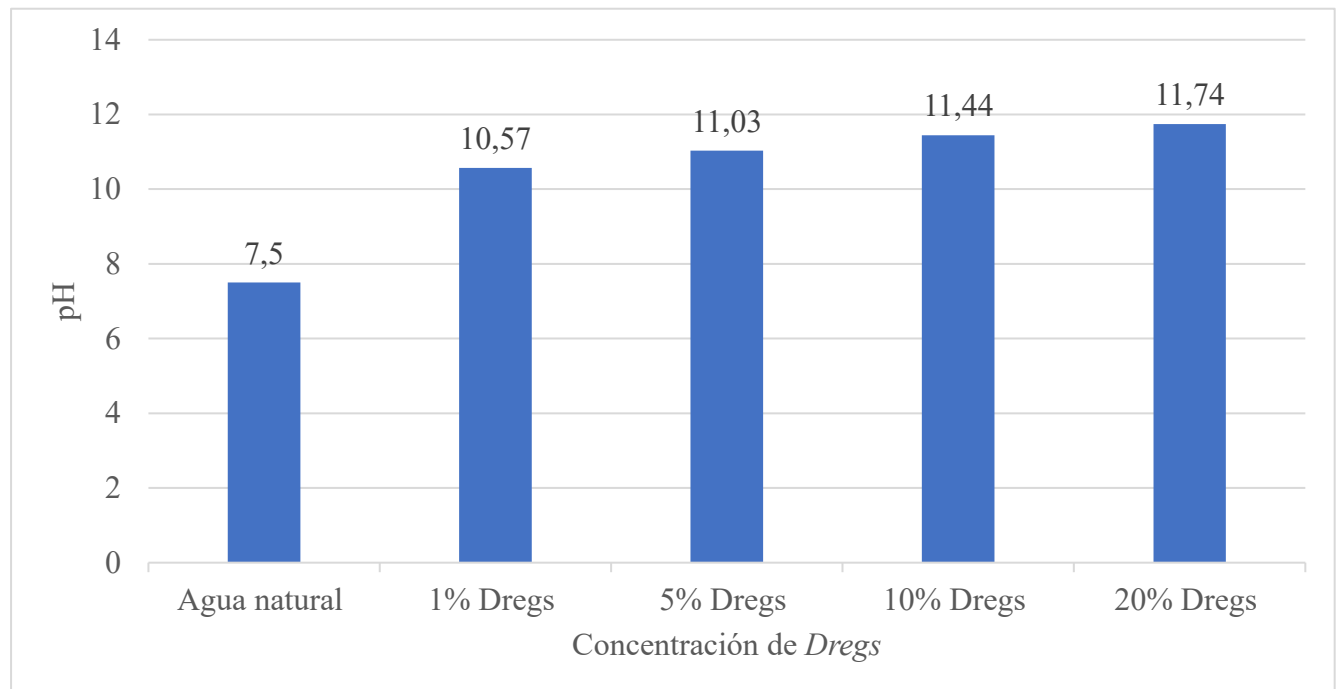


Figura 3.7 Escala de pH

Figura 3.8 Alcalinización de agua mediante incorporación de *dregs*

Luego de comprobada la efectividad del *dregs* para convertir el agua potable en un medio alcalino, como se muestra en la Figura 3.8, se procede con la elaboración de una solución que contenga agua, *dregs* y lignina Kraft. Para la generar la solución primero se debió verter el agua potable al interior de un envase, luego se agrega de manera controlada con ayuda de un embudo el *dregs* y posteriormente la lignina Kraft. En la Tabla 3.6 se entrega un resumen de la cantidad de materiales utilizados para esta solución.

Tabla 3.6 Materiales incorporados para formar solución

Masa de Agua (g)	2000
Masa de <i>dregs</i> (g)	400
Masa de lignina (g)	400
% de lignina en solución	20%

Una vez obtenida la mezcla, se dejó en reposo para facilitar la decantación de los sólidos no disueltos, empleándose únicamente la fracción líquida con lignina suspendida en el medio. A continuación, en la Figura 3.9, se muestra la solución obtenida.

**Figura 3.9 Solución alcalina**

3.4. Densidad de suelo-lignina

Previo a la elaboración de las probetas de suelo estabilizados con lignina, se realizó un ensayo Proctor modificado al suelo Nihuinco. Se le incorporó previamente la solución de lignina y se dejó curar por 24 horas antes de ser ensayada.

En relación a los porcentajes de humedad a ensayar, se tomaron valores por debajo del óptimo del suelo sin aditivos.

En la Tabla 3.7 se entregan las dosificaciones utilizadas para cada una de las probetas Proctor confeccionadas.

Tabla 3.7 Dosificación de probetas para ensayo Proctor modificado

Nº Molde	Humedad	Masa material [gr]
5	34%	1325
5	38%	1380
5	42%	1430
5	46%	1468

Este procedimiento tuvo como objetivo evaluar la influencia de la adición del 5 % de lignina, en relación a la masa de suelo seco, sobre la humedad óptima y la densidad seca máxima del material. Determinando así su efecto en las condiciones de compactación del suelo base.

3.5. Ensayos de probetas de suelo

3.5.1 Ensayos de probetas de suelo-cemento

El presente apartado describe los procedimientos y fundamentos aplicados en la confección y ensayo de probetas de suelo estabilizado con cemento, considerados como material de referencia dentro de los estabilizantes convencionales.

Los componentes utilizados para la confección de las probetas de suelo-cemento corresponden en una primera instancia a suelo proveniente de la Universidad de Concepción, el cual fue descrito anteriormente, cemento y agua potable proveniente de la red. En la Figura 3.10 se muestran los materiales mencionados.



a)



b)

Figura 3.10 a) Suelo UDEC b) Cemento utilizado para la confección de probetas

Los moldes cilíndricos utilizados corresponden a los usados para realizar el ensayo Proctor modificado al igual que el pisón compactador, además, se utilizó una balanza para pesar los materiales,

una bandeja para mezclarlos y un rociador para aplicar el agua de manera controlada. A continuación, se muestran los materiales en la Figura 3.11.



Figura 3.11 Materiales utilizados para confección de probetas

Para la confección de las probetas se realizó una mezcla de forma manual sobre superficie metálica hasta obtener una masa homogénea entre el cemento y el suelo. El porcentaje de cemento agregado se realizó en base a la masa de suelo. Se agregó un 10% de cemento a todas las mezclas. Cada mezcla permitió la confección de tres especímenes cilíndricos, totalizando quince probetas para el conjunto del estudio. En la Figura 3.12, se muestran algunas de las probetas confeccionadas.



Figura 3.12 Probetas de suelo-cemento

Posteriormente, se incorporó el agua total correspondiente a cada dosificación, compuesta por el agua física, destinada a la compactación del suelo y el agua química, destinada a la hidratación del cemento.

Se realizó una nueva homogenización del material hasta obtener una masa de consistencia plástica homogénea y sin grumos, cuidando de evitar pérdidas de humedad.

Las relaciones agua/cemento estudiadas fueron 0,20; 0,25; 0,30; 0,35 y 0,40, expresadas como la masa de agua en gramos necesaria para hidratar un gramo de cemento. El contenido de agua física se mantuvo constante para todas las mezclas. A continuación, en la Tabla 3.8 se entrega un resumen de la cantidad de material de cada una de las probetas y el total de especímenes confeccionados.

Tabla 3.8 Materiales y especímenes confeccionados para elaboración de probetas suelo-cemento

Dosificación	Relación Agua-Cemento	Suelo (g)	Cemento (g)	Agua Física (g)	Agua Química (g)	Agua Total (g)	Especímenes confeccionados
Masa	0.20	2200	220	264	44	308	3
	0.25	2200	220	264	55	319	3
	0.30	2200	220	264	66	330	3
	0.35	2200	220	264	77	341	3
	0.40	2200	220	264	88	352	3

Las probetas fueron moldeadas por capas, introduciendo el material en cinco capas de igual espesor dentro del molde cilíndrico y aplicando 25 golpes por capa con un mazo de 4,536 kg de masa y 45,72 cm de altura de caída, conforme al procedimiento del Proctor modificado. Con ello se garantizó una densificación uniforme y reproducible de las muestras.

Una vez compactadas, las probetas se extrajeron cuidadosamente del molde y se almacenaron en condiciones de laboratorio, a temperatura controlada y humedad ambiente, envueltas en plástico para mantener la humedad existente.

Las edades de ensayo se definieron a los 7, 14 y 21 días de curado, transcurrido el período de curado establecido para cada una, las probetas fueron sometidas al ensayo de resistencia a la compresión simple no confinada utilizando una prensa hidráulica de carga controlada, esta se muestra a continuación, en la Figura 3.13. La velocidad de aplicación de carga se ajustó para lograr la rotura de las probetas dentro de un intervalo de 1 a 2 minutos, registrándose la carga máxima de rotura y el área de sección transversal efectiva de cada muestra.



Figura 3.13 Prensa hidráulica para ensayo a compresión

Con el propósito de realizar una comparación entre la estabilización de suelo con cemento y lignina, se desarrolló una segunda etapa experimental aplicando el mismo procedimiento descrito previamente para el mezclado, compactación, curado y ensayo.

La diferencia en esta segunda etapa radica en el tipo de suelo utilizado, el cual corresponde a suelo Nihuinco, descrito anteriormente. Además, se incorporó una adición de un 5% de cemento, donde, cada mezcla permitió la confección de dos especímenes cilíndricos, totalizando seis probetas para el conjunto del estudio. La relación agua/cemento se mantuvo constante en 0,25 gramos de agua por gramo de cemento, al igual que el contenido de agua física, que se mantuvo constante para todas las mezclas.

Con el fin de establecer una comparación directa entre la estabilización del suelo mediante cemento y lignina, se desarrolló una segunda etapa experimental aplicando el mismo procedimiento descrito previamente para las fases de mezclado, compactación, curado y ensayo a compresión.

La diferencia principal de esta etapa radicó en el tipo de suelo empleado, correspondiente al suelo Nihuinco, previamente caracterizado. En esta serie se incorporó una dosificación del 5% de cemento respecto a la masa seca del suelo, manteniéndose constante el resto de las condiciones experimentales con el propósito de aislar el efecto del tipo de estabilizante sobre el comportamiento mecánico del material.

Cada mezcla permitió la elaboración de dos probetas cilíndricas, alcanzando un total de seis especímenes para el conjunto del estudio. La relación agua/cemento se mantuvo constante en 0,25

gramos de agua por gramo de cemento, al igual que el contenido de agua física, que permaneció invariable para todas las mezclas.

En la Tabla 3.9 se presenta el resumen de la cantidad de material correspondiente a las probetas elaboradas en esta segunda etapa experimental y la cantidad total de estas.

Tabla 3.9 Materiales y especímenes confeccionados en segunda etapa para elaboración de probetas suelo-cemento

Dosificación	Relación Agua-Cemento	Suelo (g)	Cemento (g)	Agua Física (g)	Agua Química (g)	Agua Total (g)	Especímenes confeccionados
Masa	0.25	1400	70	588	18	606	6

El ensayo de resistencia a la compresión simple no confinada se efectuó a 7, 14 y 21 días de curado, evaluándose dos probetas por cada edad. La carga se aplicó mediante la prensa hidráulica de control continuo presentada anteriormente en la Figura 3.13, con una velocidad de incremento ajustada para producir la rotura dentro de un intervalo de 1 a 2 minutos, registrándose la carga máxima de falla y calculándose la resistencia a compresión simple de acuerdo con la relación entre dicha carga y el área transversal efectiva de cada probeta.

3.5.2 Ensayos de probetas de suelo-lignina

El presente apartado describe los procedimientos y fundamentos aplicados en la confección y ensayo de probetas de suelo estabilizado con lignina Kraft, considerado como un material alternativo al uso de estabilizantes convencionales. El objetivo de esta confección consiste en realizar una comparación con la segunda etapa experimental realizada con las probetas de suelo-cemento.

Los componentes utilizados para la confección de las probetas de suelo-lignina corresponden a suelo Nihuinco, lignina Kraft en disolución, ambos descritos anteriormente, y agua potable proveniente de la red. En la Figura 3.14 se muestran los materiales mencionados.



Figura 3.14 a) Suelo Nihuinco b) Lignina Kraft en solución

Los moldes cilíndricos utilizados corresponden a los usados para realizar el ensayo Proctor modificado al igual que el pisón compactador, además, se utilizó una balanza para pesar los materiales, una bandeja para mezclarlos y un rociador para aplicar el agua de manera controlada. Estos corresponde a los mismos materiales utilizados en la sección anterior, presentados en la Figura 3.10.

Para la confección de las probetas se realizó una mezcla de forma manual sobre superficie metálica hasta obtener una masa homogénea entre el suelo y la solución de lignina Kraft. El porcentaje de lignina agregado se calculó en base a la masa de suelo seco. Se agregaron 350 ml de solución con el objetivo de incorporar una concentración de lignina igual al 5% del peso del suelo en todas las mezclas. Cada mezcla permitió la confección de dos especímenes cilíndricos, totalizando seis probetas para el conjunto del estudio.

Posteriormente, se completó con agua potable la cantidad total de agua correspondiente a la dosificación, se debe tener en cuenta que al momento de incorporar la solución de lignina, esta contenía agua que se considera dentro de este total. Con el agua ya incorporada se realizó una nueva homogenización del material hasta obtener una masa de consistencia plástica homogénea y sin grumos, cuidando de evitar pérdidas de humedad.

A continuación, en la Tabla 3.10 se entrega un resumen de la cantidad de material de cada una de las probetas y la cantidad total de estas.

Tabla 3.10 Materiales y especímenes confeccionados para elaboración de probetas suelo-lignina

Dosificación	Concentración de lignina	Suelo (g)	Solución de lignina incorporada (g)	Agua Física (g)	Agua Total (g)	Especímenes confeccionados
Masa	5%	1400	350	238	588	6

Las probetas fueron moldeadas por capas, introduciendo el material en cinco capas de igual espesor dentro del molde cilíndrico y aplicando 25 golpes por capa con un mazo de 4,536 kg de masa y 45,72 cm de altura de caída, conforme al procedimiento del Proctor modificado. Con ello se garantizó una densificación uniforme y reproducible de las muestras.

Una vez compactadas, las probetas se extrajeron cuidadosamente del molde y se almacenaron en condiciones de laboratorio, a temperatura controlada y humedad ambiente, envueltas en plástico para mantener la humedad existente.

Las edades de ensayo se definieron a los 7, 14 y 21 días de curado, transcurrido el período de curado establecido para cada una, las probetas fueron sometidas al ensayo de resistencia a la compresión simple no confinada utilizando una prensa hidráulica de carga controlada, como se muestra en la Figura 3.13. La velocidad de aplicación de carga se ajustó para lograr la rotura de las probetas dentro de un intervalo de 1 a 2 minutos, registrándose la carga máxima de rotura y el área de sección transversal efectiva de cada muestra.

3.6. Análisis ambiental

Para el análisis ambiental se buscaron diversos documentos relacionados con los datos de kg CO₂ emitidos en la producción de cemento, cal y ladrillos fiscal. Con respecto a los datos para el cemento se utilizó la información de (Grimmeissen *et al.*, 2020) y para la cal utilizó el documento de (Ministerio del Medio Ambiente, 2024). La Tabla 3.11 Muestra los kg de CO₂ generados por cada kg de cemento y cal.

Tabla 3.11 Emisiones de CO₂ por kg de cemento y cal

Material	Emisiones de kgCO ₂ por kg de material
Cemento	0,581
Cal	0,692
Ladrillo cerámico	0.212

El dato sobre las emisiones asociadas a la cocción de ladrillos cerámicos proviene de (Freire Guerrero et al., 2016), quienes reportan que la fabricación de estos elementos genera aproximadamente 0,212 kg de CO₂ por cada kilogramo de ladrillo o bloque producido.

