

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE PROTOTIPADO DE
HORMIGONES BIORECEPTIVOS**

CRISTÓBAL BECERRA SÁNCHEZ

HABILITACIÓN PROFESIONAL
PRESENTADA A LA FACULTAD DE
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO AMBIENTAL

CHILLÁN, CHILE

2024

**IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE PROTOTIPADO DE
HORMIGONES BIORECEPTIVOS**

Aprobado por:

Claudia Tramón Pregnan
Ingeniera Química, Ph D.
Profesora asistente

Profesora Guía

Susana Villar Gómez
Ingeniera Comercial
Profesora asistente

Profesora Asesora

Ana María Aguilar
Ingeniera Constructora
Profesora asistente

Profesora Asesora

Juan Antonio Cañumir Veas
Ingeniero Agrónomo, Ph D.
Profesor asociado
Director de Departamento

Director de Departamento

María Eugenia González Rodríguez
Ingeniera Agrónoma, Ph D.
Profesora asociada
Decana

Decana

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi madre por apoyarme y no dejar de confiar en mí, como también haberme dado la oportunidad de estudiar en una de las mejores Universidades. La gratificación que siento es gigante, que una mujer como ella me haya dado la vida fue mi gran bendición.

Quiero agradecer a la docente Dra. Claudia Tramon P. por la oportunidad y confianza depositada en mi como estudiante, como también por la calidad docente a cargo que ha mantenido, ayudando en dudas y consultas, prestando ayuda y atención cuando la necesitaba.

Agradezco igualmente a la profesora Victoria Mardones Vallejos encargada de laboratorio de la planta piloto por su amabilidad y conocimientos que fueron otorgados sin duda hacia mí. Gracias por su simpatía y buena disposición.

Por último, quiero agradecer a mis gatos (Felpo y Minina) por ser uno de los más grandes motores en mi vida, pasando días y noches frías a mi lado sin criticar, solo dándome amor y contención.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN.....	1
SUMMARY.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	4
2. OBJETIVOS.....	6
2.1. Objetivo general.....	6
2.2. Objetivos específicos.....	6
3. ANTECEDENTES GENERALES.....	7
4. ESTADO DEL ARTE.....	9
4.1. Hormigones bioreceptivos.....	9
4.2. Formulación y pruebas de hormigones bioreceptivos.....	10
4.3. Factores que afectan la bioreceptividad.....	10
4.4. Norma Chilena (NCh 2256).....	11
4.5. Propiedades químicas y mecánicas de los hormigones bioreceptivos.....	11
4.6. Uso de borra de café.....	12
4.7. Óxido de magnesio en hormigón.....	12
4.8. Ácido bórico en el hormigón.....	12
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
5.1. Materiales.....	14
5.2. Metodología	14
5.2.1. Métodos de dosificación.....	14
5.2.2. Ensayos sobre el hormigón y mortero.....	15
5.2.3. Ensayo con borra de café.....	16
5.2.4. Ensayo mortero con MgO.....	18
5.2.5. Ensayo mortero con borra de café combinado con MgO.....	19
5.2.6. Ensayo mortero con ácido bórico.....	21

5.2.7. Ensayo mortero con la combinación de ácido bórico y borra de café.....	23
5.2.8. Mejores dosificaciones ácido y borra.....	23
5.2.9. Mejores dosificaciones ácido y MgO.....	24
5.2.10 Elaboración de moldes de mortero.....	24
5.2.11 Molde de mortero con borra de café.....	25
5.2.12 Ensayos preliminares de compresión de morteros secos en máquina de ensayos universales.....	26
5.2.13 Secado de 7 días de moldes de mortero con borra de café.....	27
6. RESULTADOS.....	29
6.1. Ensayo mortero con aditivo la borra de café.....	29
6.2. Ensayo mortero utilizando MgO.....	31
6.3. Combinación de ambos aditivos.....	33
6.4. Mortero utilizando ácido bórico.....	35
6.5. Mortero con de ácido bórico y borra de café.....	36
6.6. Mortero con mejores dosificaciones.....	38
6.7. Ensayo de compresión molde mortero seco.....	38
6.8. Moldes de mortero con adición de borra de café.....	39
7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN.....	40
8. LITERATURA CITADA.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

		Página
Tabla 1.	Dosificación de materias primas utilizadas en la preparación de morteros.....	15
Tabla 2.	Determinación de pH de mezclas de hormigón y mortero.....	16
Tabla 3.	Preparación de mortero utilizando borra de café como aditivo.....	17
Tabla 4.	Preparación de mortero utilizando óxido de magnesio como aditivo.....	19
Tabla 5.	Preparación de mortero con borra café en proporción constante y variación en la dosificación de óxido de magnesio.....	20
Tabla 6.	Preparación de mortero con óxido de magnesio en proporción constante y variación en la dosificación de borra café.....	20
Tabla 7.	Preparación de mortero utilizando ácido bórico como aditivo.....	22
Tabla 8.	Preparación de mortero con borra de café y adición de ácido bórico.....	23
Tabla 9.	Variación de pH de mortero con la adición de borra de café como aditivo.....	29
Tabla 10.	Variación de pH de mortero con adición de óxido de magnesio como aditivo.....	31
Tabla 11.	Variación de pH de mortero con óxido de magnesio y adición de borra de café.....	33
Tabla 12.	Variación de pH de mortero con borra de café y adición de óxido de magnesio.....	34
Tabla 13.	Variación de pH del mortero con adición de ácido bórico.....	35
Tabla 14.	Variación de pH del mortero con de borra de café ácido bórico y adición de ácido bórico.....	36
Tabla 15.	Variación de pH crucial del mortero con borra de café y adición de ácido bórico donde mayor hubo cambio de pH.....	38
Tabla 16.	Variación de pH crucial del mortero con óxido de magnesio y adición de ácido bórico donde mayor hubo cambio de pH.....	38
Tabla 17.	Resultados de presión (MPa) en moldes de morteros secos.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Mortero seco (50 g).....	15
Figura 2.	Previo secado de la borra de café.....	17
Figura 3.	Mezcla fresca de mortero, borra de café y agua destilada.....	18
Figura 4.	Ácido bórico (H_3BO_3) en agitador electromagnético a baño maría.....	21
Figura 5.	Solución de ácido bórico a baño maría.....	22
Figura 6.	Mortero fresco en moldes de madera.....	24
Figura 7.	Parte de compresión de la máquina de ensayos universales.....	25
Figura 8.	Parte donde se mide en libras la fuerza de compresión de la máquina de ensayos universales....	25
Figura 9.	Moldes de mortero con adición de borra de café.....	26
Figura 10.	Mortero seco momentos antes de ensayo de compresión.....	27
Figura 11.	Mortero seco posterior	27
Figura 12.	Mortero con adición de borra de café, secado de 7 días.....	28
Figura 13.	Variación de pH del mortero utilizando borra de café aditivo.....	30
Figura 14.	Variación de pH del mortero utilizando como aditivo óxido de magnesio.....	32
Figura 15.	Comparación de variaciones de pH de borra de café y óxido de magnesio como aditivos a la mezcla de mortero.....	33

Figura 16.	Variación de pH del mortero con adición de ácido bórico.....	36
Figura 17.	Variación de pH de mortero con borra de café con adición de ácido bórico.....	37
Figura 18.	Molde agrietado de mortero con borra de café, secado de 7 días.....	39

IMPLEMENTACIÓN DE UN PROCESO DE PROTOTIPADO DE HORMIGONES BIORECEPTIVOS

IMPLEMENTATION OF A PROTOTYPING PROCESS FOR BIORECEPTIVE CONCRETES

Palabras claves: Bioreceptividad, hormigón, mortero, sostenibilidad, pH, borra de café, óxido de magnesio y ácido bórico.

