

CARACTERIZACIÓN DE UN HORMIGÓN ECOLÓGICO Y ANÁLISIS DE FACTORES QUE INCIDEN EN SU RESISTENCIA Y NIVEL DE ECOLOGIZACIÓN

Joaquín Reyes Antileo¹, Mauricio Villagrán Valenzuela², Pablo Salgado Mendoza³

RESUMEN:

Los proyectos de reverdecimiento urbano otorgan una mayor sustentabilidad en la construcción de espacios compatibles con la biodiversidad de especies, aportando beneficios al contexto de crisis climática y enriqueciendo así los entornos verdes de las urbanizaciones. La fabricación de un hormigón ecológico surge como respuesta al desarrollo de ciudades con mayor cobertura verde y con un enfoque relacionado a la interacción de ecosistemas. El hormigón ecológico se define como una estructura de hormigón permeable en la cual existe la posibilidad de presencia y crecimiento de vegetación y donde las raíces pueden atravesar su estructura debido a su alta porosidad interconectada, actuando como un lecho de plantación. En este trabajo se definen proporciones de mezcla incorporando elementos residuales de procesos de combustión de biomasa y co-productos derivados del proceso de fabricación de aceros como parte de reemplazo de cemento, estudiando además si el entorno de un pastelón de hormigón poroso es el adecuado para el crecimiento y supervivencia de dos especies de hierbas. Los resultados indican que a los 21 días se obtienen en promedio resistencias de compresión de 43,2 kg/cm², un valor medio de pH de 9,85 y un crecimiento promedio estable en las especies herbáceas de las mezclas con un reemplazo de 10% de cemento. Al utilizar un reemplazo de cemento del 30% se observó que disminuyó la resistencia a compresión del hormigón, además no aminoró considerablemente los valores de pH ni representó un alza importante en el nivel de ecologización, pero si se probó la factibilidad de su uso.

PALABRAS CLAVE: Hormigón ecológico, permeabilidad, proporción de mezcla, vegetación.

ABSTRACT:

Urban greening projects provide greater sustainability in the construction of spaces compatible with the biodiversity of species, providing benefits to the context of climate crisis and thus enriching the green environments of urbanizations. The manufacture of an ecological concrete arises as a response to the development of cities with greater green coverage and with a focus related to the interaction of ecosystems. The ecological concrete is defined as a permeable concrete structure in which there is the possibility of presence and growth of vegetation and where the roots can go through its structure due to its high interconnected porosity, acting as a planting bed. In this work, mixing proportions are defined incorporating residual elements from biomass combustion processes and co-products derived from the steel manufacturing process as part of cement replacement, and it is also studied whether the environment of a porous concrete slabs is suitable for the growth and survival of two species of herbs. The results indicate that at 21 days an average compressive strength of 43.2 kg/cm², an average pH value of 9.85 and a stable average growth of the herbaceous species in the mixes with a 10% cement replacement are obtained. The use of a 30% cement

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, jreyes@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, mvillagran@ucsc.cl

³ Profesor Informante, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, psalgado@ucsc.cl

replacement decreased the compressive strength of the concrete and did not considerably lower the pH values, nor did it represent a significant increase in the level of greening, but it did prove the feasibility of its use.

KEYWORDS: Ecological concrete, permeability, proportion mix, vegetation.

1. INTRODUCCIÓN

Las superficies naturales que permanecen expuestas a deslizamientos, socavaciones, escurrimientos de agua o erosiones debido al uso sobre ellas son propensas a sufrir desastres y problemas naturales, ya que no necesariamente presentan una resistencia adecuada para las condiciones de uso que reciben (Bao *et al.*, 2017). Es por esto que se suelen utilizar técnicas de protección basadas en estructuras inorgánicas para la protección de taludes, riberas y otras superficies próximas a urbanizaciones y carreteras como medida de prevención de desastres. Las obras de ingeniería y métodos de protección consisten comúnmente en la instalación de geotextiles, mallas metálicas, enrocados y hormigón proyectado sobre la superficie a reforzar (Cheng *et al.*, 2020).

Si bien estos métodos se han estudiado y utilizado en diversas ocasiones priorizando el fortalecimiento y estabilidad de la superficie, estos impactan en el entorno del ecosistema biológico existente inhibiendo el normal flujo de energía y materia y el correcto desarrollo de cadenas alimenticias (Li *et al.*, 2022). En el caso de la utilización de hormigón convencional como capa de recubrimiento de superficies, el entorno inferior es demasiado denso para el desarrollo de vegetaciones y equilibrio del medioambiente, ya que la baja porosidad del hormigón restringe el intercambio normal de aire, agua, suelo, luz solar y especies (Li, Zhang *et al.*, 2019).

Con el ritmo de avance de las construcciones, gran parte de ellas deben destruir el relieve y paisajismo original, dañando severamente el hábitat auténtico y causando deterioros en la vegetación y erosión de suelo natural. Las protecciones de taludes llevadas a cabo con hormigón proyectado tienen un color gris monótono, provocando una grave contaminación visual del paisaje (Li, Zhao *et al.*, 2019), rompiendo la estética original de la naturaleza y provocando en la población posibles efectos como cansancio visual, estrés por saturación y pérdida en valores escénicos (Correa & Mejía, 2015).

En consecuencia y en la constante búsqueda de nuevas soluciones, algunos investigadores han realizado algunos estudios para incorporar elementos de hormigón con un enfoque compatible con la naturaleza, orientado al intercambio de los componentes del medioambiente y sin descuidar la protección de la superficie frente a los fenómenos que se encuentra expuesto. Es por esto que el hormigón ecológico resulta ser un recurso acorde, combinando vegetación con un hormigón de alta porosidad, permitiendo que los nutrientes del suelo, agua y aire transiten por los poros interconectados (Li *et al.*, 2022), incluyendo el crecimiento de sistemas de raíces de distintas hierbas a través del elemento de hormigón, protegiendo el suelo de erosiones superficiales, socavaciones y escorrentías de agua (Cheng *et al.*, 2020), otorgando además un reverdecimiento y restauración ecológica de la superficie.

Para lograr que exista un elemento de hormigón poroso que sea biocompatible con la vegetación y su ecosistema, se deben estudiar los principales factores que influyen en el crecimiento de las plantas dentro de este tipo de elementos, siendo la porosidad uno de los principales factores que intervienen en el desarrollo de estas. El entorno de las plantas es otro factor que debe ser considerado ya que puede limitar su desarrollo. Por ejemplo, si consideramos el cemento como único elemento aglomerante en una mezcla de hormigón, este puede presentar una alta alcalinidad con valores de pH de hasta 12–13, por lo que no es adecuado para un correcto crecimiento de las plantas, ya que la vegetación sobrevive en un entorno con un rango de pH de 3,5 a 9,5 (Cheng *et al.*, 2020).

La tecnología de hormigones permeables ha sido utilizada y estudiada por diferentes autores, quienes han dado a conocer la forma en que se debe llevar a cabo el procedimiento de fabricación de este tipo de hormigón, así como también su utilización como mecanismo de protección de taludes o pavimentos porosos para evitar la generación de pozas por aguas pluviales, drenando el agua rápidamente a estratos inferiores de suelo (ver Figura 1). Por ejemplo, Tennis *et al.* (2004) analizaron sus aplicaciones y propiedades de ingeniería, beneficios ambientales, propiedades estructurales, diseños hidráulicos, técnicas de construcción y otros factores de este tipo de hormigón.

