

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LA
CIUDAD DEL CUSCO, 2024**

PRESENTADO POR:

Br. LUZ VANESSA COYA CABALLERO

Br. KEVIN FELIPE SUTTA MELO

PARA OPTAR AL TÍTULO

PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ASESORA:

Ph. D. Ing. AIDA ZAPATA MAR

CUSCO - PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor AIDA ZAPATA MAR,
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada: ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS
EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD
DEL CUSCO, 2024

Presentado por: LUZ VANESSA COYA CABALLERO DNI N° 76614979;
presentado por: KEVIN FELIPE SUTTA MELO DNI N°: 72759937
Para optar el título Profesional/Grado Académico de INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 3%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	<input checked="" type="checkbox"/>
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	<input type="checkbox"/>
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	<input type="checkbox"/>

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto** las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 14 de ENERO de 2026

Aida Zapata de la Cruz

Firma

Post firma Ph.D. ING AIDA ZAPATA MAR

Nro. de DNI 46939604

ORCID del Asesor 0000-0002-5500-0134

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:** 07259:546204174

VANESSA Y KEVIN COYA Y SUTTA

ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:546204174

Fecha de entrega

14 ene 2026, 12:52 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

14 ene 2026, 12:58 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO.pdf

Tamaño del archivo

26.6 MB

384 páginas

92.004 palabras

441.098 caracteres




3% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 12 palabras)
- Trabajos entregados

Fuentes principales

- 3%  Fuentes de Internet
- 1%  Publicaciones
- 0%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Dedico la presente tesis con profundo cariño y amor a mis padres, Martín Coya y Rosario Caballero, quienes siempre confiaron en mí, se preocuparon, me apoyaron y me motivaron a alcanzar cada meta que me propuse, aun frente a las dificultades. Destaco que la idea de esta investigación nació gracias a ellos, al permitirme observar la problemática existente en su lugar de trabajo, en la ciudad de Puerto Maldonado. Asimismo, dedico este trabajo a mis amados hermanos (Maricruz, Jhoel y Sharon), por creer en mí, por su apoyo incondicional, por siempre motivarme y ser, junto a mis padres mi mayor fuente de fortaleza. Agradezco profundamente a Dios por bendecir mi vida con una familia tan valiosa; este logro académico también les pertenece. Finalmente, este trabajo se lo dedico a una personita especial (Kevin), gracias por ser mi compañero en todo y alegrar mis días con tus ocurrencias. ¡¡¡Lo logramos, tolis!!! God is good.

Luz Vanessa Coya Caballero

Dedico la presente tesis de investigación, con profundo amor, cariño y gratitud, a mis padres Manuel Jesús Sutta y Lucía Melo Ruhua, quienes siempre estuvieron pendientes de mí y fueron mi mayor motivación para alcanzar mis objetivos. A pesar de todo pronóstico, su apoyo y confianza me impulsaron a seguir adelante. Los amo profundamente, papá y mamá.

Asimismo, dedico esta investigación a mis hermanos Luz Keyrin y Albert Jesús, por su constante apoyo, comprensión y confianza. Gracias por estar siempre presentes, por alegrar mis días y por motivarme a avanzar con el deseo de ser un ejemplo para ustedes. Siempre los querré.

Finalmente, dedico este estudio a Vanessa (babys, como siempre te digo), por ser la persona con quien compartí bellos momentos, no solo durante el desarrollo de esta investigación, sino también en la vida cotidiana. Recuerda que, contra cualquier adversidad, seguimos adelante.

Kevin Felipe Sutta Melo

Agradecimientos

Agradecemos, en primer lugar, a Dios, por demostrarnos su amor y bondad cada día de nuestras vidas y, sobre todo, por permitirnos experimentar de ello durante el desarrollo de la presente tesis. Gracias, papito, por ayudarnos a culminar y disfrutar de esta bonita etapa universitaria.

A nuestros queridos padres y hermanos, por su apoyo incondicional, tanto moral como económico y emocional, a lo largo de todo este camino académico.

A nuestros amigos, por su motivación y por los momentos compartidos que hicieron de esta etapa una experiencia enriquecedora y llena de gratos recuerdos.

A nuestra asesora de tesis, por su compromiso, orientación y observaciones, que fueron de gran importancia para la culminación del presente trabajo.

A la Dra. Ana Torre Carrillo, por su disposición, tiempo y valiosas sugerencias que fueron esenciales para el desarrollo de la investigación.

Extendemos nuestro sincero reconocimiento a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, por habernos brindado una formación académica y científica que ha sido pilar fundamental en nuestra preparación profesional. Así mismo, a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil y a la Escuela Profesional de Ingeniería Química por su apoyo institucional y colaboración durante la ejecución de esta investigación.

De manera especial, manifestamos nuestro agradecimiento al Centro de Innovación Científica Amazónica (CINCIA), por permitirnos elaborar el biochar utilizado en el estudio y por el respaldo técnico y logístico brindado a lo largo del proceso.

Finalmente, expresamos nuestro reconocimiento a todas las personas e instituciones que, de una u otra manera, contribuyeron a la realización y culminación de esta meta académica.

Resumen

El presente estudio evalúa el efecto del biochar producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*) en las propiedades físico-mecánicas del concreto con resistencia $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ en la ciudad del Cusco. Se analizaron tres formas de incorporación: sustitución parcial del agregado fino en volumen (10%, 15% y 20%), sustitución parcial del cemento en peso (1%, 2% y 3%) y adición en peso respecto al cemento (1%, 3% y 5%). El biochar empleado como agregado fino presentó granulometría controlada, mientras que el utilizado como sustituto del cemento y como aditivo correspondió al material pasante de la malla No. 200 (75 μm). En el concreto fresco se evaluaron la temperatura y el asentamiento, y en el concreto endurecido se determinaron la resistencia a la compresión, tracción indirecta y flexión, además de la densidad, absorción y porcentaje de vacíos. Los resultados indican que la sustitución del agregado fino en 10% y 15% permitió obtener resistencias similares al concreto de control, mientras que el 20% incrementó la absorción y los vacíos, reduciendo el desempeño mecánico. La sustitución parcial del cemento en 1% y 2% mantuvo propiedades comparables al concreto patrón, pero el 3% afectó negativamente su comportamiento. En contraste, la adición de biochar entre 1% y 5% mejoró el desempeño mecánico y redujo la absorción y el porcentaje de vacíos, siendo además la alternativa económicamente más viable. En conjunto, se concluye que el biochar puede emplearse eficazmente en bajas dosificaciones, aportando beneficios técnicos, económicos y ambientales.

Palabras clave: Biochar, Concreto, Propiedades mecánicas, Análisis económico.

Abstract

This study evaluates the effect of biochar produced from residual coconut biomass and Brazil nut shell (*Bertholletia excelsa*) on the physico-mechanical properties of concrete with a compressive strength of $f'_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ in the city of Cusco. Three incorporation methods were analyzed: partial replacement of fine aggregate by volume (10%, 15%, and 20%), partial replacement of cement by weight (1%, 2%, and 3%), and addition by weight with respect to cement (1%, 3%, and 5%). The biochar used as fine aggregate presented a controlled particle size distribution, while the biochar used as a cement replacement and as an additive corresponded to material passing the No. 200 sieve (75 μm). In fresh concrete, temperature and slump were evaluated, while in hardened concrete, compressive strength, splitting tensile strength, and flexural strength were determined, along with density, water absorption, and void content. The results indicate that replacing fine aggregate at 10% and 15% yielded strengths comparable to the control concrete, whereas a 20% replacement increased water absorption and void content, reducing mechanical performance. Partial replacement of cement at 1% and 2% maintained properties similar to the reference concrete, while a 3% replacement negatively affected its behavior. In contrast, biochar addition between 1% and 5% improved mechanical performance and reduced water absorption and void content, and was also identified as the most economically viable alternative. Overall, the study concludes that biochar can be effectively used in concrete at low dosages, providing technical, economic, and environmental benefits.

Keywords: Biochar, Concrete, Mechanical properties, Economic analysis.