Con relación a las emisiones generadas por los BSC-lignina, se tiene que (Miao *et al.*, 2024) encontraron que dichos bloques funcionan como captadores de CO₂, alcanzando balances entre -0,14 y -0,23 kg CO₂/kg por bloque. Para efectos de este estudio se tomará el valor más conservador, es decir, que poseen una captación de -0,14 kg CO₂/kg

Una vez conocidos los datos anteriormente expuestos, se procedió a calcular la huella de carbono del hormigón G20, ladrillo fiscal, BSC y BSC-lignina. Cabe mencionar que, en este marco, se adoptaron como unidades funcionales BSC y BSC-lignina individuales de 14 x 29 x 7 cm con dos agujeros de 5,6 cm de diámetro y una masa promedio de 4,14 kg. Para ladrillo fiscal se consideraron las siguientes medidas de 14 x 28 x 4,5 cm.

Para efectos de análisis se consideró la cubicación de un muro con dimensiones de 1,00 m de alto, 1,00 m de largo y 0,14 m de ancho, empleado como modelo de referencia para calcular el volumen de material involucrado en el sistema constructivo. El espesor fue definido en base al ancho que poseen tanto los ladrillos fiscales como los BSC. Una vez establecido el tamaño del muro, se calculó la huella de carbono emitida por cada materialidad.

Con respecto a la huella de carbono del hormigón G20, se obtuvo a partir del cálculo de sus materiales por separado. Dentro de los materiales se encuentran el cemento, la grava, la arena y el agua. En primer lugar, se obtuvieron las cantidades necesarias para la confección del muro, luego se multiplicaron los kg de cemento necesarios por su factor de emisiones de CO₂ generadas (0,581 kgCO₂/kg de cemento).

En lo que concierne a los ladrillos fiscales, BSC y BSC-lignina, lo primero que se hizo fue calcular la cantidad de unidades necesarias para confeccionar el muro descrito anteriormente. Una vez conocida la cantidad, se calculó el volumen de mortero de pega necesario y con esto conocer la cantidad de cemento requerido para la unión de las unidades. Luego, se multiplicaron los kg de cemento necesarios para el mortero de pega por su factor de emisiones de CO₂ (0,581 kgCO₂/kg de cemento).

Además, para los ladrillos fiscales, se multiplicó la cantidad de unidades de ladrillos necesarios por su peso y factor de emisiones de CO₂ generadas por su cocción (0,212 kgCO₂/kg de ladrillo). Luego, se sumaron los resultados de las emisiones del mortero de pega y de la cocción para obtener los kg de CO₂ totales de la confección.

Por otro lado, para los BSC se seleccionó la mezcla C12,5-L5, con 12,5% de cemento y 5% de cal, que fue la que presentó la mayor resistencia a la compresión, datos obtenidos de (Correa, 2025). Luego se multiplicó la cantidad de cemento y/o cal del bloque por sus factores de emisiones de CO₂ correspondientes (0,581 kgCO₂/kg de cemento y 0,692 kgCO₂/kg de cal). Finalmente, se sumaron los resultados de las emisiones del mortero de pega y de la elaboración de cada bloque para obtener los kg de CO₂ totales de la confección.

Con respecto a los BSC-lignina se multiplico la cantidad de unidades de ladrillo necesarias por su peso y el factor de emisiones de CO₂ correspondiente (-0,14 kg CO₂/kg). Luego, se sumaron los resultados de las emisiones del mortero de pega y de la elaboración de cada bloque para obtener los kg de CO₂ totales de la confección.

3.7. Conclusión

El desarrollo experimental permitió establecer un procedimiento claro para la confección, control y evaluación de probetas de suelo comprimido (BSC) estabilizados con cemento, cal y lignina Kraft, sustentado en los principios teóricos definidos en el capítulo anterior. El conjunto de ensayos abordó tanto la caracterización de las reacciones de hidratación de los estabilizantes como la determinación de parámetros físicos y mecánicos relevantes para el comportamiento del material.

Las pruebas de hidratación de cemento y cal confirmaron las relaciones agua/agentes óptimas para lograr una adecuada formación de productos cementantes, verificándose que proporciones comprendidas entre 0,25 y 0,30 favorecen una hidratación eficiente y una microestructura más densa.

Con estos antecedentes se diseñaron las mezclas para la confección de las probetas, empleando el molde y la energía de compactación equivalentes al Proctor modificado ($2700 \text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$), lo que permitió reproducir condiciones de densificación controladas y comparables entre los distintos agentes estabilizadores.

Las series confeccionadas con cemento, cal y lignina Kraft mantuvieron una geometría y densidad homogénea, lo que facilitó la comparación de resultados. Se registraron los valores de masa, volumen, densidad seca y resistencia a compresión uniaxial, con el propósito de evaluar la influencia del tipo de estabilizante en el desempeño de la probeta. En el caso de la lignina, se preparó una solución con pH alcalino, con el propósito de mejorar su solubilidad.

Complementariamente, se incorporó un análisis ambiental preliminar basado en factores de emisión reportados en la literatura, con el objetivo de cuantificar el impacto potencial de cada formulación. Los resultados estimados evidencian que la sustitución del cemento por lignina Kraft reduce de forma significativa las emisiones de CO_2 asociadas al proceso de fabricación, gracias a la eliminación de la calcinación del Clinker y al carácter biogénico del polímero, que permite fijar carbono durante el ciclo de vida del material. Esta comparación sustenta el enfoque de sostenibilidad que guía la investigación, vinculando el desempeño técnico con la mitigación ambiental.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos experimentales realizados con los distintos estabilizantes evaluados. Se analizan en primer lugar los comportamientos de hidratación del cemento y la cal, considerando su evolución en función de la relación agua/agente y el tiempo de curado. Posteriormente, se muestran los resultados de caracterización de los suelos empleados y su adecuación para la confección de probetas de suelo comprimido. Finalmente, se exponen los resultados mecánicos de las probetas estabilizadas con cemento y con lignina Kraft, destacando las variaciones de resistencia, densidad y uniformidad obtenidas. Estos antecedentes permiten evaluar el desempeño comparativo de los estabilizantes y establecer tendencias sobre la influencia de cada uno en las propiedades físicas y mecánicas del material.

4.2. Ensayos de hidratación

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de hidratación realizados con los aglomerantes tradicionales utilizados como referencia en esta investigación: cemento y cal. El objetivo de esta etapa experimental fue analizar el comportamiento físico y mecánico de ambos materiales en función de su relación agua/aglomerante y del tiempo de curado, con el propósito de determinar los rangos óptimos de agua que favorecen la formación de los productos de hidratación responsables de la resistencia y estabilidad de la matriz.

4.2.1 Hidratación de cemento

Los resultados se dividen en propiedades físicas de las probetas endurecidas, describiendo su peso, volumen y densidad aparente, además de las propiedades mecánicas de estas.

Los resultados obtenidos de la primera etapa de confección corresponden a la propiedades físicas de las probetas, como peso, volumen y densidad. En el Anexo 4.1 se presentan los detalles correspondientes a esta primera confección. En la Tabla 4.1 a continuación se muestra la densidad promedio de las probetas confeccionadas.

Tabla 4.1 Densidad promedio de probetas para hidratación de cemento

Mezcla (relación agua-cemento)	Densidad promedio (g/cm ³)
0,20	1,75
0,25	2,04
0,30	2,07
0,35	2,07
0,40	1,92

Se observa que la mezcla 0,20 muestra una densidad menor, lo cual puede ser explicado debido a una consistencia más seca, lo que dificulta el llenado de las probetas.

A continuación, en la Figura 4.1 se presentan los resultados relacionados a las propiedades mecánicas de la primera confección. En el Anexo 4.1 se entregan valores en mayor detalle sobre la resistencia a compresión, tales como mínimos, máximos y el promedio de resistencia a compresión, además de la variación de las muestras con respecto al mayor resultado.

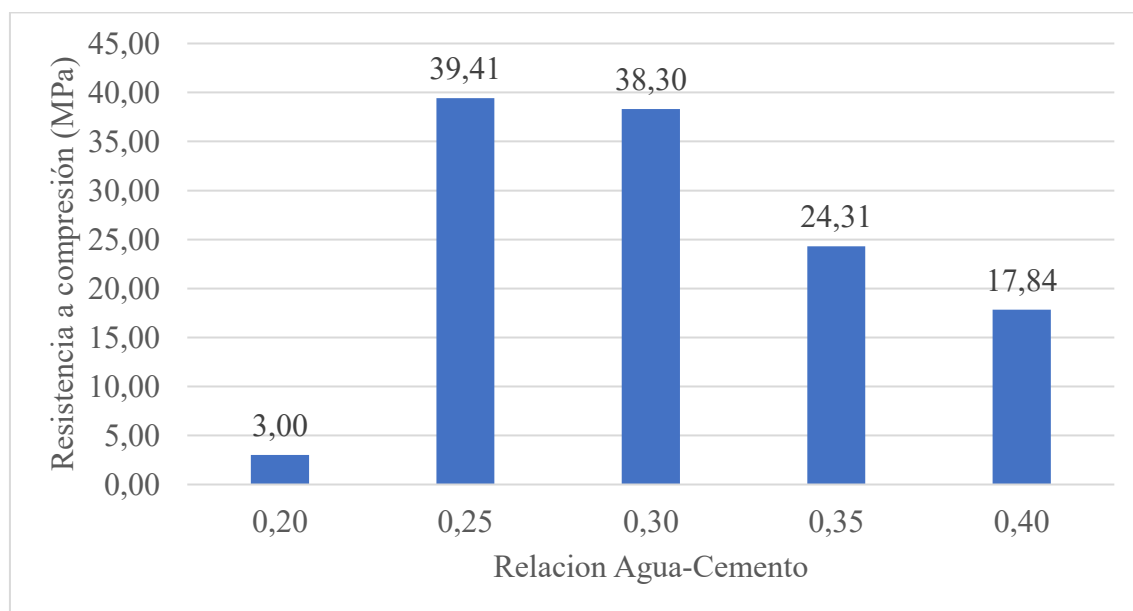


Figura 4.1 Resistencia a compresión de probetas confeccionadas para hidratación de cemento a la edad de siete días

Se observa que la mezcla con relación agua/cemento 0,25 presenta la mayor resistencia a compresión a los 7 días de curado, con un valor promedio de 39,41 MPa. Además, queda en evidencia que la mezcla que peor se comporta es la de 0,20, con una resistencia a compresión de apenas 3 MPa, lo que corresponde a un valor muy por debajo de los demás.

Para la segunda serie de confección de probetas de cemento se analizaron nuevamente las propiedades físicas y mecánicas, incorporando en esta etapa tres edades de ensayo correspondientes a 2, 5 y 8 días.

Asimismo, dentro de las propiedades físicas se incluyó el ensayo de flexión, con el propósito de complementar la caracterización del material.

En la Tabla 4.2 se presentan los resultados obtenidos sobre la densidad promedio de las probetas confeccionadas.

Tabla 4.2 Densidad promedio de probetas para segunda etapa de hidratación de cemento

Mezcla (relación agua-cemento)	Densidad promedio (g/cm ³)
0,22	1,54
0,25	1,95
0,28	2,03
0,30	1,99

En el Anexo 4.2 se presentan los datos en mayor detalle para esta segunda confección.

Se logra apreciar que la densidad se mantiene constante en la mayoría de las mezclas, excepto en la 0,22 que presenta un valor por debajo del resto. Esto se puede explicar de la misma forma que la mezcla de la primera fase, donde la consistencia resultaba algo seca, dificultando el llenado de las probetas prismáticas.

A continuación, en la Figura 4.2 se muestran los resultados obtenidos a partir de los ensayos a flexión realizados a cada una de las muestras.

En relación a la flexión, se observa que la mezcla con mejores resultados corresponde a la con relación agua/cemento 0,30 y la que presenta los valores más bajos corresponde a las de 0,22.

En Anexo 4.2 se presentan los resultados detallados relacionados a las propiedades mecánicas de la segunda confección, donde se entregan los valores mínimos, máximos y el promedio de resistencia a compresión, además de la variación de las muestras con respecto al mayor resultado.

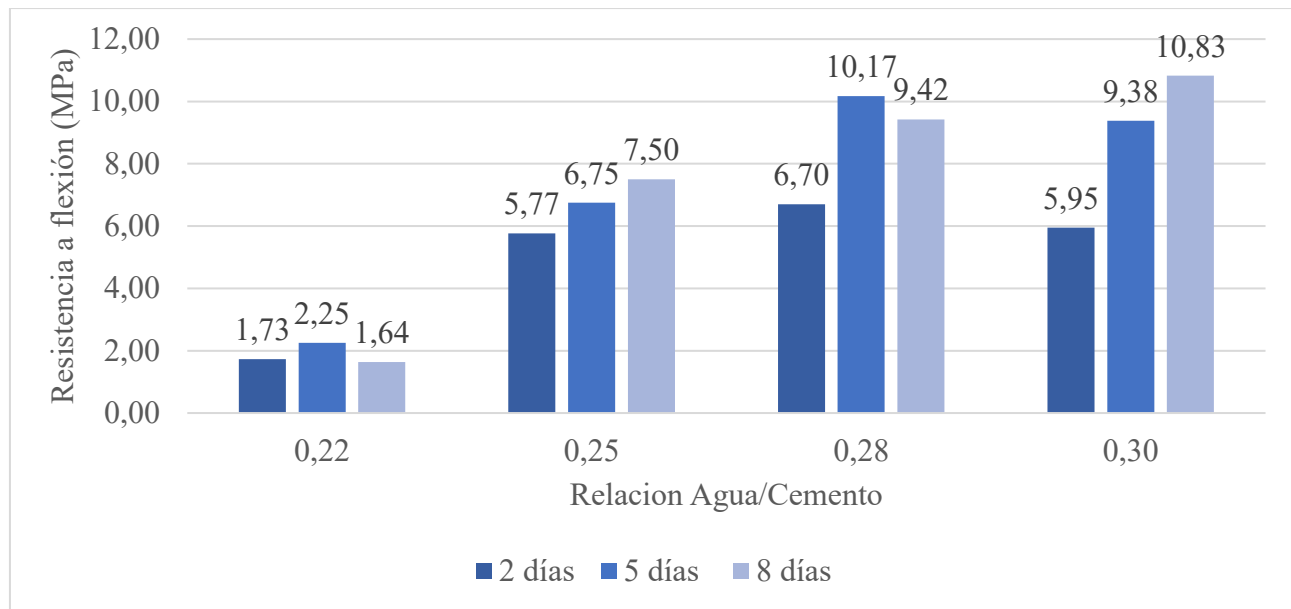


Figura 4.2 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento

En la Figura 4.3 se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de compresión a cada una de las mezclas confeccionadas en esta segunda etapa.