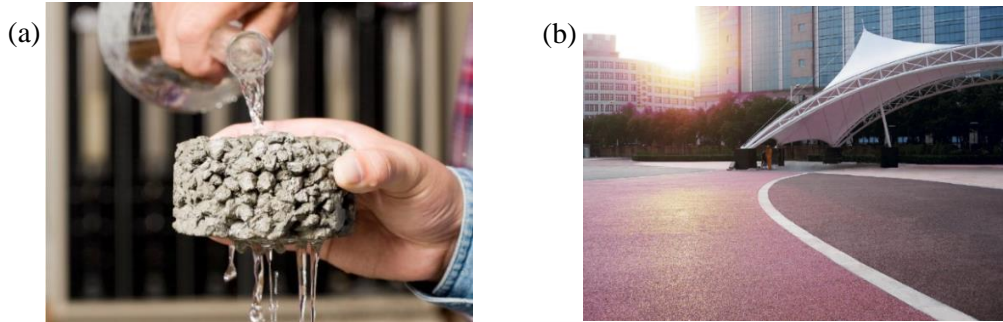


Figura 1. Usos de hormigones permeables. (a) Demostración de permeabilidad de una muestra de hormigón permeable (Fuente: Tomada de Washington Concrete, s.f.). (b) Secciones de hormigón permeable de color en la zona de preparación de los juegos olímpicos en el centro de Beijing (Fuente: Tomada de Mitchell, 2010)

Por su parte, el ACI Committee 522 (2010) ha elaborado un reporte proporcionando información técnica sobre métodos de diseño, proporciones de mezcla, pruebas de inspección y otros componentes con la finalidad de contar con una guía de diseño para la planificación de proyectos utilizando hormigones permeables, además de proporcionar gráficas y resultados esperables de aspectos de interés, definiendo al hormigón permeable como un material de granulometría abierta, casi sin asentamiento, consistente de cemento, agregado grueso, poco o nulo agregado fino, aditivos y agua. El reporte indica que las resistencias a compresión típicas pueden oscilar entre 2,8 a 28 MPa, permitiendo además relacionar este parámetro con respecto al rango de resistencia a flexión (ver Figura 2).

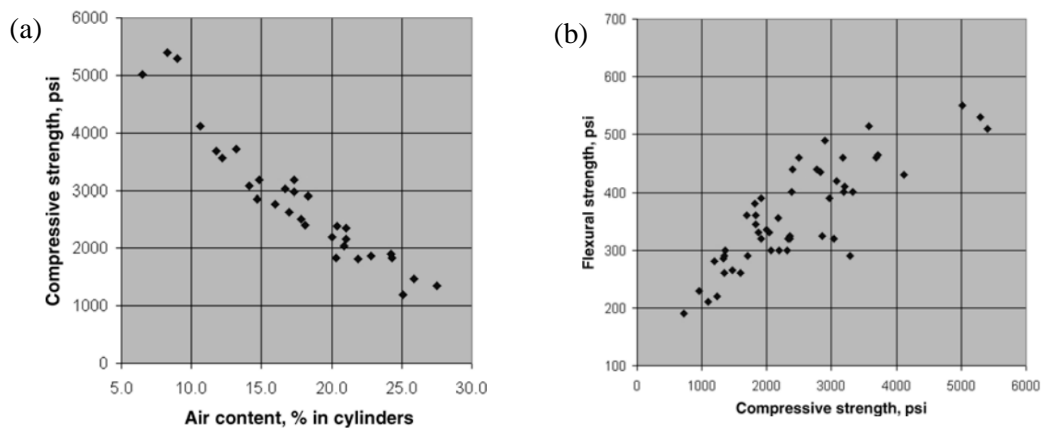


Figura 2. Gráfica de relación entre propiedades del hormigón permeable. (a) Relación entre resistencia a la compresión y el contenido de vacíos (1 psi = 0,006895 MPa) (b) Relación entre resistencia a flexión y resistencia a compresión (1 psi = 0,006895 MPa) (Fuente: ACI Committee 522, 2010).

La incorporación de elementos residuales como agentes cementicios en mezclas de hormigón es una práctica bastante usual para mejorar las propiedades del hormigón. En este sentido surge la posibilidad de utilización de cenizas del proceso de combustión de biomasa y co-productos derivados del proceso de fabricación de aceros como parte de remplazo del material cementante en la dosificación del hormigón poroso, en proporciones adecuadas favoreciendo la reutilización de un material de desecho y reduciendo el impacto ambiental de un material potencialmente contaminante del medio ambiente (Huaquisto & Belizario, 2018).

La siguiente investigación busca constituir una línea experimental sobre la fabricación de un hormigón ecológico biocompatible con hierbas típicas de la región centro-sur de Chile, adoptando elementos residuales de procesos productivos para su correcta incorporación en la dosificación, proporcionando un ambiente apto para la germinación de especies y analizando el comportamiento mecánico para distintas proporciones de los elementos sustitutos.

2. METODOLOGÍA

2.1 Proporciones de mezcla y elementos a elaborar.

El hormigón ecológico presenta dosificaciones y formas de elaboración distintas al hormigón convencional, por lo que primeramente se debe estudiar y definir la forma en que se debe llevar a cabo, de modo que se utiliza como principio de dosificación estudios anteriores de Cheng *et al.* (2020) en la cual se incluye cenizas volantes y humo de sílice como minerales de parte de reemplazo del cemento en el aglomerante para reducir la cantidad de cemento, favoreciendo un ambiente de crecimiento de vegetación y la incorporación de elementos de residuo. El hormigón poroso posee dos cualidades que lo vuelven diferente al hormigón convencional: i) no considera agregado fino como la arena, lo que permite aumentar el contenido de vacíos en él; y ii) la granulometría del agregado grueso debe ser mayormente homogénea (Tennis *et al.*, 2004).

Para este estudio se utilizaron cenizas de combustión de biomasa y barros conox como material fino y se define como reemplazo del cemento en el orden del 10% y 30% del total de material aglomerante, por lo que se trabaja con tres dosificaciones de mezcla como se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Dosificaciones de mezcla del hormigón ecológico.

Código mezcla	Relación de agua/aglomerante	Peso unitario (kg/m ³)				
		Cemento	Cenizas	Barros conox	Agua	Agregado grueso
HP-C10	0,40	226,6	25	0	100,65	1432
HP-BC10	0,40	226,6	0	25	100,65	1432
HP-BC30	0,40	176,6	0	75	100,65	1432

Para obtener una granulometría uniforme, se lavaron y tamizaron sacos de gravilla por la malla de 12,5 mm de apertura y retenida en la malla de 4,75 mm (ver Figura 3) para separar de arenas y agregados muy finos. Posteriormente se seca el material en un horno de secado a 100 °C durante 24 horas.



Figura 3. Gravilla tamizada por la malla N° 1/2” (izquierda) y retenida en la malla N°4 (derecha).

El cemento se desempeña como material aglomerante primario, en esta actividad experimental se utilizó cemento marca Melón con clasificación de cemento puzolánico grado corriente utilizado para la confección de hormigones y morteros para obras tradicionales. Las cenizas de biomasa y partículas de barros conox se secaron y tamizaron por la malla de 4 mm. Las cenizas de biomasa fueron adquiridas del receptáculo de cenizas de una estufa de combustión, mientras que, por otra parte, las muestras de barros conox utilizadas fueron suministradas por la Compañía Siderúrgica Huachipato S.A., parte de la empresa CAP S.A. que actúan como el mayor productor siderúrgico y procesador de acero en Chile.

Las escorias de acería y barros conox se producen como co-productos en el ciclo de fabricación de acero (DAPCO, 2014) y está compuesto principalmente por óxidos de hierro y óxido de calcio (CaO), y en menor medida por otros elementos (ver Tabla 2). Su aspecto es de masas pequeñas compactadas y partículas de polvo de color café.

Tabla 2. Ficha técnica de barros conox. (Fuente: Documentos de archivo).

Compuesto	Rango (%)	Valor Típico (%)
Fe total	50,0 – 70,0	60,0
SiO ₂	1,0 – 5,0	3,0
Al ₂ O ₃	0,1 – 1,0	0,60
CaO	10,0 – 30,0	18,0
MgO	1,0 – 15,0	6,0
SO ₃	0,05 – 0,30	0,10
P ₂ O ₅	0,08 – 0,40	0,20
TiO ₂	0,08 – 0,50	0,25
V ₂ O ₅	0,3 – 1,0	0,60
ZnO	0,3 – 2,0	0,80
C	0,3 – 6,0	2,0

Ensayos	Rango	Valor típico
Humedad (%)	10 – 30	20
Densidad (kg/m ³)	1000 – 2000	1500

A partir de las dosificaciones especificadas en la Tabla 1, se definen tres elementos a fabricar de hormigón permeable para evaluar tres propiedades relevantes en esta investigación: la resistencia mecánica de compresión, el desarrollo vegetacional y la permeabilidad. Para evaluar la resistencia de compresión se define la confección de dos cubos por cada dosificación para ensayar a la edad de 7 y 21 días de curado respectivamente. Luego se determina la fabricación de cinco pastelones para estudiar el crecimiento y supervivencia de vegetación sobre ellos para las distintas dosificaciones. Finalmente se destina una fracción de la mezcla fresca de cada dosificación para la elaboración de tres cilindros de hormigón para analizar la permeabilidad de las muestras en estado endurecido. Los moldajes a utilizar se muestran en la Figura 4 y las dimensiones de cada elemento se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Dimensiones de los elementos de hormigón a fabricar.