RESUMEN

Esta tesis presenta el desarrollo de un proceso de elaboración de hormigones bioreceptivos con el objetivo de integrar vegetación en entornos urbanos, contribuyendo así a la sostenibilidad y mejoramiento del entorno ambiental de las ciudades. Los hormigones bioreceptivos son modificados químicamente para reducir su alcalinidad y fomentar la colonización de microorganismos, musgos y líquenes, permitiendo la creación de superficies verdes que mejoran la estética y funcionalidad de los edificios. El trabajo se centra en la utilización de aditivos como la borra de café, el óxido de magnesio y el ácido bórico, que se incorporan al hormigón con el fin de reducir su pH. Se realizaron diversos ensayos experimentales para determinar la efectividad de estos aditivos en la modificación del pH del hormigón, su bioreceptividad y las propiedades mecánicas de las mezclas. Los resultados mostraron que tanto la borra de café como el ácido bórico son efectivos en la reducción del pH, contribuyendo a la mejora del potencial bioreceptivo del material. Sin embargo, el óxido de magnesio no mostró un impacto significativo en la reducción del pH. Finalmente, se concluye que la implementación de este proceso de

hormigones bioreceptivos puede ser una alternativa viable para promover la biodiversidad en entornos urbanos, utilizando materiales de bajo costo y amigables con el medio ambiente.

IMPLEMENTATION OF A PROTOTYPING PROCESS FOR BIORECEPTIVE CONCRETES

Keywords: Bioreceptivity, concrete, mortar, sustainability, pH, coffee grounds, magnesium oxide and boric acid.

SUMMARY

This thesis presents the development of a process for creating bioreceptive concretes aimed at integrating vegetation into urban environments, thereby contributing to the sustainability and improvement of the cities' environmental surroundings. Bioreceptive concretes are chemically modified to reduce their alkalinity and promote the colonization of microorganisms, mosses, and lichens, allowing the creation of green surfaces that enhance the aesthetics and functionality of buildings. The work focuses on the use of additives such as coffee grounds, magnesium oxide, and boric acid, which are incorporated into the concrete to reduce its pH. Various experimental tests were conducted to determine the effectiveness of these additives in modifying the pH of the concrete, its bioreceptivity, and the mechanical properties of the mixtures. The results showed that both coffee grounds and boric acid are effective in reducing pH, contributing to the improvement of the material's bioreceptive potential. However, magnesium oxide did not show a significant impact on pH reduction. Finally, it is concluded that the implementation of this bioreceptive concrete process could be a viable alternative to promote biodiversity in urban environments, using low-cost and environmentally friendly materials.

1. INTRODUCCIÓN

Es evidente que con el pasar de los años el crecimiento poblacional ha sido acelerado a nivel mundial, generando mayor demanda en urbanización e infraestructura, y desplazando los espacios considerados alguna vez parte de la naturaleza. De esta manera los espacios o áreas verdes en las ciudades suelen ser cada vez menores, generando así, ciudades estériles estéticamente. “La vegetación tiene efectos terapéuticos a nivel psicológico en los ciudadanos y además favorece la oportunidad de percibir la diferencia entre las estaciones” (Fiamingo, 2017).

Los efectos positivos de la vegetación en las ciudades son variados. Dentro de ellos tenemos la disposición y dispersión de la contaminación urbana, permeabilidad de suelos, reducción de ruidos y ayuda para mantener temperaturas óptimas dentro de las ciudades, entre otros beneficios. La construcción de edificios provoca una acumulación de calor, debido a los materiales de construcción absorbentes. Una forma de mitigar el aumento de temperaturas en las ciudades es la instalación de fachadas verdes para así, por un lado, incrementar las áreas verdes, y por otro, favorecer que las ciudades con edificios no acumulen calor a lo largo de las horas del sol.

Integrando la tecnología de construcción en hormigón bioreceptivo a la arquitectura urbana, es posible aumentar las áreas verdes en ciudades. Este material es similar al hormigón regular, pero se elabora con agregados que modifican su pH, posibilitando el crecimiento de plantas verdes (por ejemplo, briófitas) y la emergencia de biodiversidad. Presenta ventajas en

comparación con los denominados “muros verdes”, puesto que éstos son generalmente monocultivos de baja biodiversidad y alto costo en riego. En el caso del hormigón bioreceptivo, su porosidad permite que actúe como acumulador de agua, contribuyendo además al drenaje de la ciudad.

Este trabajo está en el contexto del proyecto Arte y Ciencia VRID N°2023001011CAC, “Esculturas biomiméticas para verdecer la ciudad”, cuyo objetivo es desarrollar una tecnología de bajo costo y complejidad, para construir colectivamente esculturas urbanas de mediano tamaño, de diseño biomimético, utilizando hormigones bioreceptivos, que sustente la vida de plantas verdes, mejorando la calidad del aire y contribuyendo a la transición de las ciudades a la sostenibilidad. La implementación de un proceso prototipado de hormigones bioreceptivos mediante este trabajo contribuirá de forma técnica al logro de este objetivo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

- Implementar un proceso de prototipado de hormigones bioreceptivos en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería Agrícola.

2.2. Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un proceso de elaboración de probetas de hormigón como prototipos de escala mínima viable.
- Seleccionar un tipo de residuo agroindustrial e integrarlo a la fórmula de elaboración de hormigones en el proceso de prototipado.
- Poner a punto los ensayos de propiedades químicas y mecánicas para prototipado de hormigones bioreceptivos.
- Determinar si los hormigones elaborados tienen potencial para ser utilizados como superficies bioreceptivas.

3. ANTECEDENTES GENERALES

El hormigón es uno de los materiales más utilizado por el hombre para la construcción de edificios, túneles, puentes y presas. “El hormigón es una aglomeración de materiales que involucran agregados, grava cemento, arena y agua. Al mezclarse con agua, la mezcla cohesiva se solidifica y endurece mediante un proceso llamado hidratación” (Desai y Niteen, 2022). Se caracteriza igualmente por presentar unas propiedades mecánicas favorables para todo tipo de infraestructura, por ejemplo, la alta resistencia a la compresión y una baja resistencia a la tracción. La durabilidad del hormigón es un parámetro importante que debe considerarse en el diseño de cualquier tipo de infraestructura en tema de construcción. Ahora bien, el hormigón es un elemento importante para el progreso de las ciudades y sus infraestructuras, pero nace la pregunta si el hormigón es un material sostenible o también, ¿cómo lograr que el hormigón tenga un propósito adicional a su objetivo principal de infraestructura? Dentro de algunas alternativas se llega a los hormigones bioreceptivos.

Desde hace años, se han llevado a cabo una serie estudios, investigaciones, ensayos de laboratorio e in-situ, con el único propósito de descubrir materiales propicios para la colonización de microorganismos. Entre ellos se destacan los hormigones bioreceptivos, los cuales son hormigones que “estimulan el crecimiento de capas vegetales, gracias al asentamiento en el sustrato de especies de bacterias, algas, líquenes y musgos” (Avilés, 2021). Teniendo como finalidad, recuperar las áreas verdes dentro de las ciudades,

aumentando el espacio verde (m^2 por persona) en un área determinada. Por lo que ayudaría a mejorar la calidad del aire, la estética de las ciudades y las variantes térmicas, que en las ciudades con edificios es normal el aumento de las temperaturas debido a los materiales de construcción absorbentes.