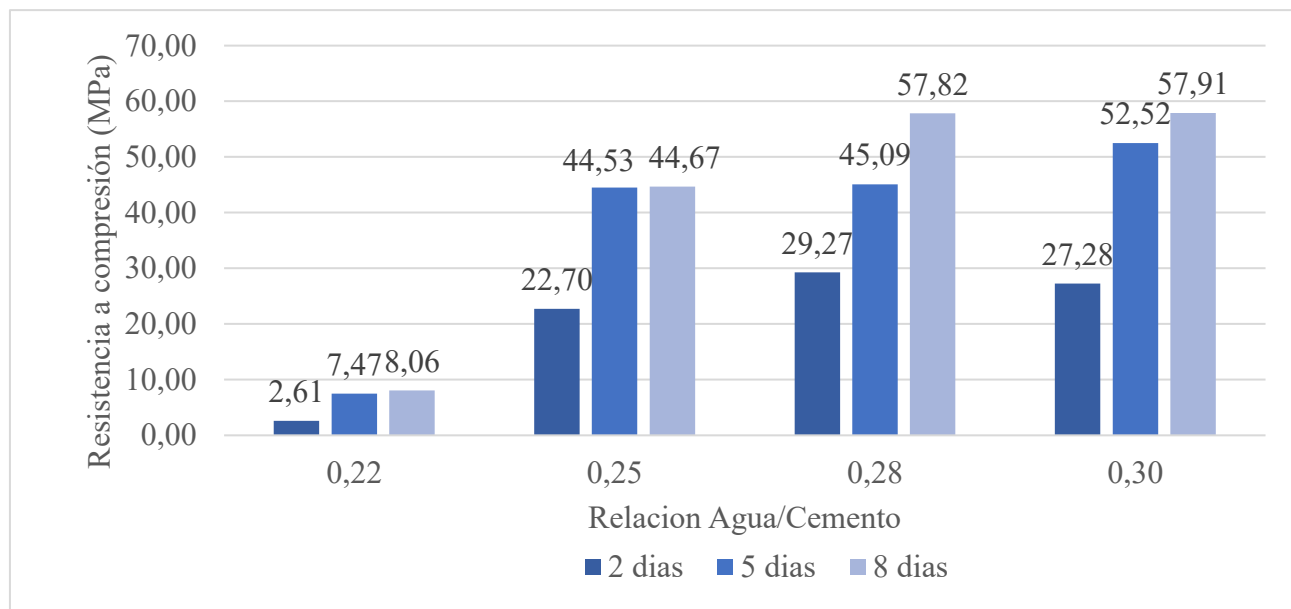


Figura 4.3 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento

Se observa que la mezcla con relación agua/cemento 0,28 presenta la mayor resistencia a compresión en la primera edad de estudio, con un valor promedio de 29,27 MPa, en las edades posteriores la mezcla 0,30 presenta una mayor resistencia. Además, queda en evidencia que la mezcla que peor se

comporta es la de 0,22, con una resistencia a compresión en a los 8 días de curados de 8,06 MPa, lo que corresponde a un valor muy por debajo de los demás.

Para la tercera serie de confección de probetas de cemento se analizaron nuevamente las propiedades físicas y mecánicas, incorporando en esta etapa tres edades de ensayo, correspondientes a 3, 7 y 14 días.

Asimismo, dentro de las propiedades físicas se incluyó el ensayo de flexión, con el propósito de complementar la caracterización del material. En la Tabla 4.3 se presentan los resultados de densidad promedio.

Tabla 4.3 Densidad promedio de probetas para tercera etapa de hidratación de cemento

Mezcla (relación agua-cemento)	Densidad promedio (g/cm ³)
0,25	2,00
0,28	2,07
0,30	2,06

Se logra apreciar que la densidad se mantiene constante en la mayoría de las mezclas, oscilando en un rango que desde 2,00 g/cm³ a 2,07 g/cm³.

En el Anexo 4.3 se presentan los datos en mayor detalle para esta tercera confección.

En la Figura 4.4 se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia a flexión.

En relación a la flexión, se observa que la mezcla con mejores resultados varía según la edad de ensayo, debido a que a los 3 días la mezcla 0,30 posee un mejor resultado, a los 7 días el valor más alto corresponde a la mezcla 0,25 y finalmente a los 14 días lidera la mezcla 0,28.

En la Figura 4.5 se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de resistencia a la compresión de cada una de las mezclas confeccionadas en esta tercera etapa.

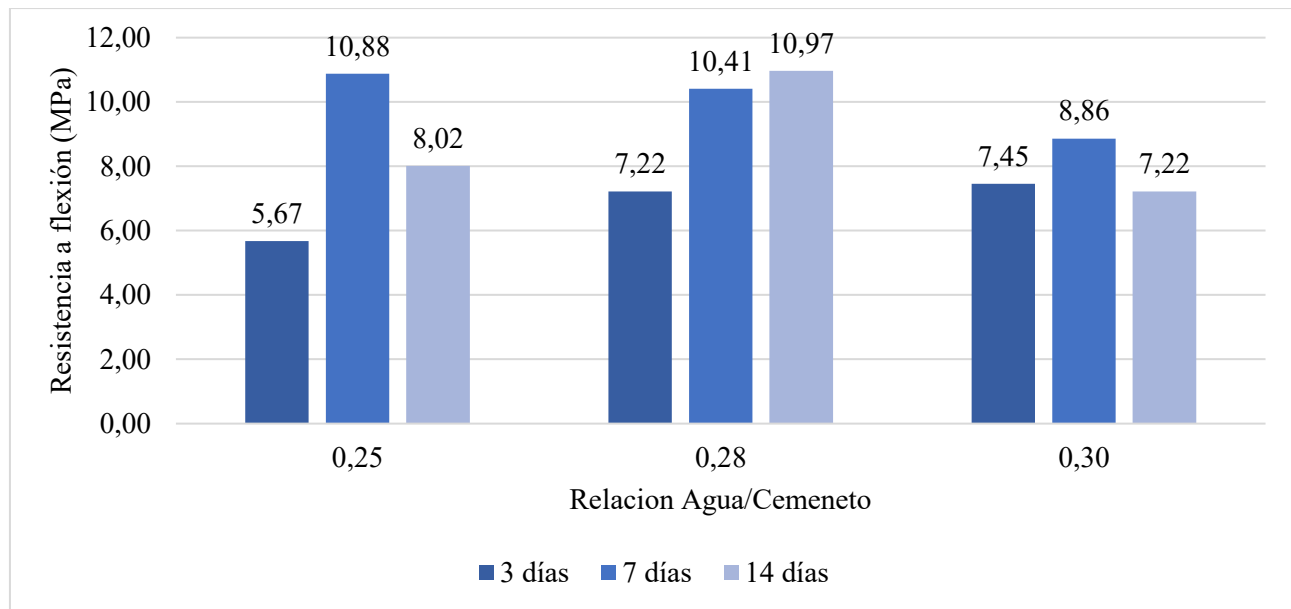


Figura 4.4 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento

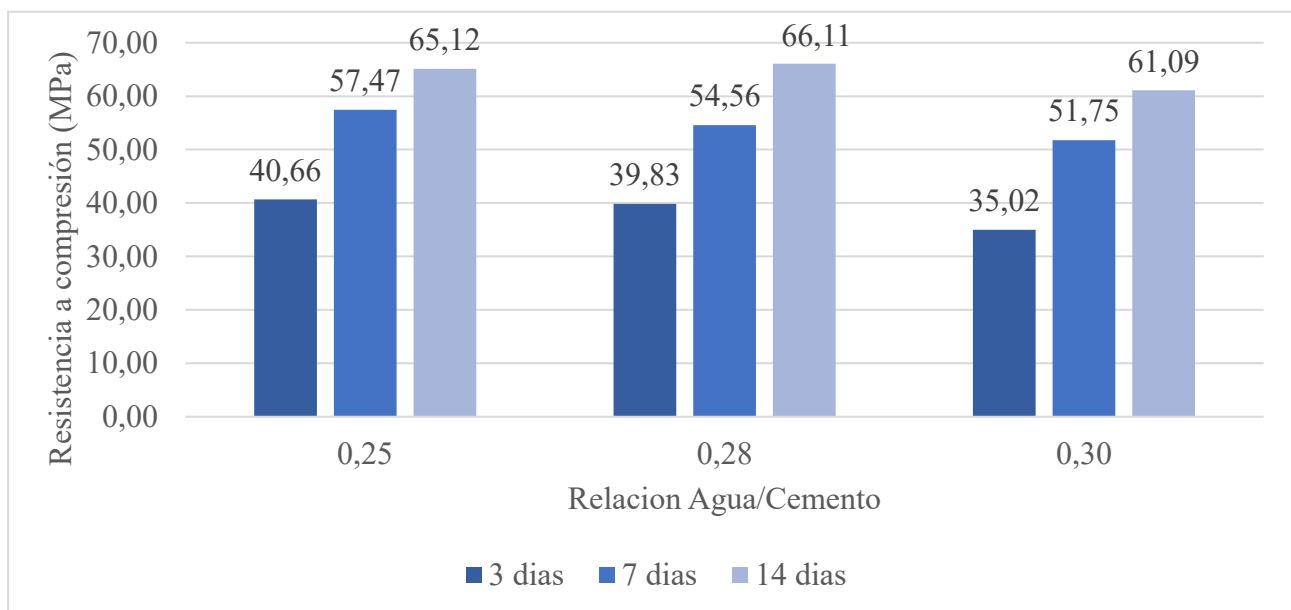


Figura 4.5 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cemento para distintas relaciones agua/cemento

Se observa que la mezcla con relación agua/cemento 0,25 presenta la mayor resistencia a compresión a los 3 y 7 días, con un valor promedio de 40,65 MPa y 57,47 MPa respectivamente, a los 14 días la mezcla 0,28 presenta una mayor resistencia. Se logra apreciar que la variación entre resistencias a 14 días es menor a un 10%.

En el Anexo 4.3 se presentan los resultados relacionados a las propiedades mecánicas de la tercera confección, donde se entregan los valores mínimos, máximos y el promedio de resistencia a compresión, además de la variación de las muestras con respecto al mayor resultado.

En la Figura 4.6 se muestran alguno de los resultados obtenidos anteriormente de resistencia a la compresión de pastas de cemento. Las mezclas seleccionadas corresponden a 0,22; 0,25; 0,28; 0,30; 0,35 y 0,40.

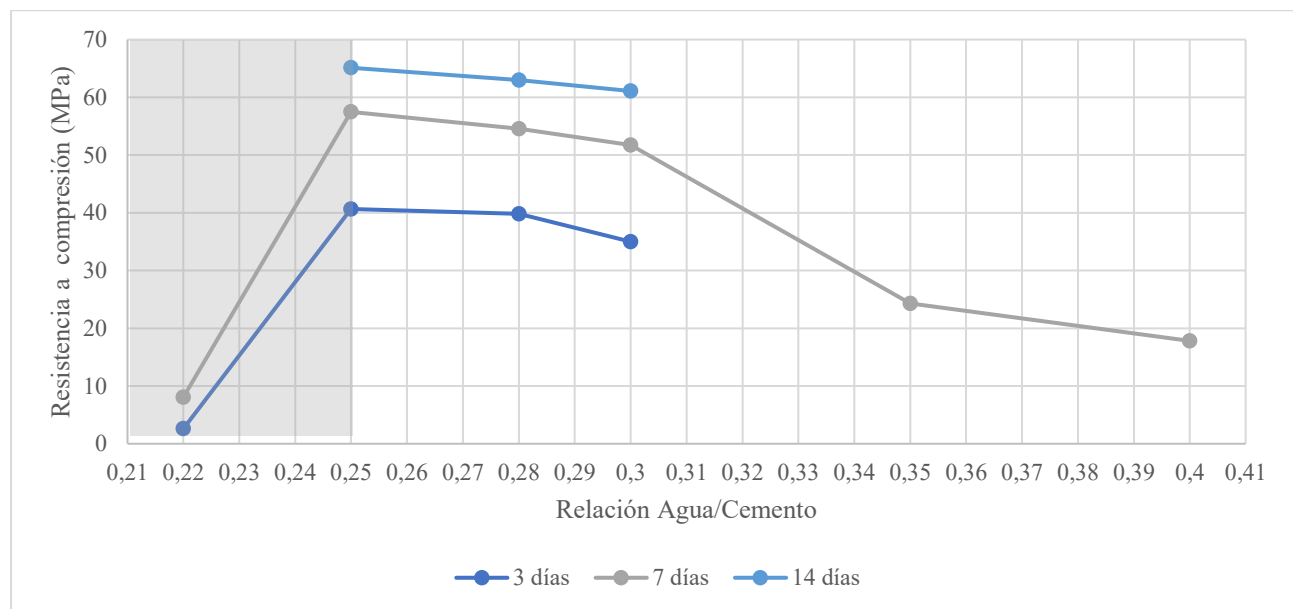


Figura 4.6 Desempeño mecánico del cemento para distintas relaciones agua/cemento

Se utilizó el supuesto de que el agua incorporada al cemento cumple dos funciones, hidratar el cemento para producir una reacción química y otorgar fluidez a la mezcla. Así, incrementando el agua desde 20% en adelante, a través de ensayo y error, puede encontrarse aproximadamente el punto en el cual el agua incorporada comienza a generar plasticidad en la mezcla y por lo tanto cierta fluidez. La zona marcada con un cuadro indica nula plasticidad y una consistencia seca, lo que visualmente se parecía a una arena semihúmeda.

Se advierte por inspección visual que la relación Agua/Cemento 0,25 es la que entrega el mejor desempeño mecánico y nula plasticidad. Valores inferiores a 25% no suministra la suficiente agua para hidratar todo el polvo de cemento y valores superiores generan un excedente de agua que muestra el inicio de la plasticidad de la mezcla, por lo que existe una cantidad de agua suficiente para hidratar el cemento y un exceso para plasticidad.

4.2.2 Hidratación de cal

En lo que respecta al ensayo de hidratación de cal se realizó un análisis de las propiedades físicas y mecánicas de las probetas confeccionadas. Dentro de los ensayos realizados se encuentran la determinación de la densidad, la resistencia a flexión y compresión.

En la primera etapa de confección se analizaron las relaciones agua/cal 0,25; 0,30 y 0,35. A continuación, en la Tabla 4.4 se presentan los datos de densidad promedio de las probetas para cada una de las mezclas realizadas.

Tabla 4.4 Densidad promedio de probetas para hidratación de cal

Mezcla (relación agua-cal)	Densidad promedio (g/cm ³)
0,25	1,28
0,30	1,54
0,35	1,46

Para el ensayo de flexión y compresión se realizaron ensayos a 14, 21 y 28 días de curado. A continuación, en la Figura 4.7 se presentan los resultados del ensayo de flexión.

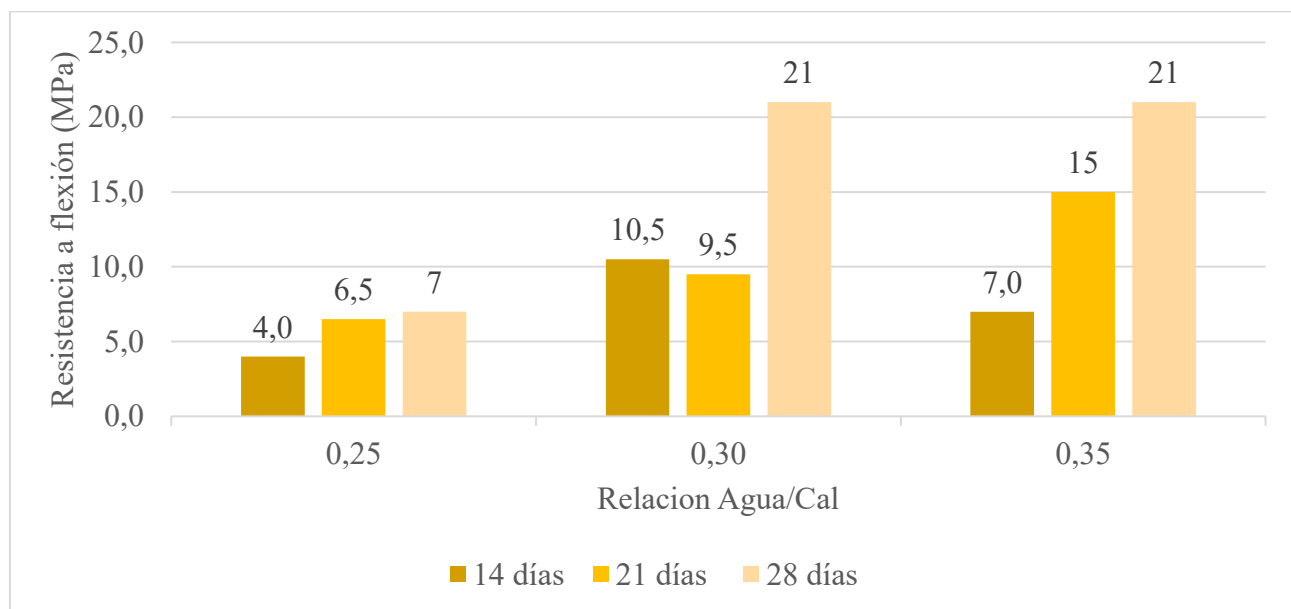


Figura 4.7 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cal para distintas relaciones agua/cemento

En base a los datos obtenidos se logra apreciar que las relaciones 0,30 y 0,35 presentan los mejores resultados de resistencia a flexión, llegando ambas a los 21 MPa en su último día de ensayo.