Elemento	Largo (cm)	Ancho (cm)	Alto (cm)
Pastelones	45	45	5
Bloques	15	15	12
Cilindro	Diámetro= 8 cm		5



Figura 4. Moldajes para la elaboración de elementos de hormigón ecológico.

2.2 Elaboración de hormigón ecológico.

Para la preparación de la mezcla, se reúnen las cantidades de cada componente para fabricar dos pastelones de hormigón ecológico, dos bloques de ensayos de compresión y un cilindro de ensayo de permeabilidad, más un porcentaje extra por concepto de pérdidas.

Se junta la grava con la mezcla de aglomerante y se combinan para posteriormente agregar el agua. La mezcla presenta una baja trabajabilidad por lo que se debe mezclar lo suficientemente bien hasta que el aglomerante se junte adecuadamente con el agua y la grava de manera uniforme, sin que se acumule parte del material en el fondo del recipiente de mezclado.

Estudios anteriores recomiendan realizar una inspección visual al aspecto de la mezcla fresca para conocer si la cantidad de agua agregada es la correcta para que toda la mezcla cohesione correctamente (Tennis *et al.*, 2004). La forma de evaluar en estado fresco el material, es realizar una bola la cual no debe desarmarse (ver Figura 5). Esta debe presentar una película de aglomerante con brillo, si se observa una pasta con brillo excesivo y la bola se desarma, quiere decir que tiene exceso de agua, por el contrario, si la pasta es opaca, no presenta brillo y la bola no cohesiona, falta agregar agua a la mezcla (Díaz *et al.*, 2020).



Figura 5. Muestras de hormigón permeable con diferentes contenidos de agua, formando una bola. (a) Muy poca agua. (b) Cantidad adecuada de agua. (c) Demasiada agua. (Fuente: Tennis *et al.*, 2004)

Una vez que se obtuvo una mezcla homogénea, ésta se vació en los moldajes y luego se procedió a compactar la mezcla para adherir fuertemente los agregados con el fin de mejorar su resistencia a compresión. Los pastelones se compactaron con una regla de madera ajustada para cumplir con la altura objetivo y de igual manera se realizó la compactación del bloque cilíndrico. En cambio los bloques prismáticos se llenaron y compactaron hasta el tope de los moldajes y luego se enrasó la superficie. Luego en un lapso de tiempo no mayor a 20 minutos se cubren los moldajes con una membrana de polietileno y se cierran todos los bordes para evitar la pérdida de humedad de la mezcla al ambiente.

La estructura abierta del hormigón permeable compromete a una mayor superficie de la mezcla a la evaporación del agua utilizada ya que el aire puede moverse en todas direcciones al interior de la estructura y la durabilidad de las superficies puede reducirse en un 60% si las superficies quedan mal protegidas (Paine, 1992). Es por esto que el método de curado de hormigones permeables consiste en el recubrimiento de la superficie con una membrana de polietileno asegurada correctamente en todos los bordes para evitar la pérdida de humedad al menos por siete días (Tennis *et al.*, 2004).

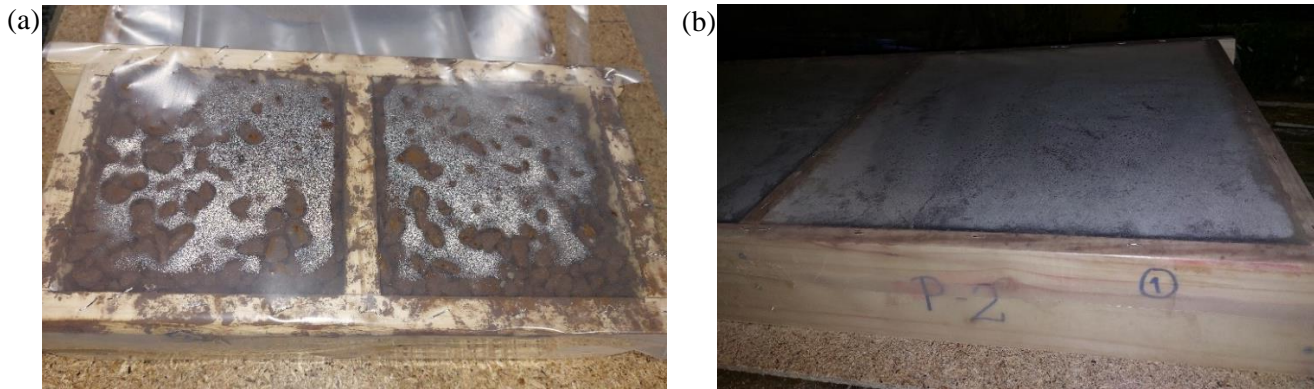


Figura 6. Curado de elementos de hormigón después de 7 días. (a) Cubos de sección 15×15 cm.
(b) Pastelón de sección 45×45 cm.

2.3 Prueba de ensayos de compresión.

Para obtener información de la resistencia que alcanza la mezcla, los 2 bloques prismáticos de hormigón ecológico se destinaron a realizar ensayos de compresión (ver Figura 7) a la edad de 7 y 21 días. Se debió realizar un proceso previo de refrentado de cada prisma con el fin de corregir imperfecciones y planeidad entre las caras en contacto con las placas, para obtener un mejor ajuste a las superficies de apoyo y una distribución uniforme de las tensiones aplicadas por la prensa durante la aplicación de la carga (Instituto Nacional de Normalización, 2010).

Posteriormente los ensayos de resistencia de compresión se ejecutaron en una prensa hidráulica para ensayos destructivos marca Controls, modelo C54G2, donde se aplicó la carga con una tasa promedio de $0,48 \text{ kg/cm}^2/\text{s}$ sobre los bloques. Se registró el valor de la tensión máxima que alcanzó cada probeta a la edad de ensayo especificada.



Figura 7. Bloque de mezcla HP-C10 refrentado en sus dos caras, en máquina de ensayo a compresión antes de ejecutar el ensayo.

2.4 Ecologización de pastelones y sembrado de semillas.

Para analizar si el ambiente del hormigón es apto para el crecimiento de vegetación, se decide observar el crecimiento de dos semillas distintas que puedan presentar una mayor factibilidad de crecimiento. Para generar un entorno adecuado para las semillas, se roció un sustrato vegetal sobre los pastelones de hormigón ecológico con el objetivo de mejorar la supervivencia de las hierbas y aportar elementos necesarios en la fase inicial de crecimiento de las semillas (ver Figura 8).



Figura 8. Aplicación de sustrato sobre pastelón de hormigón ecológico.

Se definió la utilización de semillas de cilantro (*Coriandrum sativum*) y pasto (*Festuca arundinacea*) como hierbas de análisis de crecimiento en el hormigón ecológico. Para el sembrado de semillas de cilantro, éstas se aplicaron de forma puntual una por una sobre el sustrato, dejando una distancia de 2 a 3 cm entre cada semilla. Para sembrar las semillas de pasto, éstas se distribuyeron al voleo sobre el sustrato de manera uniforme (ver Figura 9).

Inicialmente se añadió el sustrato evitando la compactación de éste para permitir la aireación de la tierra, con una altura aproximada de 2 cm, luego se sembraron las semillas y se cubrieron de la misma manera con sustrato de una altura aproximada de 1 cm como se muestra en la Figura 9c (Zhao *et al.*, 2019). El sustrato está compuesto por un 89% de tierra de hojas, un 6,4% por fibra de coco, y un 4,6% de humus que aportan una mayor aireación y nutrientes a disposición de la vegetación.