En la elaboración del hormigón, hay algunas variables a tomar en consideración que influyen en la bioreceptividad. Dentro de ellas tenemos el pH superficial, la composición química, porosidad, rugosidad del sustrato, humedad y la posición y orientación del hormigón. Dentro de estas variables la más importante es el pH, puesto que el hormigón se encuentra inmerso en un medio alcalino ($ph \approx 13$) y para beneficiar la colonización o el crecimiento de biodiversidad es necesario disminuir esos niveles a rangos más neutros o ácidos ($ph \approx 5,5-8$). Esto debido a que un medio altamente alcalino no es beneficioso para el desarrollo de especies vegetales como musgos en el hormigón. Es por esto, que la variable a considerar en este trabajo es el pH del hormigón (Avilés, 2021).

4. ESTADO DEL ARTE

Los hormigones bioreceptivos han surgido como una solución innovadora en la búsqueda de materiales de construcción sostenibles, capaces de soportar y fomentar el crecimiento de organismos biológicos en su superficie. Estos materiales se diseñan para incrementar la adherencia de microorganismos, musgos y líquenes, convirtiéndose en una opción prometedora para la mejora estética y funcional de las edificaciones, especialmente entornos urbanos. Este estado del arte aborda las propiedades químicas y mecánicas de los hormigones bioreceptivos y cómo los aditivos, como el ácido bórico, el óxido de magnesio y la borra de café, afectan estas propiedades.

4.1. Hormigones bioreceptivos

La bioreceptividad en materiales de construcción se refiere a la capacidad de estos materiales para soportar el crecimiento de organismos vivos, como musgos, líquenes y plantas vasculares. Esta propiedad es especialmente deseable en el contexto de las ciudades verdes y la arquitectura sostenible, ya que promueve la integración de la naturaleza en los entornos urbanos (González y Martel, 2018).

Los estudios iniciales en este campo se centraron en la bioreceptividad de materiales naturales, como piedra y madera, pero en los últimos años, la atención se ha desplazado hacia materiales artificiales como el hormigón. Las investigaciones han demostrado que el hormigón puede ser modificado para aumentar su bioreceptividad mediante la alteración de su composición química

y física, por ejemplo, utilizando aditivos como óxidos metálicos y residuos orgánicos (Perlaci, 2017).

4.2. Formulación y pruebas de hormigones bioreceptivos

La formulación de mezclas de hormigón bioreceptivo ha sido objeto de diversas investigaciones. Veeger, Ottelé y Prieto (2021) llevaron a cabo un estudio donde se diseñaron y probaron distintas formulaciones de hormigones bioreceptivos. Este estudio se enfocó en identificar las combinaciones de materiales y tratamientos de superficie que optimizaran la bioreceptividad, es decir, la capacidad del hormigón para favorecer el crecimiento de organismos biológicos. El trabajo de estos investigadores demuestra que la elección de agregados, aditivos y tratamientos superficiales juega un papel crucial en la mejora de la bioreceptividad de los hormigones (Veeger, Ottelé, y Prieto, 2021).

4.3. Factores que afectan la bioreceptividad

Los factores que influyen en la bioreceptividad del hormigón incluyen su pH, porosidad, rugosidad superficial y la presencia de nutrientes. Un pH elevado es generalmente desfavorable para el crecimiento de la mayoría de los organismos, por lo que la reducción del pH del hormigón es un área clave de investigación. Por ejemplo, los estudios de Bailey (2019) han mostrado que la incorporación de diferentes aditivos puede modificar el pH del concreto, logrando un aumento en la bioreceptividad. Promoviendo así, el uso en

aplicaciones sostenibles como fachadas verdes o estructuras ecológicas (Bailey, Smith y Williams, 2019).

4.4. Norma Chilena (NCh 2256)

Los morteros son mezclas fundamentales en la construcción, utilizados principalmente para la unión de elementos estructurales y como revestimiento. En Chile, la normativa que regula el uso y las especificaciones de los morteros es principalmente la NCh 2256 para morteros de albañilería, como en el caso de este trabajo. Ésta establece los diferentes tipos de morteros según su aplicación y composición. “Los morteros de albañilería para la construcción de muros suelen tener resistencias a la compresión. En el caso de los 7 días de secado, pueden alcanzar entre 6 y 18 MPa, dependiendo de la mezcla y los materiales utilizados” (INN, 2002).

4.5. Propiedades químicas y mecánicas de los hormigones bioreceptivos

Según los estudios de Stohl et al. (2023) los hormigones bioreceptivos se diseñan específicamente para facilitar el crecimiento de organismos biológicos, como algas, musgos y líquenes, en sus superficies. Estas propiedades son resultado de una combinación cuidadosa de componentes y tratamientos que modulan la porosidad, el pH, y la retención de humedad del material. Las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión y la durabilidad, también se ven afectadas por la modificación de la mezcla y la inclusión de aditivos (Stohl, et al., 2023).

4.6. Uso de borra de café

El empleo de borra de café en la fabricación de hormigón es un enfoque innovador que no solo mejora la bioreceptividad, sino que también contribuye a la sostenibilidad al reutilizar un residuo orgánico común. Estudios como los de Pereira (2020) han demostrado que la borra de café, cuando se incorpora al hormigón, puede actuar como un agente de reducción del pH y al mismo tiempo aumentar la porosidad del material, factores ambos que favorecen la bioreceptividad (Pereira, Costa, y Lima, 2020).

4.7. Óxido de magnesio en hormigón

El óxido de magnesio (MgO) es otro aditivo que ha sido ampliamente estudiado por su capacidad para modificar las propiedades del hormigón, incluyendo su bioreceptividad. Investigaciones como las de Zhang et al. (2018) han demostrado que la adición de MgO puede neutralizar parcialmente el pH alcalino del hormigón, creando un entorno más favorable para el crecimiento de microorganismos (Zhang, Tang, y Cheng, 2018).

4.8. Ácido bórico en el hormigón

El ácido bórico es otro compuesto que ha sido explorado por su efecto en la durabilidad y bioreceptividad del hormigón. Aunque es más conocido por su capacidad para inhibir la corrosión del acero en el hormigón armado, estudios recientes sugieren que también puede jugar un papel en la mejora de la bioreceptividad al modificar el pH y otras propiedades del hormigón (Lee & O'Neill, 2016).

Igualmente, Manso et al. (2014) exploraron el desarrollo de materiales cementosos de bajo pH para aumentar la bioreceptividad, destacando que una reducción en el pH puede mejorar significativamente la capacidad del hormigón para soportar el crecimiento biológico. Su investigación muestra que, al reducir el pH del hormigón, se puede promover un ambiente más adecuado para la colonización de organismos biológicos, lo cual puede tener aplicaciones en la creación de espacios más verdes y sostenibles en entornos urbanos. El ácido bórico ha sido identificado como un agente efectivo para la reducción del pH en hormigones. Según el estudio de Manso et al. (2014), el ácido bórico puede ser incorporado en las mezclas de hormigón para lograr un pH más bajo, lo cual es crucial para mejorar la bioreceptividad. Sin embargo, el uso de ácido bórico no sólo afecta el pH, sino que también puede influir en otras propiedades del hormigón, como su resistencia y durabilidad. La incorporación de ácido bórico puede alterar la hidratación del cemento y la formación de fases hidratadas, lo que podría afectar la estructura y las propiedades mecánicas del hormigón (Manso, et al., 2014).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Materiales

Dentro de los materiales como materias primas, se utilizaron pre mezclas de hormigón preparado y mortero preparado. El hormigón preparado consta de una mezcla de áridos y cemento, mientras que el mortero preparado es una mezcla es arena y cemento. En ambos sólo hace falta añadir agua y aditivos si es que se desea. Por otro lado, se tiene la borra de café la cual fue obtenida de una cafetería del centro de Chillán para su posterior secado. También se tiene como materiales el óxido de magnesio, el ácido bórico y agua destilada. Dentro de los implementos se utilizaron vasos precipitados, varilla de agitación, balanza digital, pH meter, pipeta y agitador magnético.