Tabla de Contenido

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen.....	iv
Abstract	v
Tabla de Contenido	vi
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras.....	xxiv
Introducción	1
Capítulo I	3
1. Planteamiento del problema.....	3
1.1. Descripción de la realidad problemática	3
1.2. Formulación del problema.....	6
1.2.1. Problema general.....	6
1.2.2. Problemas específicos	6
1.3. Objetivos.....	7
1.3.1. Objetivo general	7
1.3.2. Objetivos específicos.....	7
1.4. Justificación	8
1.5. Alcances y limitaciones	10

1.5.1. Alcances	10
1.5.2. Limitaciones	11
1.6. Delimitaciones	13
1.6.1. Delimitación espacial	13
1.6.2. Delimitación temporal.....	13
1.6.3. Delimitación en materiales y equipos	14
Capítulo II	15
2. Marco teórico	15
2.1. Antecedentes.....	15
2.1.1. Antecedentes a nivel internacional.....	15
2.1.2. Antecedentes a nivel nacional.....	18
2.2. Bases teóricas	21
2.2.1. Castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>).....	21
2.2.2. Biochar	27
2.2.3. Concreto	37
2.2.4. Diseño de mezclas del concreto	53
2.3. Marco Normativo	55
Capítulo III.....	56
3. Metodología de la investigación	56
3.1. Hipótesis	56

3.1.1.	Hipótesis general	56
3.1.2.	Hipótesis específica.....	56
3.2.	Alcance o nivel de investigación	57
3.3.	Tipo de investigación.....	57
3.4.	Diseño de investigación.....	57
3.5.	Enfoque de investigación.....	58
3.6.	Identificación de variables e indicadores.....	58
3.6.1.	Variable independiente.....	58
3.6.2.	Variable Dependiente	60
3.7.	Población y muestra.....	62
3.7.1.	Unidad de análisis	62
3.7.2.	Población de estudio.....	62
3.7.3.	Muestra.....	62
3.7.4.	Tamaño de muestra	63
3.8.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	65
3.9.	Técnicas e instrumentos de análisis de datos.....	66
3.10.	Flujograma de trabajo	67
3.11.	Desarrollo del procedimiento experimental	70
3.11.1.	Adquisición de materiales	70
3.11.2.	Caracterización del biochar.....	80

3.11.3.	Caracterización del Agregado Grueso.....	95
3.11.4.	Caracterización del Agregado Fino.....	110
3.11.5.	Diseño de Mezclas de Concreto.....	122
3.11.6.	Elaboración y curado de especímenes de concreto.....	131
3.11.7.	Ensayos en concreto fresco.....	135
3.11.8.	Dimensionamiento y pesado de las muestras de concreto.....	138
3.11.9.	Ensayos en concreto endurecido.....	141
Capítulo IV.....		151
4.	Resultados de la investigación.....	151
4.1.	Caracterización de los materiales.....	151
4.1.1.	Caracterización del biochar.....	151
4.1.2.	Caracterización del agregado grueso.....	161
4.1.3.	Caracterización del agregado fino.....	172
4.2.	Resultados del diseño de mezclas.....	183
4.2.1.	Condiciones de diseño y características de los materiales.....	183
4.2.2.	Resultados del diseño de mezclas.....	184
4.2.3.	Dosificación del concreto control para 1m ³	185
4.2.4.	Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino.....	185
4.2.5.	Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento.....	187
4.2.6.	Dosificación del concreto con adición de biochar.....	188

4.3.	Resultados de los ensayos en el concreto fresco	189
4.3.1.	Temperatura	189
4.3.2.	Asentamiento.....	191
4.4.	Resultados de los ensayos en el concreto endurecido	192
4.4.1.	Dimensionamiento de testigos cilíndricos para compresión	192
4.4.2.	Resistencia a la compresión	198
4.4.3.	Dimensionamiento de testigos cilíndricos para tracción.....	205
4.4.4.	Resistencia a la tracción indirecta	211
4.4.5.	Dimensionamiento de vigas para flexión	217
4.4.6.	Resistencia a la flexión.....	223
4.4.7.	Densidad, absorción y porcentaje de vacíos.....	227
4.5.	Análisis de costos unitarios	235
Capítulo V	241
5.	Análisis y discusión de los resultados.....	241
5.1.	Análisis y discusión de resultados de la consistencia del concreto	241
5.1.1.	Concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar	241
5.1.2.	Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	242
5.1.3.	Concreto con adición de biochar	243
5.2.	Análisis y discusión de resultados de la resistencia a la compresión	245
5.2.1.	Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	246

5.2.2.	Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	249
5.2.3.	Concreto con adición de biochar	253
5.3.	Análisis y discusión de resultados de resistencia a tracción indirecta.....	256
5.3.1.	Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	257
5.3.2.	Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	259
5.3.3.	Concreto con adición de biochar	262
5.4.	Análisis y discusión de resultados de la resistencia a la flexión	264
5.4.1.	Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	264
5.4.2.	Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	266
5.4.3.	Concreto con adición de biochar	268
5.5.	Análisis y discusión de resultados de la densidad, absorción y %vacíos	269
5.5.1.	Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	270
5.5.2.	Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	274
5.5.3.	Concreto con adición de biochar	277
5.6.	Análisis y discusión de resultados del análisis de costos	281
5.6.1.	Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	281
5.6.2.	Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	282
5.6.3.	Concreto con adición de biochar	282
Capítulo VI.....		284
6.	Conclusiones y Recomendaciones	284

6.1.	Conclusiones.....	284
6.1.1.	Conclusión general.....	284
6.1.2.	Conclusiones específicas.....	285
6.2.	Recomendaciones	287
6.2.1.	Líneas de Investigación Futuras.....	288
	Referencias bibliográficas.....	290
	Anexos	299

Índice de Tablas

Tabla 1 Propiedades del biochar de cáscara de Castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>).....	34
Tabla 2 Valores máximos admisibles de sustancias disueltas en el agua para concreto .	45
Tabla 3 Mezclas según su asentamiento	48
Tabla 4 Matriz de operacionalización de variables.....	61
Tabla 5 Tamaño de la muestra – ensayo de resistencia a la compresión	63
Tabla 6 Tamaño de muestra – ensayo de resistencia a la tracción indirecta.....	64
Tabla 7 Tamaño de muestra – ensayo de resistencia a la flexión	64
Tabla 8 Tamaño de muestra – ensayo de densidad, absorción y porcentaje de vacíos....	65
Tabla 9 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	66
Tabla 10 Ensayos realizados al agregado grueso	95
Tabla 11 Cantidad mínima de muestra – contenido de finos por lavado con agua del agregado grueso	96
Tabla 12 Cantidad mínima de muestra – análisis granulométrico del agregado grueso..	98
Tabla 13 Cantidad mínima de muestra – contenido de humedad del agregado grueso .	100
Tabla 14 Cantidad mínima de muestra – peso específico y absorción del agregado grueso	102
Tabla 15 Gradación de las muestras de ensayo – resistencia a la abrasión	108
Tabla 16 Número de esferas – resistencia a la abrasión	108
Tabla 17 Ensayos realizados al agregado fino	110
Tabla 18 Cantidad mínima de muestra – contenido de finos por lavado con agua del agregado fino	111
Tabla 19 Selección del asentamiento	123

Tabla 41	Materiales que pasan por el tamiz N° 200 del agregado grueso	161
Tabla 42	Análisis granulométrico del agregado grueso – Muestra 01	162
Tabla 43	Análisis granulométrico del agregado grueso – Muestra 02.....	163
Tabla 44	Análisis granulométrico del agregado grueso – Muestra 03.....	164
Tabla 45	Contenido de humedad de agregado grueso	166
Tabla 46	Peso específico y absorción del agregado grueso	167
Tabla 47	Peso unitario suelto y vacíos del agregado grueso.....	168
Tabla 48	Peso unitario compacto y vacíos del agregado grueso.....	170
Tabla 49	Resistencia a la abrasión del agregado grueso.....	171
Tabla 50	Materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino.....	172
Tabla 51	Análisis granulométrico del agregado fino – Muestra 01	174
Tabla 52	Análisis granulométrico del agregado fino – Muestra 02	175
Tabla 53	Análisis granulométrico del agregado fino – Muestra 03	176
Tabla 54	Contenido de humedad del agregado fino	177
Tabla 55	Peso específico y absorción del agregado fino	178
Tabla 56	Peso unitario y vacíos del agregado fino – suelto.....	180
Tabla 57	Peso unitario y vacíos del agregado fino – compacto.....	181
Tabla 58	Características físicas y volumétricas de los agregados	183
Tabla 59	Características del aditivo	183
Tabla 60	Características del biochar finamente molido.....	184
Tabla 61	Resultados del diseño de mezclas	184
Tabla 62	Dosificación del concreto control	185

Tabla 63 Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%	186
Tabla 64 Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%	186
Tabla 65 Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%	186
Tabla 66 Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%	187
Tabla 67 Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%	187
Tabla 68 Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%	188
Tabla 69 Dosificación del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%	188
Tabla 70 Dosificación del concreto con adición de biochar de biochar en peso del cemento en 3%	189
Tabla 71 Dosificación del concreto con adición de biochar de biochar en peso del cemento en 5%	189
Tabla 72 Registro de las temperaturas tomadas al concreto fresco durante su preparación	190
Tabla 73 Registro del asentamiento (slump) del concreto fresco	191
Tabla 74 Dimensionamiento de briquetas del concreto control para compresión	193

