

UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DE CUENCA

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN CONSTRUCCIONES CON MENCIÓN EN
ADMINISTRACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN
SUSTENTABLE**

**HYDRAULIC CONCRETE DESIGN WITH BIOCHAR:
DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON
BIOCARBÓN**

**INFORME DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN CONSTRUCCIONES MENCIÓN EN
ADMINISTRACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE**

AUTOR: ANDRÉS SEBASTIÁN ZALAMEA SUÁREZ

DIRECTOR: LUIS MARIO ALMACHE SÁNCHEZ

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA

Comunidad Educativa al Servicio del Pueblo

UNIDAD ACADÉMICA DE POSGRADO

**MAESTRÍA EN CONSTRUCCIONES CON MENCIÓN EN
ADMINISTRACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN
SUSTENTABLE**

HYDRAULIC CONCRETE DESIGN WITH BIOCHAR: DISEÑO DE
HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN

**INFORME DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE MAGISTER EN CONSTRUCCIONES MENCIÓN EN
ADMINISTRACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN SUSTENTABLE**

AUTOR: ANDRÉS SEBASTIÁN ZALAMEA SUÁREZ

DIRECTOR: LUIS MARIO ALMACHE SÁNCHEZ

CUENCA - ECUADOR

2022

DIOS, PATRIA, CULTURA Y DESARROLLO

Certificación de Asesores

Se certifica que:

El informe de investigación “Diseño de hormigón hidráulico con biocarbón”, de autoría del Señor Ing. Civ. Andrés Sebastián Zalamea Suárez, CC: 0302057914, ecuatoriano, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel o Posgrado correspondiente a Magíster en Construcciones con mención en Administración de la Construcción Sustentable, cumple con la caracterización y estructura (parte protocolaria y parte expositiva) y se sujeta a la normativa pertinente exigida por el Consejo de Educación Superior, CES y la Universidad Católica de Cuenca, en consecuencia, se autoriza su presentación para los trámites pertinentes.

Santa Ana de los Cuatro Ríos de Cuenca
Diciembre, 2022.

Luis Mario Almache Sánchez
Asesor Científico

Certificación de Autoría

Certifico que:

“Diseño de hormigón hidráulico con biocarbón”, es el tema del informe final de investigación de mi AUTORÍA, previo a la obtención del Título de Cuarto Nivel o Posgrado correspondiente a Magíster en Construcciones con mención en Administración de la Construcción Sustentable, por lo que, asumo su originalidad y el uso de fuentes de terceros registrados según las normas APA vigentes.

Santa Ana de los Cuatro Ríos de Cuenca
Diciembre, 2022.

Andrés Sebastián Zalamea Suárez
CC: 0302057914

Agradecimiento

A la vida por darme la oportunidad de transitar y desarrollarme en este espacio y tiempo.

A mi esposa, a mis padres, a mis hermanos y a mis amigos.

Al Ing. Luis Mario Almache Sánchez, al Ing. Manuel Alvarez Vera y al Ing. Eléctrico Juan Carlos Cobos Torres, PhD por su participación en este trabajo.

A la Universidad Católica de Cuenca, que me ha dado la oportunidad de seguirme preparando y mejorando académicamente.

Finalmente, agradezco al proyecto de investigación “SECUESTRADOR DE CARBONO MEDIANTE ENERGÍAS RENOVABLES” de donde se obtuvo el biocarbón y brindó apoyo y seguimiento durante el proceso.

Andrés Sebastián Zalamea Suárez

Dedicatoria

A mi esposa María Caridad Amoroso Monsalve, a mis padres Cecilia y Galo, a mis hermanos Pedro y Juan y a todos mis amigos y hermanos de vida. Por su apoyo y enseñanzas.

Andrés Sebastián Zalamea Suárez

RESUMEN.

La búsqueda creciente por reutilizar la biomasa residual, ha llevado a desarrollar alternativas que produzcan un menor impacto ambiental; una de estas es el biocarbón o biochar. Esta investigación propone reducir el impacto ambiental de los materiales como cemento, mortero u hormigones hidráulicos, mediante el encapsulamiento de carbono estable en el biocarbón, sin afectar el rendimiento de estos materiales de construcción, y así determinar la aplicabilidad del biocarbón producido actualmente en nuestra región y su incorporación en hormigones hidráulicos. La metodología consiste en una revisión bibliográfica de investigaciones similares, para conocer dosificaciones de materiales usados en experimentos similares y factores que intervienen en el proceso. Se sistematizó la información sobre la materia prima para la elaboración de los hormigones. Posteriormente, se diseñó el hormigón base y los concretos en los que se adicionó el biocarbón. Se procedió a la elaboración de las probetas de hormigón y el curado de las mismas. Se ensayó las probetas a carga axial. Se utilizó dosificaciones adicionales de biocarbón en porcentajes de 1.5%, 3.0%, 4.5% y 25.0% obteniéndose un incremento de la resistencia a compresión del hormigón a los 28 días de 19%, 15%, 14% y -77%, respectivamente, en comparación con la resistencia del hormigón de control al que no se adicionó biocarbón. En conclusión, el uso de biocarbón incrementa la resistencia a compresión en el hormigón para un rango de dosificaciones. Futuras investigaciones podrían revisar el comportamiento del hormigón para dosificaciones de adición de biocarbón entre 0.1% y 2.0%, con respecto al peso de cemento que permitirá una posible optimización de sus características; así como investigar las propiedades y beneficios de estos hormigones descritas en los párrafos posteriores. La viabilidad comercial del biocarbón en compuestos de cemento dependería de factores tales como, la disponibilidad de materia prima, el tipo de materia prima, la escala de producción, entre otros. Algunas investigaciones informan que para el análisis de costos y beneficios el hormigón con biocarbón añadido podría generar resultados económicos netos positivos.

Palabras clave: Biocarbón, Hormigón, Resistencia a Compresión, Sustentabilidad, Construcción.

ABSTRACT.

The growing search to reuse residual biomass has led to the development of alternatives that produce less environmental impact; one of these is biochar or biochar. This research proposes to reduce the environmental impact of materials such as cement, mortar or hydraulic concrete, through the encapsulation of stable carbon in the biochar, without affecting the performance of these construction materials, and thus determine the applicability of the biochar currently produced in our region. and its incorporation in hydraulic concretes. The methodology consists of a bibliographical review of similar investigations, to know dosages of materials used in similar experiments and factors that intervene in the process. The information on the raw material for the production of concrete was systematized. Subsequently, the base concrete and the concretes in which the biochar was added were designed. We proceeded to the elaboration of the concrete specimens and their curing. The specimens were tested under axial load. Added dosages of biochar were used in percentages of 1.5%, 3.0%, 4.5% and 25.0%, obtaining an increase in the compressive strength of the concrete at 28 days of 19%, 15%, 14% and -77%. , respectively, compared to the strength of the control concrete to which no biochar was added. In conclusion, the use of biochar increases the compressive strength in concrete for a range of dosages. Future research could review the behavior of concrete for biochar addition dosages between 0.1% and 2.0%, with respect to the weight of cement, which will allow a possible optimization of its characteristics; as well as investigate the properties and benefits of these concretes described in the following paragraphs. The commercial viability of biochar in cement compounds would depend on factors such as the availability of raw material, the type of raw material, the scale of production, among others. Some research reports that for cost-benefit analysis, biochar-added concrete could generate net positive economic results.

Keywords: Biochar, Concrete, Compressive Strength, Sustainability, Construction.

Índice

Contenido

1.	Capítulo 1. Introducción.....	10
1.1.	Antecedentes y justificación.....	10
1.2.	Estado del arte.....	14
1.2.1.	Generalidades.....	14
1.2.2.	Características y propiedades del mortero y el hormigón con adición de biocarbón	16
1.2.2.1.	Influencia en la trabajabilidad, densidad y porosidad.....	16
1.2.2.2.	Influencia en la resistencia a la compresión	16
1.2.2.3.	Influencia en la contracción por fraguado	17
1.2.2.4.	Influencia en la permeabilidad	18
1.2.2.5.	Aplicaciones potenciales del hormigón con adición de biocarbón.....	18
1.2.2.6.	Aspectos ambientales para la mitigación del impacto ambiental.....	19
1.2.2.7.	Aspectos económicos del biocarbón.....	21
2.	Capítulo 2. Metodología	24
2.1.	Diseño.....	24
2.2.	Procedimiento.....	24
2.3.	Equipos y materiales.....	25
2.3.1.	Cemento	25
2.3.2.	Arena	26
2.3.3.	Grava	28
2.3.4.	Aditivo plastificante	29
2.3.5.	Agua	29
2.3.6.	Biocarbón.....	29
2.4.	Diseño de la dosificación del hormigón.....	32

2.5. Confección, curado y ensayo de compresión de las probetas de hormigón	33
3. Capítulo 3. Resultados	34
4. Capítulo 4. Análisis y discusión	38
5. Capítulo 5. Conclusiones.....	44
6. Bibliografía	48
7. ANEXOS	54
Informes de laboratorio.....	54

Índice de figuras

Figura 1 Contracción por secado del mortero.....	17
Figura 2 Curva granulométrica arena	28
Figura 3 Curva granulométrica grava	29
Figura 4 Curva granulométrica del biocarbón y cemento	31
Figura 5 Imágenes del proceso de elaboración, curado y ensayo a compresión de probetas.....	36
Figura 6 Esquema de estructura y capilaridades del hormigón	39

Índice de ilustraciones

Ilustración 1 Resultados de ensayos de laboratorio de resistencia a compresión..	35
---	----

Índice de tablas

Tabla 1 Propiedades físicas del cemento utilizado y valores establecidos en la norma INEN 2380.....	25
Tabla 2 Análisis granulométrico por lavado - arena (ASTM C 33)	27
Tabla 3 Análisis granulométrico por lavado - grava (ASTM C 33).....	28
Tabla 4 Resultados de laboratorio - propiedades físicas y químicas del biocarbón .	32

Tabla 5 Dosificaciones de control y mezcla de hormigón con biocarbón de adición	34
Tabla 6 Resultados de ensayos de laboratorio de densidad y resistencia a compresión	36
Tabla 7 Relación agua cemento vs. resistencia del hormigón	42

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes y justificación

¿Qué se supone que debemos hacer ante una crisis ecológica que no se parece a ninguna crisis bélica o económica que hayamos conocido y a cuya escala, si bien sin duda es formidable, estamos de algún modo acostumbrados porque su origen es humano, demasiado humano? (Latour, 2012)

La construcción incluida su industria asociada, es la responsable del consumo de más del 40% de recursos naturales, de un 30% de energía y el 30% de las emisiones de gases de efecto invernadero (Mercader-Moyano et al., 2010). En lo referente al dispendio de recursos, la construcción de edificios consume el 40% de roca, arena y gravilla; además, del 16% del agua utilizada anualmente en el mundo (Guerrero et al. 2016; Mena et al., 2015; Cárdenas et al., 2015). En la Unión Europea, esta misma actividad consume el 40% de los materiales, el 40% de la energía primaria y genera el 40% de los residuos (Mercader-Moyano et al., 2010). Esto causa el deterioro de la Tierra, agotamiento de los recursos, contaminación del aire y agua, contaminación acústica y la generación de residuos, además de la transformación del medio (Guerrero et al., 2016).

Esta huella visible y perdurable que representa el ambiente construido en el planeta, se debe principalmente a que la industria de la construcción se basa en un modelo de producción de ciclo abierto, que se caracteriza por el consumo de materias primas y la generación de residuos (Suppen, 2013). Estudios han determinado que por cada metro cuadrado de construcción habitable en el mundo ingresan a la obra 2.500 kg de materiales con una gran cantidad de impactos ambientales asociados y la energía para la fabricación de éstos, supone un consumo de unos 6.000 MJ (1.670 kWh) equivalentes a 150 litros de gasolina (Wadel et al., 2010), situación que a su vez implica una emisión media de 0,5 toneladas de Dióxido de Carbono o CO₂ (Zabalza Bribián et al., 2011).

Es importante recalcar que los materiales utilizados para la estructura de los edificios representan más del 50% de la energía incorporada en la edificación, se hace esta puntualización ya que las estructuras de los edificios suelen ser mayoritariamente

de acero u hormigón (Asif et al., 2007).

El hormigón es el material de construcción más empleado en el mundo, detrás del agua, es el producto más consumido del planeta (Domenech, 2007); Se estima una producción anual de este material en 1,5 m³ por habitante del planeta Arias et al. (2012), supone a su vez, el empleo de 1,6 billones de toneladas de cemento, 10 billones de toneladas de roca y arena y un billón de toneladas de agua (Sanguinetti et al., 2014), así como un alto consumo de combustibles fósiles (Arias et al., 2012). En este contexto, se destaca también que los combustibles fósiles y la manufactura del cemento son responsables de más del 75% del incremento del CO₂ atmosférico, desde el periodo preindustrial del siglo XVIII a la producción del cemento portland, se le atribuye más del 8% del CO₂ derivado de las actividades humanas a nivel global (Suppen, 2013). Esta alta tasa de utilización de los recursos minerales y del medio ambiente, así como las emisiones de gases de efecto invernadero GEI, derivado de la industria de la construcción supone una disminución del potencial de los recursos para las generaciones futuras (Aldana Barrera, 2012). Se informa también en lo referente al hormigón que se gastan 332 mil millones de dólares que representa la producción anual de cuatro mil millones de toneladas de hormigón (Making Concrete Change: Innovation in Low-Carbon Cement and Concrete | Chatham House – International Affairs Think Tank, 2018).

El aumento de las emisiones globales de CO₂ intensifica los efectos del calentamiento global que afectan el clima, la población humana e incluso la vida de otras especies (Watts, 2019). De ahí la necesidad imperiosa de transformar las directrices de producción y consumo, desde los procesos abiertos generadores de residuos hacia procesos de ciclos cerrados, que propendan a la optimización de recursos y respeto al medio ambiente (Fernández, 2003).

Se conoce como biomasa a una fuente de energía renovable basada en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica, en un pasado inmediato o de los productos derivados de ésta. Se considera también biomasa la materia orgánica de las aguas residuales, así como la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos, aunque dadas las características específicas de estos residuos, se suelen considerar como un grupo aparte (Fernández, 2003). La búsqueda creciente por

reutilizar la biomasa residual, ha llevado a desarrollar metodologías alternativas que produzcan un menor impacto ambiental (Escalante Rebolledo et al., 2016).

Una metodología usada y estudiada en la actualidad, es el uso de componentes de base biológica que es el caso del biocarbón o biochar, que se produce por la transformación mediante la combustión incompleta o parcialmente anaeróbica; comúnmente denominada pirólisis de la biomasa a temperaturas de 300-650 °C. El resultado de este proceso es un material rico en contenido de carbono y cenizas, que actualmente se usa mayoritariamente devolviéndola al suelo para mejorar las condiciones del mismo (Gilces Reyna, 2014). La pirólisis evita que la materia orgánica reaccione con el oxígeno a medida que se descompone. El resultado es una estructura de carbono sólido que encapsula el carbono de la materia orgánica, lo que reduce la descomposición de la materia y la formación final de metano o CH₄, monóxido de carbono o CO, gases que producen un impacto ambiental negativo al incorporarse en la atmósfera (Wu et al., 2009).