5.2. Metodología

5.2.1. Métodos de dosificación

Tomando en cuenta que no existe un único tipo de dosificación para el hormigón y mortero, ya que eso dependerá del propósito a aplicar de estos elementos cementosos, habrá que tomar en cuenta las proporciones respecto a la cantidad de agua y aditivo que se le desea agregar.

En general, los parámetros de diseño son la relación agua/cemento y la proporción de aditivos que se le añadirán. En este contexto y para el trabajo práctico de esta investigación la dosificación en todos los ensayos a realizar es la siguiente:

Tabla 1. Dosificación de materias primas utilizadas en la preparación de morteros.

Material	Dosificación (g)
Hormigón	50±2
Mortero	50±2
Agua	25

5.2.2. Ensayos sobre el hormigón y mortero

Una vez que ya se ha decidido la dosificación del hormigón y mortero preparado en relación con las características que se debe alcanzar. En este caso respecto a los ensayos, se debe caracterizar al hormigón y mortero en término de sus propiedades químicas (pH) en estado fresco.

En estado fresco principalmente se tomará en cuenta la consistencia de la mezcla respecto a la cantidad de agua y aditivo, como también la variabilidad del pH en la mezcla.

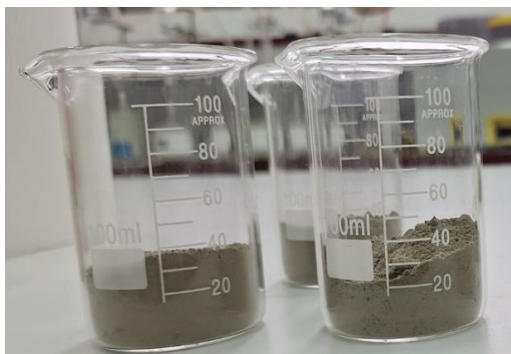


Figura 1 Mortero seco (50 g).

Se realizaron ensayos preliminares de hormigón y mortero, para verificar la consistencia de la mezcla y al mismo tiempo indicar el pH de estos elementos cementosos (Tabla 2).

Tabla 2. Determinación de pH de mezclas de hormigón y mortero.

Material	Dosificación (g)	Agua (g)	pH
Hormigón	50±2	25	12,14
Mortero	50±2		11,70

En este punto y en base a que este trabajo de investigación se realizará con el objetivo de utilizar estas mezclas de hormigón y/o mortero para esculturas de mediana estatura. El mortero como tal, sirve directamente para aplicar a estas esculturas como última capa, por ende, en los siguientes ensayos solo se utilizará mortero, ya que, igualmente presenta un pH menor al del hormigón. Además, el mortero presenta una mayor manejabilidad y facilidad de aplicación, debido a la ausencia de agregados gruesos, facilitando una mezcla homogénea con los aditivos que se utilizarán. Mejorando su distribución en toda la mezcla y optimizando el efecto de reducción del pH.

5.2.3. Ensayo con borra de café

La borra de café o el residuo sólido que queda luego de ocupar el café de grano, es el residuo agroindustrial que se ocupará. Este fue obtenido en una cafetería del centro de Chillán, y se realizó un secado previamente (Figura 2). Se añadió en estado sólido seco directamente a la mezcla de mortero, para

posteriormente añadir agua. Al mismo tiempo se realizó la prueba de pH a la borra de café en razón 1:10 (1 gramos de borra de café con 10 ml de agua destilada) obteniendo un pH aproximado de 7,2.



Figura 2. Previo secado de la borra de café.

Se utilizó la dosificación descrita anteriormente (Tabla 1) en combinación con la borra de café. Se realizaron 8 ensayos por triplicado, aumentando las dosis de borra de café (Tabla 3), todo esto en la mezcla fresca observando la consistencia de la mezcla, para posteriormente determinar el pH mediante un pH-meter.

Tabla 3. Preparación de mortero utilizando borra de café como aditivo.

Mortero (g)	Agua (g)	Borra de café (g)	%p/p borra de café respecto al mortero
50	25	2,5	5%
		5	10%
		10	20%
		15	30%
		20	40%
		25	50%

		30	60%
		35	70%

Estos ensayos al no contener algún producto corrosivo se realizaron en vasos de plástico como moldes (Figura 3), ya que, la metodología desarrollada debe ser de bajo costo y complejidad para su transferencia en el contexto del proyecto Arte y Ciencia en el cual se enmarca este trabajo.



Figura 3. Mezcla fresca de mortero, borra de café y agua destilada.

5.2.4. Ensayo mortero con MgO

El óxido de magnesio (MgO) es capaz de neutralizar parcialmente la alcalinidad elevada que tienen los elementos cementosos, al mismo sin causar grandes cambios a las propiedades mecánicas del mismo mortero. Utilizando la misma metodología que se ocupó con la borra de café, se añadió MgO exponencialmente al mortero seco (Tabla 4), para posteriormente añadir agua destilada.

Tabla 4. Preparación de mortero utilizando óxido de magnesio como aditivo.

Mortero (g)	Agua (g)	MgO (g)	%p/p MgO respecto al mortero
50	25	2,5	5%
		5	10%
		10	20%
		15	30%
		20	40%
		25	50%
		30	60%
		35	70%

Posteriormente se introdujo el pH-meter a la mezcla para determinar su pH mientras se aumenta progresivamente la proporción de óxido de magnesio.

5.2.5. Ensayo mortero con borra de café combinado con MgO

En los siguientes ensayos se toman en cuenta la borra de café y el óxido de magnesio, rescatando las cantidades críticas donde mayor cambio de pH hubo e igualmente sin alterar demasiado la consistencia de la mezcla. En este punto, en el caso de la borra de café se tomó en consideración la cantidad crítica que establecía la mayor variación de pH, 10 gramos (Tabla 3). Por otro lado, en el caso del óxido de magnesio se tomó en cuenta la cantidad de 5 gramos, ya que, esta cantidad fue la que mejor se obtuvieron resultados de cambio de pH (Tabla 4). Bajo este contexto se iniciaron ensayos con estas cantidades como base en casos separados, para revelar cuál aditivo generaba un mayor cambio en el pH de la mezcla, sin alterar la consistencia de la mezcla.

Primero se empezó con la borra de café, tomando en consideración las mismas dosificaciones de mortero y agua (Tabla 1), pero esta vez agregando 10 gramos de borra café en todos los ensayos, para luego agregar de forma progresiva óxido de magnesio y finalmente determinar el pH (Tabla 5).

Tabla 5. Preparación de mortero con borra café en proporción constante y variación en la dosificación de óxido de magnesio.

Mortero (g)	Agua (g)	Borra de café (g)	MgO (g)	%(p/p) óxido de magnesio respecto al mortero
50	25	10	2,5	5%
			5	10%
			10	20%
			15	30%
			20	40%

Luego se realizó un ensayo parecido, pero esta vez al mortero se le añadió 5 gramos de óxido de magnesio como constante, y progresivamente se fue añadiendo borra de café (Tabla 6) para luego con la ayuda del pH-meter, analizar la variable del pH.

Tabla 6. Preparación de mortero con óxido de magnesio en proporción constante y variación en la dosificación de borra café.

Mortero (g)	Agua (g)	MgO (g)	Borra de café (g)	%(p/p) Borra de café respecto al mortero
50	25	5	2,5	5%
			5	10%

		10	20%
		15	30%
		20	40%

5.2.6. Ensayo mortero con ácido bórico

El ácido bórico (H_3BO_3) es el siguiente elemento que se utilizó como agente reductor de pH, siendo añadido como un ácido débil directamente a la mezcla de mortero fresco.