Tabla 75 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10% para compresión	193
Tabla 76 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15% para compresión	194
Tabla 77 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20% para compresión	194
Tabla 78 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1% para compresión	195
Tabla 79 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2% para compresión	195
Tabla 80 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3% para compresión	196
Tabla 81 Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1% para compresión	196
Tabla 82 Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3% para compresión	197
Tabla 83 Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5% para compresión	197
Tabla 84 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto control.....	199
Tabla 85 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%	199
Tabla 86 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%	200

Tabla 87 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%	200
Tabla 88 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%	201
Tabla 89 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%	201
Tabla 90 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%	202
Tabla 91 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%	202
Tabla 92 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%	203
Tabla 93 Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%	203
Tabla 94 Dimensionamiento de briquetas del concreto control para tracción indirecta	206
Tabla 95 Dimensionamiento de briquetas concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10% para tracción indirecta	206
Tabla 96 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15% para tracción indirecta	207
Tabla 97 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20% para tracción indirecta	207
Tabla 98 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1% para tracción indirecta	208

Tabla 99 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2% para tracción indirecta.....	208
Tabla 100 Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3% para tracción indirecta.....	209
Tabla 101 Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1% para tracción indirecta	209
Tabla 102 Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3% para tracción indirecta	210
Tabla 103 Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5% para tracción indirecta	210
Tabla 104 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto control	211
Tabla 105 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%	212
Tabla 106 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%	212
Tabla 107 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%	213
Tabla 108 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%	213
Tabla 109 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%	214
Tabla 110 Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%	214

Tabla 111	Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%.....	215
Tabla 112	Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%.....	215
Tabla 113	Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%.....	216
Tabla 114	Dimensionamiento de vigas del concreto control.....	218
Tabla 115	Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10% para flexión	218
Tabla 116	Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15% para flexión	219
Tabla 117	Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20% para flexión	219
Tabla 118	Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1% para flexión.....	220
Tabla 119	Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2% para flexión.....	220
Tabla 120	Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3% para flexión.....	221
Tabla 121	Dimensionamiento de vigas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1% para flexión.....	221
Tabla 122	Dimensionamiento de vigas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3% para flexión.....	222

Tabla 123	Dimensionamiento de vigas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5% para flexión.....	222
Tabla 124	Resistencia a la flexión de vigas del concreto control	223
Tabla 125	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%	224
Tabla 126	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%	224
Tabla 127	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%	224
Tabla 128	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%	225
Tabla 129	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%	225
Tabla 130	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%	225
Tabla 131	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%	226
Tabla 132	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%	226
Tabla 133	Resistencia a la flexión de vigas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%	226
Tabla 134	Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto control	228

Tabla 135 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%	228
Tabla 136 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%	229
Tabla 137 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%	229
Tabla 138 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%	230
Tabla 139 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%	230
Tabla 140 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%	231
Tabla 141 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%.....	231
Tabla 142 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%.....	232
Tabla 143 Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%.....	232
Tabla 144 Análisis de costos unitarios del concreto control.....	235
Tabla 145 Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del agregad. fino en vol. en 10%	236
Tabla 146 Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del agregad. fino en vol. en 15%	236

Tabla 147 Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del agregad. fino en vol. en 20%	237
Tabla 148 Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del cemento en peso en 1%	237
Tabla 149 Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del cemento en peso en 2%	238
Tabla 150 Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del cemento en peso en 3%	238
Tabla 151 Análisis de costos unitarios del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%	239
Tabla 152 Análisis de costos unitarios del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%	239
Tabla 153 Análisis de costos unitarios del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%	240
Tabla 154 Cuadro resumen – resultados de resistencia a la compresión	246
Tabla 155 Cuadro resumen – resultados de resistencia a la tracción indirecta.....	256
Tabla 156 Cuadro resumen – resultados resistencia a la flexión en vigas	264
Tabla 157 Cuadro resumen – resultados a la densidad, absorción y porcentaje de vacíos	270
Tabla 158 Cuadro resumen – análisis de costos por m ³ de concreto	281

Índice de Figuras

Figura 1 Árbol de Castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>).....	24
Figura 2 Fruto del árbol de Castaña.....	24
Figura 3 Proceso genérico de la obtención del biochar	28
Figura 4 Tecnología de producción - pirolizador de flujo continuo	30
Figura 5 Tecnología de producción - cilindros TLUD	31
Figura 6 Tecnología de producción - kontiki.....	32
Figura 7 Morfología microscópica del biochar.....	33
Figura 8 Tipos de cemento según la ASTM C150 (2024).....	39
Figura 9 Tipos de cemento según la ASTM C1157 (2008).....	40
Figura 10 Propiedades de los agregados.....	43
Figura 11 Clasificación de los aditivos.....	46
Figura 12 Tronco de cono para Slump.....	48
Figura 13 Tipo de falla de los cilindros de concreto.....	51
Figura 14 Ensayo de tracción indirecta.....	52
Figura 15 Ensayo de flexión con carga en dos puntos.....	52
Figura 16 Flujograma de trabajo.....	69
Figura 17 Visita técnica al CIN CIA	72
Figura 18 Recolección de la biomasa residual (coco y cáscaras de castaña)	72
Figura 19 Almacén de biomasa en el CIN CIA	73
Figura 20 Equipo para sinterización (pirólisis) de materia prima - cilindro TLUD	73
Figura 21 Encendido del fuego para iniciar el proceso de pirólisis.....	74
Figura 22 Colocación de la tapa modificada y chimenea metálica.....	74

Figura 23 Pirólisis con llama limpia	75
Figura 24 Medición de la temperatura de pirólisis con el equipo portátil (pirómetro)....	75
Figura 25 Fluctuaciones en la medición de temperatura de pirólisis con el pirómetro ...	76
Figura 26 Finalización del proceso de pirólisis	77
Figura 27 Enfriamiento y extinción del biochar (“quenching”)	77
Figura 28 Almacenamiento del biochar	78
Figura 29 Ubicación de la cantera Vicho en Google Earth	79
Figura 30 Ubicación de la cantera Cunyac en Google Earth	79
Figura 31 Flujograma - composición química del biochar por XFR	81
Figura 32 Composición química del biochar por XFR	81
Figura 33 Flujograma – análisis granulométrico del biochar	85
Figura 34 Análisis granulométrico del biochar	85
Figura 35 Flujograma - peso específico y absorción del biochar como arena	87
Figura 36 Peso específico y absorción del biochar como arena	88
Figura 37 Flujograma – peso unitario suelto del biochar como arena	90
Figura 38 Peso unitario suelto del biochar como arena	90
Figura 39 Flujograma – peso unitario compactado del biochar como arena	91
Figura 40 Peso unitario compactado del biochar como arena	91
Figura 41 Flujograma – densidad del biochar como cemento y/o aditivo	94
Figura 42 Densidad del biochar como cemento y/o aditivo	94
Figura 43 Flujograma – contenido de finos por lavado con agua del agregado grueso ..	96
Figura 44 Contenido de finos por lavado con agua del agregado grueso	97
Figura 45 Flujograma – análisis granulométrico del agregado grueso	99

Figura 46 Análisis granulométrico del agregado grueso	99
Figura 47 Flujograma – contenido de humedad del agregado grueso	101
Figura 48 Contenido de humedad del agregado grueso.....	101
Figura 49 Flujograma – peso específico y absorción del agregado grueso	103
Figura 50 Peso específico y absorción del agregado grueso	103
Figura 51 Flujograma – peso unitario suelto del agregado grueso	105
Figura 52 Peso unitario suelto del agregado grueso	105
Figura 53 Flujograma – peso unitario compactado del agregado grueso	106
Figura 54 Peso unitario compactado del agregado grueso	106
Figura 55 Flujograma – resistencia a la abrasión	109
Figura 56 Resistencia a la abrasión.....	109
Figura 57 Flujograma – contenido de finos por lavado con agua del agregado fino.....	111
Figura 58 Contenido de finos por lavado con agua del agregado fino	112
Figura 59 Flujograma – análisis granulométrico del agregado fino	113
Figura 60 Análisis granulométrico del agregado fino	114
Figura 61 Flujograma – contenido de humedad del agregado fino	115
Figura 62 Contenido de humedad del agregado fino	115
Figura 63 Flujograma – peso específico y absorción del agregado fino	117
Figura 64 Peso específico y absorción del agregado fino.....	118
Figura 65 Flujograma – peso unitario suelto del agregado fino	120
Figura 66 Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido.....	120
Figura 67 Flujograma – peso unitario compactado del agregado fino	121
Figura 68 Peso unitario compactado del agregado fino.....	121