Cuando la materia orgánica se deposita en rellenos sanitarios y se deja descomponer, el subproducto natural de este proceso es una gran cantidad de gas, denominado landfill gas o gas de relleno sanitario. Los microorganismos que descomponen la materia orgánica liberan CO₂ y CH₄ en el proceso. La composición del gas de relleno sanitario consiste en un 99,9% de CH₄ y CO₂, con un pequeño porcentaje de compuestos orgánicos distintos del CH₄. Aproximadamente, la mitad del 99,9% es gas CH₄ y la otra mitad es CO₂. Esto hace que el landfill gas sea una gran fuente de contaminación; el landfill gas se clasifica como la tercera fuente mundial de emisiones de CH₄ de origen humano. Se sabe que el CH₄ es de 28 a 36 veces más eficaz para atrapar el calor que el CO₂, por lo que es una amenaza muy dañina del medio ambiente. Como se puede observar, utilizar materia orgánica para producir biocarbón puede reducir el impacto ambiental evitando grandes cantidades de CH₄ y CO₂ entrando en la atmósfera y proporcionando una solución a las emisiones globales (Basic Information about Landfill Gas | Landfill Methane Outreach Program (LMOP) | US EPA, 2016).

Considerando entonces estos impactos, por un lado, el impacto ambiental generado por la explotación de recursos para la elaboración de cemento y por otro lado la

contaminación generada naturalmente de la descomposición de la biomasa de origen antropogénico o no, necesarias investigaciones aparecen para dar alternativas ambientales que permitan la mitigación del impacto ambiental generado. Así, Gupta et al., (2017) y Shao et al., (2006) proponen reducir el impacto ambiental de los materiales asociados al cemento, mortero u hormigones hidráulicos, mediante el secuestro, retención o encapsulamiento de carbono estable en el biocarbón sin afectar el rendimiento del material.

El uso de biocarbón en los materiales de construcción reducirá gran parte de las emisiones de efecto invernadero, la contaminación producto de la elaboración del hormigón convencional y el tratamiento de los residuos orgánicos. Al secuestrar el carbono de los materiales de desecho orgánicos, el biocarbón reduce las emisiones de CH₄ y CO₂ liberadas por el gas de los rellenos sanitarios. Si todos los desechos orgánicos de los rellenos sanitarios se convirtieran en biocarbón, la reducción del gas en los rellenos sanitarios equivaldría a una posible reducción global del 11% en las emisiones de CH₄ de origen humano (Yang et al., 2017).

Roberts et al., (2010) informan que según el tipo de materia prima y las condiciones de preparación utilizadas, el biocarbón tiene el potencial de reducir las emisiones netas de GEI en alrededor de 870 kg de CO₂ equivalente (CO₂-eq) por tonelada de materia prima seca, de la cual el 62-66% se realiza a partir de la captura y el almacenamiento de carbono.

Además, la adición de biocarbón en bloques de hormigón reduciría la cantidad de cemento usado y, por lo tanto, disminuiría el CO₂ liberado en el proceso. El ladrillo propuesto por Jackalope Team, se compone de tres partes de biocarbón y una parte de cemento Portland. Si estos ladrillos compuestos se escalan globalmente, existe la posibilidad de una disminución del 6% en las emisiones globales originales de CO₂ y del 8% de las emisiones producidas a partir de la elaboración de cemento (Basic Information about Landfill Gas | Landfill Methane Outreach Program (LMOP) | US EPA, 2016). El uso del biocarbón reduciría también la explotación de materiales minerales como la caliza, que se usa actualmente para la producción de cemento (Muñoz et al., 2011).

Es necesario resaltar que es probable que esto se convierta en una preocupación más seria en el futuro con la creciente demanda de materiales (Müller et al., 2007). Se proyecta para el año 2050 un incremento de un 260% en comparación con las emisiones generadas en el año de 1990 de CO₂ producidas por la elaboración del cemento, de no tomar medidas para la reducción de estas emisiones. Y la repercusión directa de estas emisiones en el calentamiento global.

1.2. Estado del arte

1.2.1. Generalidades

Los hormigones hidráulicos son conglomerados de cementantes, agregados y agua. Convencional o tradicionalmente, se elaboran con cemento, arena, grava y agua; sin embargo, desde sus orígenes, para el uso de este material de construcción, se ha utilizado diferentes materiales en remplazo para mejorar sus características. Al respecto existen muchas investigaciones publicadas, sin embargo, el desarrollo de este campo es necesario e innovador porque responde a necesidades de la construcción, requerimientos sociales e incluso a políticas ambientales. Además, por su lugar de origen y características particulares, es preciso determinar la aplicabilidad del biocarbón, ya que, podrían presentar un comportamiento diferente al adicionarlo al hormigón como producto final.

La elaboración y el uso de los morteros adicionando materiales reciclados data casi de los propios orígenes de los morteros, como lo enuncia Furlan et al. (1975). Según investigaciones realizadas en el siglo X a.C., ya se evidencia la adición de materiales como ladrillo y cerámicos triturados en morteros de cal que evidencian el mejoramiento de su resistencia. En construcciones romanas, se aplicaba material de escorias procedentes de los hornos y se obtenían similares características de resistencia (Petrement et al., 2012). Después de la Segunda Guerra Mundial, se potencia también el uso de residuos reciclados no tradicionales en sustitución del árido de los morteros y hormigones para desalojar la gran acumulación de escombros de las ciudades destruidas. En Inglaterra, Alemania y Rusia, se incorporó los escombros de los edificios, previamente tratados (reciclados), a los hormigones y, en menor medida, a los morteros de cemento, investigaciones que concluyen cuando se agotaron esos escombros (Hincapié Henao et al., 2003).

Choi et al., (2012) exploraron el uso de biocarbón como reemplazo parcial del cemento entre un 5% y un 20% en peso. Ahmad et al., (2015) produjeron biocarbón de bambú, para luego agregarlo en un porcentaje entre 0,05 - 0,20% en peso y elaborar mortero de cemento. Restuccia et al., (2016) y Restuccia et al., (2017), también informaron de su investigación con biocarbón producto de la cáscara de avellana y usado para la elaboración de morteros. Gupta et al., (2017) informan una mejora en las propiedades físicas del mortero de cemento reforzado con fibra, cuando las fibras de polipropileno (PP) se recubren con micro partículas de biocarbón. Se atribuyó a una unión mejorada entre la fibra de PP y la matriz de cemento debido a la densificación por micro partículas de biocarbón.

El trabajo realizado con biocarbón por Maxwell Barton y otros con el nombre de su equipo de investigación Jackalope Team, consiste en el uso de biocarbón como materia prima, en este caso para elaborar ladrillos similares a los convencionales. La composición del mortero es 50% de biocarbón, 30% de arcilla y 20% de arena, y sirve como alternativa al aislamiento de espuma de poliestireno. Este tipo de mortero permite que las casas, se conviertan en filtros de carbono ya que absorben olores y toxinas. Por tanto, tiene potencial para ser implementado en hospitales, fábricas y lugares residenciales, entre otros edificios. Como se mencionó anteriormente, la capacidad de absorción de agua y la baja conductividad térmica permite que el mortero de biocarbón sea un sustituto ideal para aislamiento (Ithaka Institute - Building Material, 2015).

El biocarbón se puede utilizar con residuos plásticos para crear ladrillos y reducir también los residuos plásticos globales. Esta fue una de las rutas que exploró el equipo Jackalope para ver la viabilidad del bloque convencional en comparación con el mortero de biocarbón. Así mismo, proponen el uso del biocarbón como material reciclado para la construcción de bloques con mortero hidráulico (Barton et al., 2020). Finalmente Akhtar et al., (2018), estudiaron la resistencia y la absorción de agua del hormigón con biocarbón, derivado de desechos de aves de corral, cascarilla de arroz y lodos de la industria papelera, agregado el 0,1% en reemplazo del volumen total de cemento.

1.2.2. Características y propiedades del mortero y el hormigón con adición de biocarbón

Para realizar un estudio completo del caso, esta investigación presenta también las características y propiedades del material presentadas en otras investigaciones que permiten al lector recoger la información con más profundidad los efectos producidos por la adición de biocarbón para ser considerada en conjunto y que a más de responder dudas que podrían existir con respecto a las características del material justifican y respaldan la sustentabilidad del material.

1.2.2.1. Influencia en la trabajabilidad, densidad y porosidad

La trabajabilidad y fluidez de la mezcla fresca de hormigón es función principalmente de la cantidad de agua agregada a la mezcla, comúnmente se cuantifica como relación agua/cemento. Existen otros factores que afectan también la trabajabilidad del hormigón como es el porcentaje de absorción de agua de los agregados, la forma de los agregados, su módulo de finura, entre otros (Aïssoun et al., 2016).

Gupta et al., (2018) informan que, con una adición de 1,0% - 2,0% de biocarbón en morteros, no se afecta significativamente la trabajabilidad y aumenta la densidad con morteros que tienen un 6,95% de porosidad, en comparación con el 7,82% de porosidad del mortero de control. Así mismo, sostienen que la estructura del mortero elaborado con una adición de 1,0% - 2,0% de biocarbón, determinada por espectroscopia de rayos X, presenta una menor cantidad de poros abiertos y capilaridades en el hormigón.

1.2.2.2. Influencia en la resistencia a la compresión

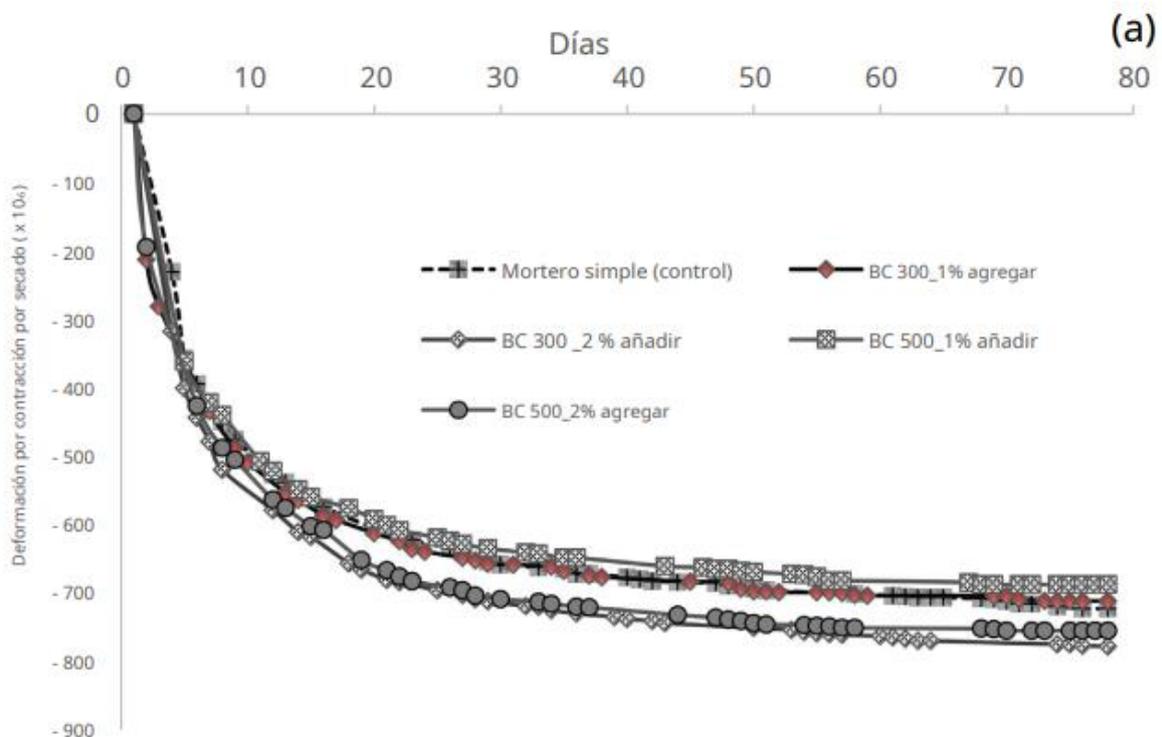
Es necesario indicar que el comportamiento del hormigón entre su dosificación y su resistencia a compresión no es un comportamiento lineal por lo que es necesario confeccionar y ensayar varias dosificaciones para conocer su la realidad. Además, la naturaleza de los materiales utilizados por su origen y propiedades generaran múltiples resultados diferentes por lo que es necesario realizar este trabajo una vez se tenga las opciones disponibles de materia prima para utilizar.

1.2.2.3. Influencia en la contracción por fraguado

Gupta et al., (2018) informan que el mortero preparado con 1% en peso de biocarbón muestra una contracción por fraguado similar a la del mortero de control. Se confirma, además, un perfil de pérdida de masa similar en el mortero de control y en el mortero que contiene biocarbón, lo que significa que la velocidad de fraguado no se ve afectada por la adición de biocarbón. El mismo autor y sus colaboradores indican que la mayor parte de la contracción por fraguado adicional, en el mortero que contenía biocarbón, tuvo lugar en una etapa temprana, típicamente entre uno y cuatro días de edad.

Resultados similares fueron reportados por Naik et al., (2003) con ceniza de desecho de madera: la contracción temprana a los siete días aumentó con una dosis más alta de ceniza de desecho de madera, aunque hubo una reducción en la contracción a largo plazo, a la edad de doscientos treintaidós días.

Figura 1 Contracción por secado del mortero



Fuente: (Gupta, Kua, y Pang, 2018)

1.2.2.4. Influencia en la permeabilidad

Según Gupta et al., (2018), los resultados de sorción, penetración de agua y permeabilidad se reducen en morteros que contienen biocarbón. En las primeras 6 h, la sorción del mortero que contenía 1% en peso de biocarbón elaborados a 300°C y 500°C, se redujo 68% y 41%, respectivamente, en comparación con el mortero simple. La alta reducción en la sorción inicial puede atribuirse a la naturaleza hidrofílica del biocarbón, que redujo el agua libre en la matriz del mortero por sorción, lo que significa que habría una menor cantidad de agua evaporable que formaría poros capilares. El mismo estudio informa también que la tasa de sorción del biocarbón de manera libre, sin estar mezclado dentro del hormigón, le permite una sorción del 80% del adsorbato total en un tiempo de 6 horas, y que la sorción del 100% del adsorbato se produce en un tiempo de 24 horas aproximadamente. La adición de 1% - 2% en peso de biocarbón reduce significativamente la sorción total de agua (en porcentaje) y la sorción inicial del mortero. También se concluye que la sorción secundaria no se reduce con la adición de biocarbón, lo que se atribuye a la sorción de agua por los poros del biocarbón.

Esto significa que la construcción con hormigón mixto de biocarbón reduce la filtración de agua a través de la sorción capilar responsable del crecimiento de moho y gérmenes en el ambiente interior.