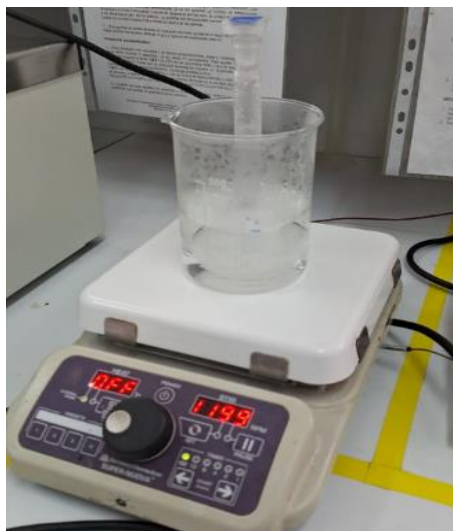


Figura 4. Ácido bórico (H_3BO_3) en agitador electromagnético a baño maría.

Se pesaron 10 gramos de H_3BO_3 para luego ser aforado con agua destilada a 100 ml. Posteriormente a través de la ayuda de un agitador electromagnético y la solución introducida a baño maría (Figura 5), fue posible obtener una disolución homogénea del ácido bórico. Luego se prepararon diferentes muestras con las dosificaciones originales (Tabla 1) para así añadir esta

solución de ácido bórico en diferentes porcentajes respecto al peso del mortero (%p/p peso ácido bórico respecto al peso del mortero).



Figura 5. Solución de ácido bórico a baño maría.

Se pesaron 50 gramos de mortero seco en diferentes vasos precipitados para realizar ensayos por triplicados añadiendo desde 1 ml hasta 15 ml de la solución de ácido bórico al mortero fresco. Posteriormente se introdujo el pH-meter para determinar la variable de pH (Tabla 7).

Tabla 7. Preparación de mortero utilizando ácido bórico como aditivo.

Mortero (g)	Ácido disuelto (ml)	(%p/p)	Agua (g)
50	0	0%	25
	1	0,2%	
	3	0,6%	
	5	1,0%	
	10	2,0%	
	15	3,0%	

5.2.7. Ensayo mortero con la combinación de ácido bórico y borra de café

Para la realización de este ensayo se tomaron en cuenta 15 gramos de borra de café de forma constante en todos los ensayos por triplicado. Esto, debido a que esta cantidad afecta directamente el pH del medio alcalino del mortero y por otro lado no afecta de forma invasiva la consistencia de la mezcla. Se pesaron 50 gramos de mortero seco, para luego añadir 15 gramos de borra de café en todos los ensayos por triplicado. Se probaron diferentes cantidades de solución de ácido bórico para luego realizar pruebas con el pH-meter y notar un cambio de la variable del pH (Tabla 8).

Tabla 8. Preparación de mortero con borra de café y adición de ácido bórico.

Mortero (g)	Ácido disuelto (ml)	(%p/p)	Agua (g)	Borra de café (g)
50	0	0%	25	15
	3	0,6%		
	5	1%		
	10	2%		
	15	3%		

5.2.8. Mejores dosificaciones ácido y borra

En este ensayo se pesaron 50 gramos de mortero seco, para posteriormente añadir 5 y 10 gramos de borra de café en ensayos por triplicado. Se añadió a la mezcla 5 ml de solución de ácido bórico para luego con el pH-meter realizar la prueba de pH.

5.2.9. Mejores dosificaciones ácido y MgO

En este ensayo se pesaron 50 gramos de mortero seco, para posteriormente añadir 10 gramos de MgO en ensayos por triplicado. Se añadió a la mezcla 5 ml de solución de ácido bórico para luego con el pH-meter realizar la prueba de pH.

5.2.10. Elaboración de moldes de mortero

Se procedió a la elaboración de mortero sin aditivos, para luego introducirlo en 6 moldes de largo 10 centímetros, ancho 5 centímetros y de alto 7 centímetros. Para posteriormente esperar 7 días el curado y realizar las pruebas mecánicas de compresión en la máquina de ensayos universales.



Figura 6. Mortero fresco en moldes de madera.

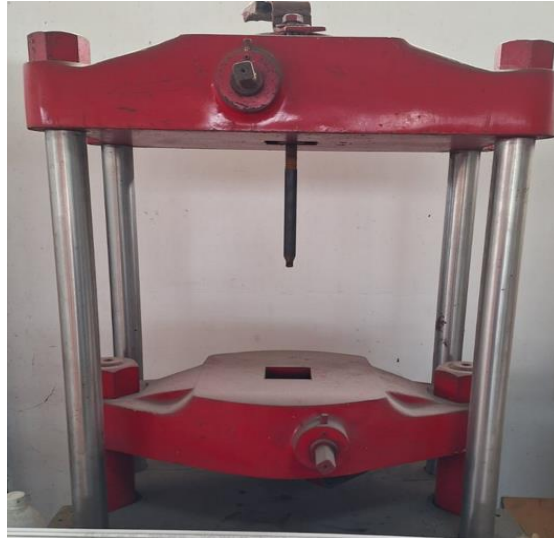


Figura 7. Parte de compresión de la máquina de ensayos universales.



Figura 8. Parte donde se mide en libras la fuerza de compresión de la máquina de ensayos universales.

5.2.11. Moldes de mortero con borra de café

Se realizó la mezcla de mortero con borra de café con la adición de agua para introducir la mezcla a 3 moldes anteriormente mencionados.



Figura 9. Moldes de mortero con adición de borra de café.

5.2.12. Ensayos preliminares de compresión de morteros secos en máquina de ensayos universales

Posteriormente al secado del mortero en los moldes, se realizaron ensayos de pruebas mecánicas en la máquina de ensayos universales. La posición del mortero fue de forma vertical (superficie 35 cm^2). Todo esto con el fin de probar la máquina y su utilización, como también analizar el rompimiento del material cementoso al estar seco.



Figura 10. Mortero seco momentos antes de ensayo de compresión.



Figura 11. Mortero seco posterior a la compresión.

5.2.13. Secado de 7 días de moldes de mortero con borra de café

Se realizó la sustracción de mortero con borra de café como aditivo, exactamente al paso de 7 días posterior a su realización, dejando un secado de una semana.



Figura 12. Mortero con adición de borra de café, secado de 7 días.

6. RESULTADOS

En el siguiente apartado se darán a conocer las variables obtenidas en cuanto al cambio de pH de la mezcla de mortero con los diferentes aditivos utilizados y sus combinaciones. Siguiendo en todos los ensayos las dosificaciones establecidas del mortero (Tabla 1) se mostrarán los cambios de pH con la adición de cada aditivo utilizado como la combinación de estos.

6.1. Resultados

6.1.1. Ensayo mortero con aditivo la borra de café

Tabla 9. Variación de pH de mortero con la adición de borra de café como aditivo.

Borra café (g)	%(p/p) Borra respecto al mortero	pH
0	0%	11,70
2,5	5%	10,86
5	10%	10,06
10	20%	9,89
15	30%	9,46
20	40%	8,71
25	50%	8,57
30	60%	8,44
35	70%	8,31

Se produjo una bajada de pH significativa, pasando de una alcalinidad alta aportada por el mortero, a una alcalinidad baja tendiendo a un medio más neutro. Sin embargo, hay puntos a tomar en consideración, debido a que el pH de la borra de café redondea los 7,0 a 7,5 de pH. Esto quiere decir que, en algún momento, dependiendo la cantidad utilizada de borra, la baja de pH se verá limitada. Por otro lado, aumentar las concentraciones de borra de café inmersos en la mezcla de mortero, provocaría efectos significativos importantes en las propiedades mecánicas del mortero.