Figura 69 Flujograma - elaboración y curado de especímenes de concreto	133
Figura 70 Elaboración y curado de especímenes de concreto	135
Figura 71 Flujograma - medición de la temperatura del concreto fresco	136
Figura 72 Medición de la temperatura del concreto fresco	136
Figura 73 Flujograma - asentamiento del concreto (slump test)	137
Figura 74 Asentamiento del concreto (slump test)	138
Figura 75 Dimensionamiento de muestras cilíndricas	140
Figura 76 Dimensionamiento de muestras prismáticas (vigas)	140
Figura 77 Flujograma - resistencia a la compresión	142
Figura 78 Resistencia a la compresión	142
Figura 79 Flujograma - resistencia a la tracción indirecta	144
Figura 80 Resistencia a la tracción indirecta	144
Figura 81 Flujograma - resistencia a la flexión	146
Figura 82 Resistencia a la flexión	146
Figura 83 Flujograma - densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido	148
Figura 84 Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido	149
Figura 85 Composición química del biochar por Fluorescencia de Rayos X	152
Figura 86 Contenido de carbono fijo del biochar	153
Figura 87 Alcalinidad (pH) del biochar	153
Figura 88 Curva granulométrica del biochar como agregado fino	155
Figura 89 Peso específico de masa del biochar como agregado fino	156
Figura 90 Porcentaje de absorción del biochar como agregado fino	156
Figura 91 Peso unitario suelto del biochar como arena	157

Figura 92 Porcentaje de vacíos del biochar como arena - suelto	158
Figura 93 Peso unitario compacto del biochar como arena	159
Figura 94 Porcentaje de vacíos del biochar como arena - compacto	159
Figura 95 Densidad del biochar finamente molido.....	160
Figura 96 Porcentaje de finos que pasan el tamiz N° 200 del agregado grueso	161
Figura 97 Curva granulométrica del agregado grueso – Muestra 01	163
Figura 98 Curva granulométrica del agregado grueso – Muestra 02.....	164
Figura 99 Curva granulométrica del agregado grueso – Muestra 03.....	165
Figura 100 Módulo de fineza del agregado grueso.....	165
Figura 101 Diagrama de barras del contenido de humedad.....	166
Figura 102 Peso específico de masa del agregado grueso	167
Figura 103 Porcentaje de absorción del agregado grueso.....	168
Figura 104 Peso unitario suelto del agregado grueso	169
Figura 105 Porcentaje de vacíos del agregado grueso - suelto	169
Figura 106 Peso unitario compacto del agregado grueso	170
Figura 107 Porcentaje de vacíos del agregado grueso - compacto	171
Figura 108 Resistencia a abrasión del agregado grueso	172
Figura 109 Porcentaje de finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino	173
Figura 110 Curva granulométrica del agregado fino – Muestra 01	174
Figura 111 Curva granulométrica del agregado fino – Muestra 02	175
Figura 112 Curva granulométrica del agregado fino – Muestra 03	176
Figura 113 Módulo de fineza del agregado fino.....	177
Figura 114 Contenido de humedad del agregado fino.....	178

Figura 115 Peso específico del agregado fino	179
Figura 116 Porcentaje de absorción del agregado fino.....	179
Figura 117 Peso unitario suelto del agregado fino	180
Figura 118 Porcentaje de vacíos del agregado fino – suelto.....	181
Figura 119 Peso unitario compacto del agregado fino	182
Figura 120 Porcentaje de vacíos del agregado fino – compacto.....	182
Figura 121 Representación gráfica de las temperaturas promedio	190
Figura 122 Representación gráfica de las temperaturas promedio adyacentes a la temperatura ambiente.....	191
Figura 123 Representación gráfica de los promedios del asentamiento del concreto fresco	192
Figura 124 Esquema de los patrones de tipos de fracturas – adaptado de la NTP 339.034 (2015).....	198
Figura 125 Comparación de los resultados de las resistencias a compresión en testigos cilíndricos – 3 días	204
Figura 126 Comparación de los resultados de las resistencias a compresión en testigos cilíndricos – 7 días	204
Figura 127 Comparación de los resultados de las resistencias a compresión en testigos cilíndricos – 28 días	205
Figura 128 Comparación de los resultados de las resistencias a tracción indirecta en testigos cilíndricos - 7 días.....	216
Figura 129 Comparación de los resultados de las resistencias a tracción indirecta en testigos cilíndricos - 28 días.....	217

Figura 130 Comparación de los resultados de las resistencias a flexión en vigas – 28 días	227
Figura 131 Comparación de resultados del ensayo de densidad del concreto endurecido	233
Figura 132 Comparación de resultados del ensayo de porcentaje de absorción del concreto endurecido.....	233
Figura 133 Comparación de resultados del ensayo de porcentaje de vacíos del concreto endurecido.....	234
Figura 134 Comparación de los resultados del análisis de costos unitarios del concreto para 1m ³	240
Figura 135 Curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena	246
Figura 136 Gráfico – resistencia a la compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	247
Figura 137 Curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento	250
Figura 138 Gráfico – resistencia a la compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	250
Figura 139 Curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto control vs concreto con adición de biochar	253
Figura 140 Gráfico – resistencia a la compresión del concreto control vs concreto con adición de biochar	254

Figura 141 Curva de madurez de la resistencia a tracción del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena	257
Figura 142 Gráfico – resistencia a la tracción indirecta del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	258
Figura 143 Curva de madurez de la resistencia a tracción del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento	260
Figura 144 Gráfico – resistencia a la tracción indirecta del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.....	260
Figura 145 Curva de madurez de la resistencia a tracción del concreto control vs concreto con adición de biochar	262
Figura 146 Gráfico – resistencia a la tracción indirecta del concreto control vs concreto con adición de biochar	262
Figura 147 Curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena	265
Figura 148 Gráfico – resistencia a la flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena por biochar.....	265
Figura 149 Curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento	266
Figura 150 Gráfico – resistencia a la flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar	267
Figura 151 Curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto control vs concreto con adición de biochar	268

Figura 152 Gráfico – resistencia a la flexión del concreto control vs concreto con adición de biochar	268
Figura 153 Gráfico – densidad seca del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena biochar	271
Figura 154 Gráfico – absorción del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena biochar	271
Figura 155 Gráfico – porcentaje de vacíos del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena biochar	272
Figura 156 Gráfico – densidad seca del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.....	274
Figura 157 Gráfico – absorción del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.....	275
Figura 158 Gráfico – porcentaje de vacíos del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.....	275
Figura 159 Gráfico – densidad seca del concreto control vs concreto con adición de biochar	278
Figura 160 Gráfico – absorción del concreto control vs concreto con adición de biochar	278
Figura 161 Gráfico – porcentaje de vacíos del concreto control vs concreto con adición de biochar	279

Introducción

En la actualidad, la búsqueda de materiales sostenibles y estrategias efectivas para mitigar el cambio climático ha impulsado el desarrollo de tecnologías que contribuyan a disminuir la liberación de gases responsables del efecto invernadero. En este contexto, el biochar se presenta como una alternativa prometedora debido a su capacidad para capturar y almacenar carbono, mejorar las propiedades de los materiales de construcción y valorizar residuos orgánicos de origen agroindustrial. Según la International Biochar Initiative [IBI] (2024), la producción de biochar se realiza mediante procesos termoquímicos como la pirólisis o la gasificación, en los que la biomasa —proveniente de residuos agrícolas, forestales o industriales— se somete a altas temperaturas en condiciones limitadas de oxígeno, generando un material sólido altamente poroso capaz de retener carbono durante cientos o miles de años.

El uso del biochar no solo permite reducir las emisiones asociadas a la descomposición de los residuos orgánicos, sino que también promueve una economía circular al convertir desechos en insumos valiosos para diversos sectores. La IBI (2024), destaca que su aplicación se extiende desde la agricultura hasta el entorno construido, donde puede incorporarse a materiales como el cemento o el asfalto para lograr productos con balance de carbono negativo y mejorar sus propiedades térmicas y estructurales.

En el ámbito del concreto, la incorporación de biochar ha despertado un creciente interés debido a su estructura porosa, su alta área superficial y su potencial para mejorar la trabajabilidad, durabilidad y resistencia de las mezclas (Li et al., 2023). Asimismo, contribuye a la reducción de la huella de carbono del cemento Portland, reconocido por su elevada generación de dióxido de carbono dentro del sector constructivo (Gupta et al., 2018).