1.2.2.5. Aplicaciones potenciales del hormigón con adición de biocarbón

Existen múltiples aplicaciones para este material en el campo de la construcción. Debido a su mayor grado de impermeabilidad, se puede recomendar para usos donde haya mayor susceptibilidad al intemperismo, conociendo que este efecto proporcionará una mayor durabilidad o alargará la vida útil del hormigón. Si se considera también la capacidad de purificación del aire debido al potencial del biocarbón para eliminar los vapores de metales, en particular el mercurio elemental (HgO), los gases ácidos (H₂S, SO₂, CO₂), el ozono y los óxidos de nitrógeno (NO_x) y contaminantes orgánicos, incluidos compuestos aromáticos, compuestos orgánicos volátiles y sustancias olorosas, presentes en el medio como lo señala Gwenzi et al., (2021), se puede recomendar el uso en elementos de pared delgada que tengan una

mayor área expuesta, como es la construcción de muros en edificios o estructuras especiales cuando forman parte de la ventilación de una edificación. Otra de las capacidades potenciales del material es la resistencia al fuego y baja conductividad térmica que puede ser explotada en varias aplicaciones (Ithaka Institute - Building Material, 2015). Para morteros, se ha recomendado el uso como agente de unión entre materiales de construcción y en trabajos de enlucido. Debido a sus excelentes propiedades mecánicas, la aplicación de biocarbón puede extenderse al desarrollo de mezclas de hormigón proyectado para el revestimiento de túneles y construcciones subterráneas.

El potencial uso del hormigón con adición de biocarbón y su viabilidad comercial como material de construcción está en función de varios factores, incluida la disponibilidad local de la materia prima, su origen y características, la escala de producción y técnicas alternativas de gestión de los residuos.

1.2.2.6. Aspectos ambientales para la mitigación del impacto ambiental

El objetivo principal de la adición del biocarbón en el hormigón es poder aportar en el campo de la construcción sustentable. Sentar los primeros pasos en este campo, para que se continúe con esta línea de investigación en el Ecuador. Además, se evaluar la reducción del impacto ambiental de los materiales propuestos y de otros materiales similares, que se puedan reciclar en la región; es entonces, el fin que se pretende alcanzar.

En cuanto a la reducción del impacto ambiental el método más utilizado debido a su estandarización y a la posibilidad que ofrece de comparar los resultados es el denominado Análisis de Ciclo de Vida o por sus siglas en Ingles LCA descrito más ampliamente en Shanmugam et al., (2021) y Matuščík et al., (2020). Con el uso de este método existen algunas investigaciones que analizan el uso de biocarbón en morteros u hormigones y son presentadas para ser consideradas.

Campos et al., (2020) trabajan con adiciones de biocarbón entre 0% y 20% de peso con relación al peso de cemento. Informan que el aumento de la cantidad de

biocarbón minimizaba el agotamiento del ozono, la toxicidad (aire, agua, suelo) y mejora la formación de ozono. Los impactos en otras categorías como el calentamiento global, la acidificación, la eutrofización terrestre y acuática también se redujeron significativamente.

Gupta et al., (2018) realizaron un extenso estudio sobre la utilización de biocarbón derivado de aserrín de madera mixto, como aditivo para capturar carbono en el hormigón. Una parte del biocarbón se saturó con CO₂ y se agregó al concreto. En el estudio se analizó el efecto del biocarbón saturado e insaturado sobre la emisión de gases de efecto invernadero y el potencial del calentamiento global. Los resultados mostraron que la aplicación de biocarbón redujo las emisiones de CO₂ y disminuyó la liberación de CH₄, NO_x y SO_x durante la producción. El potencial de calentamiento global neto para el hormigón sin biocarbón fue de 7,8 kg CO₂-eq, mientras que se registraron 6,65 kg CO₂-eq y 6,63 kg CO₂-eq para mezclas con adición de biocarbón saturadas e insaturadas, respectivamente. En otro trabajo, los mismos autores utilizaron residuos de biocarbón de cáscara de maní para mejorar las propiedades del mortero de cemento. La sustitución del 3% del cemento por biocarbón redujo significativamente la emisión de CO₂ (Gupta et al., 2021).

Además, Suarez (2018) afirmó que la sustitución del 2% de cemento por biocarbón para la producción 1 m³ de mortero resulta en una reducción de 67 kg de CO₂ atmosférico.

De esta forma, se prevé que la adición de biocarbón al cemento podría contribuir a la disminución de NO₂, reduciendo considerablemente el impacto ambiental; sin embargo, la investigación en esta área es limitada. El análisis LCA revisado demuestra que la inclusión de biocarbón en el hormigón presenta una alternativa ambiental para la industria de la construcción; por lo tanto, su implementación mitigará los problemas de calentamiento global.

1.2.2.7. Aspectos económicos del biocarbón

La presente investigación no ejecuta un cálculo de costos de la producción de biocarbón en Ecuador y su aplicación en mortero u hormigones para la industria de la construcción local.

Se conoce que la empresa Holcim, asociada con Geocycle en Ecuador, utiliza procesos para el tratamiento de residuos que son incluidos en el Clinker del cemento para la elaboración del cemento; este proceso recicla la biomasa adicionándola a la producción del cemento, sin embargo, deberá tener otras consideraciones porque es un proceso diferente al estudiado. Dentro de la información compartida en su página web, se encuentran datos tales como que Geocycle gestiona más de 10 millones de toneladas de residuos al año a nivel global, también informan de las reducciones de emisiones netas de CO₂ entre los años de 1990 y 2020 con 713 Kg CO₂ neto / tonelada de material cementante y 552 Kg CO₂ neto / tonelada de material cementante, respectivamente, lo que significa un 22% de reducción de emisiones de CO₂. Los procesos utilizados y los resultados de estos procesos carecen de acceso público. Holcim utiliza residuos de algunos rellenos sanitarios, entre los que se evidencia los provenientes del relleno sanitario de Pichacay de la ciudad de Cuenca, Ecuador.

Convertir los desechos de biomasa en biocarbón agregaría valor a los desechos de biomasa generados localmente, reduciría el espacio utilizado por los vertederos, extendería la vida útil de estos últimos y evitaría el costo de eliminación de basura. Sin embargo, establecer una instalación de pirólisis para producir biocarbón generaría un costo adicional.

Varios estudios informan sobre el costo del biocarbón al considerar la disponibilidad, la producción y la aplicación en los campos (Restuccia et al., 2017); (Shackley et al., 2011); (Huang et al., 2015). Por ejemplo, Shackley et al. (2011) presentaron una revisión exhaustiva del costo del biocarbón, según tres escalas diferentes de producción: grande (185.000 toneladas secas al horno de biocarbón/año), mediana (16.000 toneladas secas al horno de biocarbón/año) y pequeña (2.000 toneladas secas al horno de biocarbón/año). El costo del biocarbón, incluido el transporte de producción y la aplicación en el campo, se ha estimado entre

222 y 584 USD / tonelada. Del mismo modo, Huang et al., (2015) informaron que la producción de biocarbón, a partir de desechos avícolas, costaría alrededor de 297 USD / tonelada, sin considerar la electricidad generada durante la producción.

Gupta et al., (2018) informan de un resultado similar en el aspecto económico, considerando como los principales factores de costos: la inversión en las instalaciones, el alquiler del espacio, el costo de la mano de obra, la tarifa eléctrica y una tarifa mensual general. Los mismos autores suponen que el costo del transporte de materia prima a la instalación de pirólisis sería similar al de una planta de incineración y, por lo tanto, no lo considera en el análisis económico comparativo. El cálculo de costos mostró que la producción de biocarbón por pirólisis de desechos de madera incurre en un costo positivo neto alrededor de USD 303 y USD 484,20 por tonelada de biocarbón elaborados a 300°C y 500°C respectivamente.

Chen et al., (2022) presentan un análisis de costos y beneficios, que indica que el hormigón con biocarbón añadido podría generar beneficios económicos netos positivos. Teniendo en cuenta el rendimiento mecánico, la disponibilidad de recursos, las emisiones negativas de CO₂ y las ganancias económicas, el hormigón con biocarbón como agregado y metacaolín como aglutinante en peso con relación al peso de cemento en un 30% y un 9%, respectivamente; podría secuestrar 59 kg de CO₂/ton y generar potencialmente una ganancia total de 35,4 USD/m³.

Los análisis del costo beneficio deberán ser estudiado para su aplicación, conociendo que los costos de producción son variables en relación con la localización geográfica, la escala de las economías, el costo de la energía, el precio de la mano de obra, la tecnología disponible y otros factores que intervienen en este proceso. Además, el costo final del material mixto deberá evaluarse con respecto a un material que tenga propiedades similares, para que la unidad de estudio sea la adecuada.

Es necesario señalar que empresas como Holcim están implementando el uso de biomasa y su incorporación en el cemento, proceso que resulta sostenible considerando la trayectoria de esta empresa. Sin embargo, no es posible establecer una comparación porque se trata de procesos distintos.

Esto significa que el costo calculado puede reducirse y depende del proceso que se utilice para la producción de diferentes tipos de material y de la escala de producción. Es importante notar también que dependiendo de la cantidad de biocarbón utilizado el peso del costo en el hormigón tendrá una menor o mayor incidencia, en el caso de hormigones con una adición de biocarbón con un 2,0% o menor el incremento del costo no será significativo. Además, para ciertos procesos podría considerarse también la cogeneración de biopetróleo y biogás.

Capítulo 2. Metodología

2.1. Diseño

La presente investigación se define según la finalidad como aplicada (Lozada, 2014), pues mediante los conocimientos previos de fabricación de hormigones se adicionó biocarbón en la mezcla. Se busca determinar la posible implementación de este material en hormigones hidráulicos, solucionando problemas concretos de la realidad del Ecuador y del mundo; especialmente, en materia de la construcción sustentable. El alcance temporal es longitudinal prospectiva (Mousalli, 2015) pues la toma de las muestras y ensayos se realizaron a lo largo del tiempo. En función a la profundidad es explicativa (Lecca, 2014) debido a que, se analizó el comportamiento de la variabilidad del hormigón en densidad y resistencia a la compresión según la dosificación establecida y la adición de biocarbón, es de carácter cuantitativo, debido a que todos los datos serán cuantificables. Finalmente, es de naturaleza experimental (Bravo, 1994) por los ensayos de laboratorio ejecutados.

2.2. Procedimiento

Procedimiento de la investigación:

- Etapa 1:

Se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones similares que permita conocer el estado de las investigaciones en este campo, la dosificación de biocarbón usado en otros experimentos, los procesos y factores que intervienen en la producción del hormigón con biocarbón, y los resultados obtenidos con la finalidad de establecer comparaciones.

- Etapa 2:

Se levantó la información necesaria y complementaria de la materia prima: ensayos de granulometría, determinación del módulo de finura del agregado fino, determinación de pesos específicos de los materiales usados y otros factores necesarios para el diseño del hormigón.

- Etapa 3:

Se diseñó la dosificación del hormigón base y los hormigones a los que se adicionan el biocarbón, utilizando el método ACI.

- Etapa 4:

Se procedió a la elaboración de las probetas de hormigón y el curado de las mismas.

- Etapa 5:

Se ensayó las probetas a compresión, en la prensa hidráulica, con la finalidad de obtener los datos de resistencia a la compresión y se determinó las densidades de los hormigones endurecidos.

2.3. Equipos y materiales

Los equipos usados para esta investigación son los descritos en cada una de las normas utilizadas y citadas que serán indicadas más adelante, en la sección destinada a describir la confección, curado y ensayo de compresión de las probetas.

Los materiales utilizados para la elaboración de los hormigones son:

- Cemento.
- Agregado fino, arena.
- Agregado grueso, grava.
- Agua.
- Aditivo plastificante, Sika Plastocrete 161 HE.
- Biocarbón.

2.3.1. Cemento

Se utilizó el cemento ordinario cuya disponibilidad es abundante en la mayor parte de los comercios locales. En la ficha técnica del cemento utilizado, se especifica que está compuesto por Clinker de cemento portland, sulfato de calcio y una o más adiciones de puzolanas naturales, tipo GU, o de uso general, conforme a la Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 2380 (INEN, 2011), que equivale a la ASTM C 1157. La composición química y algunas propiedades físicas como densidad, finura, entre otros, no están publicadas por la marca. Las propiedades físicas publicadas son presentadas en la Tabla 1.

Tabla 1 Propiedades físicas del cemento utilizado y valores establecidos en la norma

INEN 2380

Parámetros considerados	INEN 2380	Valor referencial
Cambio de longitud por autoclave. % máximo	0,80	-0,06
Tiempo de fraguado inicial, método Vivcat		
No menos de, minutos	45	190
No más de, minutos	420	
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	A	3
Resistencia a la compresión, Mpa, mínimo		
1 día	A	9
3 día	13	17
7 día	20	22
28 día	28	31
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0,020	0,002

Fuente: (Holcim, 2022). Elaboración: Propia

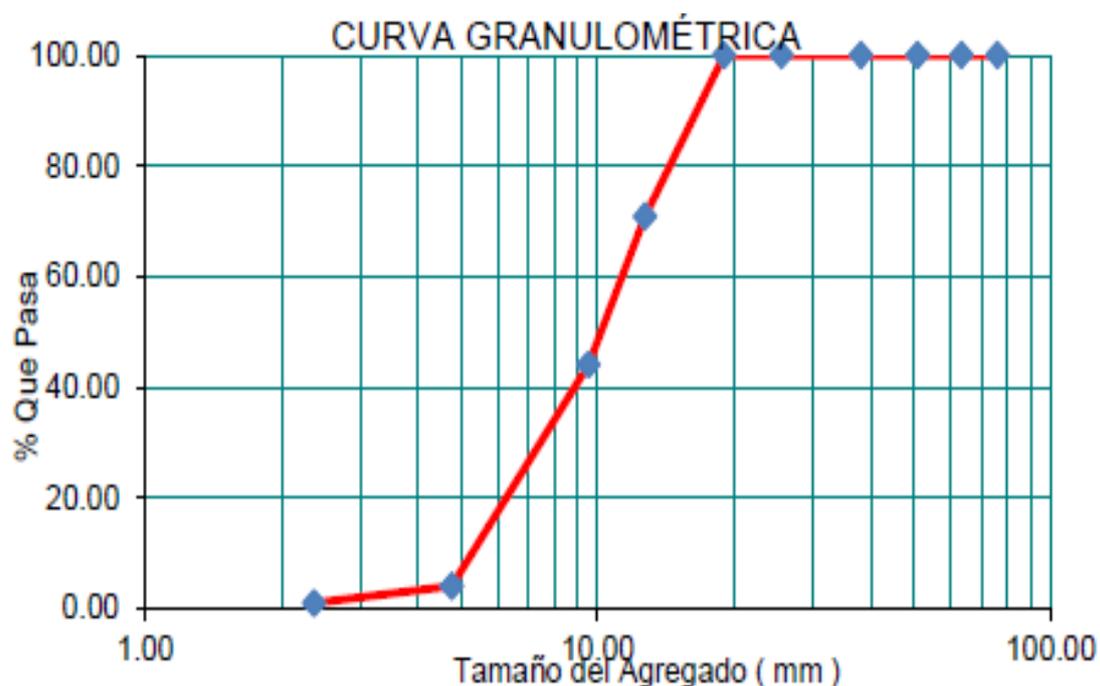
2.3.2. Arena

En la preparación del mortero se utilizó arena de río que está disponible localmente. El módulo de finura y la gravedad específica saturada seca superficialmente (gesss) de la arena son 3,04 y 2,63, respectivamente. La gradación cumple con la norma ASTM C33 (C33/C33M-18, 2018). La Tabla 2 y la Figura 2 muestran las propiedades de la arena.