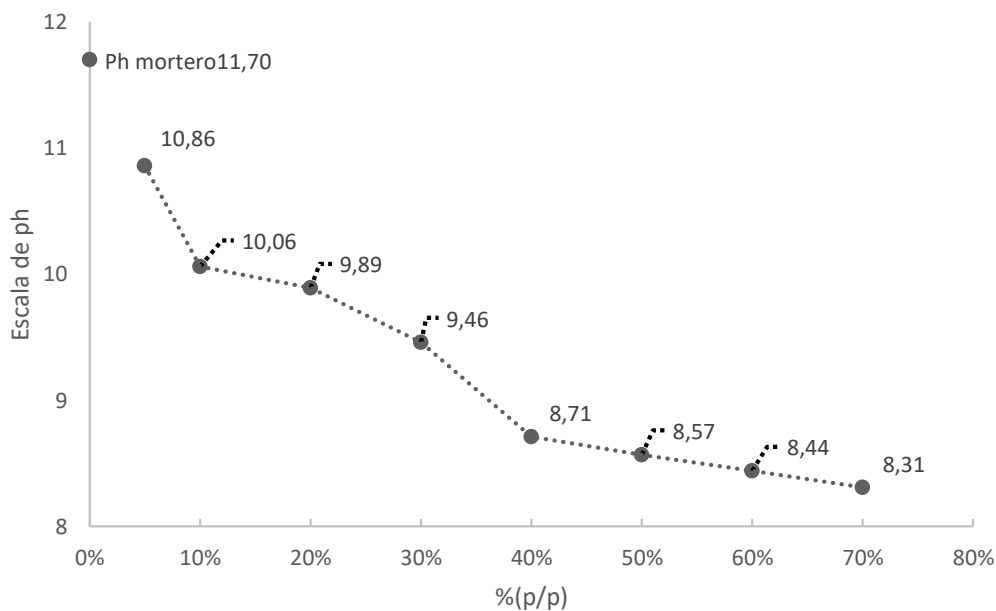


Figura 13. Variación de pH del mortero utilizando borra de café aditivo.

6.1.2. Ensayo mortero utilizando como aditivo MgO

Tabla 10. Variación de pH de mortero con adición de óxido de magnesio como aditivo.

MgO (g)	%(p/p) MgO respecto al mortero	pH
0	0%	11,70
2,5	5%	10,56
5	10%	9,86
10	20%	9,76
15	30%	9,71
20	40%	9,66
25	50%	9,66
30	60%	9,66
35	70%	9,66

Los ensayos realizados con óxido de magnesio (MgO) revelaron que, si bien el MgO favorecía las propiedades de la mezcla como del curado del mortero, no lograba una disminución química del mortero significativas, estancándose en un pH aproximado de 9,66, lo que indicaba que este compuesto no contribuye al objetivo principal del ensayo, que es disminuir el pH a un rango

5,5 y 8. Puesto que se necesita alcanzar un nivel neutro/ácido para favorecer el crecimiento de microorganismos según la bibliografía.

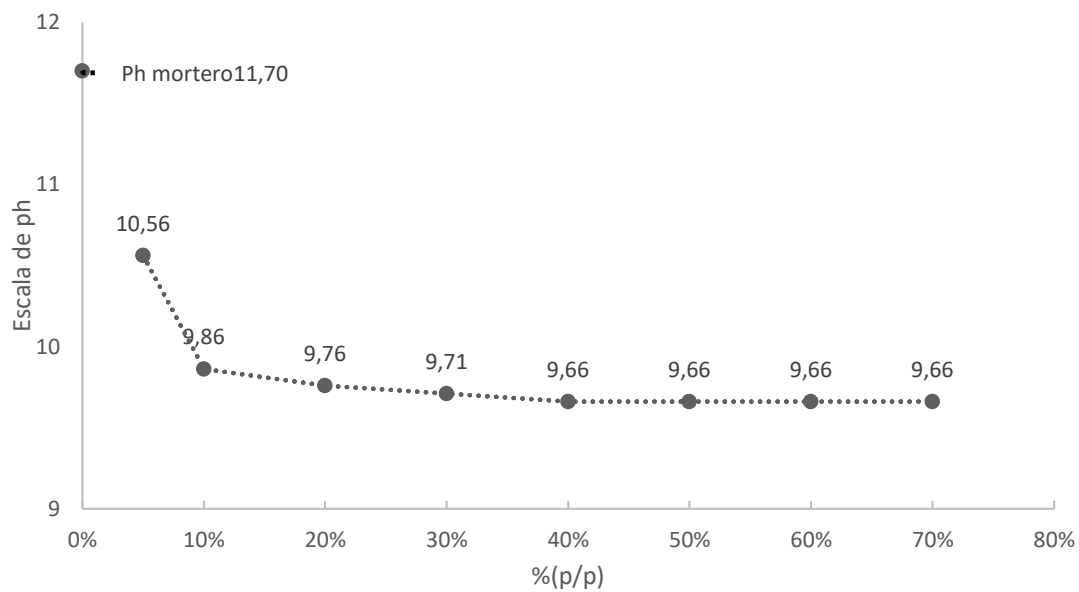


Figura 14. Variación de pH del mortero utilizando como aditivo óxido de magnesio.

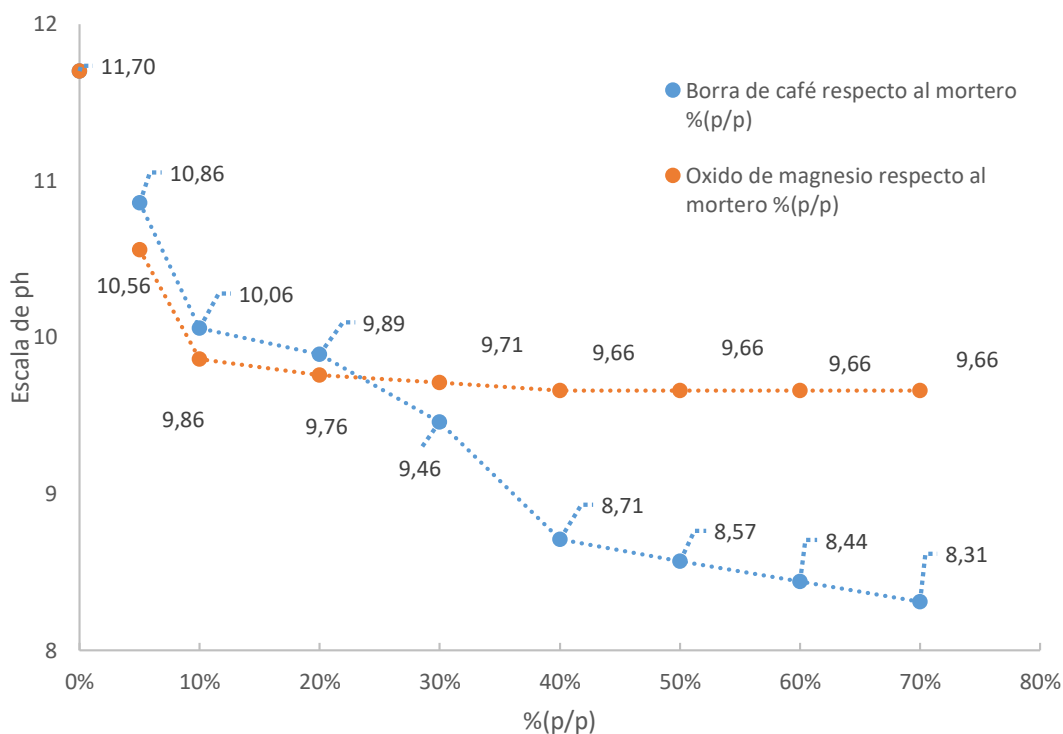


Figura 15. Comparación de variaciones de pH de borra de café y óxido de magnesio como aditivos a la mezcla de mortero.

6.1.3. Combinación de ambos aditivos

Tabla 11. Variación de pH de mortero con óxido de magnesio y adición de borra de café.