En la Figura 4.8 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de compresión para cada una de las muestras confeccionadas.

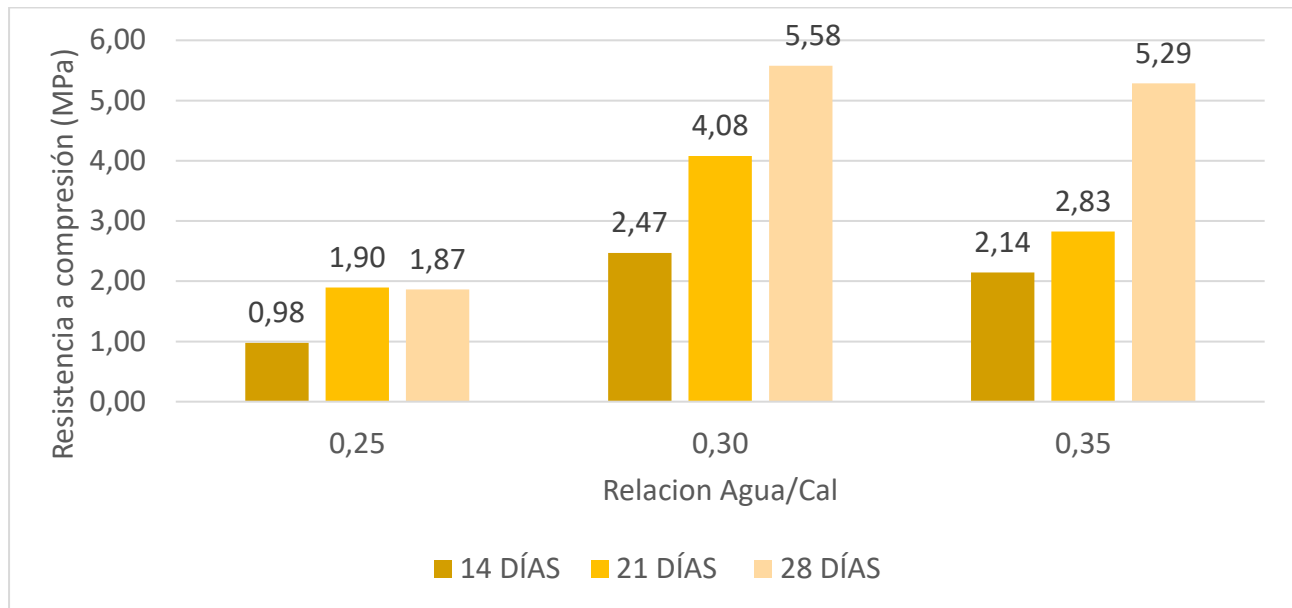


Figura 4.8 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cal para distintas relaciones agua/cemento

Queda en evidencia que la confección de probetas de cal muestra una baja resistencias a compresión, resultando un valor máximo de tan solo 5,58 MPa para la mezcla 0,30 a los 28 días.

Se presenta en el Anexo 4.4 con más detalle los resultados obtenidos para cada una de las mezclas confeccionadas.

Para la segunda etapa experimental de la hidratación de la cal se tienen los resultados de las probetas de cal y cemento, en donde se analizaron las relaciones Agua/Cal-Cemento de 0,25; 0,28 y 0,30.

A continuación, en la Tabla 4.5 se presentan los datos de densidad promedio de las probetas para cada una de las mezclas realizadas.

Tabla 4.5 Densidad promedio de probetas para segunda etapa de hidratación de cal

Mezcla (relación agua-cal/cemento)	Densidad promedio (g/cm ³)
0,25	1,95
0,28	1,90
0,30	1,93

Para el ensayo de flexión y compresión se realizaron ensayos a 3, 7 y 14 días de curado. A continuación, en la Figura 4.9 se presentan los resultados del ensayo de flexión.

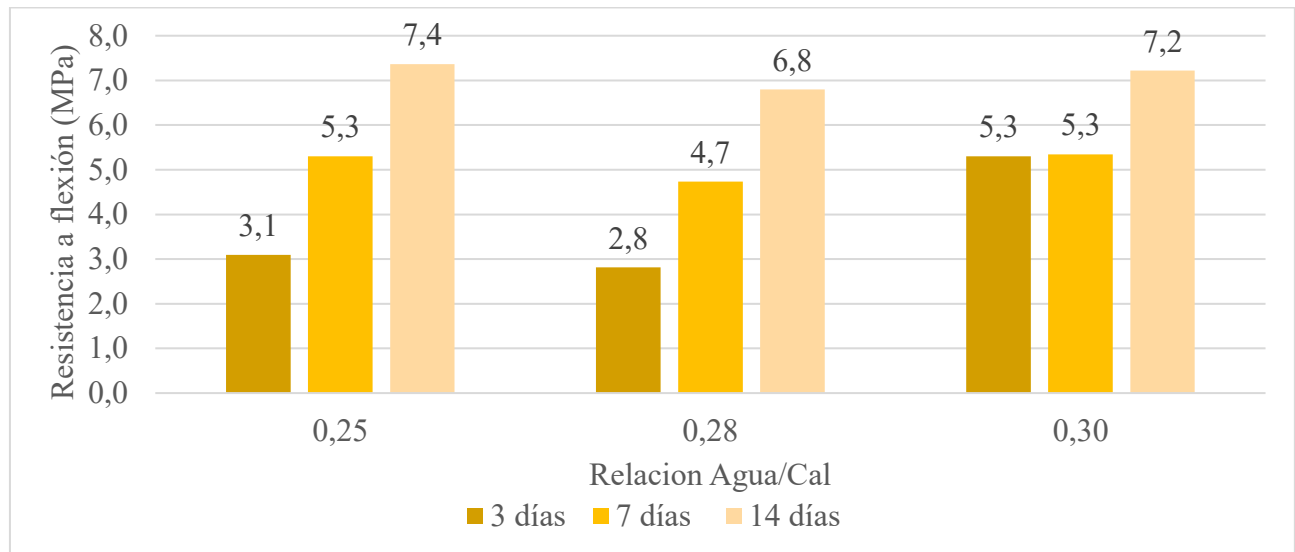


Figura 4.9 Evolución de resistencia a flexión de probetas de cal-cemento para distintas relaciones agua/cemento

Queda en evidencia al observar los datos que la mezcla 0,25 presenta en la mayor resistencia a flexión de las 3 mezclas, con un valor de 27,1 MPa. Sin embargo, se podría decir que la diferencia no resulta significativa.

En la Figura 4.10 se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de compresión para cada una de las muestras confeccionadas.

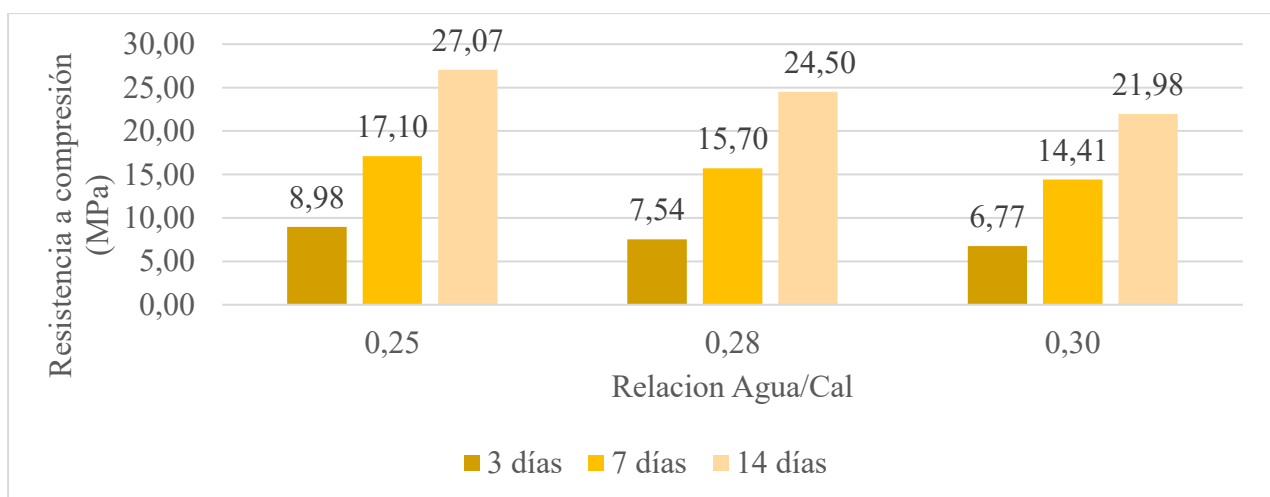


Figura 4.10 Evolución de resistencia a compresión de probetas de cal-cemento para distintas relaciones agua/cemento

Queda en evidencia que la confección de probetas de cal muestra una buena a compresión a una temprana edad, con un valor máximo que alcanza los 27,07 MPa para la mezcla 0,25 a los 14 días. Además, se observa un incremento de resistencia de manera uniforme a lo largo del ensayo.

Se presenta en el Anexo 4.5 con más detalle los resultados obtenidos para cada una de las mezclas confeccionadas.

4.3. Densidad de suelo-lignina

Los resultados del Proctor aplicado al suelo con una incorporación de un 5% de lignina entregó como resultado una densidad seca máxima de 1,08 g/cm³ con una humedad óptima de un 42%. En la Figura 4.11 se presenta la curva de densidad seca versus humedad óptima.

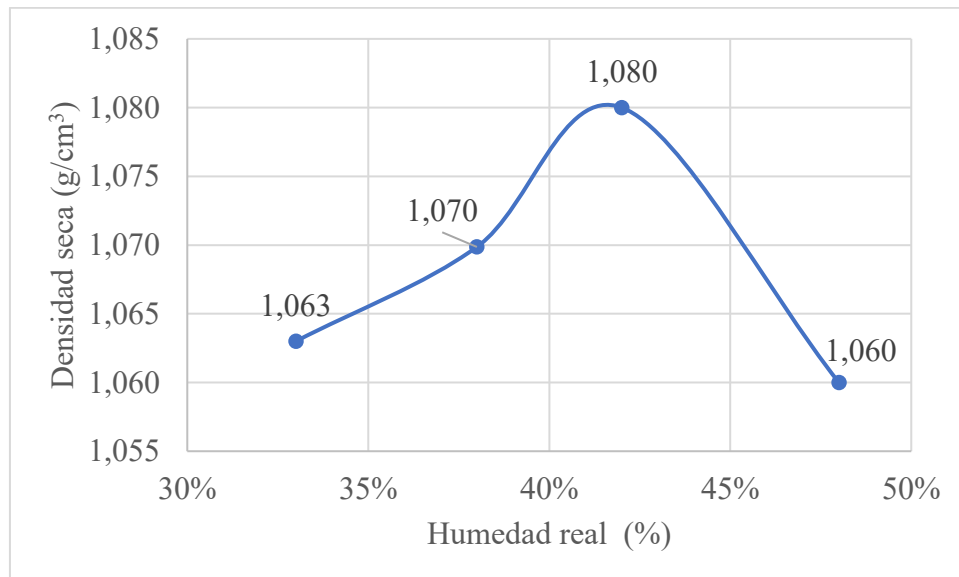


Figura 4.11 Curva Proctor modificado para suelo con adición de lignina

En el Anexo 4.6 se presenta la tabla con el detalle de datos obtenidos en el ensayo.

4.4. Resultados de probetas de suelo estabilizado

En esta sección se presentan los resultados correspondientes a los ensayos realizados sobre probetas de suelo estabilizados con cemento y lignina Kraft. El objetivo de esta etapa experimental fue analizar el comportamiento físico y mecánico de las probetas en función del tipo de estabilizante empleado, evaluando su influencia en la densidad y resistencia a compresión de las probetas.

El cemento se utilizó como material de referencia por su amplio uso en estabilización de suelos y por ser el principal agente hidráulico en la fabricación de bloques de tierra comprimida, mientras que la lignina se incorporó como un aditivo alternativo, buscando reducir el impacto ambiental asociado al uso de conglomerantes convencionales. Los resultados obtenidos permiten comparar el desempeño de ambos estabilizantes y determinar la efectividad de la lignina como sustituto parcial del cemento en la consolidación de matrices suelo-aglomerante.

4.4.1 Probetas de suelo-cemento

En la primera etapa de confección se estudiaron mezclas con relación Agua/Cemento en un rango de [0,20 a 0,40], a las probetas se les otorgó la nomenclatura de PR, seguido de su relación agua/cemento a las edades de 7, 14 y 21 días. Dentro de las propiedades estudiadas encontramos las físicas y mecánicas.

A continuación, en la Tabla 4.6 se entregan los valores promedios de densidad para cada una de las mezclas confeccionadas. En el Anexo 4.7 se entregan mayores detalles sobre la masa, volumen y densidad de cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 4.6 Densidad promedio de probetas para probetas de suelo-cemento

Mezcla (relación agua-cemento)	Densidad promedio (g/cm ³)
PR-20	2,04
PR-25	2,05
PR-30	2,03
PR-35	2,06
PR-40	2,06

Los valores obtenidos de densidad presentan variaciones mínimas entre las diferentes probetas, lo que evidencia una adecuada homogeneidad en la confección y compactación de las muestras. Esta uniformidad sugiere que el procedimiento de moldeo y la cantidad de agua utilizada fueron consistentes, permitiendo una comparación fiable de los resultados mecánicos posteriores.

En la Figura 4.12 se presentan los resultados de resistencia a compresión para cada una de las mezclas generadas. Se presenta en el Anexo 4.7 con más detalle los resultados obtenidos para cada una de las mezclas confeccionadas.