La presente investigación, titulada “*Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del Cusco, 2024*”, evalúa el comportamiento del concreto al incorporar biochar obtenido de una mezcla de coco y cáscara de castaña *Bertholletia excelsa*, aplicado de tres formas: como sustituto parcial del agregado fino (arena gruesa), como sustituto parcial del cemento y como adición. El objetivo principal es analizar cómo influye el biochar en las propiedades físico-mecánicas del concreto, buscando determinar la combinación más eficiente que promueva un material más resistente, sostenible y compatible con las condiciones locales de Cusco.

Esta investigación no solo busca aportar al conocimiento técnico sobre el uso del biochar en la ingeniería civil, sino también contribuir al desarrollo de materiales ecoeficientes, que integren criterios ambientales y estructurales en el diseño de edificaciones e infraestructuras sostenibles.

Capítulo I

1. Planteamiento del problema

1.1. Descripción de la realidad problemática

En el contexto actual, uno de los principales desafíos del sector construcción es la creación de materiales con menor impacto ambiental y mayor sostenibilidad, sin comprometer el desempeño estructural ni la durabilidad del concreto. El sector de la construcción está significativamente desviado de cumplir sus objetivos de descarbonización para 2030 y 2050. Entre 2015 y 2023, las emisiones de CO₂ de las operaciones de construcción aumentaron un 5,4 %, frente a la reducción del 28,1 % requerida (United Nations Environment Programme [UNEP] y Global ABC, 2025). La fabricación del cemento Portland, que constituye el principal componente del concreto, genera alrededor del 6 % al 8 % de las emisiones totales de CO₂ a nivel mundial, mientras que la extracción de agregados naturales genera impactos negativos en los ecosistemas, tales como la degradación de cauces fluviales, pérdida de biodiversidad y contaminación del agua (Global Cement and Concrete Association [GCCA], 2025). En este contexto, la búsqueda de materiales alternativos de origen renovable y bajo impacto ambiental se ha convertido en una prioridad técnica y científica para la ingeniería civil moderna.

A nivel mundial, la creciente generación de residuos agrícolas constituye un problema ambiental significativo debido a su manejo inadecuado. La mayoría de estos residuos lignocelulósicos —como cáscaras, fibras y restos vegetales— son quemados o dispuestos en el suelo, lo que provoca contaminación del aire, del agua y aumento de gases de efecto invernadero. No obstante, dichos residuos poseen un alto potencial de valorización al poder transformarse en productos de valor agregado, como el biocarbón (biochar), biocombustibles o biofertilizantes, dentro de un enfoque de economía circular y sostenibilidad ambiental (Koul et al., 2022). Por

ejemplo, en India se generan aproximadamente 141 millones de toneladas anuales de desechos generados por la actividad agrícola, de las cuales más de 92 millones se queman debido a la falta de medios para gestionarlos sosteniblemente, lo que intensifica los problemas de calidad del aire y salud pública (Gatkal et al., 2024). Asimismo, se estima que en 2022 la generación mundial de residuos agrícolas fue de aproximadamente 980 millones de toneladas, muchas de las cuales aportan a la contaminación ambiental al no ser utilizadas como recurso valioso (Liu et al., 2025).

En el Perú, la agroindustria enfrenta el reto de transitar hacia modelos más sostenibles mediante la economía circular, pues únicamente de esta manera podrá no solo reducir su impacto medioambiental sino también generar nuevas cadenas de valor y acceder a mercados emergentes (Instituto Tecnológico de la Producción [ITP], 2025). La bioconversión de residuos agroindustriales representa una oportunidad estratégica al permitir transformar biomasa actualmente subutilizada en recursos valiosos.

La producción de castaña amazónica en Perú representa una importante actividad económica para las regiones amazónicas del país. En los últimos años, la demanda internacional ha impulsado su crecimiento, situando al Perú entre los mayores exportadores mundiales, ocupando el tercer puesto en 2023 (Centro de Investigación de Economía y Negocios Globales [CIEN], 2024). De un fruto de castaña aproximadamente el 85% de su peso corresponden al coco y cáscaras lo cual genera grandes cantidades de residuos durante el proceso de recolección hasta la exportación; sin embargo, estas materias primas pueden ser adecuadas para diferentes aplicaciones industriales como son la producción de carbón activado, biocarbón y materiales de construcción (Torres et al., 2021). La información disponible sobre la cantidad y las propiedades de estos residuos sigue siendo limitada e imprecisa; sin embargo, se sabe que, durante el proceso de recolección estos suelen acumularse en los bosques, ser dispuestos directamente al ambiente o

incinerados, generando impactos negativos en el entorno (Cabeza, 2018). A partir de esta problemática, se busca la aplicación del biochar proveniente de residuos de coco y cáscara de la castaña en el concreto.

El uso de biochar como material alternativo en el concreto representa una línea de investigación emergente que combina los principios de sostenibilidad y economía circular. Diversos estudios han evidenciado que el biochar presenta propiedades capaces de modificar de manera notable el comportamiento del concreto; no obstante, su efecto varía considerablemente según el tipo de biomasa utilizada en su producción, temperatura de pirólisis y forma de incorporación. Esto ha generado resultados dispares entre los estudios existentes, destacando la necesidad de investigaciones más contextualizadas que definan parámetros óptimos de dosificación y comportamiento en condiciones locales.

En ese sentido, la presente investigación cobra relevancia al abordar de manera experimental el aprovechamiento del biochar obtenido a partir de residuos de coco y cáscara de castaña amazónica, materiales representativos de la biomasa residual del sur oriente peruano. Este estudio tiene como propósito aportar al conocimiento científico relacionado con la aplicación del biochar en el concreto, y también ofrecer una alternativa práctica para el manejo de residuos agroforestales y apoyar iniciativas que buscan que la construcción sea un rubro menos contaminante. Con ello, se promueve un modelo de desarrollo sostenible alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible, especialmente con el ODS 9, orientado a fomentar la innovación y promover infraestructuras e industrias sostenibles y resilientes, y el ODS 12, enfocado en hacer más y mejor con menos recursos lo cual habla de sobre una producción y consumo sostenible (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2025).

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

PG: ¿Qué efecto tiene el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), incorporado como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento y como adición, en las propiedades físico-mecánicas y en la viabilidad económica del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024?

1.2.2. Problemas específicos

PE-01: ¿Cómo influye el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), incorporado como sustituto parcial del agregado fino, en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024?

PE-02: ¿Cómo influye el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), incorporado como sustituto parcial del cemento, en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024?

PE-03: ¿Cómo influye el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), incorporado como adición, en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024?

PE-04: ¿Cuál es la viabilidad económica del biochar como material sustituto o aditivo, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

OG: Determinar el efecto del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), incorporado como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento y como adición, en las propiedades físico-mecánicas y la viabilidad económica del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

OE-01: Determinar la influencia del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), como sustituto parcial del agregado fino en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

OE-02: Determinar la influencia del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), como sustituto parcial del cemento en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

OE-03: Determinar la influencia del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), como adición en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

OE-04: Realizar el análisis de costos unitarios del biochar como material sustituto o aditivo, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), en el concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

1.4. Justificación

El desarrollo de esta investigación surge a partir de la necesidad de explorar y promover alternativas sostenibles en el ámbito de la construcción, un sector con alto impacto ambiental por su considerable demanda de recursos naturales y la liberación de gases responsables del efecto invernadero. El concreto, material ampliamente utilizado en el mundo, depende principalmente del cemento Portland, cuya producción contribuye significativamente al calentamiento global. Frente a esta problemática, resulta esencial explorar materiales complementarios o sustitutos que permitan reducir la huella ambiental sin comprometer las propiedades mecánicas ni la durabilidad del concreto.

En este contexto, el biochar se presenta como un material con gran potencial, gracias a su carácter renovable y a su capacidad de optimizar determinadas propiedades del concreto. Este material se obtiene mediante la pirólisis de biomasa, proceso que además de generar un producto útil, contribuye a la retención de carbono, favoreciendo la mitigación del cambio climático. Diversas investigaciones internacionales han demostrado que el biochar puede influir en la trabajabilidad, densidad, resistencia y durabilidad del concreto; sin embargo, los resultados varían según el tipo de biomasa y las condiciones de producción, lo que resalta la importancia de realizar estudios adaptados a cada contexto local.