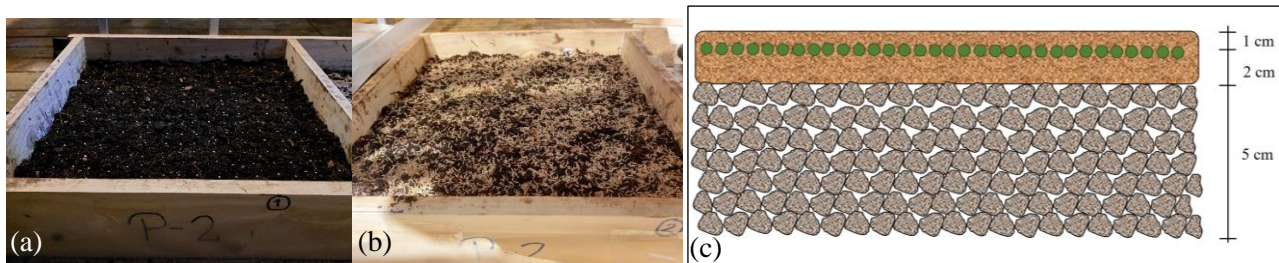


Figura 9. Siembra de semillas. (a) Semillas de cilantro. (b) Semillas de pasto. (c) Representación de una sección lateral de sustrato y semillas.

Posterior al sembrado de semillas, se roció agua con un pulverizador en forma de llovizna para incorporar humedad y además se cubrieron con una membrana de polietileno con la intención de crear un ambiente de invernadero, manteniendo temperaturas adecuadas para el desarrollo de las plantas. El cuidado de la vegetación consistió solamente en mantener los pastelones con exposición de luz solar, mantener humectado el sustrato por las mañanas y mantener cubierto por la membrana de polietileno durante un mínimo de 7 días.

El entorno de hormigón por sí mismo no es adecuado para la supervivencia de las especies por su alta alcalinidad. Es por esto que se consideró la adición de cenizas de biomasa y barros conox en partes de reemplazo del cemento para optar a menores valores de pH en las mezclas.

Se realizaron mediciones del valor del pH para cada una de las tres dosificaciones a la edad de 7 y 21 días cada una, además del valor del pH para el sustrato vegetal y para el cemento utilizado en las mezclas. Para esto se masaron 5 gramos de cada material y se vertieron en un matraz graduado de 250 mL para agregar 96,5 mL de agua ultrapura. Luego se situaron en un agitador de laboratorio magnético a una velocidad de rotación de 1500 rpm durante 5 minutos. El líquido es filtrado mediante un filtro cualitativo grado 1 de Whatman® y es a este líquido que se debe realizar la medición de pH por medio de un electrodo de pH conectado a un medidor multiparamétrico modelo HI5521 de la marca Hanna Instruments.

2.5 Densidad y cantidad de vacíos.

Con la información de las dosificaciones utilizadas se puede obtener de manera teórica la densidad del hormigón ecológico. Sin embargo, se realizó la medición de la densidad práctica de las mezclas tomando las medidas de la masa de un bloque de hormigón poroso y sus dimensiones geométricas, y se obtuvo la densidad dividiendo la masa por su volumen (multiplicación de su largo por ancho y por su alto), expresada en unidades de kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

El procedimiento para ensayar el contenido de vacíos de las probetas de hormigón poroso endurecido recoge inicialmente algunos aspectos de la International Organization for Standardization (2018) y se adaptaron para la actividad experimental. El método consistió en sumergir la probeta, en un estanque prismático de dimensiones conocidas con agua a una temperatura inferior a 20°C . El agua se llena hasta una altura determinada y señalizada, una vez sumergido el bloque, éste se deja reposar durante 30 minutos golpeando ligeramente el estanque para asegurar que el agua llene todos los poros del bloque de hormigón poroso. El volumen de huecos se calcula utilizando la ecuación (1)

$$V_{\text{huecos}} = V_{\text{bloque}} - V_{\text{desplazado}} \quad (1)$$

Donde:

- V_{huecos} es el volumen de huecos de la muestra.
- V_{bloque} es el volumen medido de la muestra.
- $V_{\text{desplazado}}$ es el volumen de agua desplazado por los sólidos.

El volumen de agua desplazado se calculó midiendo la altura de la columna de agua aumentada por la inmersión de la probeta y multiplicada por el área rectangular interior del estanque prismático. Luego, el contenido de vacíos será la relación entre el volumen de huecos con respecto al volumen total expresado en porcentaje (ACI Committee 522, 2010).

La permeabilidad de la muestra está directamente relacionada con la porosidad del material y el tamaño del agregado grueso utilizado. En esta investigación no fue posible la fabricación o utilización de un permeámetro para generar una circulación de agua a través de una probeta cilíndrica durante un tiempo determinado y determinar la permeabilidad de las muestras. Sin embargo, diversos autores han representado gráficamente la relación entre la permeabilidad del hormigón poroso y el contenido de vacíos (ACI Committee 522, 2010), lo que puede entregar un rango de la permeabilidad de las muestras en relación con el contenido de vacíos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Características físicas de la mezcla de hormigón ecológico.

Inicialmente se realiza un ensayo de mezcla de un hormigón permeable sin utilizar agregado grueso tamizado, se utiliza una grava de un diámetro promedio de 30 mm aproximadamente y se deja reposar durante 7 días. Con los resultados visibles del prototipo (ver Figura 10), se opta por utilizar árido tamizado con un diámetro entre 4,75 y 12,5 mm para facilitar la trabajabilidad y obtener superficies más uniformes.



Figura 10. Comparación de bloques de hormigón permeable con árido promedio de 30 mm (izquierda) y con árido entre 4,75 mm y 12,5 mm (derecha).

Las dosificaciones para todas las variaciones de mezcla se presentan en la Tabla 1 y se calcularon las cantidades para el volumen de todos los elementos a hormigonar. No fue posible la utilización de una máquina de mezclado tipo betonera ya que la baja fluidez de la mezcla en estado fresco no permitió la correcta mixtura de todos los elementos ya que estos se quedaban adheridos a las paredes de la betonera, por lo que se debió vaciar la mezcla en una capa de polietileno y realizar el mezclado manualmente con una pala de acero.

Las mezclas que incluyeron barros conox como parte de reemplazo de material cementante, cambiaron su aspecto físico adoptando una tonalidad de color café, distinto del color gris del cemento convencional (ver Figura 11), las mezclas que incluyeron cenizas de biomasa no variaron la tonalidad del elemento.

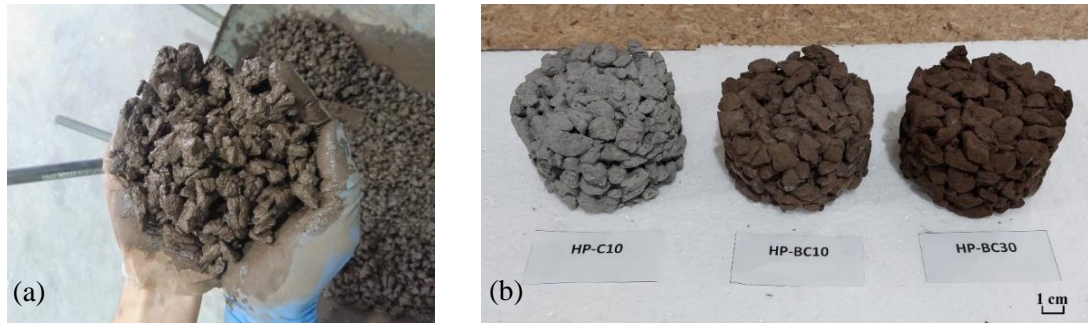


Figura 11. Aspecto físico de mezclas de hormigón ecológico. (a) Aspecto de mezcla HP-BC10 en estado fresco. (b) Contraste de muestras cilíndricas elaboradas según diferentes dosificaciones.

3.2 Resistencia a la compresión.

Las probetas de hormigón ecológico presentaron una falla por aplastamiento, exhibiendo inicialmente grietas en las caras de los bloques y luego comienza un desmoronamiento de fracciones de grava suelta o en conjunto debido a la acción del aglomerante en la mezcla (ver Figura 12b). Todas las probetas de todas las mezclas presentaron el mismo mecanismo de falla al ejecutar las pruebas de resistencia a compresión.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a compresión axial para las tres mezclas de hormigón ecológico a la edad de 7 y 21 días cada una (ver Figura 12a).