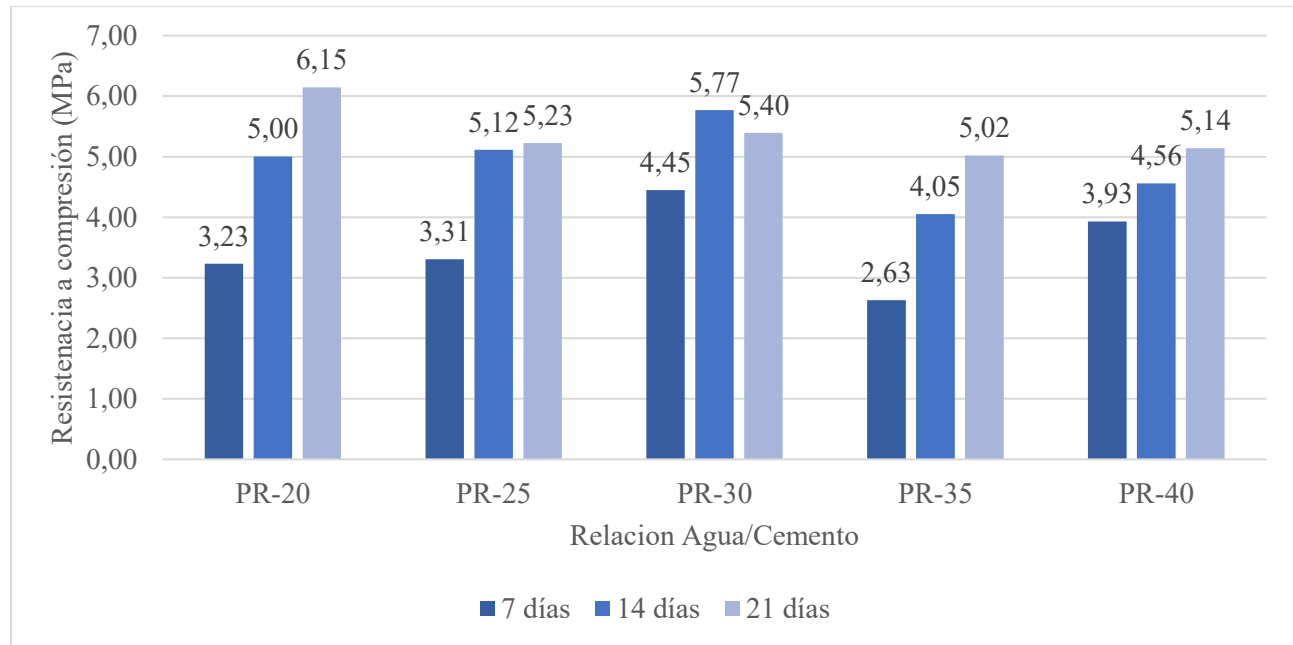


Figura 4.12 Evolución de resistencia a compresión de probetas de suelo-cemento con distintas relaciones agua/cemento

Se observa una tendencia general de incremento progresivo en la resistencia a compresión para la mayoría de las mezclas evaluadas, a excepción de la de las mezclas PR-25 y PR-30, donde se observa un aumento marginal de resistencia y una disminución, lo que podría ser explicado por un curado deficiente. La mezcla que alcanzó la resistencia máxima corresponde a la muestra PR-20, con un valor promedio de 6,15 MPa, evidenciando un desempeño mecánico superior respecto al resto de las formulaciones analizadas. A continuación, se muestra en la Figura 4.13 fotografías de las probetas luego de alcanzar su máxima resistencia a compresión.



Figura 4.13 Falla de probeta de suelo Udec -cemento

4.4.2 Probetas con cemento vs lignina

Para la confección de probetas de suelo Nihuinco estabilizadas con cemento y lignina, cada uno es adición de un 5% del peso seco del suelo, se realizaron edades de ensayo a los 7, 14 y 21 días. Dentro de las propiedades estudiadas encontramos las físicas y mecánicas.

Con respecto a la propiedad física de la densidad de las probetas con cemento, se obtuvo un valor promedio de $1,49 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, para las probetas con lignina se obtuvo un valor promedio de $1,52 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. En el Anexo 4.8 y 4.9 se entregan mayores detalles sobre la masa, volumen y densidad de cada una de las probetas ensayadas.

En la Figura 4.14 se presentan los resultados de resistencia a compresión para cada una de las edades de ensayo de las probetas estabilizadas con cemento, lignina y la probeta patrón, esta última se ensayó luego de su confección y se agregó a cada una de las edades como referencia. Se presenta en el Anexo 4.8 con más detalle los resultados obtenidos para cada una de las mezclas confeccionadas de suelo-cemento. Se presenta en el Anexo 4.9 con más detalle los resultados obtenidos para cada una de las mezclas confeccionadas de suelo-lignina.

El grafico muestra la evolucion de la resistencia a la compresion promedio de las probetaas estabilizadas con cemento, lignina y suelo natural patrón a edades de 7, 14 y 21 días. Para el cemento se observa que se alcanzaron valores de 0,40 MPa, 0,39 MPa y 0,44 MPa . Mientras que para la lignina, se tienen valores de 0,45 MPa, 0,44 MPa y 0,50 MPa, siendo estos ultimos valores superiores en todas las edades a los del cemento. Cabe destacar que ambos estabilizantes logran elevar la resistencia de los bloques por sobre la del suelo natural. A continuación, en la Figura 4.15 se muestran fotografías de las probetas luego de alcanzar su máxima resistencia a compresión.

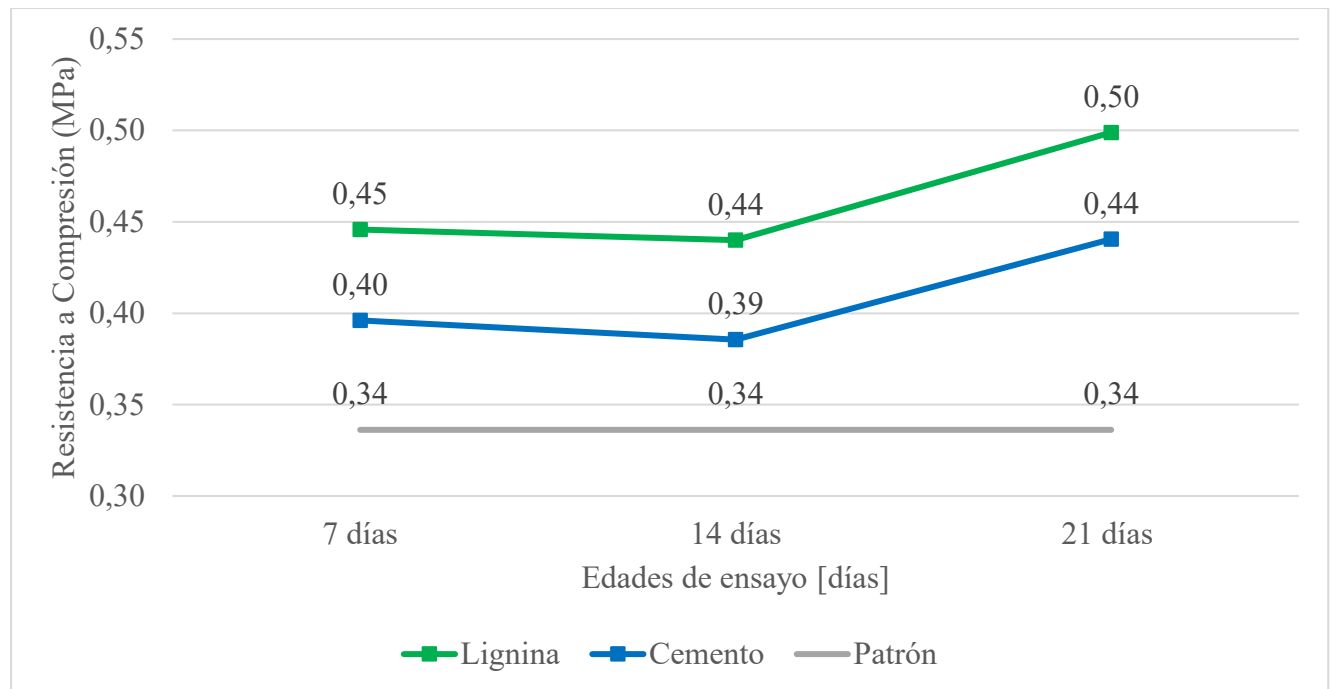


Figura 4.14 Evolución de resistencia a compresión de probetas de suelo estabilizadas con cemento, lignina y suelo natural

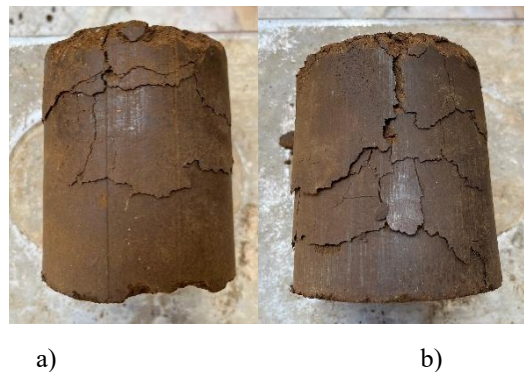


Figura 4.15 a) Falla de probeta de suelo Nihuinco-cemento b) Falla de probeta de suelo Nihuinco-lignina

Es importante incluir la dispersión de los datos obtenidos en las probetas, ya que esta información entrega una medida directa de la consistencia y confiabilidad de los resultados. En este sentido, a continuación, en la Figura 4.16 se muestra un gráfico con barras de error, que representan la desviación estándar de los resultados, para cada una de las edades de ensayo y tipo de probeta de suelo.

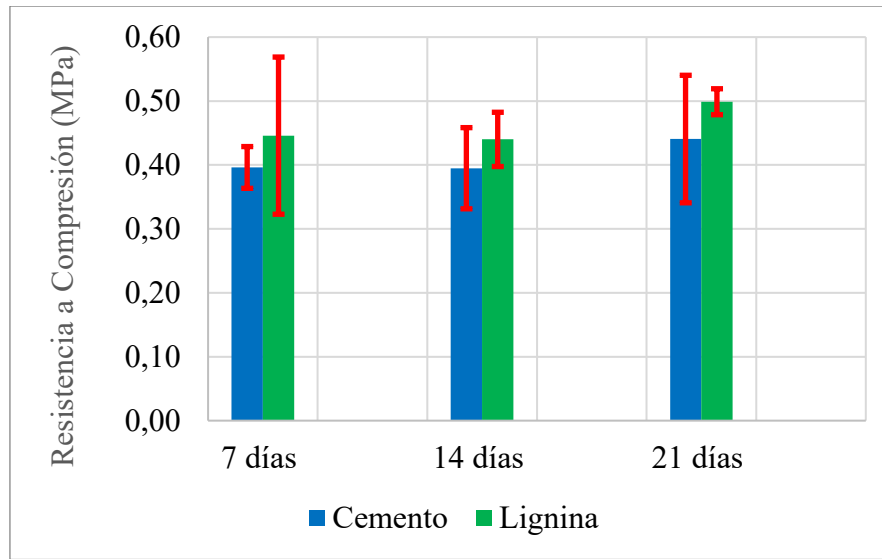


Figura 4.16 Gráfico de resistencia a compresión de probetas y su variabilidad de resultados

Se observa en el caso de la lignina que la dispersión inicial es relativamente alta a los 7 días, pero disminuye de manera significativa a 14 días y se vuelve mínima a 21 días, evidenciando una mayor consistencia en las mediciones a medida que avanza el curado. Por su parte, la mezcla con cemento presenta una variabilidad baja en edades tempranas, seguida de un incremento moderado a los 14 días y una mayor dispersión a los 21 días.

4.5. Análisis ambiental

Una vez conocidas las cantidades necesarias de cemento y/o cal para la construcción de un muro de 1 x 1 x 0,14 metros, se calcularon las emisiones de CO₂ generadas por cada materialidad.

Para el hormigón G20, la Tabla 4.7 muestra las cantidades de cemento necesarias para la confección del muro.

Tabla 4.7 Cantidad de cemento para confección de muro

Hormigón G20		
Descripción	Cantidad	Unidad
Cantidad de cemento para muro	340	kg
Cantidad de grava	1095	kg
Cantidad de arena	715	kg
Cantidad de agua	200	lt
Cantidad de cemento necesario	47,6	kg

Para los ladrillos fiscales, la Tabla 4.8 muestra las cantidades de cemento necesarias para la confección del muro.

Tabla 4.8 Cantidad de ladrillos y cemento necesarias para confección de muro

Ladrillo fiscal		
Descripción	Cantidad	Unidad
Ladrillos necesarios para muro	56	unidad
Volumen muro	0,14	m ³
Volumen ladrillos	0,101	m ³
Volumen mortero de pega	0,039	m ³
Cantidad de cemento necesario	1,10	kg

Para los BSC y los BSC-lignina, la Tabla 4.9 muestra las cantidades de cemento necesarias para la confección del muro.

Tabla 4.9 Cantidad de BSC y BSC-lignina necesarios para confección de muro

BSC y BSC-lignina		
Descripción	Cantidad	Unidad
BSC necesarios para muro	39	unidad
Volumen muro	0,14	m ³
Volumen ladrillos	0,111	m ³
Volumen mortero de pega	0,029	m ³
Cantidad de cemento necesario	0,81	kg

Por otro lado, la Figura 4.17 muestra los kg de CO₂ totales generados por cada materialidad para la construcción del muro.

Se observa que la albañilería convencional presenta el mayor impacto ambiental, con 33,9 kg CO₂, seguida del hormigón con 27,7 kg CO₂ y de la albañilería con 18,6 kg CO₂. En contraste, el BSC-lignina evidencia un balance de carbono negativo con -0,6 kg CO₂, lo que significa que durante su ciclo de vida captura más dióxido de carbono del que emite.

Al comparar los resultados, el hormigón emite aproximadamente 46 veces más CO₂, la albañilería tradicional cerca de 57 veces más CO₂, e incluso el BSC sin lignina alrededor de 31 veces más CO₂ que el bloque con lignina. Este comportamiento resalta el potencial de la lignina Kraft como estabilizante no convencional capaz de transformar el balance ambiental del material, reduciendo significativamente su huella de carbono frente a las tecnologías constructivas tradicionales.

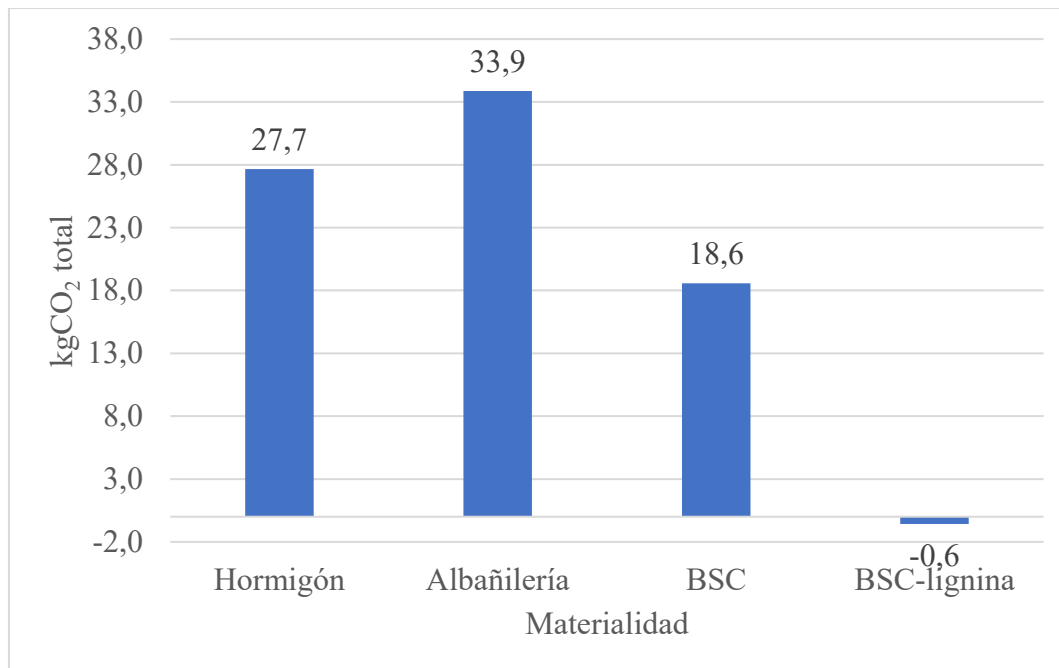


Figura 4.17 kgCO₂ generados por cada materialidad en muro de 1m²

4.6. Conclusión

El conjunto de resultados obtenidos permitió comprender de manera integral el comportamiento físico y mecánico de los materiales empleados, así como el efecto de los distintos agentes estabilizadores evaluados.