Tabla 2 Análisis granulométrico por lavado - arena (ASTM C 33)

Tamiz	Abertura	Ret. Parcial	Ret. Acumulado		% Que Pasa
	mm	gramos	gramos	%	
3"	76,2	0	0	0	100
2½"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1½"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	0	0	0	100
¾"	19	0	0	0	100
½"	12,7	0	0	0	100
⅜"	9,53	0	0	0	100
Nº4	4,75	11,5	11,5	1,2	98,8
Nº8	2,36	164,1	175,6	18,35	81,65
Nº16	1,18	169	373,8	39,07	60,93
Nº30	0,6	261,7	635,5	66,43	33,57
Nº40	0,43	100,3	735,8	76,91	23,09
Nº50	0,3	71,2	807	84,35	15,65
Nº100	0,15	95,5	902,5	94,33	5,67
Nº200	0,075	42,4	944,9	98,87	1,23
PASA 200		11,8			
Resumen:					
Grava =	1,20%	Arena =	97,57%	Finos =	1,23%

Fuente y Elaboración: propia

Figura 2 Curva granulométrica arena

Fuente y Elaboración: propia

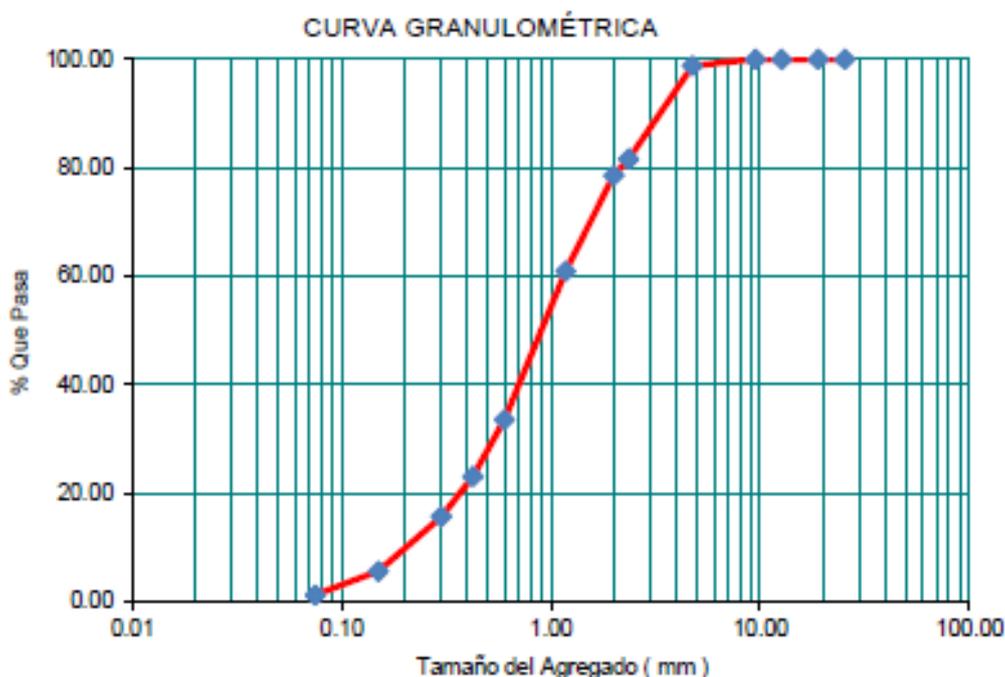
2.3.3. Grava

Se utilizó grava triturada disponible localmente. La gesss de la grava es 2,67. La gradación cumple con la norma ASTM C33(C33/C33M-18, 2018). La tabla 3 y la figura 3 muestran las propiedades de la arena.

Tabla 3 Análisis granulométrico por lavado - grava (ASTM C 33)

Tamiz	Abertura mm	Ret. Parcial gramos	Ret. Acumulado gramos	% %	% Que Pasa
3"	76,2	0	0	0	100
2½"	63,5	0	0	0	100
2"	50,8	0	0	0	100
1½"	38,1	0	0	0	100
1"	25,4	0	0	0	100
¾"	19	0	0	0	100
½"	12,7	754	754	29,15	70,85
⅜"	9,53	692	1.446	55,89	44,11
N°4	4,75	1.037	2.483	95,98	4,02
N°8	2,36	80	2.563	99,07	0,93
PASA N°8		24			
Resumen:					
Grava =	96%	Arena =	4,02%	Finos =	0,00%

Fuente y Elaboración: propia

Figura 3 Curva granulométrica grava

Fuente y Elaboración: propia

2.3.4. Aditivo plastificante

Se usó aditivo plastificante, Sika Plastocrete 161 HE, aditivo químico reductor de agua y acelerante de resistencias, conforme a ASTM C494 tipo E (ASTM, 1999), con la finalidad de lograr suficiente trabajabilidad durante la mezcla y como reductor de agua.

2.3.5. Agua

El agua usada para la mezcla de los materiales cumple con lo establecido en el American Concrete Institute (ACI 318-14) (ACI [American Concrete Institute], 2014).

2.3.6. Biocarbón

El biocarbón utilizado para la investigación tiene su origen en el material leñoso de ramas de árboles de acacia o con su nombre científico *Acacia Scorpioides*, podadas que crecen en la región de Cuenca, provincia del Azuay, Ecuador.

La madera fue procesada usando el proceso de pirólisis a 350°C. Para someter al material al proceso de pirólisis, se verificó que esté completamente seco. La velocidad

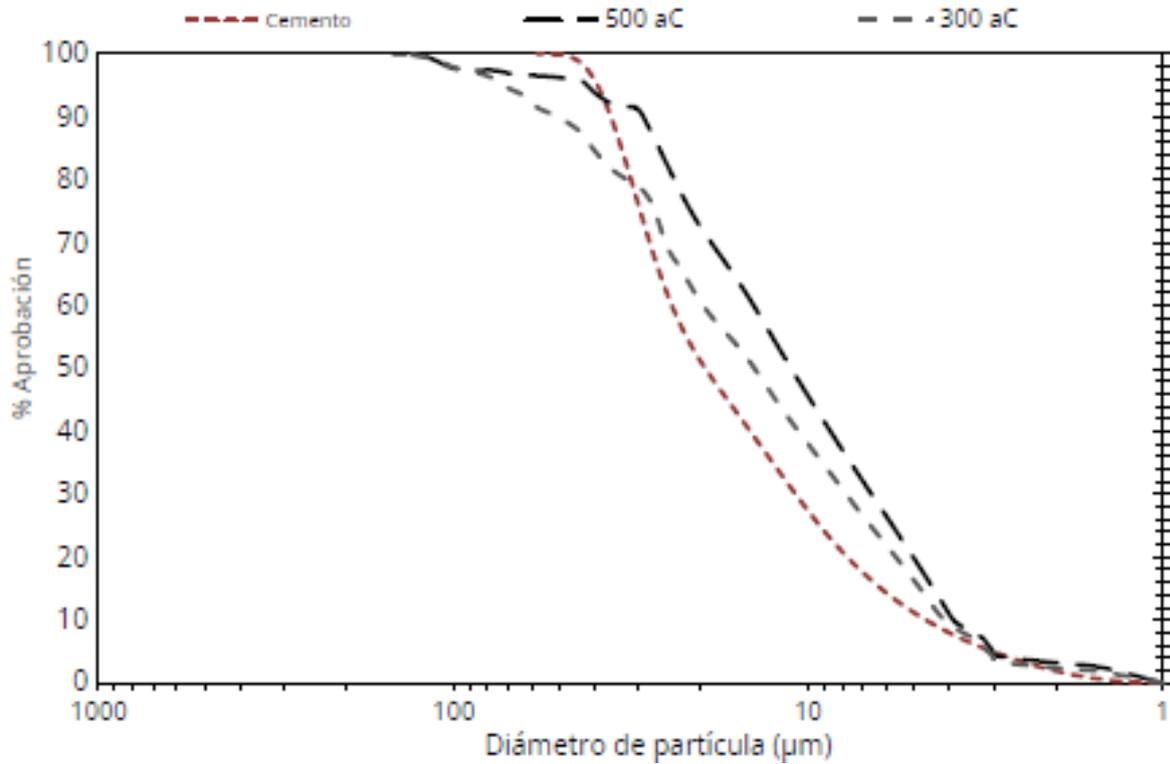
de calentamiento se mantuvo a 10 °C/min. hasta que se alcanzó la temperatura de pirólisis y luego se mantuvo la misma temperatura durante 240 minutos. Es importante indicar que en la bibliografía revisada se indica que para ciertos casos es necesario que el horno esté equipado con un respiradero, ya que esta disposición evita que los vapores y los compuestos volátiles se depositen en la superficie del biocarbón producido.

El material usado de biocarbón presentaba partículas de tipo angular (con aristas, no redondeadas) con un diámetro promedio de 5 cm. La forma y el tamaño del material se deben a la morfología propia de las ramas que se utilizaron, ya que antes de empezar el proceso de pirólisis la madera fue cortada hasta obtener partículas del tamaño descrito.

Para esta investigación se recibió el material en forma de biocarbón, por esta razón no se realiza mayor descripción de la producción del biocarbón.

Las partículas de biocarbón fueron reducidas a partículas más pequeñas, utilizando un apisonador manual, de manera similar a lo realizado por Gupta et al., (2018), quienes dentro de sus resultados establecen por espectroscopia de rayos X, el tamaño de las partículas de biocarbón. Se determina que el 80% de partículas tiene un tamaño entre 1 μm y 40 μm y una gradación similar a la del cemento y el 20% restante de partículas de biocarbón son más finas con relación a la gradación del cemento, presentando partículas con tamaños entre 40 μm y 200 μm como se puede observar en la figura 4.

Figura 4 Curva granulométrica del biocarbón y cemento



Fuente: (Gupta et al., 2018)

Se tamizó el material separando para el experimento lo que pasa por el tamiz Nro. 100 y se retiene en el fondo.

Las propiedades físicas y químicas del material utilizado son presentadas en la Tabla 4.

Tabla 4 Resultados de laboratorio - propiedades físicas y químicas del biocarbón

ÍTEM	UNIDAD	VALORES
pH	-	11,9
Alcalinidad	ppm (CaOCO3)	240,87
Conductividad eléctrica	mS cm-1	2,44
Densidad aparente	g ml-1	0,336
Materia orgánica	%	90,2
Carbono orgánico total	%	78,6
Oxígeno	%	18,8
Nitrógeno total	%	4,3
C/N	-	25,5
P	ppm	133,4
K	ppm	1.215,9
CIC	cmol Kg-1	82,6

Fuente: Laboratorio Bionika. Elaboración: Propia

El pH del biocarbón preparado es de 11,90, similar a lo reportado por Gupta et al., (2018), lo que indica su naturaleza alcalina. Por otro lado, la densidad aparente del biocarbón fue de 0,336 gr/ml. a diferencia de la densidad esquelética de 1,59 y 1,51 gr/ml. respectivamente para dos tipos diferentes de biocarbón, obtenida Gupta et al., (2018) utilizando picnometría de gases; lo que evidencia la cantidad de espacios vacíos que puede existir en este tipo de materiales.

2.4. Diseño de la dosificación del hormigón

Se realizó el diseño de un hormigón hidráulico convencional, utilizando el método ACI, y tomando ciertas consideraciones de ajustes dadas por la experiencia en la producción de hormigones en nuestro medio. El diseño de hormigón se realizó considerando una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

Con el diseño de hormigón convencional, se procedió al diseño de hormigón con el uso de material de biocarbón, adicionando un porcentaje de biocarbón con respecto al peso de cemento y obteniendo las dosificaciones para los ensayos que serán evaluados a continuación.

Las dosificaciones propuestas en esta investigación fueron elegidas luego del análisis de investigaciones similares. Se utilizó dosificaciones de 1,5%, 3,0%, 4,5% y 25,0% de adición de peso de biocarbón en relación al peso de cemento utilizado, ver tabla 5. Estas dosificaciones son similares a las utilizadas en otras investigaciones

considerando los rangos más altos descritos, con la intención de que el efecto de reducción del impacto ambiental sea mayor. La mayor parte de investigaciones revisadas trabajan con rangos entre el 0,0% y el 5,0% de biocarbón en adición al hormigón, sin embargo, en la bibliografía revisada se encontró investigaciones con dosificaciones en rangos más altos; por esa razón, se propone la dosificación del 25,0% de biocarbón de adición al hormigón.

Se uso una adición de biocarbón y no un remplazo, considerando que los resultados de resistencia a compresión que se obtendrán para ser comparados, deberán tener cantidades similares de cemento y del resto de componentes parte de la materia prima de hormigón. Posteriormente, se analiza el efecto que resultó de remplazar el biocarbón por el cemento; determinando la posibilidad de usar una cantidad menor de cemento en el hormigón que proporcione resistencias similares y signifique una reducción del impacto ambiental generado.

2.5. Confección, curado y ensayo de compresión de las probetas de hormigón

La confección y el curado de los cilindros o probetas, se realizó según la norma ASTM C 31/C 31 M - 08a. La rotura de las probetas se realizó según la norma C 39/C 39M – 01. Se confeccionó seis probetas para cada dosificación. De cada grupo de seis probetas, se procedió a la rotura de tres de las probetas, a los siete días de su elaboración, y a la rotura de otras tres probetas, luego de veintiocho días de su elaboración.

Capítulo 3. Resultados

Las dosificaciones escogidas luego de la revisión de la literatura y el diseño de hormigón son las presentadas en la tabla 5. Se utilizó para esta investigación un hormigón de control que no contiene material de biocarbón, y otras 4 dosificaciones que se adiciona biocarbón en porcentajes de 1,5%, 3,0%, 4,5% y 25,0%.