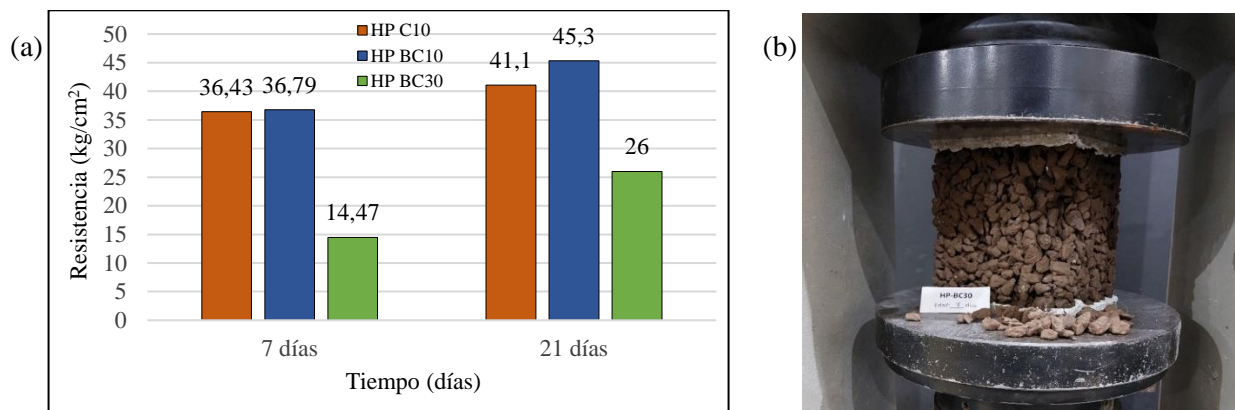


Figura 12. (a) Resultados obtenidos de la resistencia a compresión para diferentes mezclas de hormigón ecológico. (b) Falla en elemento sometido a compresión axial.

Como se aprecia en la Figura 12a, todas las mezclas aumentaron su resistencia a compresión a una edad mayor de ser ensayadas: la mezcla HP-C10 aumentó su resistencia en un 13%, la mezcla HP-BC10 aumentó su resistencia en un 23%, mientras que la resistencia de la mezcla HP-BC30 aumentó en un 80%.

Cabe mencionar que se apreció *in situ* durante los ensayos que la calidad del curado de las probetas y el correcto secado del refrentado de las caras a ensayar pudo haber afectado directamente las tensiones que admitían las probetas. Si el sellado y curado no era apropiado, las probetas de hormigón adoptaban una textura más opaca y frágil al tacto, disgregando partículas de grava con facilidad. Por otra parte, si el refrentado no se alcanzaba a secar correctamente el día de ensayo de las probetas, éste tendía a agrietarse y desprenderse, conllevando a

que la máquina de ensayo a compresión detectara una falla y diera por finalizado el ensayo. En consecuencia, esto puede dar una primera indicación de la variación en el porcentaje de aumento de resistencia a la compresión entre las distintas mezclas, ya que en los ensayos de 21 días de edad de las mezclas HP-C10 y HP-BC10 la capa de refrentado no presentaba seca en su totalidad, no así en el ensayo de la mezcla HP-BC30 que alcanzó un correcto secado.

3.3 Densidad y cantidad de vacíos.

La densidad teórica es igual para todas las mezclas de hormigón poroso debido a la sumatoria de los elementos que componen sus dosificaciones. Por otra parte, para la medición de la densidad experimental, se midieron las dimensiones de un bloque de hormigón ecológico y la masa del mismo para obtener el valor de la densidad lograda. Se realizó un promedio de los resultados de las densidades experimentales para los tres bloques de las distintas dosificaciones medidas obteniendo una media de $1661,8 \text{ kg/m}^3$ y los resultados y comparaciones individuales se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Densidad de las mezclas de hormigón ecológico.

Mezcla	Método de determinación	
	Teórico (kg/m^3)	Experimental (kg/m^3)
HP-C10	1784,25	1662,04
HP-BC10	1784,25	1647,84
HP-BC30	1784,25	1675,77

La porosidad de los bloques de hormigón ecológico obtenida como el volumen de huecos con respecto al volumen total de la muestra da un porcentaje medio del 35% por elemento, permitiendo que los elementos de hormigón confeccionados presenten una alta tasa de permeabilidad para la filtración de agua a través del elemento. El ACI Committee 522 (2010) señala que con un contenido de vacíos inferior al 15% se cree que no hay suficiente interconectividad de los huecos para una buena permeabilidad, sin embargo, mientras mayor sea la porosidad del hormigón la resistencia a compresión será menor.

Con este índice de la cantidad de aire en las probetas, podemos relacionar a un valor típico de la tasa de permeabilidad que se ha planteado en reportes anteriores (ACI Committee 522, 2010) según la gráfica de la Figura 13. Esto permite estimar un coeficiente de permeabilidad en el rango de 3,4 a 4,25 cm/s para los elementos de hormigón ecológico fabricados en esta investigación, siendo mayor que los valores típicos de permeabilidad para este tipo de hormigones, que van desde 0,2 a 0,54 cm/s y con tasas de hasta 1,2 cm/s y superiores que se han medido en laboratorio (Tennis *et al.*, 2004).

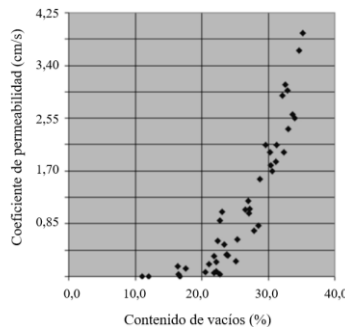


Figura 13. Relación entre el coeficiente de permeabilidad y contenido de aire de un hormigón permeable. (Adaptado de “Report on Pervious Concrete” (p. 12), por ACI Committee 522, 2010).

3.4 Crecimiento de especies herbáceas y valor de pH.

Luego de que todas las semillas fuesen sembradas en los distintos pastelones con mezclas de hormigón ecológico en conjunto del sustrato, se mantuvieron humectadas con agua y cubiertas de una membrana de polietileno, mientras se observaba y registraba el avance en la germinación de especies. Los pastelones se mantuvieron en un sector con luz solar y temperaturas promedio de 18°C durante el día, y 8°C durante la noche con una humedad relativa media de 65%.

Las semillas de pasto fueron las primeras en germinar y lograr pequeños crecimientos, logrando ser visibles al 7^{mo} día de plantación con una altura media inferior a 1 cm en los pastelones de mezcla HP-C10 y HP-BC10, mientras que en el pastelón de mezcla HP-BC30 presentaban una altura media máxima de 1,5 cm con una leve mayor densidad. Al 9^{no} día la densidad y altura en todos los pastelones era mayor a 3 cm y levemente mayor en la mezcla HP-BC30. En general las semillas de pasto tenían una tendencia de rápido crecimiento (ver Figura 14).