Desde esta perspectiva y tomando en cuenta los contextos ambiental y social, el estudio busca dar valor a los residuos generados por la industria de la castaña en la Amazonía Peruana, especialmente en Madre de Dios, donde grandes cantidades de coco y cáscaras del fruto son desechadas o quemadas, generando impactos negativos en los ecosistemas. Su aprovechamiento como materia prima para la elaboración de biochar representa una oportunidad para disminuir la

contaminación, evitar la quema de residuos y fortalecer un esquema de economía circular que impulse el desarrollo sostenible en la región.

En línea con los avances hacia una construcción más sostenible, en junio de 2025 se puso en funcionamiento en Piura la primera planta industrial dedicada a la producción de biochar en el Perú. Esta iniciativa, promovida por Inspiratus Technologies con el apoyo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA), tiene la capacidad de transformar grandes volúmenes de residuos agrícolas en biochar destinado a la mejora de suelos y a la captura permanente de carbono. La apertura de esta planta evidencia el creciente interés nacional por este material y refuerza la relevancia de desarrollar investigaciones que analicen nuevas aplicaciones del biochar, como su incorporación en mezclas de concreto (AGROPERÚ, 2025).

A nivel técnico y científico, esta investigación busca generar información experimental sobre el comportamiento del concreto con adición de biochar proveniente de biomasa residual de la industria castañera, bajo las condiciones propias de la ciudad del Cusco. En la actualidad no existen estudios previos sobre el uso de biochar en el concreto lo que justifica la necesidad de un estudio que permita evaluar su efecto. Los resultados permitirán conocer cómo varían las propiedades físico-mecánicas del concreto y si su uso puede considerarse viable para futuras aplicaciones estructurales o no estructurales. Además, se pretende aportar evidencia que sirva como base para nuevas líneas de investigación sobre materiales sostenibles en el país.

El uso del biochar es prometedor a un futuro cercano, puesto que esta es una alternativa que está recientemente en práctica como es el caso de la empresa estadounidense Solid Carbon. Esta empresa vertió, el 1 de junio del año 2022, una losa de concreto de un aproximado de 500 m² en Dayton, Oregón, en el cual se hizo uso de biochar proveniente de los desechos municipales, obteniendo como resultado el secuestro de más de 5.1 toneladas de CO₂ (Degerman, 2022).

Finalmente, el estudio tiene una relevancia práctica al proponer el uso de un recurso disponible y de bajo costo como componente del concreto. Esta propuesta podría beneficiar tanto al sector de la construcción como al medio ambiente y a las comunidades involucradas en la producción de castaña. De esta manera, la investigación se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 9 y 12 de la ONU (2025).

1.5. Alcances y limitaciones

1.5.1. Alcances

- a) Evaluar cómo cambia el comportamiento del concreto cuando una parte del agregado fino es reemplazado por el biochar producido a partir de residuos de coco y cáscaras de castaña.
- b) Evaluar cómo cambia el comportamiento del concreto cuando una parte del cemento es reemplazado por el biochar producido a partir de residuos de coco y cáscara de castaña.
- c) Evaluar cómo cambia el comportamiento del concreto cuando se le añade biochar producido a partir de residuos de coco y cáscara de castaña.
- d) Evaluar diferentes porcentajes de sustitución y adición y compararlos con un concreto patrón o control.
- e) Diseñar las mezclas de concreto aplicando los lineamientos establecidos por el American Concrete Institute (ACI), mediante el método ACI 211.1 (2004), manteniendo constantes las características de los materiales empleados durante el estudio.
- f) Trabajar exclusivamente con cemento yura tipo HS, agregado fino procedente de la cantera Cunyac y agregado grueso de la cantera vicho, asegurando uniformidad en las características de los insumos.
- g) Aplicar procedimientos consistentes de mezclado, compactado, curado y ensayo, de modo de que todas las muestras pasen por el mismo proceso y los resultados sean comparables.

- h) Evaluar las propiedades en estado fresco como en estado endurecido del concreto siguiendo los procedimientos establecidos en las normas técnicas peruanas.
- i) Analizar la influencia del biochar en el concreto, considerando su uso potencial en elementos estructurales y pavimentos.
- j) Comparar las propiedades obtenidas con las del concreto convencional, identificando posibles mejoras o disminuciones en el desempeño para cada nivel de reemplazo o adición.

1.5.2. Limitaciones

1.5.2.1. Limitaciones relacionadas con los materiales

- a) La investigación utiliza exclusivamente cemento Yura tipo HS, sin considerar otros tipos de cemento que podrían modificar el comportamiento del concreto.
- b) El biochar empleado en los ensayos proviene únicamente de residuos de coco y cáscaras de castaña, por lo que no se incluyen otros tipos de biochar obtenidos de otros tipos de biomasa.
- c) Los agregados proceden únicamente de la cantera de Cunyac (fino) y Vicho (grueso), lo que limita la extrapolación de los resultados a otros yacimientos.
- d) El agua empleada corresponde a agua potable proveniente de la red de distribución de SEDACUSCO, sin evaluarse el efecto de otros tipos de agua (con diferente contenido de sales, pH o impurezas).

1.5.2.2. Limitaciones experimentales y metodológicas

- a) El reemplazo del agregado fino se restringe a niveles de 10%, 15% y 20%, sin considerar porcentajes menores, mayores o intermedios.
- b) El reemplazo de cemento se restringe a niveles de 1%, 2% y 3%, sin considerar porcentajes menores, mayores o intermedios.

- c)* La adición de biochar a la mezcla se restringe a niveles de 1%, 3% y 5%, sin considerar porcentajes menores, mayores o intermedios.
- d)* Las propiedades analizadas en el concreto en estado fresco se limitan a ensayos de temperatura y asentamiento.
- e)* Las propiedades analizadas en el concreto en estado endurecido se limitan a ensayos de compresión, tracción indirecta, flexión; así como, densidad, absorción y porcentaje de vacíos.
- f)* Las mezclas se diseñan únicamente con el método ACI 211.1 (2004), sin comparar otros métodos de dosificación.
- g)* El estudio trabaja con edades de curado de 3, 7 y 28 días para ensayos de compresión; de 7 y 28 días para ensayos de tracción indirecta y 28 días únicamente para ensayos a flexión y absorción-densidad-vacíos.
- h)* Se utilizó únicamente moldes cilíndricos de PVC de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para los ensayos de compresión, tracción indirecta y absorción-densidad-vacíos. Se utilizó únicamente moldes metálicos prismáticos de 15 cm de ancho, 15 cm de alto y 60 cm de largo para los ensayos a flexión.
- i)* La producción del biochar utilizado para los ensayos se produjo únicamente mediante la tecnología de cilindros TLUD (Top-Lit Updraft), sin considerar otras tecnologías de producción.
- j)* El curado de los especímenes de concreto se realizó en una poza de curado sin control de temperatura.

1.5.2.3. Limitaciones por condiciones ambientales

- a) Las variaciones de temperatura y humedad presentes durante el secado de los agregados.
- b) La temperatura y la humedad y velocidad del viento durante el proceso de mezclado, fraguado y curado de las muestras de concreto.
- c) Durante el fraguado, factores como la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento podrían alterar el desarrollo normal del proceso. Las condiciones de temperatura en el proceso de curado.

1.6. Delimitaciones

1.6.1. Delimitación espacial

El estudio se llevó a cabo en el ámbito geográfico correspondiente a la ciudad del Cusco, ubicada en el sur del Perú. Los ensayos experimentales se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil. Asimismo, el análisis químico del biochar se llevó a cabo en la Escuela Profesional de Ingeniería Química, ambos pertenecientes a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Los agregados utilizados provienen de canteras ubicadas en la misma región. La producción del biochar se llevó a cabo en el CINCIA, situado en el departamento de Madre de Dios, Perú.

1.6.2. Delimitación temporal

La investigación se ejecutó entre los meses de enero y agosto del año 2025. Durante este periodo se realizaron las etapas correspondientes a la producción del biochar, la selección y caracterización de los agregados, la preparación de los diseños de mezcla, el curado y las pruebas del concreto en laboratorio.

1.6.3. Delimitación en materiales y equipos

Se usaron materiales como:

- a)* Tipo de Cemento Portland: HS – Marca Yura S.A.
- b)* Agregado Grueso: Cantera Vicho
- c)* Agregado Fino: Cantera Cunyac
- d)* Agua potable proveniente de la red de distribución de SEDACUSCO.
- e)* Biochar proveniente de la Biomasa residual específicamente la cascara de castaña y coco de la misma, dicho biochar producido en el CINCIA.