En la etapa de hidratación de pastas, se verificó que el cemento presenta una ganancia progresiva de resistencia a compresión con el aumento de la relación agua-cemento hasta valores óptimos próximos a 0,28–0,30, evidenciando el equilibrio entre la cantidad de agua disponible para la hidratación y la porosidad final del material. Esta tendencia concuerda con la teoría de Czernin (1962), que establece que la resistencia del cemento aumenta a medida que avanza la hidratación de los silicatos de calcio y se forman productos de tipo tobermorita y portlandita. En el caso de la cal, los resultados mostraron una hidratación más lenta y dependiente del tiempo de carbonatación, confirmando su menor desarrollo de resistencia inicial frente al cemento, aunque con una estabilidad progresiva a edades mayores.

Respecto a la caracterización de los suelos utilizados, el material proveniente de la Universidad de Concepción (UdeC) corresponde a una arena limosa (SM) con baja plasticidad, granulometría bien graduada y un contenido de finos moderado, condiciones que lo ubican dentro de los rangos comúnmente aceptados para la fabricación de bloques de suelo comprimido. En contraste, el suelo de

la localidad de Nihuinco se clasifica como un limo de alta plasticidad (MH), con un porcentaje de finos cercano al 98 % y humedad óptima elevada, lo que implica una matriz altamente compresible y controlada por la fracción fina. Aun cuando su granulometría se aleja de los valores recomendados en la literatura para BSC, los resultados experimentales mostraron que, pese a su elevada fracción fina y alta plasticidad, el suelo Nihuinco permitió la confección de probetas compactadas y estabilizadas, obteniéndose resistencias suficientemente consistentes para efectos de análisis comparativo dentro de este estudio, aunque inferiores a los valores usualmente reportados para bloques de suelo comprimido.

En la evaluación de los bloques estabilizados, las probetas suelo–cemento elaboradas en primera instancia exhibieron un aumento uniforme de resistencia a compresión con el incremento del contenido de aglomerante, alcanzando valores superiores a 6 MPa en las dosificaciones óptimas, en concordancia con lo reportado por Cabrera *et al.* (2020) para bloques con dosificaciones de 10 % de cemento.

En la etapa experimental realizada con suelo de Nihuinco, se comparó el comportamiento de los bloques estabilizados con 5% de cemento y con 5% de lignina Kraft, ambos fabricados bajo las mismas condiciones de compactación y curado controlado.

Los bloques de suelo-cemento (5%) presentaron un buen nivel de compactación y desarrollo de resistencia a compresión, alcanzando valores de 0.44 MPa, con una densidad promedio del orden de 1,5 g/cm³.

En contraste, los bloques de suelo-lignina (5 %) exhibieron resistencias promedio entre 0,45 y 0,50 MPa, con densidades similares a las del suelo-cemento, lo que indica que la compactación fue equivalente pero el mecanismo de estabilización difiere. En estos bloques no se generaron productos cementantes minerales, sino un enlace orgánico-coloidal promovido por la lignina, que actuó como aglomerante físico recubriendo las partículas del suelo y aumentando la cohesión entre ellas. Este tipo de enlace otorga menor rigidez, pero una mayor capacidad de deformación sin fisuras y un comportamiento más dúctil frente a esfuerzos de compresión.

En términos generales, los ensayos realizados permitieron validar el procedimiento experimental y establecer las bases para el análisis comparativo entre estabilizadores convencionales y no convencionales. La incorporación de lignina Kraft demostró potencial como agente de bajo impacto ambiental, coherente con los objetivos de sostenibilidad de esta investigación, mientras que los

ensayos con cemento y cal sirvieron como referencia para contrastar su comportamiento mecánico y su evolución durante la hidratación.

Desde la perspectiva ambiental, el análisis comparativo realizado en este capítulo evidenció diferencias sustanciales en la huella de carbono de los materiales evaluados. Donde el material que más contamina en su fabricación es el ladrillo cocido, en cambio, el bloque de suelo–lignina (BSC–lignina) muestra un balance de carbono negativo de $-0,6 \text{ kg CO}_2$, lo que implica que durante su ciclo de vida captura más dióxido de carbono del que emite.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El estudio evaluó experimentalmente el comportamiento físico-mecánico y ambiental de probetas de suelo comprimido estabilizadas con cemento y lignina Kraft, utilizando como base un suelo limoso de alta plasticidad. Se definieron procedimientos de mezclado, compactación mediante el molde y energía del ensayo Proctor modificado y curado en laboratorio, que permiten reproducir de manera sistemática probetas cilíndricas de suelo estabilizado.

En relación con los ensayos de hidratación, el comportamiento del cemento y la cal permitió validar los fundamentos teóricos descritos por Czernin (1963), observándose una correlación directa entre la relación de agua/agente y el desarrollo de la resistencia a compresión. La máxima resistencia se alcanzó en relaciones agua/cemento entre 0,25 y 0,30, rango que coincide con el punto de hidratación óptima para la formación de tobermorita y portlandita, productos responsables de la cohesión del sistema cementante. Este rango permite establecer valores de referencia aplicable a las futuras formulaciones de bloques con cemento nacional, reafirmando la importancia de controlar rigurosamente la dosificación de agua para evitar mezclas sobre hidratadas que comprometan la densificación del material.

En el caso del suelo Nihuinco, clasificado como MH y con alto contenido de finos, la estabilización con lignina Kraft al 5 % en solución alcalina produjo mejoras medibles. El Proctor modificado mostró un aumento de la densidad seca máxima desde 1,00 g/cm³ a 1,08 g/cm³ y una reducción de la humedad óptima desde 47 % a 42 %, lo que implica un incremento cercano al 8 % en densidad seca y una disminución del orden de 11 % en la humedad requerida para alcanzar dicha densidad. Esto indica una mejor compactación del suelo con una menor demanda de agua para la misma energía de compactación.

Las probetas cilíndricas de suelo estabilizado con lignina alcanzaron, a 21 días de curado, resistencias a compresión del orden de 0,50 MPa, superiores a los 0,44 MPa obtenidos con 5 % de cemento y 0,34 MPa del suelo natural, bajo el mismo método experimental. En términos relativos, la lignina se ubicó aproximadamente un 47 % por encima del suelo natural y un 14 % por encima del cemento a igual dosificación. En relación con la dispersión de los datos, se tiene para la lignina, que la variabilidad inicial es mayor y disminuye conforme avanza el curado, lo que indica que el material tiende a estabilizar su respuesta mecánica. En contraste, las probetas con cemento presentan desviaciones más

irregulares, lo que sugiere una mayor sensibilidad del suelo–cemento a pequeñas variaciones de compactación o curado.

El comportamiento observado sugiere que la lignina Kraft puede funcionar como agente estabilizante no convencional en suelos finos, aumentando densidad y resistencia a la compresión con respecto del suelo sin adición e incluso frente a un estabilizante convencional como el cemento.

Desde el punto de vista ambiental, los resultados obtenidos evidencian que la lignina Kraft posee un desempeño ambiental claramente superior frente a los estabilizantes convencionales. El análisis comparativo de emisiones mostró que un bloque suelo–lignina presenta un balance de carbono negativo de $-0,6 \text{ kg CO}_2$, lo que implica que durante su ciclo de vida captura más dióxido de carbono del que emite. Este comportamiento contrasta de manera significativa con las tecnologías constructivas tradicionales donde el BSC con estabilizante tradicional genera $18,6 \text{ kg CO}_2$, el hormigón $27,7 \text{ kg CO}_2$, y la albañilería cerámica alcanza $33,9 \text{ kg CO}_2$ por unidad equivalente. En términos relativos, el bloque con lignina emite aproximadamente 31 veces menos CO_2 que el BSC convencional, 46 veces menos que el hormigón y 57 veces menos que la albañilería, posicionándose como una alternativa con un potencial real de mitigación climática. Esta condición se explica tanto por el origen residual de la lignina, un subproducto abundante de la industria papelera que evita la fabricación de nuevos insumos, como por su capacidad de actuar como sumidero de carbono. En conjunto, estos factores permiten concluir que el uso de lignina Kraft no solo mejora el desempeño mecánico del material, sino que constituye una estrategia efectiva para reducir la huella de carbono asociada a la construcción con tierra, alineándose con principios de economía circular y con las metas globales de descarbonización del sector construcción.

A partir de los resultados obtenidos, se identifican diversas oportunidades de continuidad para esta línea de investigación. En primer lugar, se encuentra el estudio de procedimientos alternativos de modificación química de la lignina, con el propósito de optimizar la capacidad aglutinante de la lignina Kraft. Asimismo, se plantea la mejora del proceso actual, incorporación de *dregs*, promoviendo la utilización de subproductos de la industria papelera. En complemento, se considera necesario contrastar el desempeño de estas rutas de modificación a través de un análisis de costo-efectividad, que permita identificar el balance óptimo entre rendimiento técnico, complejidad de procesamiento y viabilidad económica.

Otra recomendación para investigaciones futuras sería profundizar en la determinación del porcentaje óptimo de lignina para su empleo como estabilizante en bloques de suelo comprimido, de modo de maximizar su desempeño mecánico y su aporte a la durabilidad del material

Como ultima recomendación para futuras investigaciones, se plantea la necesidad de incorporar un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) integral del sistema suelo-lignina, que cuantifique las emisiones asociadas a su producción, transporte, uso y disposición final. Este análisis permitirá determinar con mayor precisión el impacto ambiental neto del material y contrastarlo con los estabilizantes convencionales.

En síntesis, los resultados de esta investigación permiten afirmar que la lignina Kraft posee un potencial técnico y ambiental significativo como estabilizante no convencional para unidades de suelo comprimido. Si bien aún se requieren estudios de optimización, durabilidad y evaluación integral de ciclo de vida, la evidencia generada constituye una base sólida para continuar avanzando hacia soluciones constructivas más sostenibles, de menor impacto ambiental y coherentes con los desafíos actuales de descarbonización del sector construcción

GLOSARIO

a/c	=	Relación agua/cemento usado para definir la proporción entre ambos materiales.
BSC	=	Bloques de Suelo Comprimido. Unidad constructiva elaborada mediante compactación de suelo.
BSC – lignina	=	Bloques de Suelo Comprimido estabilizados con lignina Kraft.
cm	=	Centímetro. Unidad de longitud.
cm ³	=	Centímetro cúbico. Unidad de volumen.
CO ₂	=	Dióxido de carbono. Gas atmosférico usado en análisis ambientales.
F(F)	=	Suelo completamente dominado por fracción fina (RSCS).
g	=	Gramo. Unidad de masa.
g/cm ³	=	Gramos por centímetro cúbico. Unidad de densidad.
H ₂ O	=	Agua. Fórmula química.
(H)	=	Alta plasticidad según RSCS.
kg	=	Kilogramo. Unidad de masa.
kgCO ₂	=	Kilogramos de dióxido de carbono. Unidad de huella de carbono.
kNm/m ³	=	Unidad de energía de compactación (Proctor Modificado).
(L)	=	Baja sensibilidad a la química del agua (RSCS).
LL	=	Límite líquido.
LLbrine	=	Límite líquido medido con solución salina.
LLdw	=	Límite líquido medido con agua destilada
LLkor	=	Límite líquido corregido.
m ²	=	Metro cuadrado. Unidad de área.
MH	=	Limo de alta plasticidad (SUCS).
mm	=	Milímetro. Unidad de longitud.
MPa	=	Megapascal. Unidad de resistencia mecánica

%	=	Porcentaje.
°C	=	Grados Celsius. Unidad de temperatura.
RSCS	=	Sistema Revisado de Clasificación de Suelos
SM	=	Arena limosa (SUCS).
SUCS	=	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

REFERENCIAS

- Addleson, L. (1983). *Materiales para la construcción, Volume 1*. 196. https://books.google.com/books/about/Materiales_para_la_construcci%C3%B3n.html?hl=es&id=gPsElo-1DIMC
- Angulo Jaramillo, D. E., & Carreño Charry, A. (2019). Bloque de Tierra Comprimido o BTC Una alternativa de Construcción para la Arquitectura Contemporánea. *REVISTA NODO*, 12(23), 31–37. <https://doi.org/10.54104/NODO.V12N23.140>
- Asman, N. S. A., Bolong, N., Mirasa, A. K., & Asrah, H. (2020). Life Cycle Assessment of Interlocking Compressed Earth Brick and Conventional Fired Clay Brick for Residential House. *Journal of Physics: Conference Series*, 1529(4). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1529/4/042012>
- Cabrera, S. P., Aranda-Jiménez, Y. G., Suárez-Domínguez, E. J., Rotondaro, R., Cabrera, S. P., Aranda-Jiménez, Y. G., Suárez-Domínguez, E. J., & Rotondaro, R. (2020). BLOQUES DE TIERRA COMPRIMIDA (BTC) ESTABILIZADOS CON CAL Y CEMENTO. EVALUACIÓN DE SU IMPACTO AMBIENTAL Y SU RESISTENCIA A COMPRESIÓN. *Revista Hábitat Sustentable*, 10(2), 70–81. <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.05>
- Cai, G., Zhang, T., Liu, S., Li, J., & Jie, D. (2016). Stabilization Mechanism and Effect Evaluation of Stabilized Silt with Lignin Based on Laboratory Data. *Marine Georesources & Geotechnology*, 34(4), 331–340. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2014.966217>
- Correa, V. (2025). Evaluación experimental de las propiedades físico-mecánicas y ambientales de bloques de suelo comprimido estabilizado con agentes convencionales. Memoria de título, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil.
- Czernin, W. (1962). *Cement Chemistry and Physics for Civil Engineers*. Springer.
- Freire Guerrero, A., Marrero, M., & Muñoz Martín, J. (2016). Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. *Revista Hábitat Sustentable*, 6–17. <https://doi.org/10.22320/07190700.2016.06.01.02>

- Grimmeissen, L., Jensen, A., & Wehner, S. (2020). *Hoja de ruta para el desarrollo de bajas emisiones en la industria chilena del cemento*. Proyecto Mecanismos y Redes de Transferencia de Tecnología Relacionada con el Cambio Climático en América Latina y el Caribe.
- Hermansson, F., Janssen, M., & Svanström, M. (2020). Allocation in life cycle assessment of lignin. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2020 25:8, 25(8), 1620–1632. <https://doi.org/10.1007/S11367-020-01770-4>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2004). NTC 5324:2004. Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Métodos de ensayo. Condiciones de entrega. Bogotá, Colombia: ICONTEC
- Instituto Nacional de Normalización. (2001). NCh169:2001 Construcción – Ladrillos cerámicos – Clasificación y requisitos. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2008). NCh1534/2:2008 Mecánica de suelos – Relaciones humedad/densidad – Parte 2: Método de compactación con pisón de 4,5 kg y 460 mm de caída. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2009). NCh1017:2009 Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2019). NCh158:2019 Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento. Santiago, Chile: INN.
- Instituto Nacional de Normalización. (2022). NCh 1498:2022. Hormigón y mortero - Agua de amasado - Requisitos. Santiago, Chile: INN.
- Kasinikota, P., & Tripura, D. D. (2021). Evaluation of compressed stabilized earth block properties using crushed brick waste. *Construction and Building Materials*, 280, 122520. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.122520>
- Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Maillard, P., & Poirier, C. (2017). Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(12), 04017244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002096)