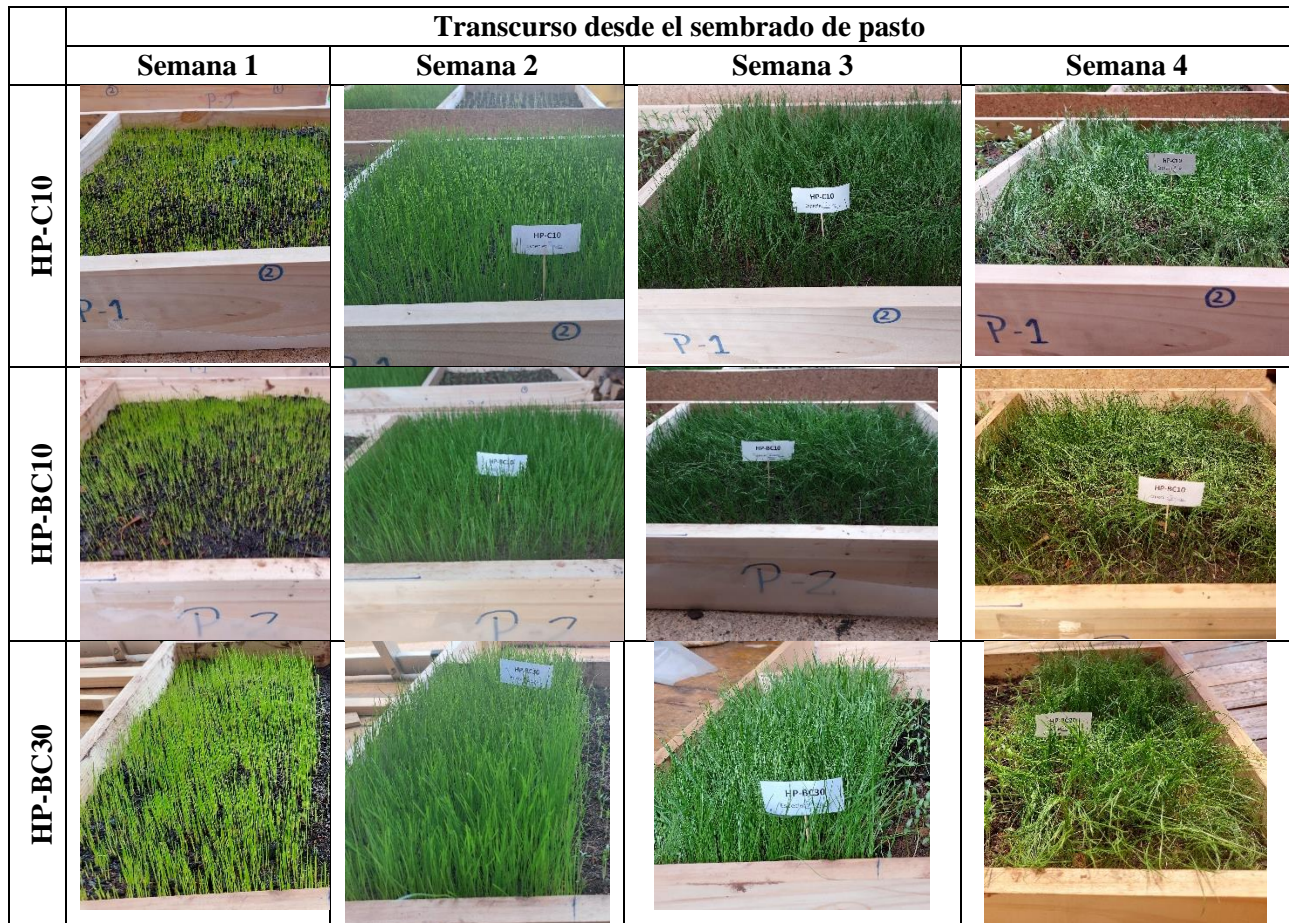


Figura 14. Progreso en el desarrollo de pasto en pastelones de hormigón ecológico durante cuatro semanas desde el sembrado.

Por su parte, la germinación y el primer brote de cilantro logra ser visible al 9^{no} día desde el sembrado en sólo una planta en la mezcla HP-BC30. Ya al 11^{vo} día se logran ver brotes en la mayoría de las semillas en todos los pastelones de mezcla de hormigón. Las especies de cilantro mostraron un crecimiento más tardío en comparación con el pasto. (ver Figura 15).

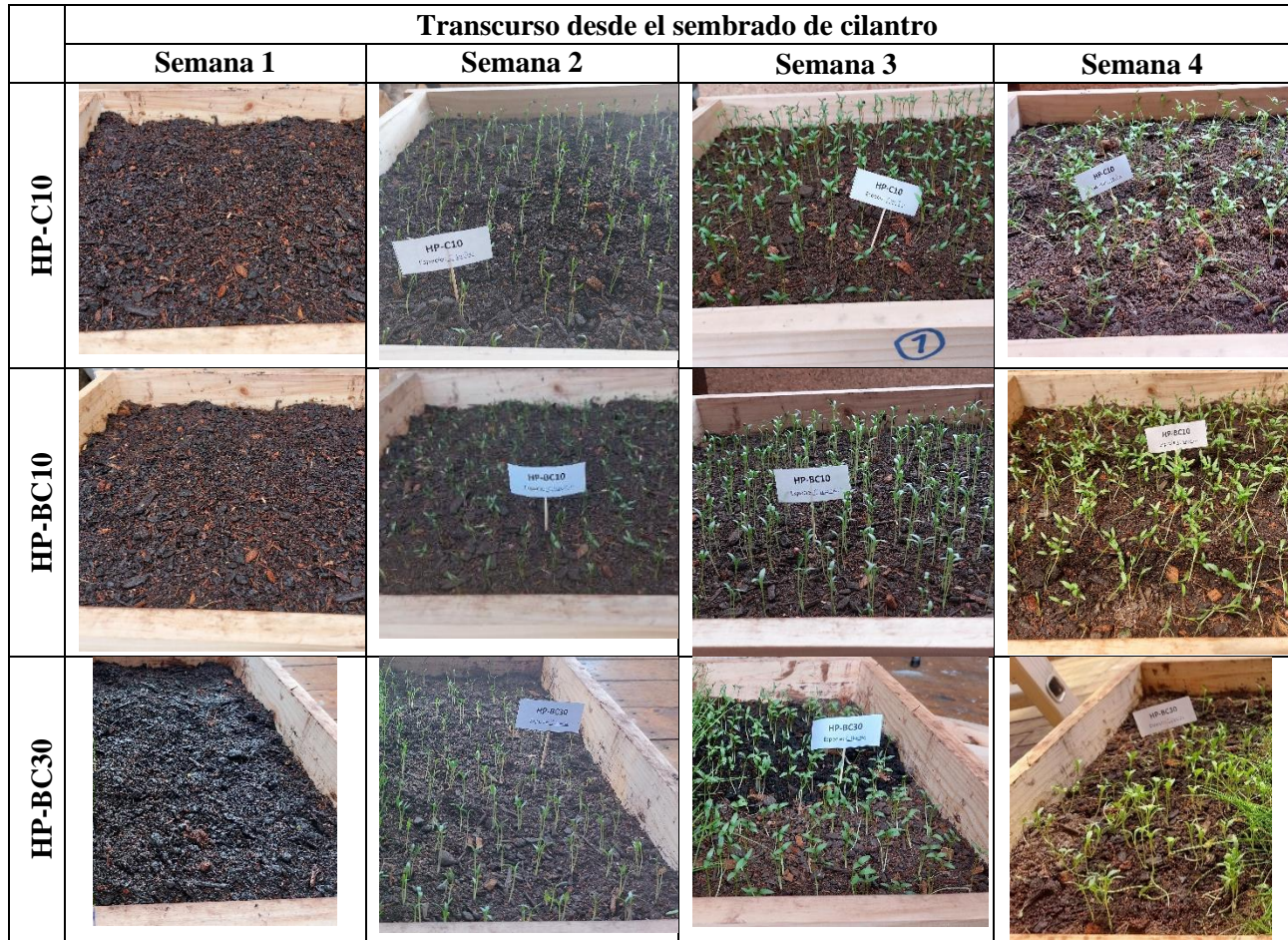


Figura 15. Progreso en el desarrollo de cilantro en pastelones de hormigón ecológico durante cuatro semanas desde el sembrado.

Dos semanas después de la siembra ya es notoria la germinación de las semillas en todos los pastelones de hormigón ecológico presentando alturas de crecimiento de 2 a 4 cm en las hierbas de cilantro, mientras la altura del pasto va desde 6 a 9 cm. A la tercera semana desde el sembrado las plantas de cilantro presentan mayor desarrollo en el pastelón de mezcla HP-C10 con una altura media de 6 cm, seguido de la mezcla HP-BC10 que presentan alturas de 4 a 5 cm y se presencian algunas semillas que recién comienzan a brotar, mientras que en el pastelón de mezcla HP-BC30 existen algunas plantas caídas y la altura se encuentra en el rango de 3 a 5 cm. La Figura 16 muestra los resultados de la longitud de crecimiento de la vegetación para cada especie con respecto al avance del tiempo.