Se usaron equipos como:

- a)* Maquina Universal (Ensayo de Resistencia a compresión, tracción indirecta, y flexión).
- b)* Pirolizador “Cilindro TLUD” (para la producción del biochar).
- c)* Pirómetro (para la medición de la temperatura durante el proceso de pirolización del biochar).
- d)* Analizador XRF Portátil (Fluorescencia de Rayos X del biochar).

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes a nivel internacional

Amancha (2024) realizó la investigación titulada “*Elaboración de concreto con adición de bagazo de café para incrementar su resistencia*” en la Universidad Técnica de Ambato en Ecuador, para la obtención del título de ingeniero civil. El estudio tuvo como objetivo evaluar mezclas de concreto con diferentes proporciones de bagazo y biocarbón de café como reemplazo del agregado fino, con el fin de incrementar la resistencia del concreto. La metodología utilizada fue de tipo aplicada, experimental y descriptiva, utilizando un enfoque cuantitativo. Para obtener el biocarbón, el bagazo fue sometido a un proceso de pirólisis a 349.50 °C. Tanto el bagazo sin tratar como el biocarbón fueron incorporados en el concreto como sustituto parcial del árido fino, con proporciones del 5%, 10% y 20% en volumen. Se efectuaron ensayos de resistencia a la compresión, y el módulo de elasticidad fue determinado mediante ecuaciones empíricas. En conclusión, se demostró que aplicar el bagazo sin tratamiento no generó mejoras significativas, mientras que el reemplazo con biocarbón al 20% proporcionó los valores más altos de desempeño, incrementando la resistencia a compresión en aproximadamente 22% y el módulo de Young en 8%. Esto evidencia que el biocarbón de bagazo de café puede mejorar la respuesta mecánica del concreto cuando se utiliza en proporciones adecuadas.

Li et al. (2023) desarrollaron el estudio “*Mechanical Properties of Concrete with Different Carya Cathayensis Peel Biochar Additions*” en la Universidad de Ciencia y Tecnología de Zhejiang en China. Este estudio corresponde a un artículo científico publicado en la revista Sustainability. El estudio tuvo como objetivo investigar la influencia del biochar elaborado a partir

de residuos de cáscara de *Carya cathayensis*, una biomasa característica de la provincia de Zhejiang en China, sobre las propiedades mecánicas básicas del concreto. La metodología de la investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de carácter aplicado y con un diseño experimental. El material se incorporó al concreto de tres formas: como adición (1-5% con respecto al peso del cemento), sustitución parcial del cemento (1-5% con respecto al peso del cemento) y sustitución parcial de arena (5-25% con respecto al volumen de arena). Los resultados indicaron que la mejor respuesta mecánica se obtuvo al reemplazar el 5% del volumen de arena por biochar, logrando incrementos del 16.7% en la resistencia a la compresión y del 27.4% en la resistencia a tracción indirecta. Asimismo, se observó que la zona de transición interfacial (ITZ) entre el biochar y la matriz cementicia presentó una estructura más compacta y uniforme que la de la arena. En conclusión, se recomienda el uso del biochar de *Carya cathayensis* como reemplazo de arena entre el 5% y el 10% en volumen.

Zalamea (2022) desarrolló la tesis titulada “*Diseño de hormigón hidráulico con biocarbón*” en la Universidad Católica de Cuenca en Ecuador, como requerimiento para obtener el título de Magíster en Construcciones con especialización en Administración de la Construcción Sustentable. La investigación tuvo como objetivo mejorar el comportamiento mecánico del concreto al adicionar biocarbón procedente de ramas de árboles de acacia (*Acacia scorpioides*). La metodología de la investigación fue aplicada, longitudinal prospectiva, explicativa, cuantitativa y de naturaleza experimental. El biocarbón fue pirolizado a 350°C, las partículas fueron reducidas utilizando un apisonador manual, y posteriormente se tamizó el material utilizando todo lo que pasó el tamiz N°100. Se realizó ensayos de compresión y se determinó la densidad del concreto endurecido. Se diseñó el hormigón base según el método ACI 211.1 (2004), considerando una resistencia especificada de 210 kg/cm². Se ensayaron dosificaciones de adición de biocarbón con

relación al peso del cemento de 1.5 %, 3.0 %, 4.5 % y 25.0 %. Como resultado las adiciones con biocarbón de 1.5 %, 3.0 % y 4.5 % mostraron incrementos de aproximadamente 19 %, 15 % y 14 % respectivamente, mientras que la adición de 25.0 % produjo una fuerte reducción (−77 %) en la resistencia a la compresión. En conclusión, el mayor incremento de resistencia se dio con una adición del 1.5%.

Turovaara (2022) desarrolló la tesis titulada "The effect of high-ratio biochar replacement in concrete on performance properties" en la Luleå University of Technology en Suecia, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Civil. El estudio tuvo como objetivo analizar las propiedades del concreto con biochar como reemplazo parcial del cemento y comparar los resultados obtenidos con los reportados en investigaciones anteriores. Se evaluaron porcentajes de sustitución de 5%, 8% y 10% en relación con el peso del cemento. Se realizaron ensayos con probetas cúbicas de 100 mm, las cuales fueron ensayadas a 28 y 56 días. Además, se evaluó la trabajabilidad, densidad, microestructura y propiedades químicas. Los resultados mostraron que la trabajabilidad fue significativamente menor en las mezclas de concreto con biochar. Asimismo, la densidad disminuyó conforme se incrementó el porcentaje de biochar incorporado. Un comportamiento similar se observó en la resistencia a la compresión, donde la muestra de referencia alcanzó una resistencia de 72 MPa a los 28 días, mientras que la muestra con 10 % de biochar presentó una resistencia de 52 MPa. Sin embargo, la muestra con 10 % de biochar evidenció el mayor incremento de resistencia a la compresión después de 28 días adicionales de curado.

Gupta et al. (2020) desarrollaron el estudio "*Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperatura*" en la National University of Singapore. Este estudio corresponde a un artículo científico publicado en la revista Construction

and Building Materials. El estudio tuvo como objetivo investigar la influencia de biochar producido a partir de biomasa lignocelulósica en el desempeño mecánico y la durabilidad del concreto de grado estructural expuesto a temperaturas elevadas. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, de carácter aplicado y diseño experimental, empleando biochar de biomasa leñosa obtenido por pirólisis a 500 °C (BC500), el cual fue incorporado al concreto en proporciones de 0,50 %, 1 % y 2 % en peso del cemento. Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión, flexión, tracción indirecta y permeabilidad en especímenes curados en condiciones normales y luego expuestos a temperaturas de 300 °C y 500 °C a los 28 días, induciendo el daño térmico mediante un horno eléctrico con una velocidad de calentamiento de 5 °C/min y un tiempo de permanencia de 1 hora. Los resultados evidenciaron que la adición de 0,50 % y 2 % de BC500 incrementó la resistencia a la compresión en 16 % y 9 %, respectivamente, y que el 2 % de biochar redujo la permeabilidad hasta en 40 %, además de minimizar el daño térmico y permitir una mayor retención de resistencia en comparación con el concreto patrón y con concreto con 10 % de humo de sílice. Los resultados sugieren que el biochar de residuos de madera constituye un aditivo sostenible y una alternativa viable al humo de sílice para mejorar la resistencia y durabilidad del concreto expuesto a altas temperaturas.

2.1.2. Antecedentes a nivel nacional

Becerra y Carrasco (2024) presentan la tesis de pregrado titulada “*Aplicación del mortero con biocarbón y malla de fibra de vidrio para reparación de grietas en muros de albañilería – Chiclayo*”, en la Universidad de San Martín de Porres como parte de su proceso para obtener el grado de Ingeniero Civil. El objetivo del estudio consiste en verificar la eficacia del mortero modificado con biocarbón, complementado con malla de fibra de vidrio, para la rehabilitación de grietas en muros de albañilería. La metodología empleada se basó en un diseño experimental con

nivel explicativo, de tipo aplicativo y con enfoque cuantitativo. Para la elaboración del mortero se utilizó una dosificación cemento–arena de 1:3, reemplazando de manera parcial el cemento por biocarbón en función de su peso. Posteriormente, se realizaron ensayos de fluidez y pruebas mecánicas (compresión, flexión y tracción) con la finalidad de caracterizar el comportamiento del mortero. Asimismo, se desarrollaron ensayos de compresión axial en pilas y compresión diagonal en muretes, tanto en elementos de control como en aquellos previamente fisurados y reparados con el mortero diseñado. En conclusión, los autores establecieron que el 2.5% de biocarbón es la dosificación óptima, logrando incrementos de 13.42% en la resistencia a compresión, 13.27% en flexión y 11.61% en tracción respecto al mortero patrón. Del mismo modo, las pilas reparadas mejoraron su capacidad a compresión axial en 116.89% y los muretes su resistencia a compresión diagonal en 124.87%, demostrando la eficacia del mortero con biocarbón para la rehabilitación de muros de albañilería.