- Miao, B. H., Headrick, R. J., Li, Z., Spanu, L., Loftus, D. J., & Lepech, M. D. (2024). Development of biopolymer composites using lignin: A sustainable technology for fostering a green transition in the construction sector. *Cleaner Materials*, 14, 100279. <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2024.100279>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2024). Documento del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Serie 1990–2022.
- Nagaraj, H. B., Sravan, M. V., Arun, T. G., & Jagadish, K. S. (2014). Role of lime with cement in long-term strength of Compressed Stabilized Earth Blocks. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 54–61. <https://doi.org/10.1016/J.IJSBE.2014.03.001>
- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete-5th edition. *Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*, 28–40.
- Ouedraogo, K. A. J., Aubert, J. E., Tribout, C., & Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, 117578. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.117578>
- Rocha, J. H. A., Galarza, F. P., Chileno, N. G. C., Rosas, M. H., Peñaranda, S. P., Diaz, L. L., & Abasto, R. P. (2022). Compressive Strength Assessment of Soil–Cement Blocks Incorporated with Waste Tire Steel Fiber. *Materials* 2022, Vol. 15, Page 1777, 15(5), 1777. <https://doi.org/10.3390/MA15051777>
- Sebastián Guzmán, A., & Mateo Iñiguez, A. (2016). *Metodología para elección de estabilizantes químicos para bloques de tierra Election methodology of chemical stabilizers for earth blocks*. 5(9). <https://doi.org/10.18537/est.v005.n009.12>
- Zhang, T., Cai, G., & Liu, S. (2018). Application of Lignin-Stabilized Silty Soil in Highway Subgrade: A Macroscale Laboratory Study. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(4). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002203)

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ☐ ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ☐ ODS-2 : Hambre cero.
- ☐ ODS-3 : Salud y bienestar.
- ☐ ODS-4 : Educación de calidad.
- ☐ ODS-5 : Igualdad de género.
- ☐ ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ☐ ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ☐ ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ☒ ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ☐ ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ☒ ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ☐ ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ☒ ODS-13 : Acción por el clima.
- ☐ ODS-14 : Vida Submarina.
- ☐ ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ☐ ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ☐ ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación

El presente estudio se vincula directamente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y ODS 13 (Acción por el Clima). En relación con el ODS 9, el trabajo aporta a la innovación en materiales de construcción al evaluar el uso de lignina Kraft, un subproducto industrial, como estabilizante no convencional en suelo comprimido, promoviendo soluciones tecnológicas más eficientes y alineadas con la economía circular. Respecto al ODS 11, la investigación contribuye al desarrollo de sistemas constructivos locales, de bajo impacto energético y potencialmente aplicables a viviendas y edificaciones no estructurales, favoreciendo ciudades más sostenibles y resilientes mediante el uso de recursos disponibles y técnicas de menor huella ambiental. Finalmente, el ODS 13 se aborda de manera directa al analizar comparativamente la huella de carbono de los bloques de suelo-lignina frente a materiales tradicionales como el hormigón y la albañilería cerámica, evidenciando una reducción significativa e incluso un balance de carbono negativo, lo que posiciona esta alternativa como una estrategia concreta de mitigación del cambio climático en el sector de la construcción.

ANEXO 2.1 Clasificación de suelo UDEC

En el presente anexo se presentan los datos obtenidos para la caracterización del suelo UDEC. En la Tabla A.2.1.1 se presenta su granulometría, la Tabla A.2.1.2 presenta la determinación de partículas sólidas, la Tabla A.2.1.3 presenta los límites de Atterberg y en la Tabla A.2.1.4 se presenta la humedad óptima.

Tabla A.2.1.1 Ensayo granulométrico

Tamiz N°	Masa retenida acumulada (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
4	8,0	8,0	92,0
10	30,0	30,0	70,0
20	50,0	50,0	50,0
40	64,0	64,0	36,0
60	74,0	74,0	26,0
200	86,0	86,0	14,0

Tabla A.2.1.2 Determinación de densidad de partículas sólidas

Identificación Muestra:	C3-M1
N° Picnómetro:	10
Masa suelo seco (ms, en g)	100,0
Masa suelo + picnómetro + agua (mspa, en g)	725,7
Masa picnómetro + agua (mpa, en g)	663,9
Temperatura de ensayo (°C)	15,0
Peso específico de los sólidos, Gs (<i>adim.</i>)	2,62

Tabla A.2.1.3 Límites de Atterberg

Id. Muestra	C3-M1
LL	
Peso total + tara	25,2
Peso seco	19
Tara	3,2
LP	
Peso total + tara	23,2
Peso seco	17,8
Tara	3,7
Limite Liquido	39
Limite Plástico	38
Índice de Plasticidad	1
Clasificación	ML

Tabla A.2.1.4 Humedad óptima

Molde	Peso molde	Volumen molde	Peso total	Masa suelo	Humedad	Densidad húmeda	Densidad seca
5	4178	934,7	6003	1825	8%	1,95	1,81
7	4016	944,3	5972	1956	10%	2,07	1,88
5	4178	934,7	6187	2009	12%	2,15	1,92
7	4016	944,3	6011	1995	14%	2,11	1,85
4	3982	952,7	5934	1952	16%	2,05	1,77
4	3982	952,7	5911	1929	18%	2,02	1,72

ANEXO 2.2 Clasificación de suelo Nihuinco

En el presente anexo se presentan los datos obtenidos para la caracterización del suelo Nihuinco. En la Tabla A.2.2.1 se presenta su granulometría, la Tabla A.2.2.2 presenta los límites de Atterberg y en la Tabla A.2.2.3 el resultado de clasificación revisada de suelo (RSCS).

Tabla A.2.2.1 Ensayo granulométrico

Tamiz N°	Masa retenida acumulada (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
4	0,0	0,0	100,0
10	0,0	0,0	100,0
20	0,0	0,0	100,0
40	0,0	0,0	100,0
60	0,0	0,0	100,0
200	2,0	2,0	98,0

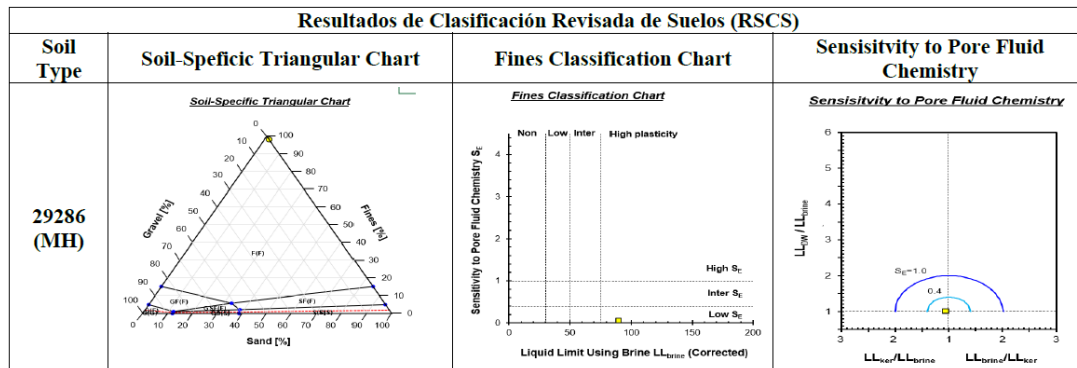
Tabla A.2.2.2 Cálculos de límites de Atterberg avanzados

Suelo	Nihuinco
Origen	Natural
Características	
LL Agua Desionizada (%)	89
LL Salmuera (%)	81
LL Parafina (%)	75

Tabla A.2.2.3 Resultado de clasificación revisada de suelo (RSCS)

Soil type	Classification	Description
Nihuinco (MH)	F(F)-HL	Propiedad mecánica controlada por fracción fina, al igual que conductividad hidráulica. Finos tienen alta plasticidad intermedia y baja sensibilidad

Figura A.2.2.1 Resultado de clasificación revisada de suelo (RSCS)



ANEXO 2.3 Normativa internacional

En la Tabla A.2.3.1 se presentan las normativas internacionales relacionadas con los bloques de suelo comprimido.

Tabla A.2.3.1 Normativa internacional sobre BSC

País	Código Normativa	Año de Publicación	Título
Alemania	DIN 18942-1	2024	Earthen materials and products – Part 1 : Vocabulary
	DIN 18945-3	2024	Earth blocks – Requirements, test and labeling
	DIN 18946-3	2024	Earth masonry mortar - Requirements, test and labeling
Colombia	NTC 5324	2004	Bloques de suelo cemento para muros y divisiones - Definiciones - Especificaciones - Métodos de ensayo - Condiciones de entrega
Francia	XP P 13-901	2001	Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons. Definitions, spécifications, méthodes d'essai, conditions de reception
España	UNE 41410	2008	Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques - Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo
Nueva Zelandia	NZS 4297	2024	Engineering design of earth buildings
	NZS 4298	2024	Materials and construction for earth buildings
	NZS 4299	2024	Earth buildings not requiring specific engineering design
India	IS 1725	2023	Stabilized soil blocks used in general building construction - Specification
Estados Unidos	NMAC, 14.7.4	2021	Housing and construction - Building codes general - 2021 New Mexico earthing materials code
Italia	Ley n° 378	2004	Disposizioni per la tutela e la valorizzazione dell'architettura rurale
	L.R. 2/06 2	2006	Norme per la valorizzazione delle costruzioni in terra cruda

País	Código Normativa	Año de Publicación	Título
Sri Lanka	SLS 1385-1.	2009	Specification for compressed stabilized earth blocks
Túnez	NT 21.33	1996	Blocs de terre comprimée ordinaires – Spécifications techniques
	NT 21.35	1996	Blocs de terre comprimée - Définition, classification et désignation
Brasil	NBR 8491	2012	Tijolo maciço de solo-cimento
	NBR 8492	2012	Tijolo maciço de solo-cimento - Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água
	NBR 10832	1989	Fabricação de tijolo maciço de solo-cimento com a utilização de prensa manual
	NBR 10833	2012 Rev. 2013	Fabricação de tijolo maciço e bloco vazado de solo-cimento com utilização de prensa hidráulica
	NBR 10834	2012 Rev. 2013	Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural
	NBR 10835	1994	Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Forma e dimensões
	NBR 10836	1994	Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural - Determinação da resistência à compressão e da absorção de água
Níger	NIS 369	1997	Standard for stabilized earth bricks
Kenia	KS 02-1070	1999	Specifications for stabilized soil blocks

País	Código Normativa	Año de Publicación	Título
África Regional	ARS 670	1996	Compressed Earth Blocks (CEB), Standard for terminology
	ARS 671	1996	CEB, Definition, classification, and designation of compressed earth blocks
	ARS 672	1996	CEB, Definition, classification, and designation of earth mortars
	ARS 673	1996	CEB. Definition, classification, and designation of compressed earth blocks masonry
	ARS 670	1996	CEB, Standard for terminology
	ARS 671	1996	CEB, Definition, classification, and designation of compressed earth blocks
	ARS 672	1996	CEB, Definition, classification, and designation of earth mortars
	ARS 673	1996	CEB. Definition, classification, and designation of compressed earth blocks masonry
	ARS 674	1996	CEB. Technical specifications for ordinary compressed earth blocks
	ARS 675	1996	CEB-Technical specifications for facing compressed earth blocks
	ARS 676	1996	CEB-Technical specifications for ordinary earth mortars
	ARS 677	1996	CEB-Technical specifications for facing earth mortars
	ARS 678	1996	CEB-Technical specifications for ordinary compressed earth block masonry
	ARS 679	1996	CEB-Technical specifications for facing compressed earth block masonry
	ARS 680	1996	CEB. Code of practice for the production of compressed earth blocks
	ARS 681	1996	CEB. Code of practice for the preparation of earth mortars
	ARS 682	1996	CEB. Code of practice for the assembly of compressed earth block masonry
	ARS 683	1996	CEB. Standard for classification of material identification tests and mechanical tests

ANEXO 2.4 Norma nch1534/2 of.2008: determinación de densidad y contenido de humedad de suelos compactados

a continuación, se presenta un resumen de la norma nch1534/2 of.2008, sobre la determinación de densidad y contenido de humedad de suelos compactados.

1. Introducción

La norma NCh1534/2 Of.2008 establece los procedimientos para determinar la densidad aparente y el contenido de humedad de suelos compactados, tanto en laboratorio como en terreno.

En el contexto de esta investigación, dicha norma se utilizó para verificar las propiedades físicas de los bloques de suelo comprimido confeccionados con distintos agentes estabilizadores, asegurando que los valores de densidad y humedad obtenidos correspondieran a una compactación adecuada y reproducible.

2. Objetivo

Determinar la densidad aparente y el contenido de humedad de muestras de suelo compactadas, con el fin de evaluar la uniformidad del proceso de fabricación y establecer una base comparativa entre los bloques de suelo–cemento, suelo–cal y suelo–lignina Kraft.

3. Fundamento del método

La norma NCh1534/2 se basa en la determinación directa de la masa y volumen de una muestra compactada, junto con la medición del contenido de agua por secado en horno.

Estos valores permiten calcular la densidad húmeda (ρ_h), la densidad seca (ρ_d) y la humedad gravimétrica (w), parámetros esenciales para el control de calidad y la comparación entre diferentes mezclas o condiciones de compactación.

Las relaciones fundamentales son:

$$\rho_d = \frac{\rho_h}{1 + w}$$

donde:

ρ_d : densidad seca del suelo (g/cm³)

ρ_h : densidad húmeda del suelo (g/cm^3)

w : contenido de humedad (decimal)

4. Equipos y materiales

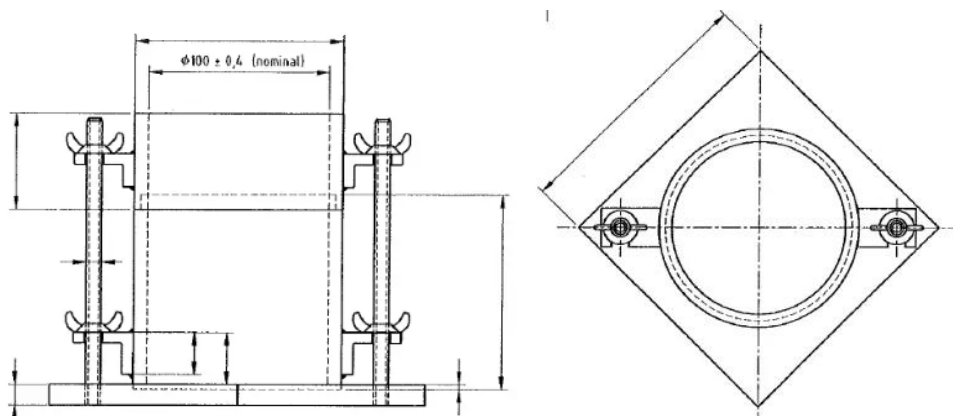
De acuerdo con la NCh1534/2, los principales elementos utilizados fueron:

Balanza con precisión de $\pm 0,1$ g.

Horno de secado regulado a 105 ± 5 °C.

Recipientes metálicos herméticos para almacenamiento temporal de muestras húmedas.

Moldes cilíndricos o prismáticos con volumen conocido, esto se muestran a continuación.



5. Procedimiento aplicado

Obtención de la muestra: Se seleccionaron probetas representativas de cada serie de bloques, inmediatamente después de su confección y antes del proceso de curado.

Determinación de la masa y volumen: Cada probeta fue pesada con su humedad natural y se midieron sus dimensiones geométricas para calcular el volumen aparente.

Secado en horno: Las muestras fueron introducidas en horno a 105 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante, definida como una variación menor al 0,1% entre dos pesadas consecutivas.