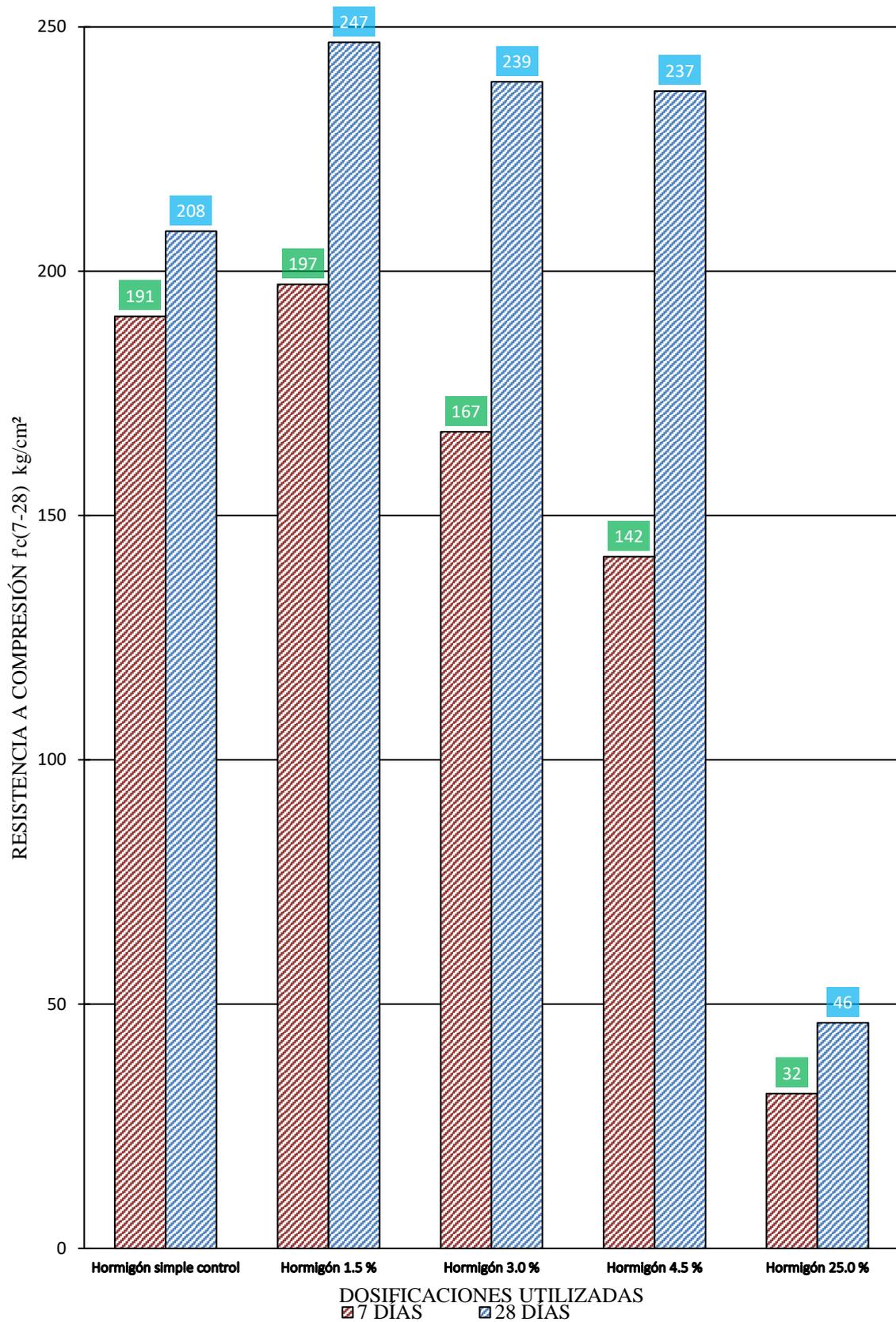
Luego de la elaboración de las probetas de hormigón, se procedió a ensayar las mismas a los 7 y 28 días, según establece la norma ASTM C 39/C 39M – 01 (ASTM, 2004). La tabla 6 muestra los resultados obtenidos de las resistencias a compresión.

Se determinó también las densidades de las probetas para ser analizadas dentro de los resultados. Las densidades obtenidas son presentadas en la tabla 6.

Tabla 5 Dosificaciones de control y mezcla de hormigón con biocarbón de adición

Descripción de la dosificación	Cemento gramos	Agu a litros	Grava gramos	Arena gramos	Biocarbón gramos	Plastificante gramos
Hormigón simple control	1.000	590	2.994	1.702	-	15
Hormigón 1,5% de adición	1.000	590	2.994	1.702	15	15
Hormigón 3,0% de adición	1.000	590	2.994	1.702	30	15
Hormigón 4,5% de adición	1.000	590	2.994	1.702	45	15
Hormigón 25,0% de adición	1.000	809	2.994	1.702	250	15

Fuente y Elaboración: propia

Ilustración 1 Resultados de ensayos de laboratorio de resistencia a compresión

Fuente y Elaboración: propia

Tabla 6 Resultados de ensayos de laboratorio de densidad y resistencia a compresión

Descripción de la dosificación	Días	Densidad	Resistencia (f'c)		Porcentaje de resistencia con respecto al diseño 210 kg/cm ² (%)	Relación densidad con respecto a una densidad de 2400 kg/m ³ -
		(kg/m ³)	(kg/cm ²)	(MPa)		
Hormigón simple control	7	2.405,7	190,8	19,4	91%	1
	28	2.363,3	208,2	21,2	99%	0,98
Hormigón 1,5%	7	2.387,6	197,3	20,1	94%	0,99
	28	2.381,9	246,8	25,2	118%	0,99
Hormigón 3,0%	7	2.423,9	167,1	17	80%	1,01
	28	2.377,4	238,8	24,3	114%	0,99
Hormigón 4,5%	7	2.366,2	141,6	14,4	67%	0,99
	28	2.349,2	236,8	24,1	113%	0,98
Hormigón 25,0%	7	2.028,3	31,7	3,2	15%	0,85
	28	2.021,1	46,2	4,7	22%	0,84

Fuente y Elaboración: propia

Figura 5 Imágenes del proceso de elaboración, curado y ensayo a compresión de probetas

1.- Materiales y equipos de laboratorio



2.- Agregados del hormigón



3.- Hormigonado de probetas



4.- Probetas de hormigón



5.- Hormigón con dosificación del 25,0%
de biocarbón



6.- Hormigón con dosificación de 1,5%
de biocarbón sometido a ensayo de
compresión

Fuente y Elaboración: propia

Capítulo 4. Análisis y discusión

El método aplicado en esta investigación fue tomado de las normas citadas en el apartado 2.5, con lo que se garantiza la confiabilidad de los resultados.

Los ensayos y resultados obtenidos en esta investigación aportan significativamente al desarrollo local, pudiendo confirmar la hipótesis propuesta y además promover futuras investigaciones que posibiliten el uso de esta tecnología, que entrega importantes avances en la reducción del impacto ambiental en el campo de la construcción.

Los parámetros analizados son: trabajabilidad, densidad, porosidad y resistencia a compresión.

La trabajabilidad o fluidez del hormigón o mortero es un factor considerado en esta línea de investigación y es función del uso específico del material; si el material va a ser colocado en espacios pequeños donde no se puede realizar un acomodo mecánico, se necesita que el material tenga un comportamiento autonivelante que le permita ocupar todos los espacios, si no es ese el caso se puede utilizar un material menos fluido que ocupará los espacios luego de realizar un acomodo mecánico del material. Sin embargo, es importante considerar también que el grado de fluidez del material va a afectar la resistencia final del mismo, ya que para obtener una mezcla más fluida comúnmente se incrementa la cantidad de agua y como consecuencia se incrementa la relación agua cemento que está relacionada con la resistencia final.

Para los porcentajes de 1,5%, 3,0% y 4,5% de peso de biocarbón añadido, no se reduce significativamente la trabajabilidad del hormigón en comparación con el control.

Como se puede observar en la Tabla 6, la relación agua/cemento utilizada para las dosificaciones de adición de biocarbón de 1,5%, 3,0% y 4,5% es igual a 0,59.

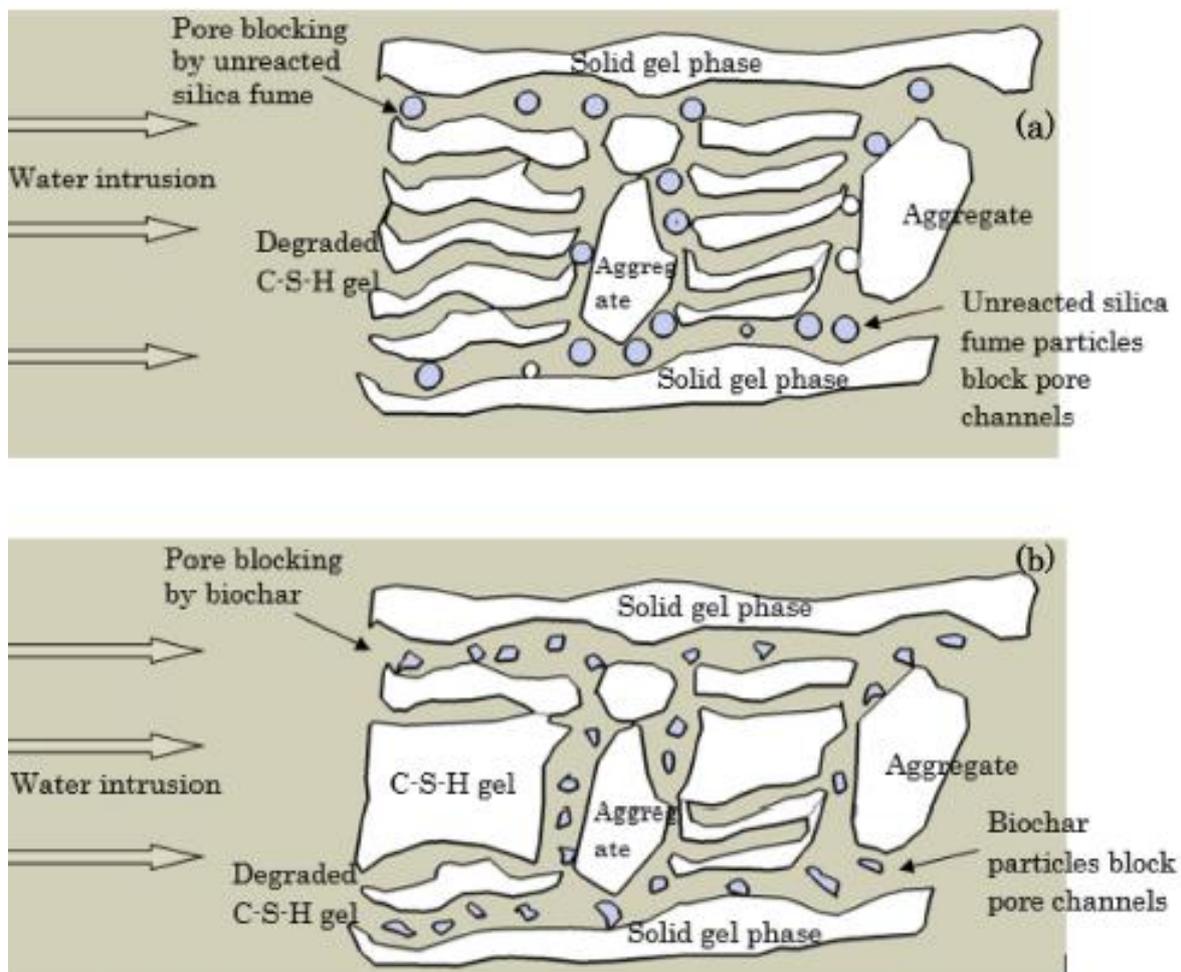
La trabajabilidad disminuye a medida que se incrementa la cantidad de biocarbón; en este estudio solamente cuando se elaboró el hormigón con 25,0% de peso de

biocarbón añadido, se obtuvo una mezcla que no permitía un correcto hormigonado y resultó la necesidad de incrementar la cantidad de agua llegando a una relación agua cemento de 0,809.

En este estudio la trabajabilidad mínima del hormigón no fue determinada ya que se ha considerado el material de una manera general sin considerar un uso específico del mismo

La densidad endurecida no se ve afectada para dosificaciones de 1,5%, 3,0% y 4,5% de peso de biocarbón añadido. Sin embargo, para el 25,0% de peso de biocarbón añadido, la densidad endurecida es significativamente menor según es presentado en la Tabla 6.

Figura 6 Esquema de estructura y capilaridades del hormigón



Fuente: (Gupta et al., 2020).

Como se observa en la Figura 5, el biocarbón como agregado en el concreto causó el proceso de hidratación del cemento, lo que facilitó la formación de gel de hidrato de silicato de calcio (CSH) y mejoró el grado de polimerización del gel CSH a través del curado interno (Chen et al., 2022).

Se puede entonces concluir que la trabajabilidad para determinados porcentajes de adición de biocarbón no se ve afectada. Así también, esta adición produce una reducción de la porosidad y capilaridad que se debe a que el biocarbón incorporado retiene el agua libre de la mezcla fresca. Esto significa que se redujo el contenido de agua evaporable responsable de la porosidad capilar. Por lo tanto, la adición de biocarbón produce un efecto de densificación del hormigón endurecido.

Como se observa en la Tabla 6, la resistencia a la compresión del hormigón con un porcentaje de 1,5% de peso de biocarbón añadido, incrementa la resistencia en un 3% cuando el hormigón alcanza una madurez de siete días. El incremento de la resistencia a los veintiocho días es de un 19%.

Se puede notar que las dosificaciones, añadiendo el biocarbón con un porcentaje del 3,0% y 4,5%, también incrementan la resistencia a los veintiocho días en un 15% y 14% respectivamente.

Lo indicado permite inferir que el mayor incremento de resistencia se da con una dosificación adicionando el biocarbón con un porcentaje del 1,5%; con porcentajes mayores, la curva de resistencia presenta una pendiente negativa, conforme se desprende de los resultados obtenidos, ver Ilustración 1.

Dentro de esta investigación, luego de revisada la literatura relacionada, se decidió utilizar diferentes porcentajes de adición de biocarbón similares a los usados por otros autores, considerando los rangos más altos descritos, con la intención de que el efecto de reducción del impacto ambiental sea mayor. Esta consideración, se puede tener en cuenta para aplicaciones que no requieran mayores resistencias; sin embargo, si se requiere la optimización de las propiedades del material, deberá considerarse lo indicado en los dos párrafos precedentes.

En relación a la dosificación, informamos que, al añadir el biocarbón en un porcentaje del 25,0%, se observa una reducción del 84% de la resistencia a compresión en comparación con el hormigón de control. Se deduce que este resultado fue causado por el consumo de agua de la ceniza adicionada y el contenido orgánico de las cenizas lo que generó la baja compacidad del hormigón.

A su vez, el incremento de la resistencia a compresión es generado por la menor porosidad del hormigón, mejorando su estructura y reduciendo capilaridades que pueden ser los posibles planos de falla.

Ahmad et al., (2015) dan cuenta en sus investigaciones, de una mejora en la resistencia con la adición de 0,08% y 0,20%, en peso de biocarbón, preparado a partir de bambú, lo que aumentó la resistencia a la compresión en un 30% y un 18%, respectivamente, en comparación con el hormigón de control. Vale la pena señalar que la dosis de biocarbón utilizada por los ensayos de laboratorio de Ahmad et al. es inferior a la que se utiliza en este estudio y los resultados obtenidos en cuanto a resistencia a compresión son mayores en el primer caso y similares para el segundo.