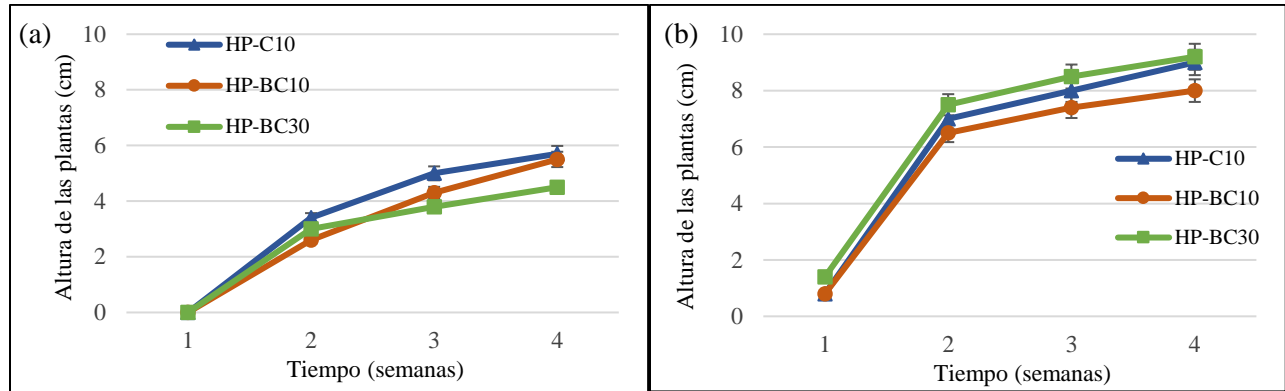


Figura 16. Gráfica de altura promedio alcanzada por las plantas. (a) Altura de plantas de cilantro. (b) Altura de plantas de pasto.

Cabe mencionar que la manera de medir el crecimiento de las plantas se realizó midiendo con una regla graduada la altura desde la rasante del sustrato vegetal hasta la punta de la hierba (ver Figura 17), tomando valores promedios ya que no todas las plantas registran la misma medida.

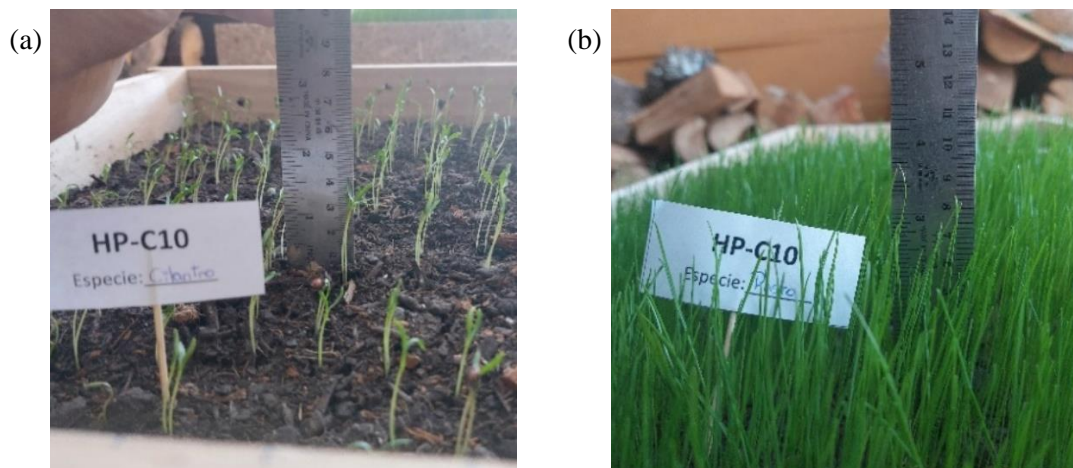


Figura 17. Altura alcanzada por las hierbas en el pastelón de mezcla HP-C10 medida a la segunda semana desde el sembrado. (a) Hierbas de cilantro. (b) Hierbas de pasto.

Para apreciar el desarrollo del sistema radicular de las hierbas a través de los poros de hormigón ecológico, se observa la sección transversal de los pastelones ecologizados a la cuarta semana de crecimiento. Al examinar no se logran apreciar aún las raíces de las hierbas de cilantro, sin embargo, el pasto que registra un mayor desarrollo se logra observar que las raíces aún son esbeltas y la ramificación es pequeña a la cuarta semana. El sistema radicular más desarrollado corresponde a las hierbas de pasto sobre el pastelón de mezcla HP-BC30 que a su vez es el que presenta una leve mayor altura (+1cm) por sobre los otros pastelones (ver Figura 18).

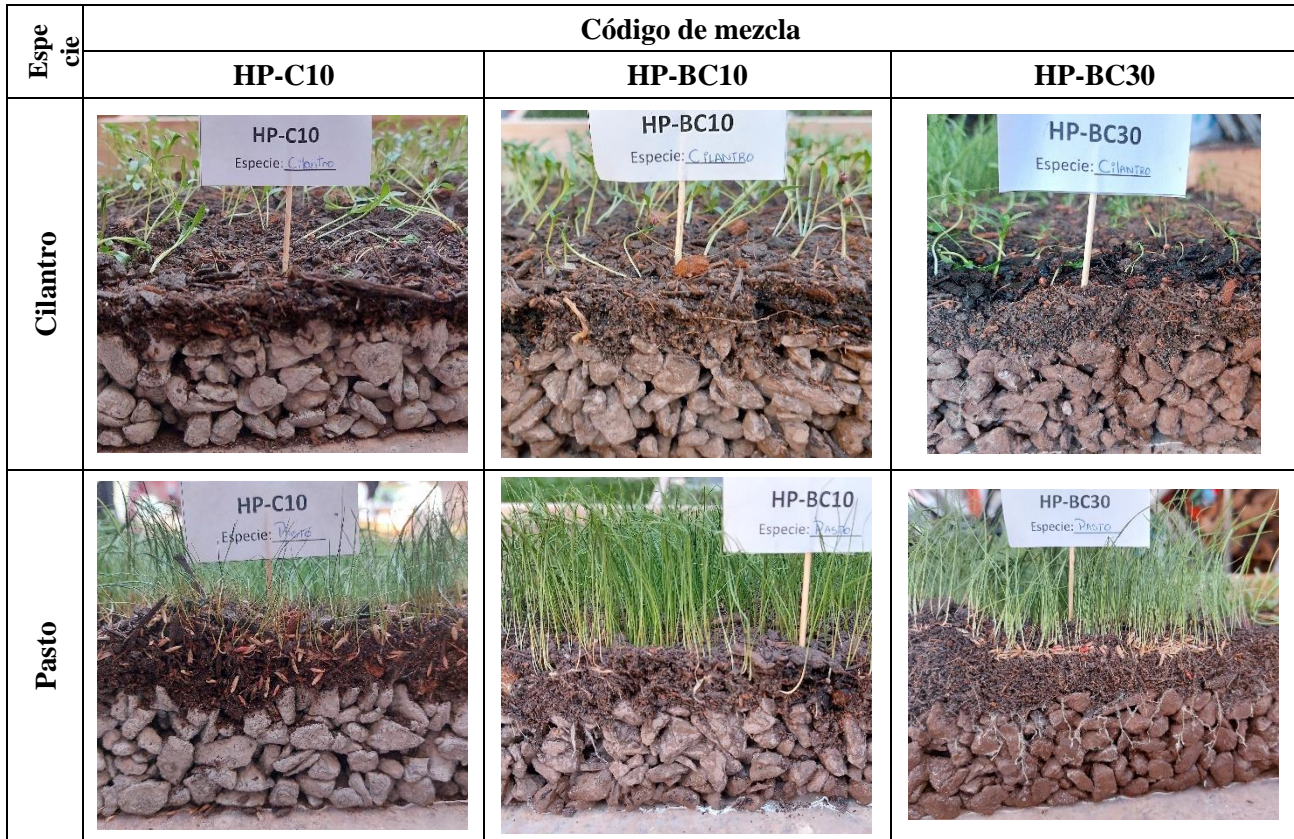


Figura 18. Sistema radicular en pastelones de hormigón ecológico a la cuarta semana de sembrado.