Cálculo del contenido de humedad:

$$\omega = \frac{m_h - m_s}{m_s}$$

donde m_h es la masa húmeda y m_s la masa seca del espécimen.

Cálculo de densidades: A partir de la masa húmeda y volumen del bloque se determinó la densidad húmeda (ρ_h); con el valor de humedad obtenido se calculó la densidad seca (ρ_d).

6. Aplicación en la investigación

Los valores de densidad seca promedio y contenido de humedad obtenidos permitieron comparar la compactación alcanzada entre los distintos estabilizadores ensayados.

La consistencia de estos parámetros fue fundamental para asegurar que las diferencias observadas en resistencia mecánica provinieran del tipo de estabilizador y no de variaciones en la compactación o en el contenido de agua del material.

Asimismo, los resultados de densidad y humedad determinados conforme a la NCh1534/2 fueron utilizados para verificar la homogeneidad del proceso de moldeado y contrastar las condiciones reales de fabricación con los valores óptimos derivados del ensayo Proctor modificado.

ANEXO 4.1 Propiedades físicas y mecánicas de primera confección análisis hidratación del cemento

En la Tabla A.4.1.1 se muestran los resultados obtenidos de la primera etapa de confección del análisis de hidratación de cemento, correspondiente a la propiedades físicas de las probetas.

Tabla A.4.1.1 Propiedades físicas de probetas

7 días			
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]
0,20	448,77	256	1,75
0,25	521,40	256	2,04
0,30	530,13	256	2,07
0,35	530,67	256	2,07
0,40	491,13	256	1,92

En la Tabla A.4.1.2 se muestran las propiedades mecánicas de la primera confección para estudiar la hidratación del cemento.

Tabla A.4.1.2 Propiedades mecánicas de probetas

7 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,20	2,17	4,41	3,00	-92%
0,25	33,60	43,36	39,41	0%
0,30	36,77	39,89	38,30	-3%
0,35	20,58	26,09	24,31	-38%
0,40	16,62	19,10	17,84	-55%

ANEXO 4.2 Propiedades físicas y mecánicas de segunda confección análisis hidratación del cemento

En la Tabla A.4.2.1 se muestran los resultados obtenidos de la segunda etapa de confección del análisis de hidratación de cemento, correspondiente a la propiedades físicas de las probetas. En la Tabla A.4.2.2 se muestran las propiedades mecánicas de la segunda confección para estudiar la hidratación del cemento.

Tabla A.4.2.1 Propiedades físicas de probetas

2 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,22	362,05	256	1,41	1,73
0,25	487,85	256	1,91	5,77
0,28	521,75	256	2,04	6,70
0,30	499,10	256	1,95	5,95
5 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,22	390,50	256	1,53	2,25
0,25	502,20	256	1,96	6,75
0,28	521,40	256	2,04	10,17
0,30	512,60	256	2,00	9,38
8 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,22	428,30	256	1,67	1,64
0,25	508,90	256	1,99	7,50
0,28	515,00	256	2,01	9,42
0,30	519,40	256	2,03	10,83

Tabla A.4.2.2 Propiedades mecánicas de probetas

2 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,22	2,30	2,81	2,61	-91%
0,25	15,80	30,63	22,70	-22%
0,28	26,66	30,91	29,27	0%
0,30	26,92	27,60	27,28	-7%
5 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,22	6,83	8,28	7,47	-86%
0,25	34,68	51,80	44,53	-15%
0,28	36,62	55,21	45,09	-14%
0,30	51,84	53,43	52,52	0%
8 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,22	5,86	10,22	8,06	-86%
0,25	34,58	52,14	44,67	-23%
0,28	54,78	60,55	57,82	-0,2%
0,30	55,63	59,82	57,91	0%

ANEXO 4.3 Propiedades físicas y mecánicas de tercera confección análisis hidratación del cemento

En la Tabla A.4.3.1 se muestran los resultados obtenidos de la tercera etapa de confección del análisis de hidratación de cemento, correspondiente a la propiedades físicas de las probetas. La Tabla A.4.3.2 muestra las propiedades mecánicas de la tercera confección para estudiar la hidratación del cemento.

Tabla A.4.3.1 Propiedades físicas de probetas

3 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	506,40	256	1,98	5,67
0,28	511,25	256	2,00	7,22
0,30	519,35	256	2,03	7,45
7 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	513,25	256	2,00	10,88
0,28	533,00	256	2,08	10,41
0,30	525,05	256	2,05	8,86
14 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	516,85	256	2,02	8,02
0,28	543,65	256	2,12	10,97
0,30	535,20	256	2,09	7,22

Tabla A.4.3.2 Propiedades mecánicas de probetas

3 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,25	39,26	41,56	40,65	0%
0,28	37,87	40,96	39,83	-2%
0,30	34,19	35,50	35,01	-14%
7 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,25	55,13	60,59	57,47	0%
0,28	51,42	59,60	54,56	-5%
0,30	49,85	53,64	51,745	-10%
14 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,25	63,17	67,83	65,12	-1%
0,28	60,10	75,48	66,11	0%
0,30	59,88	62,46	61,09	-8%

ANEXO 4.4 Propiedades físicas y mecánicas de primera confección análisis hidratación del cal

La Tabla A.4.4.1 muestra los resultados obtenidos de la primera etapa de confección del análisis de hidratación de cal, correspondiente a la propiedades físicas de las probetas. En la Tabla A.4.4.2 se muestran las propiedades mecánicas de la primera confección para estudiar la hidratación del cal.

Tabla A.4.4.1 Propiedades físicas de probetas

14 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	340,05	256	1,33	4,0
0,30	405,10	256	1,58	10,5
0,35	383,15	256	1,50	7,0
21 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	327,55	256	1,28	6,5
0,30	389,40	256	1,52	9,5
0,35	385,70	256	1,51	15,0
28 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	313,75	256	1,23	7,0
0,30	386,30	256	1,51	21,0
0,35	350,75	256	1,37	21,0

Tabla A.4.4.2 Propiedades mecánicas de probetas

2 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,22	0,84	1,05	0,98	-60%
0,25	2,11	2,60	2,47	0%
0,28	1,89	2,56	2,14	-13%
21 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,22	1,70	2,08	1,90	-53%
0,25	3,87	4,42	4,08	0%
0,28	2,46	3,20	2,83	-31%
28 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,22	1,66	2,10	1,87	-67%
0,25	4,67	7,16	5,58	0%
0,28	5,04	5,76	5,29	-5%

ANEXO 4.5 Propiedades físicas y mecánicas de segunda confección análisis hidratación del cal

En la Tabla A.4.5.1 se muestran los resultados obtenidos de la segunda etapa de confección del análisis de hidratación de cal, correspondiente a la propiedades físicas de las probetas. La Tabla A.4.5.2 muestra los resultados obtenidos de la etapa de confección del análisis de hidratación de cal, correspondiente a la propiedades mecánicas de las probetas.

Tabla A.4.5.1 Propiedades físicas de probetas

3 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	501,60	256	1,96	9,0
0,28	482,45	256	1,88	7,5
0,30	492,40	256	1,92	17,1
7 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	496,00	256	1,94	17,1
0,28	483,65	256	1,89	15,7
0,30	495,00	256	1,93	14,4
14 días				
Mezcla	Peso promedio [g]	Volumen [cm ³]	Densidad [g/cm ³]	Flexión promedio [MPa]
0,25	501,70	256	1,96	27,1
0,28	496,40	256	1,94	24,5
0,30	493,45	256	1,93	22,0

Tabla A.4.5.2 Propiedades mecánicas de probetas

3 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,25	8,74	9,23	8,98	0%
0,28	7,00	7,81	7,54	-16%
0,30	6,68	6,86	6,77	-25%
7 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,25	14,50	18,46	17,10	0%
0,28	15,00	16,33	15,70	-8%
0,30	14,27	14,56	14,41	-16%
14 días				
Mezcla	Mínimo [MPa]	Máximo [MPa]	Resistencia compresión promedio [MPa]	Variación [%]
0,25	25,01	28,34	27,07	0%
0,28	23,11	25,45	24,50	-9%
0,30	21,26	22,44	21,98	-19%

ANEXO 4.6 Proctor de suelo-lignina

En la Tabla A.4.6.1 se presenta con detalle los datos obtenidos en el ensayo Proctor modificado aplicado al suelo Nihuinco con una adición de un 5% de lignina en solución.

Tabla A.4.6.1 Resultados ensayo Proctor modificado de suelo Nihuinco

Nº Molde	Humedad	Masa Total [gr]	Masa Molde [gr]	Vol. Molde [m3]	Masa material [gr]	Densidad aparente [gr/m3]	Humedad real	Densidad seca [gr/m3]
5	34%	5504	4179	934,7	1325	1,4176	33%	1,063
5	38%	5559	4179	934,7	1380	1,4764	38%	1,070
5	42%	5609	4179	934,7	1430	1,5299	42%	1,080
5	46%	5647	4179	934,7	1468	1,5706	48%	1,060

ANEXO 4.7 Propiedades físicas y mecánicas de probetas suelo-cemento con suelo UDEC

En la Tabla A.4.7.1 se entregan mayores detalles sobre la masa, volumen y densidad de cada una de las probetas con suelo-cemento confeccionadas en la primera etapa. En la Tabla A.4.7.2 se presentan los resultados obtenidos de la primera etapa de confección de probetas de suelo-cemento, correspondiente a las propiedades mecánicas de las probetas

Tabla A.4.7.1 Propiedades físicas de probetas de suelo-cemento

Variación de masa probetas				
Mezcla	Edad de ensayo (días)	Masa (g)	Volumen Proctor (cm ³)	Densidad (g/cm ³)
PR-20	7	1935	943,6	2,05
	14	1920	943,6	2,03
	21	1927	943,6	2,04
PR-25	7	1966	943,6	2,08
	14	1943	943,6	2,06
	21	1894	943,6	2,01
PR-30	7	1928	943,6	2,04
	14	1947	943,6	2,06
	21	1881	943,6	1,99
PR-35	7	1968	943,6	2,09
	14	1927	943,6	2,04
	21	1941	943,6	2,06
PR-40	7	1937	943,6	2,05
	14	1948	943,6	2,06
	21	1957	943,6	2,07

Tabla A.4.7.2 Propiedades mecánicas de bloques de suelo-cemento

7 días		
Mezcla	Variación [%]	Resistencia compresión promedio [MPa]
PR-20	0%	3,23
PR-25	0%	3,31
PR-30	0%	4,45
PR-35	0%	2,63
PR-40	0%	3,93
14 días		
Mezcla	Variación [%]	Resistencia (MPa)
PR-20	55%	5,00
PR-25	55%	5,12
PR-30	30%	5,77
PR-35	54%	4,05
PR-40	16%	4,56
21 días		
Mezcla	Variación [%]	Resistencia (MPa)
PR-20	23%	6,15
PR-25	2%	5,23
PR-30	-6%	5,40
PR-35	24%	5,02
PR-40	13%	5,14

ANEXO 4.8 Propiedades físicas y mecánicas de probetas suelo-cemento con suelo Nihuinco

En la Tabla A.4.8.1 se entregan mayores detalles sobre la masa, volumen y densidad de cada una de las probetas con suelo-cemento confeccionadas en la segunda etapa utilizando suelo Nihuinco. Se presenta a continuación la Tabla A.4.8.2 con los resultados obtenidos de la segunda etapa de confección de probetas de suelo-cemento para suelo Nihuinco, correspondiente a las propiedades mecánicas de las probetas.

Tabla A.4.8.1 Propiedades físicas de probetas suelo-cemento

Variación de masa probetas						
Tipo	Edad de ensayo (días)	Masa 1 (g)	Masa 2 (g)	Masa promedio (g)	Volumen	Densidad promedio
Cemento	7	1421	1389	1405	943,6	1,49
	14	1411	1410	1411	943,6	1,49
	21	1367	1419	1393	943,6	1,48
Patrón	7	1452	1456	1454	943,6	1,54

Tabla A.4.8.2 Propiedades mecánicas de probetas suelo-cemento

7 DÍAS DE CURADO			
Nomenclatura	Diferencia	Resistencia (MPa)	Resistencia promedio
Cemento-1	0%	0,42	0,40
Cemento-2	0%	0,37	
14 DÍAS DE CURADO			
Nomenclatura	Diferencia	Resistencia (MPa)	Resistencia promedio
Cemento-1	-3%	0,44	0,39
Cemento-2	-3%	0,33	
21 DÍAS DE CURADO			
Nomenclatura	Diferencia	Resistencia (MPa)	Resistencia promedio
Cemento-1	14%	0,37	0,44
Cemento-2	14%	0,51	

ANEXO 4.9 Propiedades físicas y mecánicas de probetas suelo-lignina con suelo Nihuinco

En la Tabla A.4.9.1 se entregan mayores detalles sobre la masa, volumen y densidad de cada una de las probetas confeccionadas de suelo-lignina utilizando suelo Nihuinco. En el anexo se presenta la Tabla A.4.9.2 con los resultados obtenidos de la confección de probetas de suelo - lignina para suelo Nihuinco, correspondiente a las propiedades mecánicas de las probetas.

Tabla A.4.9.1 Propiedades físicas de probetas suelo-lignina

Variación de masa probetas						
Tipo	Edad de ensayo (días)	Masa 1 (g)	Masa 2 (g)	Masa promedio (g)	Volumen	Densidad promedio
Lignina	7	1443	1466	1455	943,6	1,54
	14	1426	1455	1441	943,6	1,53
	21	1408	1423	1416	943,6	1,50
Patrón	7	1452	1456	1454	943,6	1,54

Tabla A.4.9.2 Propiedades mecánicas de probetas suelo-lignina

7 días			
Nomenclatura	Diferencia	Resistencia (MPa)	Resistencia promedio
Lignina-1	0%	0,53	0,45
Lignina-2	0%	0,36	
14 días			
Nomenclatura	Diferencia	Resistencia (MPa)	Resistencia promedio
Lignina-1	-1%	0,41	0,44
Lignina-2	-1%	0,47	
21 días			
Nomenclatura	Diferencia	Resistencia (MPa)	Resistencia promedio
Lignina-1	13%	0,48	0,50
Lignina-2	13%	0,51	

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Benjamín Alvial Vildósola
Título de la memoria : Evaluación experimental de las propiedades físico-mecánicas y ambientales de suelo comprimido estabilizado con lignina Kraft
Fecha de la presentación oral :
Profesor(es) Guía : Luis Merino
Profesor(es) Revisor(es) : Sebastián Calderón
Juan Pedro Elissetche
Concepto :
Calificación :

Resumen

El hormigón y la albañilería son fuentes significativas de emisiones de CO₂ en la construcción. Los bloques de suelo comprimido (BSC), con menor impacto, son una alternativa si se garantiza su desempeño mecánico. Esta investigación evaluó el potencial de la lignina Kraft, un residuo de la industria papelera, como estabilizante no convencional para BSC, promoviendo la economía circular.

Se ensayaron probetas de suelo estabilizadas con 5% de lignina, 5% de cemento y un patrón sin estabilizante. Los resultados mostraron que la mezcla con lignina alcanzó una resistencia máxima de 0,50 MPa, superando al cemento y al patrón, aunque son resistencias para usos no estructurales.

Ambientalmente, el bloque de suelo-lignina presentó un balance de carbono negativo, captura más CO₂ del que emite, a diferencia de las soluciones tradicionales que exhiben altas emisiones.

Se concluye que la lignina Kraft es un estabilizante técnica y ambientalmente atractivo para unidades de suelo comprimido de baja resistencia, constituyendo una alternativa sustentable a los materiales convencionales.