Gupta et al., (2018) utilizan biocarbón producido mediante pirólisis a 300°C y 500 °C, e informan que la adición de 1% y 2% de biocarbón en relación al porcentaje de cemento para mortero, produce un incremento en la resistencia a compresión. A través del análisis estadístico, se determina que el incremento de resistencia a compresión a los siete días es significativo. El resultado es importante también para la resistencia a los veintiocho días, pero solamente para la muestra que se adiciona 1% y 2% de biocarbón producido a 500°C. Se puede verificar que otros estudios utilizan dosificaciones similares y obtienen asimismo incremento en la resistencia a compresión.

Otros autores como Beltrán et al., (2016) y Carrasco et al., (2014) informan que los vacíos de aire atrapado con una mayor dosis de biocarbón son perjudiciales para el desarrollo de la resistencia.

Gupta et al., (2018) afirman que la mejora en la resistencia en comparación con el mortero de control es más importante, cuando se agrega en un mortero preparado

con una mayor proporción de agua y cemento, normalmente sobre 0,35. Hormigones que han sido elaborados y tienen relaciones agua / cemento entre 0,30 y 0,35 son hormigones con una estructura densa, donde la adición de biocarbón no tiene incidencia. Los hormigones elaborados con una relación agua / cemento menor de 0,35 suelen tener problemas de compactación por tratarse de una mezcla rígida poco trabajable. Luego de los análisis realizados los autores sostienen que, con la adición de biocarbón, se reduce la relación agua / cemento efectiva a 0,33 y 0,31, respectivamente para una mezcla con agua / cemento = 0,40. La capacidad promedio de absorción de agua del biocarbón seco elaborado a 300°C y 500°C, es de 7,35 g/g y 8,78 g/g, respectivamente.

Es importante notar que, considerando el método de diseño de hormigones ACI, se observa que recomienda relaciones agua / cemento en los rangos de 0,38 a 0,79, por lo que relaciones agua / cemento inferiores a 0,35, no son comúnmente utilizadas. Ver tabla 7.

Tabla 7 Relación agua cemento vs. resistencia del hormigón

f'c 28 días kg / cm ²	Relación agua cemento en peso Sin aire incorporado
450	0,38
400	0,42
350	0,47
300	0,54
250	0,61
200	0,69
150	0,79

Fuente: (Dixon et al., 1991). Elaboración: propia

Gupta et al., (2018) afirman que, con 1% en peso de biocarbón elaborado a 300°C y 500°C, se obtuvo la mayor resistencia a la flexión: 13,43 MPa y 13,80 MPa, respectivamente, que representan un 10% y un 13% superiores, en comparación con el mortero simple, luego de veintiocho días. La adición de 2%, 5% y 8% de biocarbón elaborado a 500°C da como resultado una resistencia a la flexión del 98%, 90% y 76% en comparación con la del mortero simple. Este hallazgo es coincidente con los resultados obtenidos por Khushnood et al., (2016) que informaron una ligera reducción, alrededor del 7%, en la resistencia a la flexión, cuando se agregó al mortero de cemento 1% en peso de biocarbón producido a partir de cáscara de maní. Sin

embargo, el mortero con una dosis más baja de biocarbón, 0,08% – 0,20%, preparado con cáscara de maní y cáscara de avellana, mostró una mejora de alrededor del 60% – 80% en la resistencia a la flexión.

El módulo elástico del material compuesto es una función de las propiedades de los materiales constituyentes, tal como indica Mindess (2019). Por lo tanto, la adición de biocarbón puede dar lugar a dos efectos opuestos: aumentar la resistencia y el módulo elástico de la pasta, o la presencia de partículas de biocarbón de bajo módulo elástico puede reducir el módulo elástico efectivo del compuesto.

Gupta et al., (2018) informan que el módulo elástico estático y la resistencia a la flexión no se ven significativamente influenciados por la adición de biocarbón, lo que se atribuye al bajo módulo de elasticidad de las partículas de biocarbón añadidas, en comparación con la pasta de mortero.

Capítulo 5. Conclusiones

En base a la investigación realizada se puede obtener las siguientes conclusiones:

Las dosificaciones más utilizadas en investigaciones similares están en el rango de 0,1% - 3,0% de adición de peso de biocarbón, en relación al peso de cemento utilizado.

Con los porcentajes de 1,5%, 3,0% y 4,5% de peso de biocarbón de adición no se reduce significativamente la trabajabilidad del hormigón en comparación con el control. La trabajabilidad se ve reducida a medida que se incrementa la cantidad de biocarbón; en este estudio, solamente cuando se elaboró el hormigón con 25,0% de peso de biocarbón de adición.

La relación agua / cemento que permita la trabajabilidad mínima del hormigón es función del uso específico que se le vaya a dar al material y no fue determinada en este estudio ya que se elaboró un material para uso general y este parámetro puede ser parte de una nueva investigación.

En esta investigación, la densidad endurecida no se ve afectada para 1,5%, 3,0% y 4,5% de peso de biocarbón de adición. Para el 25,0% de peso de biocarbón añadido, la densidad endurecida es significativamente menor.

La reducción de la porosidad y la capilaridad se debe a que el biocarbón incorporado retiene el agua libre de la mezcla fresca, lo que significa que se redujo el contenido de agua evaporable responsable de la porosidad capilar. Por lo tanto, una dosis óptima de biocarbón se espera que produzca un efecto de densificación del hormigón endurecido.

La construcción con hormigón mixto de biocarbón, arroja como resultado un material menos permeable y reduce la filtración de agua a través de la sorción capilar responsable del crecimiento de moho y gérmenes en el ambiente interior.

El mayor incremento de resistencia se da con una dosificación, adicionando el

biocarbón con un porcentaje del 1,5%; con porcentajes mayores, la curva de resistencia presenta una pendiente negativa. Se sugiere entonces que futuras investigaciones trabajen con dosificaciones de biocarbón en un rango entre el 0,01% - 2,0%, que permitirán un mejor ajuste de los resultados.

En relación a la dosificación, informamos que, al añadir el biocarbón en un porcentaje del 25,0%, se observa una reducción del 84% de la resistencia a compresión en comparación con el hormigón de control. Se deduce que este resultado fue causado por el consumo de agua de la ceniza adicionada, lo que generó la baja compacidad del hormigón.

Para los hormigones que tuvieron un incremento en la resistencia a compresión, de la investigación realizada se puede colegir que este incremento es generado por la menor porosidad del hormigón que mejora su estructura y reduce capilaridades que pueden ser posibles planos de falla.

El efecto producido por el biocarbón en la estructura del hormigón tiene mayor incidencia, cuando existe más cantidad de agua libre en la mezcla, para dosificaciones con relaciones de agua / cemento bajas el efecto producido no es apreciable.

El módulo elástico del material compuesto es una función de las propiedades de los materiales constituyentes. Por lo tanto, la adición de biocarbón puede dar lugar a dos efectos opuestos: aumentar la resistencia y el módulo elástico de la pasta, o la presencia de partículas de biocarbón de bajo módulo elástico puede reducir este último factor efectivo del compuesto.

Es importante señalar también que el incremento de la resistencia para el hormigón se debe analizar en función de los requerimientos que tenga el elemento que se quiera construir, cuando no se requieran resistencias altas; en el caso de elementos no estructurales o similares, se puede considerar el uso del biocarbón en porcentajes mayores que aporten más significativamente a la reducción del impacto ambiental en el campo de la construcción.

Dentro de las aplicaciones del hormigón o mortero con adición de biocarbón es

importante indicar que no es recomendado para hormigones armados con varillas de acero, debido al riesgo de corrosión. Otras investigaciones se adentran en el hormigón con adición de biocarbón y reforzado con fibras de polipropileno para aplicaciones donde sea necesario las propiedades que aportan estos elementos al hormigón.

Investigaciones futuras pueden realizarse para complementar los resultados obtenidos en esta investigación; se sugiere la profundización en campos tales como: adición de biocarbón en porcentajes de 0,01% - 2,0% que permitan ajustar los resultados; determinación de la relación agua / cemento mínima para obtener la trabajabilidad necesaria del material; estudiar los cambios en la estructura del hormigón con la adición del biocarbón a nivel de microestructuras y estructuras capilares; resistencia a la flexión; módulo elástico del material; contracción del hormigón por fraguado; capacidad purificadora del aire, resistencia al fuego y determinación de conductividad térmica del material; análisis del ciclo de vida LCA del caso específico de estudio; análisis económico de la adicción del biocarbón en el hormigón del caso específico de estudio; y, análisis de la inclusión del material en los procesos de construcción.

Existen también otras investigaciones que utilizan dosificaciones para la elaboración de morteros hasta con un 75% de biocarbón y un 25% de cemento, dosificaciones que tienen otras consideraciones y podrán ser consideradas y replicadas en futuras investigaciones.

Futuras investigaciones también pueden estar dirigidas a estudiar el rendimiento del hormigón con biocarbón sujeto a carga de impacto y ambiente químico y térmico severo. Estos esfuerzos científicos permitirán impulsar la aplicación de biocarbón como material de construcción sostenible, en zonas de alto riesgo, así como en una amplia gama de instalaciones de infraestructura.

El estudio de otro tipo de materias primas similares, incluidos los desechos alimentarios, agrícolas y hortícolas, puede ser también otra línea importante de investigación ya que estos actualmente existen en abundancia en la región y no son aprovechados.

La viabilidad comercial del biocarbón en compuestos de cemento dependería de varios factores, incluida la disponibilidad local de materia prima, el tipo de materia prima, la escala de producción y las técnicas alternativas existentes de gestión de residuos.

Para ciertos casos, el análisis de costos y beneficios del hormigón con biocarbón añadido, podría generar resultados económicos netos positivos.

Convertir los desechos de biomasa en biocarbón agregaría valor a los desechos de biomasa generados localmente, reduciría el espacio utilizado por los vertederos, extendería la vida útil de estos últimos y evitaría el costo de eliminación de basura.

La inclusión de biocarbón en el hormigón presenta una alternativa sustentable para la industria de la construcción; por lo tanto, su implementación deberá ser estudiada para ser parte de los objetivos sustentables en este campo.

Bibliografía

ACI American Concrete Institute. (2014). Aci 318-14.

Ahmad, S., Khushnood, R. A., Jagdale, P., Tulliani, J. M., y Ferro, G. A. (2015). High performance self-consolidating cementitious composites by using micro carbonized bamboo particles. *Materials & Design*, 76, 223-229. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2015.03.048>

Aïssoun, B. M., Hwang, S.-D., y Khayat, K. H. (2016). Influence of aggregate characteristics on workability of superworkable concrete. *Materials and Structures*, 49(1), 597-609.

Akhtar, A., y Sarmah, A. K. (2018). Novel biochar-concrete composites: Manufacturing, characterization and evaluation of the mechanical properties. *Science of The Total Environment*, 616-617, 408-416. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.10.319>

Aldana Barrera, J. C. (2012). Temas y tendencias sobre residuos de construcción y demolición: un meta-análisis= Topics and tendencies of construction and demolition waste: a meta-analysis.

Arias, E. G., Bizinotto, B., Valls, S., y Barrio, D. (2012). Trabajo final de máster título 706-TFM-342 nueva técnica de dosificación de hormigones reciclados: método del volumen de mortero equivalente.

Asif, M., Muneer, T., y Kelley, R. (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment*, 42(3), 1391-1394.

ASTM, C. (1999). 494. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM, C. (2004). 39/C 39M-01, (2004). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

Barton, M., Kim, J., Patel, B., y Twizerimana, A. L. (2020). Biochar Bricks for Building Material Closed Project File Team Jackalope.

Basic Information about Landfill Gas | Landfill Methane Outreach Program (LMOP) | US EPA. (2016). Recuperado 14 de agosto de 2022, a partir de https://19january2017snapshot.epa.gov/lmop/basic-information-about-landfill-gas_.html#main-content

Beltrán, M. G., Barbudo, A., Agrela, F., Jiménez, J. R., y de Brito, J. (2016). Mechanical performance of bedding mortars made with olive biomass bottom ash. *Construction and Building Materials*, 112, 699-707. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.065>

Bravo, R. S. (1994). Técnicas de investigación social: teoría y ejercicios (Vol. 12). Paraninfo Madrid.

C33/C33M-18, A. (2018). Standard specification for concrete aggregates. Technical Report, ASTM International, West Conshohocken, PA.

Campos, J., Fajilan, S., Lualhati, J., Mandap, N., y Clemente, S. (2020). Life Cycle Assessment of Biochar as a Partial Replacement to Portland Cement. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 479(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/479/1/012025>

Cárdenas, J. P., Muñoz, E., Riquelme, C., y Hidalgo, F. (2015). Simplified life cycle assessment applied to structural insulated panels homes Análisis de ciclo de vida simplificado aplicado a viviendas de paneles SIP (structural insulated panels). *Revista Ingeniería de Construcción*, 30(1), 33-38.

Carrasco, B., Cruz, N., Terrados, J., Corpas, F. A., y Pérez, L. (2014). An evaluation of bottom ash from plant biomass as a replacement for cement in building blocks. *Fuel*, 118, 272-280. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2013.10.077>

Chen, L., Zhang, Y., Wang, L., Ruan, S., Chen, J., Li, H., Yang, J., Mechtcherine, V., y Tsang, D. C. W. (2022). Biochar-augmented carbon-negative concrete. *Chemical Engineering Journal*, 431, 133946. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.133946>

Choi, W. C., Yun, H. do, y Lee, J. Y. (2012). Mechanical Properties of Mortar Containing Bio-Char From Pyrolysis. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 16(3), 67-74. <https://doi.org/10.11112/jksmi.2012.16.3.067>

Dixon, D. E., Prestreera, J. R., Burg, G. R. U., Chairman, S. A., Abdun-Nur, E. A., Barton, S. G., Bell, L. W., Blas Jr, S. J., Carrasquillo, R. L., y Carrasquillo, P. M. (1991). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).

Domenech, J. L. (2007). Huella ecológica y desarrollo sostenible, vol. 6. AENOR, Ed., Madrid.

Escalante Rebolledo, A., Pérez López, G., Hidalgo Moreno, C., López Collado, J., Campo Alves, J., Valtierra Pacheco, E., y Etchevers Barra, J. D. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34(3), 367-382.

Fernández, J. (2003). Energía de la biomasa. *Energías Renovables Para El Desarrollo*. Thomson-Paraninfo, 2-20.

Furlan, V., y Bissegger, P. (1975). Les mortiers ancieas-histoire et essais d'analyse scientifiques. *Zeitschrift Fur Schweizerische Archaeologie Und Kunstgeschichte*, 32, 166-178.

Gilces Reyna, M. A. (2014). Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/6632>

Guerrero, A. F., Meléndez, M. M., y Martín, J. M. (2016). Incorporación de huella de carbono y huella ecológica en las bases de costes de construcción. Estudio de caso de un proyecto de urbanización en Écija, España. *Hábitat Sustentable*, 6(1), 6-17.

Gupta, S., y Kashani, A. (2021). Utilization of biochar from unwashed peanut shell in cementitious building materials – Effect on early age properties and environmental benefits. *Fuel Processing Technology*, 218, 106841. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2021.106841>

Gupta, S., y Kua, H. (2017). Factors Determining the Potential of Biochar As a Carbon Capturing and Sequestering Construction Material: Critical Review Computational study of potential impact of end-of-life stage of polycarbonate waste due to dispersion of Bisphenol-A from incinerator View project. Article in *Journal of Materials in Civil Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001924)

Gupta, S., Kua, H. W., y Dai Pang, S. (2020). Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 234, 117338.