Por otra parte, los valores de pH de las muestras fueron obtenidos en laboratorio a los restos de las muestras ensayadas a compresión a la edad de 7 y 21 días para así tener conocimiento si existe variación del valor del pH con el avance del tiempo, y además manejar el rango de alcalinidad que poseen los pastelones de hormigón ecológico que influyen en el desarrollo de la vegetación. El sustrato vegetal del entorno de las semillas y el cemento utilizados en las mezclas obtuvieron un valor de pH de 7,65 y 11,87 respectivamente, los valores de la alcalinidad de las muestras de hormigón se aprecian en la Figura 19.

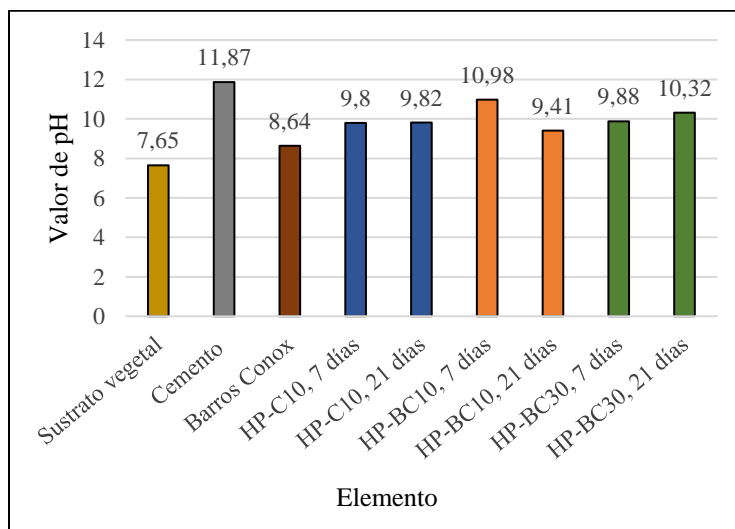


Figura 19. Resultados de los valores de pH alcanzados.

El sustrato vegetal que acoge a las semillas presenta un valor de pH adecuado para el cultivo y crecimiento de las plantas, lo que les permite germinar sin mayor dificultad y aportando nutrientes. Por su parte las muestras de hormigón ecológico con reemplazo de cemento del 10% presentaron valores del rango de 9,41 a 10,98 siendo menores que el valor de pH del cemento por sí solo, y presentando una media de 9,85 de valor de pH a la edad de 21 días.

El valor de pH a los 21 días en la mezcla HP-C10 logra alcanzar el valor más bajo de 9,41. Este valor obtenido está en el rango comprendido por investigaciones anteriores como el estudio de Cheng *et al.* (2020) donde el valor más bajo es de 9,5 utilizando adiciones de cenizas volantes y humo de sílice para reducir la alcalinidad de los especímenes de hormigón y lograr un correcto desarrollo vegetacional. La investigación realizada por Li *et al.* (2022) logra bajar el nivel de pH hasta 8,5 en un grupo de hormigón permeable debido a la utilización de un aditivo diseñado en la Sichuan Agriculture University empleado para reducir la alcalinidad del hormigón, compuesto principalmente por Nano-Calcium Carbonate (Nano-CaCO₃) y nitrógeno, entre otros compuestos químicos.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha llevado a cabo la caracterización de un hormigón ecológico, estudiando las tensiones que logran admitir en los ensayos de compresión a los que se sometieron las probetas, en el valor de pH y el nivel de ecologización sobre pastelones de hormigón ecológico, observando el desarrollo de dos hierbas sembradas. Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

- 1) Las características físicas obtenidas por la utilización de árido grueso en un rango de tamaño entre 4,75 y 12,5 mm son favorables por sobre áridos con un tamaño mayor, otorgando una mayor uniformidad a la superficie ya que al utilizar áridos más gruesos implica obtener superficies demasiado rugosas.
- 2) La adición de los elementos sustitutivos de cemento utilizados en esta investigación fue óptima en la proporción de 10% de reemplazo de cemento, ya que presentaron mejores resultados de resistencia a compresión alcanzando un valor promedio de 43,2 kg/cm² a la edad de 21 días.
- 3) Un reemplazo de cemento del 30% no mejoró significativamente el nivel de crecimiento de las hierbas analizadas ni aminoró los valores de pH de la mezcla de manera importante con respecto al resto de dosificaciones. La resistencia a compresión para esta dosificación disminuyó en aproximadamente un 60% en comparación a las otras mezclas.
- 4) La incorporación de una capa de sustrato vegetal resultó exitosa para el desarrollo de las hierbas seleccionadas aportando las condiciones iniciales para el brote de las semillas. Luego las hierbas lograron sobrevivir y crecer en el entorno del hormigón poroso en las tres variaciones de mezcla utilizadas durante el período de 4 semanas que fueron observadas.
- 5) El sistema radicular de las hierbas sembradas logra atravesar la estructura a través de los poros y logra instaurar una evaluación preliminar de su ramificación en el corto plazo de apreciación.

Finalmente, se concluye que es factible la fabricación de un hormigón ecológico con fines de incrementar la tasa de reverdecimiento, proporcionando una conectividad de ecosistemas y proporcionar mayor

permeabilidad a elementos de construcción. Los resultados obtenidos proporcionan información preliminar para futuras investigaciones y se debe profundizar más el estudio de este tipo de hormigones para mejorar las dosificaciones según el objetivo que se desee aplicar.

5. REFERENCIAS

- ACI Committee 522. (2010). *522R-10: Report on Pervious Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Bao, X., Liao, W., Dong, Z., Wang, S. & Tang, W. (2017). Development of Vegetation-Pervious Concrete in Grid Beam System for Soil Slope Protection. *Materials*, 10(2), 96.
- Cheng, J., Luo, X., Shen, Z. & Guo, X. (2020). Study on Vegetation Concrete Technology for Slope Protection and Greening Engineering. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(6), 4017-4028.
- Correa, V., & Mejía, A. (2015). Indicadores de contaminación visual y sus efectos en la población. *Enfoque UTE*, 6(3), 115-132.
- DAPCO. (2014). *Declaración Ambiental de Productos: Barra de Acero de Refuerzo*. CAP Acero. https://www.capacero.cl/cap_acero/site/artic/20180628/asocfile/20180628161248/03_dapco_capacero_barraa440_280h_a630_420h_version_extendida_v3.pdf
- Díaz, A., Herrera, T., & Marrero, I. (2020). *Estudio de las características del hormigón permeable y su implementación en el Uruguay* [Tesis de grado]. Universidad de la República.
- Huaquisto, S., & Belizario, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(2), 225-234
- Instituto Nacional de Normalización. (2010). *Hormigón - Refrentado de probetas* (NCh 1172.Of2010).
- International Organization for Standardization. (2018). *Testing methods for pervious concrete — Part 2: Density and void content*. (ISO 17785-2:2018(E)).
- Li, C., Zhao, S., Zhou, H., Liu, C. & Zhang, Y. (2019). A Review of Research Progress of Vegetation Concrete on Coastal Highway Slope. *Journal of Coastal Research*, 94(sp1), 367.
- Li, D., Tao, Y., Mou, S., Lyu, B., Lin, W., Zeng, C., Li, N., Zhang, X., Guo, L., & Chen, Q. (2022). Investigating planting concrete suitability by evaluating the physiological indexes of three ground cover plants. *Applied Sciences*, 12(2), 645.
- Li, L., Zhang, H., Zhou, X., Chen, M., Lu, L., & Cheng, X. (2019). Effects of super absorbent polymer on scouring resistance and water retention performance of soil for growing plants in ecological concrete. *Ecological Engineering*, 138, 237–247.
- Mitchell, D. (2010). *Concrete decor*. Obtenido de Decorative Options for Pervious Concrete: <https://www.concretedecor.net/departments/concrete-placing/decorative-options-for-pervious-concrete/>
- Paine, J. (1992). Portland Cement Pervious Pavement Construction. *Concrete Construction*, 655 – 659.



Tennis, P. D., Leming, M. L., & Akers, D. J. (2004). Pervious Concrete Pavements. *Portland Cement Association, EB302*, 36.

Washington Concrete. (s.f.). Obtenido de Pervious Concrete: <https://www.washingtonconcrete.org/pervious-concrete>

Zhao, M., Jia, Y., Yuan, L., Qiu, J., & Xie, C. (2019). Experimental study on the vegetation characteristics of biochar-modified vegetation concrete. *Construction and Building Materials, 206*, 321–328.