MgO (g)	Borra café (g)	%(p/p)	pH
5	0	0%	9,86
	2,5	5%	9,23
	5	10%	8,79
	10	20%	8,56

	15	30%	8,46
	20	40%	8,39

Tabla 12. Variación de pH de mortero con borra de café y adición de óxido de magnesio.

Borra café (g)	MgO (g)	%(p/p)	pH
10	0	0%	9,76
	2,5	5%	8,71
	5	10%	8,69
	10	20%	5,76
	15	30%	8,54
	20	40%	8,53

Se realizó una combinación de los aditivos de borra de café y óxido de magnesio (Tabla 11 y Tabla 12) con los puntos donde mayor hubo diferencia de pH, esto para descartar que el óxido de magnesio si bien actúa como un neutralizador de la alcalinidad del mortero, no ayuda igualmente a bajar en mejores condiciones el pH de la mezcla. Por ende, se evidencia que el óxido de magnesio no contribuye al pH deseado.

6.1.4. Mortero utilizando ácido bórico

Tabla 13. Variación de pH del mortero con adición de ácido bórico.

Ácido disuelto (ml)	(%p/p) Ácido respecto al mortero	pH promedio
0	0%	11,27
1	0,2%	8,04
3	0,6%	7,76
5	1,0%	7,54
10	2,0%	7,31
15	3,0%	7,19

El ácido bórico presentó resultados significativos enfocados a la reducción del pH del medio alcalino del mortero (Tabla 13), esto debido a que se estaría en presencia de un ácido débil, de un pH aproximado de 5, por lo que actuaría como reductor del pH del medio alcalino sin afectar de forma significativa a las propiedades mismas del mortero, ni a la consistencia de la mezcla.

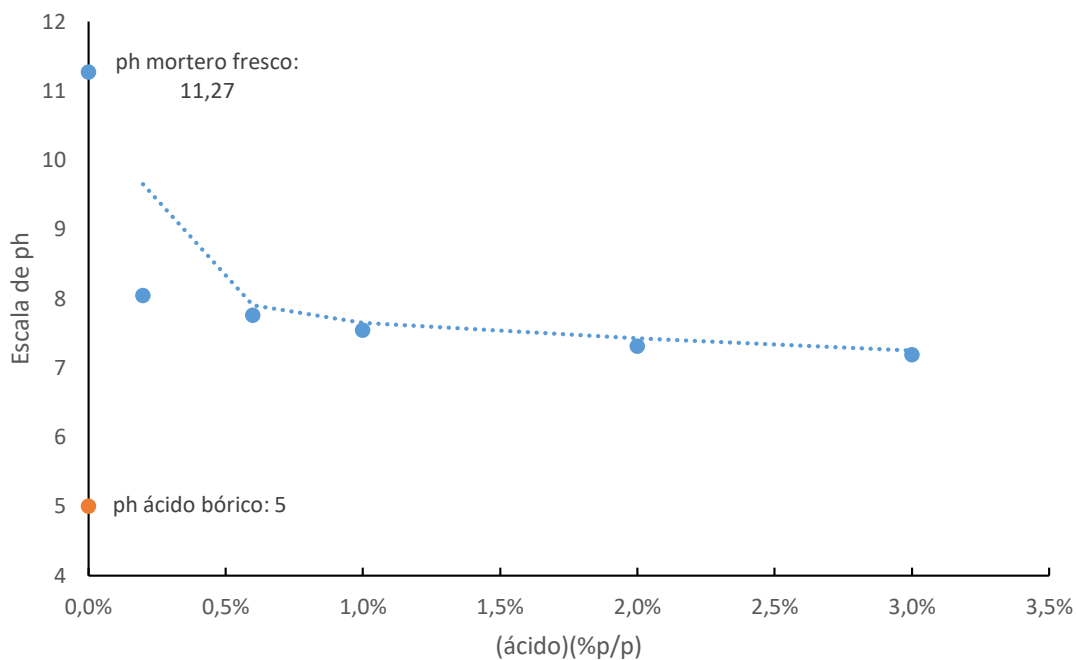


Figura 16. Variación de pH del mortero con adición de ácido bórico.

6.1.5. Mortero con de ácido bórico y borra de café

Tabla 14. Variación de pH del mortero con de borra de café ácido bórico y adición de ácido bórico.

Ácido disuelto (ml)	(%p/p) Ácido respecto al mortero	Borra de café (g)	pH
0	0%		9,46
3	0,6%		7,66
5	1,0%	15	7,54
10	2,0%		7,31
15	3,0%		7,19

Se combinaron los dos aditivos, manteniendo la cantidad de borra de café constante en 15 gramos para que no afectara de forma significativa la consistencia de la mezcla, pero si el pH, luego al añadir el ácido bórico, no se notaron grandes diferencias de pH con o sin la borra de café. Esto quiere decir que, el ácido bórico es quien se encarga de neutralizar y bajar el pH del mortero totalmente, con o sin la borra de café.

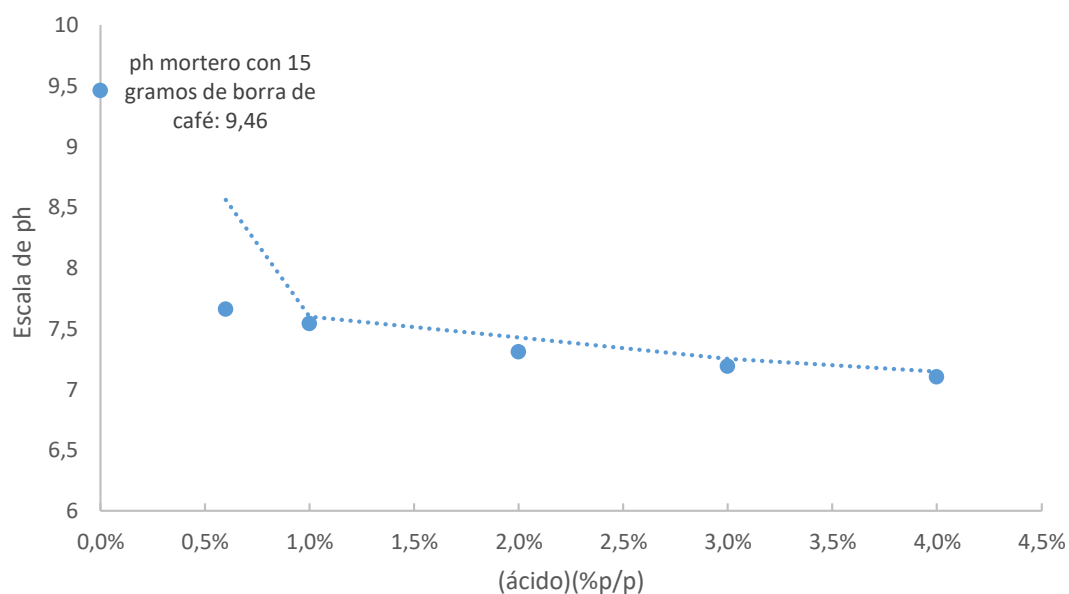


Figura 17. Variación de pH de mortero con borra de café con adición de ácido bórico.

6.1.6. Mortero con mejores dosificaciones

Tabla 15. Variación de pH crucial del mortero con borra de café y adición de ácido bórico donde mayor hubo cambio de pH.

Borra de café (g)	Ácido disuelto (ml)	%(p/p)Ácido respecto al mortero	pH
5	5	1%	7,76
10			7,69

Tabla 16. Variación de pH crucial del mortero con óxido de magnesio y adición de ácido bórico donde mayor hubo cambio de pH.

óxido de magnesio (g)	Ácido disuelto (ml)	%(p/p)Ácido respecto al mortero	pH
10	5	1%	8,04

8.1.7 Ensayo de compresión molde mortero seco

Tabla 17. Resultados de presión (MPa) en moldes de morteros secos.