Gupta, S., Kua, H. W., y Low, C. Y. (2018). Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. *Cement and Concrete Composites*, 87, 110-129. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.12.009>

Gupta, S., Kua, H. W., y Pang, S. D. (2018). Biochar-mortar composite: Manufacturing, evaluation of physical properties and economic viability. *Construction and Building Materials*, 167, 874-889. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.104>

Gupta, S., Kua, H. W., y Tan Cynthia, S. Y. (2017). Use of biochar-coated polypropylene fibers for carbon sequestration and physical improvement of mortar. *Cement and Concrete Composites*, 83, 171-187. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.07.012>

Gwenzi, W., Chaukura, N., Wenga, T., y Mtisi, M. (2021). Biochars as media for air pollution control systems: Contaminant removal, applications and future research directions. *Science of The Total Environment*, 753, 142249. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142249>

Hincapié Henao, Á. M., y Aguja López, E. A. (2003). Agregado reciclado para morteros. *Revista Universidad EAFIT*, 39(132), 76-89.

Holcim. (2022). Holcim. <https://www.Holcim.Com.Ec/Sites/Ecuador/Files/2022-07/Ficha-Holcim-Fuerte.Pdf>.

Huang, Y., Anderson, M., McIlveen-Wright, D., Lyons, G. A., McRoberts, W. C., Wang, Y. D., Roskilly, A. P., y Hewitt, N. J. (2015). Biochar and renewable energy generation from poultry litter waste: A technical and economic analysis

based on computational simulations. *Applied Energy*, 160, 656-663. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2015.01.029>

INEN, N. T. E. (2011). 2380, "Cemento hidráulico. Requisitos de Desempeño Para Cementos Hidráulicos" Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1, 5.

Ithaka Institute - Building material. (2015). Recuperado 14 de agosto de 2022, a partir de <https://www.ithaka-institut.org/en/ct/97>

Khushnood, R. A., Ahmad, S., Restuccia, L., Spoto, C., Jagdale, P., Tulliani, J.-M., y Ferro, G. A. (2016). Carbonized nano/microparticles for enhanced mechanical properties and electromagnetic interference shielding of cementitious materials. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 10(2), 209-213. <https://doi.org/10.1007/s11709-016-0330-5>

Latour, B. (2012). *Esperando a Gaia. Componer el mundo común mediante las artes y la política.*

Lecca, F. C. (2014). La investigación jurídica. *Docentia et Investigatio*, 16(1), 173-186.

Lozada J. Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual e Industria. *CIENCIAMÉRICA*. 2014;(3):34–9.

Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete | Chatham House – International Affairs Think Tank. (2018). Recuperado 14 de agosto de 2022, a partir de <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete-0/executive-summary>

Matuščík, J., Hnátková, T., y Kočí, V. (2020). Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120998. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120998>

Mena, V. G., Molina, F. Q., Catalán, M. L., Valdés, D. O., y Serrano, A. (2015). Eficiencia energética en edificaciones residenciales. *Estoa. Revista de La Facultad de Arquitectura y Urbanismo de La Universidad de Cuenca*, 4(7), 59-67.

Mercader-Moyano, P., Marrero Meléndez, M., Solís-Guzmán, J., Montes Delgado, M. V. de, y Ramírez de Arellano Agudo, A. (2010). Cuantificación de los recursos materiales consumidos en la ejecución de la cimentación. *Informes de La Construcción*, 62 (517), 125-132.

Mindess, S. (2019). *Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete.* Woodhead Publishing.

Mousalli, G. (2015). *Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa.* <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2633.9446>

Müller, N., Harnisch, J., y Mesguen, J.-P. (2007). A report prepared for the

WWF-Lafarge Conservation Partnership On behalf of: WWF International Gland Switzerland How to Turn Around the Trend of Cement Related Emissions in the Developing World.

Muñoz, C. B., Peris, P. M., David, J., y Rodríguez, R. (2011). Estado del arte de las tecnologías de captura y almacenamiento de CO₂ en la industria del cemento.

Naik, T. R., Kraus, R. N., y Siddique, R. (2003). Demonstration of manufacturing technology for concrete and clsm utilizing wood ash from Wisconsin.

Petrement, C. J., López, J. G., Benito, J. A. P., García, F. J. G., Limones, R. H., Olmedo, J. J. G., Vicente, G. M. M., Pérez, A., Bernal, J. M. M., y Martín, J. M. G. (2012). Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano: obtención, caracterización y puesta en obra. Burgos: Universidad de Burgos.

Restuccia, L., y Ferro, G. A. (2016, mayo 29). Nanoparticles from food waste: a «green» future for traditional building materials. Proceedings of the 9th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. <https://doi.org/10.21012/FC9.276>

Restuccia, L., Reggio, A., Ferro, G. A., y Kamranirad, R. (2017). Fractal analysis of crack paths into innovative carbon-based cementitious composites. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 90, 133-141. <https://doi.org/10.1016/J.TAFMEC.2017.03.016>

Roberts, K. G., Gloy, B. A., Joseph, S., Scott, N. R., y Lehmann, J. (2010). Life Cycle Assessment of Biochar Systems: Estimating the Energetic, Economic, and Climate Change Potential. Environmental Science y Technology, 44(2), 827-833. <https://doi.org/10.1021/es902266r>

Sanguinetti, C. M., y Ortiz, F. Q. (2014). Análisis de Ciclo de Vida en la determinación de la energía contenida y la huella de carbono en el proceso de fabricación del hormigón premezclado. Caso estudio planta productora Región del Bío Bío, Chile. Hábitat Sustentable, 16-25.

Shackley, S., Hammond, J., Gaunt, J., y Ibarrola, R. (2011). The feasibility and costs of biochar deployment in the UK. En Carbon Management, 2(3), 335-356. <https://doi.org/10.4155/cmt.11.22>

Shanmugam, V., Mensah, R. A., Försth, M., Sas, G., Restás, Á., Addy, C., Xu, Q., Jiang, L., Neisiany, R. E., Singha, S., George, G., Jose E, T., Berto, F., Hedenqvist, M. S., Das, O., y Ramakrishna, S. (2021). Circular economy in biocomposite development: State-of-the-art, challenges and emerging trends. Composites Part C: Open Access, 5, 100138. <https://doi.org/10.1016/J.JCOMC.2021.100138>

Shao, Y., Mirza, M. S., y Wu, X. (2006). CO₂ sequestration using calcium-

silicate concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 33(6), 776-784. <https://doi.org/10.1139/L05-105>

Suarez, D. (2018). *Biochar as Eco-Friendly Filler to Enhance the Sustainable Performance Cement* (Doctoral dissertation). Politecnico di Torino.

Suppen, N. (2013). *Análisis de ciclo de vida y ecodiseño para la construcción en México. Hábitat Sustentable*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí and CADIS.

Wadel, G., Avellaneda, J., y Cuchí, A. (2010). La sostenibilidad en la arquitectura industrializada: cerrando el ciclo de los materiales. *Informes de La Construcción*, 62(517), 37-51.

Watts, J. (2019). Concrete: the most destructive material on Earth. *The Guardian*, 25, 1-9.

Wu, H., Yip, K., Tian, F., Xie, Z., y Li, C.-Z. (2009). Evolution of Char Structure during the Steam Gasification of Biochars Produced from the Pyrolysis of Various Mallee Biomass Components. *Industrial y Engineering Chemistry Research*, 48(23), 10431-10438. <https://doi.org/10.1021/ie901025d>

Yang, H., Zhang, C., Gao, P., Wang, H., Li, X., Zhong, L., Wei, W., y Sun, Y. (2017). A review of the catalytic hydrogenation of carbon dioxide into value-added hydrocarbons. *Catalysis Science y Technology*, 7(20), 4580-4598. <https://doi.org/10.1039/C7CY01403A>

Zabalza Bribián, I., Valero Capilla, A., y Aranda Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133-1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>

ANEXOS

Informes de laboratorio



TITANIUMROAD Cia. Ltda.				
Proyecto : TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN				
Solicita: ING. ANDRÉS ZALAMEA				
Ensayo : ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO				
Norma : ASTM D 422-63				
Fecha de Muestreo : lunes, 9 de mayo de 2022				
Muestreado por : Lab. Pedro Arce	Material: Grava			
Revisado por : ING. ANDRÉS ZALAMEA	Procedencia: Mina Vipesa			
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO				
Peso Inicial de la Muestra Seca	Grava = 96			
Peso de la Muestra Después del Lavado	Ps (gr) = 150.52			
Perdida por Lavado	Ph (gr) = 150.52			
Tolerancia	W% = 0.0			
----- %				
Tamiz	Abertura (mm)	Ret. Parcial (gr.)	Ret. Acumulado (gr.)	% Que Pasa (%)
3"	76.20	0.00	0.00	100.0
2 1/2"	63.50	0.00	0.00	100.0
2"	50.80	0.00	0.00	100.0
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	100.0
1"	25.40	0.00	0.00	100
3/4"	19.00	0.00	0.00	100
1/2"	12.70	754.00	754.00	29.15
3/8"	9.53	692.00	1446.00	55.89
Nº4	4.75	1037.00	2483.00	95.98
Nº8	2.36	80.00	2563.00	99.07
PASA Nº8		24.00		
Total Retenido :				

MIGUEL MENDEZ PERALTA
INGENIERO - CONTROL CALIDAD

CURVA GRANULOMÉTRICA

TITANIUMROAD Cia. Ltda.									
Proyecto : TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRAÚLICO CON BIOCARBÓN									
Solicita: ING. ANDRÉS ZALAMEA									
Ensayo : ANALISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO									
Norma : ASTM D 422-63									
Fecha de Muestreo : lunes, 9 de mayo de 2022									
Muestreado por : Lab. Pedro Arce									
Revisado por : ING. ANDRÉS ZALAMEA									
Material: Arena									
Procedencia: Mina Vípessa									
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR LAVADO									
Peso Inicial de la Muestra Seca		1000		gr		Humedad (w%)		Grava = 1	
Peso de la Muestra Después del Lavado				gr		Ps (gr) =		54.09	
Pérdida por Lavado				gr		Ph (gr) =		54.09	
Tolerancia				%		W% =		0.0	
Tamiz	Abertura (mm)	Ret. Parcial (gr.)	Ret. Acumulado (gr.)	Ret. (%)	% Que Pasa				
3"	76.20	0.00	0.00	0.00	100.00				
2 1/2"	63.50	0.00	0.00	0.00	100.00				
2"	50.80	0.00	0.00	0.00	100.00				
1 1/2"	38.10	0.00	0.00	0.00	100.00				
1"	25.40	0.00	0.00	0.0	100.00				
3/4"	19.00	0.00	0.00	0.0	100.00				
1/2"	12.70	0.00	0.00	0.0	100.00				
3/8"	9.53	0.00	0.00	0.0	100.00				
N°4	4.75	11.50	11.50	1.2	98.80				
N°8	2.36	164.10	175.60	18.4	81.65				
N°10	2.00	29.20	204.80	21.4	78.59				
N°16	1.18	169.00	373.80	39.1	60.93				
N°30	0.60	261.70	635.50	66.4	33.57				
N°40	0.43	100.30	735.80	76.9	23.09				
N°50	0.30	71.20	807.00	84.4	15.65				
N°100	0.15	95.50	902.50	94.3	5.67				
N°200	0.075	42.40	944.90	98.8	1.23				
N°400	0.0375	11.80	956.70	99.8	0.2				
Total Retenido :									
Modulo de Finura		3.04							

CURVA GRANULOMÉTRICA

Si el módulo de finura de una arena es de 2.3 se trata de una arena fina, y si el módulo de finura es de 2.3 a 3.1 se trata de una arena mediana. Y si el módulo de finura es mayor de 3.1 se trata de una arena gruesa.

Wanda Succar
MIGUEL MENDEZ PERALTA
INGENIERO - CONTROL CALIDAD

TITANIUMROAD Cia. Ltda.	
Proyecto :	TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN
Solicita :	ING. ANDRÉS ZALAMEA
Ensayo :	DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCION AGREGADO FINO Y GRUESO
Norma :	ASTM C 127 y ASTM C 128
Fecha de Muestreo :	lunes, 9 de mayo de 2022
Muestreado por :	Lab. Pedro Arce
Revisado por :	ING. ANDRÉS ZALAMEA
	Material: Grava y Arena Procedencia: Mina Vipesa
DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO - GRAVA ASTM C 127 AASHTO T 85	
A Peso del material sumergido	761.00
B Peso del material Saturado Seco Superficialmente	1216.50
C Peso del material seco	1196.40
1) Gravedad Específica de Masa (Bulk)	$\frac{C}{(B - A)} = 2.63$
2) Gravedad Específica Saturada Seca Superficialmente (SSS)	$\frac{B}{(B - A)} = 2.67$
3) Gravedad Específica Aparente	$\frac{C}{(C - A)} = 2.75$
4) Porcentaje de Absorción	$\frac{(B - C)}{C} \times 100 = 1.68\%$
DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA Y PORCENTAJE DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO - ARENA ASTM C 128 AASHTO T 84	
A Peso del material Saturado Seco Superficialmente	500.00
B Peso del Picnómetro + Agua + Material	1611.50
C Peso del Picnómetro + Agua	1301.90
D Peso del material seco	486.80
1) Gravedad Específica de Masa (Bulk)	$\frac{D}{(C + A - B)} = 2.56$
2) Gravedad Específica Saturada Seca Superficialmente (SSS)	$\frac{A}{(C + A - B)} = 2.63$
3) Gravedad Específica Aparente	$\frac{D}{(D + C - B)} = 2.75$
4) Porcentaje de Absorción	$\frac{(A - D)}{D} \times 100 = 2.71\%$
 Firmado electrónicamente por: MIGUEL ANGEL MENDEZ PERALTA	
MIGUEL MÉNDEZ PERALTA INGENIERO CONTROL DE CALIDAD	

TITANIUMROAD Cia. Ltda.

Proyecto : TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN

Solicita : ING. ANDRÉS ZALAMEA

Ensayo : DETERMINACION DE PESOS UNITARIOS SUELTOS Y COMPACTADOS

Norma :

Fecha de Muestreo : lunes, 9 de mayo de 2022

Muestreado por : Lab. Pedro Arce

Revisado por : ING. ANDRÉS ZALAMEA

Material: Grava
Procedencia: Mina Vipesa

ENSAYO PESOS UNITARIOS SUELTO

PESO MUESTRA+MOLDE (gr)	VOLUMEN MOLDE (cm ³)	PESO DEL MOLDE (gr)	Peso Volumetrico (kg/m ³)
12080	3169.69	7520	1439
12050	3169.69	7520	1429
12065	3169.69	7520	1434
Peso Volumetrico (kg/m³)			1434

ENSAYO PESOS UNITARIOS VARILLADO

PESO MUESTRA (gr)	VOLUMEN MOLDE (cm ³)	PESO DEL MOLDE (gr)	Peso Volumetrico (kg/m ³)
12495	3169.69	7520	1570
12470	3169.69	7520	1562
12485	3169.69	7520	1566
Peso Volumetrico (kg/m³)			1566



Firmado digitalmente por:
**MIGUEL ANGEL
MENDEZ PERALTA**

ING. MIGUEL MENDEZ PERALTA
INGENIERO - CONTROL CALIDAD

TITANIUMROAD Cia. Ltda.