Moldes de mortero (N°)	Presión (MPa)
1	2,848
2	4,348
3	4,628
4	4,628
5	3,585
6	5,111

Cada molde tuvo diferentes presiones de ruptura, puesto que en cada molde varia la cantidad de agua proporcionada por sección y otros factores ambientales y del mismo molde (humedad de la madera). Según norma chilena NCh 2256 lo normal al secado de 7 días de un mortero de albañilería redondea entre los 6 y 18 MPa (60-70% de la resistencia final) ((INN), 2002).

6.1.7 Moldes de mortero con adición de borra de café

Se procedió a retirar cuidadosamente los moldes de mortero con borra de café al paso de 7 días de secado, este presentaba una estructura aún húmeda, es decir, el secado o la humedad ambiental (de la misma borra de café igualmente) no fue el apropiado, puesto que se desarmaron al tacto. Su manipulación se dificultó en los 3 moldes que se elaboraron, por lo que las pruebas mecánicas no se pudieron realizar.



Figura 18. Molde agrietado de mortero con borra de café, secado de 7 días.

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Los ensayos realizados revelan grandes cambios a la estructura química del material primario utilizado. El mortero al estar en un ambiente alcalino (Tabla 2), debido a los materiales que lo componen, modificar sus niveles de pH con aditivos, resulta una tarea metodológica, tomando en cuenta la composición química y consistencia de la mezcla. La selección del residuo agroindustrial se hizo tomando en cuenta las características químicas y físicas del mortero, y su composición. Ya que, la borra de café mantiene un pH entre neutro y ácido dependiendo de donde sea extraído el residuo. Ahora bien, es importante entender que atrapar este residuo agroindustrial en el mortero para ser utilizado como nivelador del pH es una contribución importante a la sostenibilidad, pues que disminuiría los desperdicios de pozos de café que llegarían a los vertederos. También es importante señalar que la borra de café es un compuesto orgánico que podría ayudar a los microorganismos que se presentan en el material cementoso, como también ayudar a la porosidad del material y favorecer la humedad, incrementando las posibilidades de que crezca o exista biodiversidad en el mortero bioreceptivo.

El óxido de magnesio si bien contribuye a las propiedades mecánicas del mortero y hormigón por sus propiedades, no aporta significativamente al objetivo de este trabajo, reducir el pH del mortero.

Por otro lado, la adición de ácido bórico a la mezcla de mortero provocó un cambio significativo en la reducción del medio alcalino del mortero, presentando los mejores resultados en cambio de pH y consistencia de la

mezcla. Ya el ácido actuando con la borra de café cumple la misma función de ser la condicionante para la reducción del pH, por lo que el ácido bórico ayudaría significativamente a la reducción del pH agregando o no borra de café. Al mismo tiempo, el ácido bórico comparado con otros ácidos como el ácido clorhídrico o el ácido sulfúrico, es mucho más amigable, ya que, no emite gases nocivos ni genera algún tipo de corrosión al manipularlo. Por lo que manejar este tipo de ácido es muy conveniente para cualquier tipo de persona, lo que se debe considerar en el contexto del proyecto Arte y Ciencia.

Posteriormente se estableció un punto de inflexión para llegar a una estabilidad entre la borra de café y el ácido bórico, tal que no afecten de manera considerable las propiedades mecánicas del mortero (Tabla 15). En este ensayo con 5 ml de ácido bórico obteníamos una bajada significativa de pH, aproximadamente un 30% de disminución de pH tomando como referencia el pH original del mortero fresco. Por ende, 5 ml de ácido bórico es el mejor resultado para una reducción de pH significativo como también mantener una consistencia de mezcla estable.

La utilización de ácido bórico (5 ml) junto con la borra de café en las cantidades medidas, fueron los ensayos con mayor impacto a la estructura química del mortero, reduciendo el pH alcalino del mortero y manteniendo una mezcla consistente. Logrando una mejora en el potencial bioreceptivo y manteniendo una consistencia más neutra a diferencia de la alcalinidad alta del mortero. Al poseer un pH más neutro y además con la adición de materia orgánica como

la borra de café, aumentaría las probabilidades de que prospere una biodiversidad en el mortero.

Por otro lado, el secado del mortero con la borra de café se vio dificultado, esto es debido a que, al mantener esa materia orgánica dentro del mortero, fue más lento para este efectuar un secado normal comparado con el mortero normal sin aditivos. Debido a la humedad que puede retener la borra de café el secado del mortero en los moldes, se vería retrasado. Por ende, es necesario un secado más prolongado para efectuar pruebas de compresión. Tomando en consideración lo último es necesario un ensayo a los 28 días de secado, para comparar con bibliografía y con moldes de mortero sin aditivos. Lo cual quedó fuera de los plazos establecidos para este trabajo.

Finalmente se implementó un proceso de elaboración de mortero bioreceptivo añadiendo como aditivo un residuo agroindustrial, añadido a la mezcla como neutralizador del pH alcalino del mortero, con la adición de ácido bórico para estabilizar el pH a un pH más neutro/ácido mejorando la bioreceptividad para el beneficio de la biodiversidad que pueda presentar el mortero, sin perjudicar significativamente las propiedades del material cementoso. Además, la metodología desarrollada es de bajo costo y riesgo, y se puede realizar con materiales y equipamiento de uso común o de fácil acceso, lo que lo hace adecuada para ser utilizada en la elaboración de esculturas y ser transferida a comunidades.

8. LITERATURA CITADA

- Avilés, S. C. (2021). *Evaluación del uso en ingeniería civil y edificación de hormigones bioceptivos* (Trabajo final de máster, Escola de Camins).
- Bailey, R., Smith, J., & Williams, D. (2019). Enhancing bioceptivity of concrete through pH modification: The role of additives. *Journal of Sustainable Construction Materials*, 5 (3), 231–245.
- Desai, A., & Niteen, B. (2022). Life cycle assessment of construction materials and its environmental impacts for sustainable development. *Materials Today: Proceedings*, 65, 3866–3873. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.171>.
- Fiamingo, F. (2017). *Hormigones biológicos*. Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena.
- González, C., & Martel, A. (2018). Bioceptivity in building materials: An overview of current research and applications. *Building and Environment*, 165–174.
- Instituto Nacional de Normalización (INN). (2002). NCh2256: Morteros de albañilería-requisitos. Santiago, Chile.
- Lee, H., & O'Neill, R. (2016). Boric acid as a corrosion inhibitor in reinforced concrete: Implications for structural integrity and bioceptivity. *Cement and Concrete Research*, 55–63.

- Manso, S., Mestres, G., Ginebra, M., Belie, N., & Aguado, A. (2014). Development of a low pH cementitious material to enlarge bioreceptivity. *Construction and Building Materials*, 485–495. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.001>
- Pereira, A., Costa, M., & Lima, R. (2020). Recycling coffee grounds in concrete: Effects on pH and bioreceptivity. *Journal of Cleaner Production*, 245. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125837>
- Perlaci, T. (2017). The evolution of bioreceptive materials: From natural to engineered solutions. *Materials Science and Technology*, 245–255.
- Stohl, L., Manninger, T., von Werder, J., Dehn, F., Gorbushina, A., & Meng, B. (2023). Bioreceptivity of concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 76. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102545>.
- Veeger, M., Ottelé, M., & Prieto, A. (2021). Making bioreceptive concrete: Formulation and testing of bioreceptive concrete mixtures. *Journal of Building Engineering*.
- Zhang, L., Tang, Z., & Cheng, H. (2018). Magnesium oxide in concrete: Effects on durability and bioreceptivity. *Construction and Building Materials*, 802–812.