Proyecto : TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN

Solicita : ING. ANDRÉS ZALAMEA

Ensayo : DETERMINACIÓN DE PESOS UNITARIOS SUELTOS Y COMPACTADOS

Norma :

Fecha de Muestreo : lunes, 9 de mayo de 2022

Muestreado por : Lab. Pedro Arce

Revisado por : ING. ANDRÉS ZALAMEA

Material: Arena
Procedencia: Mina V/pesa

ENSAYO PESOS UNITARIOS SUELTO

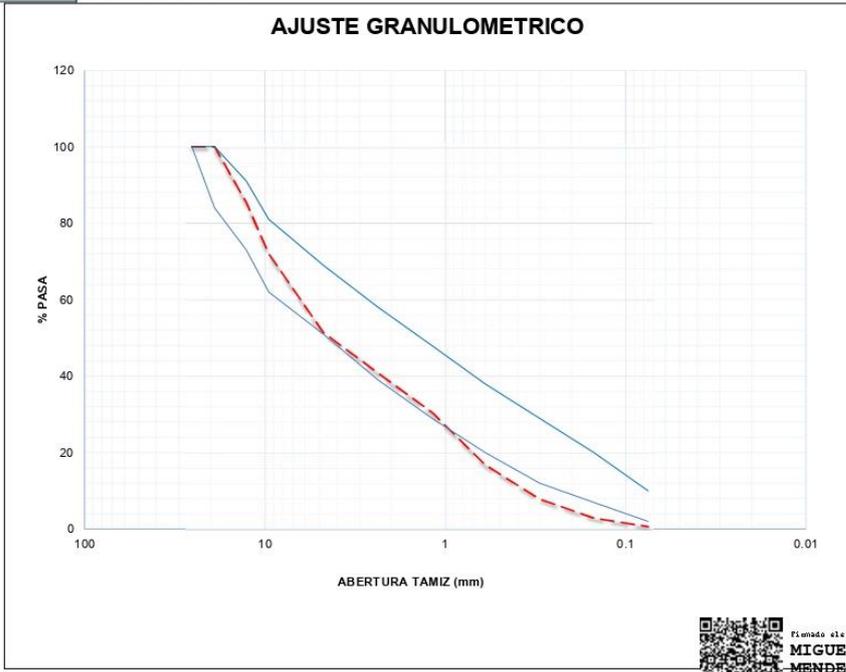
PESO MUESTRA (gr)	VOLUMEN MOLDE (cm3)	PESO DEL MOLDE (gr)	Peso Volumetrico (kg/m3)
12705	3169.69	7520	1636
12655	3169.69	7520	1620
12670	3169.69	7520	1625
Peso Volumetrico (gr/cm3)			1627

ENSAYO PESOS UNITARIOS VARILLADO

PESO MUESTRA (gr)	VOLUMEN MOLDE (cm3)	PESO DEL MOLDE (gr)	Peso Volumetrico (kg/m3)
13185	3169.69	7520	1787
13210	3169.69	7520	1795
13197	3169.69	7520	1791
Peso Volumetrico (gr/cm3)			1791



ING. MIGUEL MENDEZ PERALTA
INGENIERO - CONTROL CALIDAD

TITANIUMROAD Cia. Ltda.								
Proyecto : TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN								
Solicita: ING. ANDRÉS ZALAMEA								
Ensayo : AJUSTE GRANULOMETRICO								
Norma :								
Fecha de Muestreo : lunes, 9 de mayo de 2022								
Muestreado por : Lab. Pedro Arce								
Revisado por : ING. ANDRÉS ZALAMEA								
TAMIZ	ABERTURA (mm)	GRAVA		ARENA		AJUSTE GRANULOMETRICO	PORCENTAJES IDEALES	
		% PASA	50.0 %	% PASA	50.0 %		LIMITE INFERIOR	LIMITE SUPERIOR
1"	25.40	100	50	100	50	100	100	100
3/4"	19.00	100	50	100	50	100	84	100
1/2"	12.70	71	35	100	50	85	73	91
3/8"	9.53	44	22	100	50	72	62	81
Nº4	4.75	4	2	99	49	51	51	69
Nº8	2.36	0	0	82	41	41	39	58
Nº16	1.18	0	0	61	30	30	29	48
Nº30	0.60	0	0	34	17	17	20	38
Nº50	0.30	0	0	16	8	8	12	29
Nº100	0.15	0	0	6	3	3	7	20
Nº200	0.08	0	0	1	1	1	2	10
Porcentaje usado al combinar los áridos								
Granulometría de los áridos								
AJUSTE GRANULOMETRICO								
								
 Firmado electrónicamente por: MIGUEL ANGEL MENDEZ PERALTA								
ING. MIGUEL MÉNDEZ PERALTA INGENIERO - CONTROL CALIDAD								

TITANIUMROAD Cia. Ltda.																																									
Proyecto :	TRABAJO DE TITULACIÓN DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO CON BIOCARBÓN																																								
Solicita :	ING. ANDRÉS ZALAMEA																																								
Fecha de Muestreo :	lunes, 9 de mayo de 2022																																								
Muestreado por :	Lab. Pedro Arce																																								
Revisado por :	ING. ANDRÉS ZALAMEA																																								
Procedencia:	Mina Vipesa																																								
Resistencia a Compresion a los 28 dias (kg/cm2):	210																																								
Asentamiento (cm):	[7 - 5]																																								
Tipo de Cemento :	Cemento Portland																																								
DISEÑO DE MEZCLA (Pesos SSS 1 m ³)																																									
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Peso Especifico Varillado (gr/cm3)</th> <th>Peso (kg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cemento</td> <td>3.050</td> <td>410</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>1.791</td> <td>896</td> </tr> <tr> <td>Grava</td> <td>1.566</td> <td>783</td> </tr> <tr> <td>Agua</td> <td>1.000</td> <td>190</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>1.0%</td> <td></td> </tr> <tr> <td>Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)</td> <td>0.5%</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: right;">Total:</td> <td></td> <td>2279</td> </tr> </tbody> </table>	Material	Peso Especifico Varillado (gr/cm3)	Peso (kg)	Cemento	3.050	410	Arena	1.791	896	Grava	1.566	783	Agua	1.000	190	Aire	1.0%		Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)	0.5%		Total:		2279																
Material	Peso Especifico Varillado (gr/cm3)	Peso (kg)																																							
Cemento	3.050	410																																							
Arena	1.791	896																																							
Grava	1.566	783																																							
Agua	1.000	190																																							
Aire	1.0%																																								
Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)	0.5%																																								
Total:		2279																																							
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>MATERIAL</th> <th>PESO (kg)/ m³</th> <th>PESO CORREGIDO (kg)/m³</th> <th>Volumen (lt.)</th> <th>Peso Lab</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Agua</td> <td>190</td> <td>190</td> <td>190</td> <td>5.71</td> </tr> <tr> <td>Cemento</td> <td>410</td> <td>410</td> <td>134</td> <td>12.30</td> </tr> <tr> <td>Arena</td> <td>896</td> <td>896</td> <td>350</td> <td>26.87</td> </tr> <tr> <td>Grava</td> <td>783</td> <td>783</td> <td>298</td> <td>23.49</td> </tr> <tr> <td>Aire</td> <td>1.00</td> <td>1.00</td> <td>10</td> <td>0.03</td> </tr> <tr> <td>Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)</td> <td>2.05</td> <td>2.05</td> <td>1.72</td> <td>0.06</td> </tr> <tr> <td>TOTAL</td> <td>2279</td> <td>2279</td> <td>985</td> <td>68.5</td> </tr> </tbody> </table>	MATERIAL	PESO (kg)/ m ³	PESO CORREGIDO (kg)/m ³	Volumen (lt.)	Peso Lab	Agua	190	190	190	5.71	Cemento	410	410	134	12.30	Arena	896	896	350	26.87	Grava	783	783	298	23.49	Aire	1.00	1.00	10	0.03	Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)	2.05	2.05	1.72	0.06	TOTAL	2279	2279	985	68.5
MATERIAL	PESO (kg)/ m ³	PESO CORREGIDO (kg)/m ³	Volumen (lt.)	Peso Lab																																					
Agua	190	190	190	5.71																																					
Cemento	410	410	134	12.30																																					
Arena	896	896	350	26.87																																					
Grava	783	783	298	23.49																																					
Aire	1.00	1.00	10	0.03																																					
Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)	2.05	2.05	1.72	0.06																																					
TOTAL	2279	2279	985	68.5																																					
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Relación a/c</th> <td>0.46</td> <th>Peso unitario</th> <td>2314 kg/cm³</td> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Resistencia a compresión teórica (28 dias)</td> <td>235</td> <td>kg/cm2</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Relación a/c	0.46	Peso unitario	2314 kg/cm ³	Resistencia a compresión teórica (28 dias)	235	kg/cm2																																	
Relación a/c	0.46	Peso unitario	2314 kg/cm ³																																						
Resistencia a compresión teórica (28 dias)	235	kg/cm2																																							
DOSIFICACIÓN POR VOLUMEN																																									
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="3" style="text-align: center;">Dimensiones de la parihuela</th> </tr> <tr> <th>lado 1 (cm)</th> <th>lado 2 (cm)</th> <th>altura (cm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>30</td> <td>30</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>Volumen de la parihuela</td> <td>0.0270</td> <td>m³</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>		Dimensiones de la parihuela			lado 1 (cm)	lado 2 (cm)	altura (cm)		30	30	30	Volumen de la parihuela	0.0270	m ³																										
	Dimensiones de la parihuela																																								
	lado 1 (cm)	lado 2 (cm)	altura (cm)																																						
	30	30	30																																						
Volumen de la parihuela	0.0270	m ³																																							
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Material</th> <th>Cantidad</th> <th>Unidades</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>AGUA</td> <td>23</td> <td>litros</td> </tr> <tr> <td>CEMENTO</td> <td>1.0</td> <td>saco</td> </tr> <tr> <td>GRAVA</td> <td>2.6</td> <td>parihuela</td> </tr> <tr> <td>ARENA</td> <td>2.5</td> <td>parihuela</td> </tr> <tr> <td>Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)</td> <td>0.210</td> <td>litros</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">OPCIONAL</p>	Material	Cantidad	Unidades	AGUA	23	litros	CEMENTO	1.0	saco	GRAVA	2.6	parihuela	ARENA	2.5	parihuela	Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)	0.210	litros																						
Material	Cantidad	Unidades																																							
AGUA	23	litros																																							
CEMENTO	1.0	saco																																							
GRAVA	2.6	parihuela																																							
ARENA	2.5	parihuela																																							
Aditivo plastocrete 161 he (0.5%)	0.210	litros																																							
Recomendaciones:																																									
	<ol style="list-style-type: none"> 1 Para el presente diseño se ha considera los materiales secos, por lo tanto, verificar el contenido de humedad de los áridos antes de iniciar la producción del hormigón 2 Todos los áridos deben estar libres de impurezas antes de iniciar la producción del hormigón. 3 Las dimensiones de las parihuelas deben ser revisadas antes de iniciar la producción de hormigón. 4 El proceso de control de calidad y proceso de curado queda a criterio del contratista, pero se reco 																																								
	 <p>Real. D. Tomas ASTM. MIGUEL ANGEL MENDEZ PERALTA</p> <p>ING. MIGUEL MENDEZ PERALTA INGENIERO - CONTROL CALIDAD</p>																																								

PROYECTO: TRABAJO DE TITULACION DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRAULICO CON BIODARBÓN
SOLICITA: ING. ANDRÉS ZALAMEA

Ensayo: DETERMINACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESION DE CILINDROS DE HORMIGÓN

Norma: ASTM C 31

Ensayado por: LAB. PEDRO ARCE

Revisado por: ING. ANDRÉS ZALAMEA

ID LAB	DISEÑO	ELEMENTO	FECHA COINFECCION	DIAS	FECHA ROTURA	Ø	H	AREA	Velocidad de ensayo:				RESISTENCIA (MPa)	PORCENTAJE	
									PESO HUMEDO	PESO S.S	DENSIDAD	CARGA DE ROTURA (KN)			
5 kg/cm2/s															
						cm	cm	cm ²	gr	gr	Kg/m ³	Kg/cm ²	Kg/cm ²	%	
240	T.C	ESTRUCTURAL	6/6/2022	7	13/6/2022	10.2	20	81.71	3902	3902	2388	158.1	197	20.1	82%
240	240		6/6/2022	28	4/7/2022	10.2	20.2	81.71	3906	3900	2363	186.9	233	23.8	97%
240	240		6/6/2022	28	4/7/2022	10.2	20.2	81.71	3909	3902	2364	194.4	243	24.7	101%
240	240		6/6/2022	28	4/7/2022	10.3	20.1	83.32	4057	4051	2419	216.3	265	27.0	110%
240	240	DISEÑO 1.5% DE CARBÓN	6/6/2022	7	14/6/2022	10.1	20	80.12	3884	3884	2424	131.3	167	17.0	79%
240	240		7/6/2022	28	9/7/2022	10.2	20.2	81.71	3907	3896	2360	183.6	237	24.1	95%
240	240		7/6/2022	28	9/7/2022	10.2	20.4	81.71	4001	3922	2413	203.7	254	25.9	106%
240	240		7/6/2022	28	9/7/2022	10.2	20.2	81.71	3901	3894	2359	160.7	223	23.0	94%
240	240	DISEÑO 3% DE CARBÓN	8/6/2022	7	15/6/2022	10.2	20	81.71	3867	3867	2366	113.5	142	14.4	59%
240	240		8/6/2022	28	6/7/2022	10.2	20.3	81.71	3882	3879	2338	188.7	236	24.0	98%
240	240		8/6/2022	28	6/7/2022	10.2	20.4	81.71	4020	4016	2409	197.3	246	25.1	103%
240	240		8/6/2022	28	6/7/2022	10.3	20.3	83.32	3896	3890	2300	186.9	229	23.3	95%
240	240	DISEÑO 4.5% DE CARBÓN	11/6/2022	7	18/6/2022	10.4	20	84.95	3446	3446	2028	26.4	32	3.2	13%
240	240		11/6/2022	28	9/7/2022	10.2	20.2	81.71	3399	3367	2040	39.2	49	5.0	20%
240	240		11/6/2022	28	9/7/2022	10.2	20.2	81.71	3384	3351	2030	36.3	45	4.6	19%
240	240		11/6/2022	28	9/7/2022	10.2	20.2	81.71	3325	3290	1993	35.6	44	4.5	19%



Firma digitalizada por:
**MIGUEL ANGEL
MENDEZ FERALTA**

Ing. Miguel Méndez
Control de Calidad