Salvador (2023) presenta la tesis de pregrado titulada “*Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c=210\text{kg/cm}^2$, sustituyendo parcialmente el cemento por biocarbón de restos de madera, en la ciudad de Chiclayo*”, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo, para obtener título de Ingeniero Civil Ambiental. El objetivo del estudio fue determinar las propiedades físico-mecánicas del concreto al reemplazar parcialmente el cemento por biocarbón obtenido de restos de diversas especies de madera (tulipán, meijo, molle costeño, ficus y molle serrano). La metodología consistió en un estudio experimental, de nivel aplicativo y enfoque cuantitativo. El biocarbón se produjo por pirólisis en un recipiente metálico tipo campana invertida y fue caracterizado mediante análisis de densidad y difracción de rayos X. Para el concreto en estado fresco y endurecido se evaluaron asentamiento, resistencia a compresión y flexión, entre otras, aplicando sustituciones del 1%, 2% y 2.5%, además de una evaluación

económica. En conclusión, el análisis espectroscópico reveló que el biocarbón utilizado no alcanza los valores mínimos requeridos por la ASTM C618 (2022) para ser clasificado como material puzolánico. En cuanto a la trabajabilidad, el asentamiento disminuyó conforme aumentó la dosificación de biocarbón: la mezcla patrón registró 3.90”, mientras que las sustituciones del 1%, 2% y 2.5% alcanzaron 3.45”, 3.00” y 2.98”, respectivamente, evidenciando una reducción del 24% en el último caso. A los 28 días, la resistencia a compresión mostró valores de 213.53 kg/cm² para el concreto patrón y de 230.69 kg/cm², 248.97 kg/cm² y 202.47 kg/cm² para los porcentajes de 1%, 2% y 2.5%, destacando un mejor desempeño en las dos primeras dosificaciones. En flexión, todas las muestras fueron inferiores al patrón (39.95 kg/cm²), obteniéndose 35.07 kg/cm², 37.02 kg/cm² y 37.02 kg/cm², siendo el 2.5% el más cercano. Finalmente, el análisis económico evidenció una ligera disminución en el costo por m³: S/. 378.03 para el concreto control y S/. 377.92, S/. 377.84 y S/. 377.76 para los porcentajes de 1%, 2% y 2.5%, respectivamente.

Díaz (2019) presenta la tesis de pregrado titulada “*Propiedades del concreto $f'c=210$ kg/cm² en estado fresco al adicionarle biocarbón de aserrín en 5%, 7.5% y 10%, Chimbote – 2019*”, Universidad Cesar Vallejo, para obtener el título profesional de Ingeniero Civil. El objetivo de esta investigación fue determinar cómo varían las propiedades del concreto al incorporar biocarbón en proporciones de 5%, 7.5% y 10% respecto al peso del cemento. La metodología se desarrolló bajo un enfoque experimental, con un diseño cuasi experimental. El proceso contempló la obtención del biocarbón a partir de aserrín de madera tornillo, seguido de un Análisis Térmico Diferencial (ATD), un análisis químico del material producido. Así mismo, en el concreto fresco se evaluó la mezcla mediante ensayos de asentamiento y en el estado endurecido se evaluó pruebas de resistencia a la compresión tanto para el concreto patrón como para el concreto con biocarbón añadido. En conclusión, se determinó que la temperatura adecuada de calcinación fue de 430 °C

durante aproximadamente tres horas y media. El análisis químico evidenció que el biocarbón no cumplía con el mínimo del 70% exigido por la norma ASTM C618 (2022) para ser considerado un material puzolánico, presentando solo un 43% de compuestos como Fe_2O_3 , SiO_2 y CaO . En los ensayos de trabajabilidad, el concreto patrón registró un asentamiento de 3", mientras que los concretos con biocarbón mostraron valores de 1.87", 1.69" y 1.57" para los porcentajes de 5%, 7.5% y 10%, respectivamente, reflejando una menor fluidez y una consistencia más seca. En la resistencia a compresión a 28 días, se obtuvieron resultados de 213.10 kg/cm² para el concreto patrón, 227.70 kg/cm² con 5% de biocarbón, 220.40 kg/cm² con 7.5% y 212.30 kg/cm² con 10%, evidenciando que el mejor desempeño se alcanzó con la adición del 5% de biocarbón.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Castaña (*Bertholletia excelsa*)

2.2.1.1. Descripción botánica. La castaña, conocida también como nuez del Brasil, pertenece a la familia Lecythidaceae y es una de las especies arbóreas más representativas de la Amazonía. Se trata de un árbol de gran valor ecológico y económico, ampliamente distribuido en regiones tropicales de Sudamérica, especialmente en Brasil, Bolivia y Perú (Perú Ecológico, 2009).

Según Perú Ecológico (2009), la clasificación taxonómica de la castaña amazónica se ubica dentro del Reino Plantae, perteneciente a la división Magnoliophyta y la clase Magnoliopsida. A su vez, se encuentra en el orden Lecythidales, familia Lecythidaceae, con el género *Bertholletia* y la especie *excelsa*.

Según Zuidema (2003) sus nombres comunes son:

- a) Castaña, almendra o nuez del Brasil (español)
- b) Amazonian nut (inglés)

- c) Castanha-do-brasil o castanha-do-pará (portugués)
- d) Paranuss (alemán)
- e) Noix du Brésil (francés)
- f) Paranoot (Países Bajos)

De acuerdo con Perú Ecológico (2009) la castaña presenta las siguientes características morfológicas:

- a) El árbol de castaña es una especie de notable altura, capaz de alcanzar hasta 60 metros de altura y presentar un diámetro de 1 a 2.5 metros. Presenta un tronco recto, cilíndrico y liso, sin ramas en la parte inferior, lo que le permite sobresalir dentro del dosel del bosque amazónico.
- b) En la Amazonía peruana se han identificado ejemplares con una longevidad estimada entre 800 y 1,200 años, lo que evidencia su crecimiento lento y su capacidad de adaptación a las condiciones tropicales.
- c) Las hojas son simples, alternas y de forma oblonga, con tonalidades que varían de verde oscuro a verde amarillento. Su tamaño oscila entre 17 y 50 centímetros de longitud y 6 a 15 centímetros de ancho.
- d) Las flores se agrupan en inflorescencias terminales en forma de racimos, que pueden alcanzar entre 20 a 40 centímetros de longitud. Presentan tonalidades que van del blanco cremoso al amarillo suave y cada flor tiene un diámetro de aproximadamente 2 a 3 centímetros.
- e) El fruto es una cápsula leñosa de forma esférica o globosa, con un diámetro de 9 a 15 centímetros y un peso que varía entre 0.5 y 1.5 kilogramos. Un árbol adulto puede producir entre 200 y 400 frutos por temporada.

- f) En el interior del fruto se encuentran de 10 a 25 semillas, cada una de 3 a 5 centímetros de largo y un peso aproximado de 4 a 10 gramos. Estas semillas presentan una cubierta dura, rugosa y leñosa, que protege una almendra blanca recubierta por una fina piel marrón. En promedio, un árbol maduro puede generar entre 100 y 120 kilogramos de semillas por año, dependiendo de las condiciones ambientales y del manejo del bosque.

2.2.1.2. Origen y extensión. La *Bertholletia excelsa* proviene de las zonas tropicales de Sudamérica y crece de forma natural en la selva amazónica. Su presencia es común en países como Brasil, Perú, Bolivia, Colombia, Venezuela, Surinam y la Guayana Francesa. Esta especie se desarrolla mejor en suelos de textura arenosa o arcillosa con buen drenaje, lo que favorece su crecimiento (Zapata et al.,2022). En el caso del Perú, las áreas con mayor concentración de castaños se ubican en la región de Madre de Dios, próximas a la frontera con Bolivia y Brasil (Perú Ecológico, 2009). En la Figura 1 se muestra el árbol de castaña y en la Figura 2 su respectivo fruto.

Figura 1

Árbol de Castaña (Bertholletia excelsa)



Nota. Obtenido de *Un Mondo Ecosostenibile* (2022).

Figura 2

Fruto del árbol de Castaña



Nota. (a) Coco de Castaña, (b) Castaña con cáscara “in shell” y (c) Castaña sin cáscara “kernerls”. Fotografías obtenidas de *depositphotos* (2025).

2.2.1.3. La Actividad castañera. La recolección de la castaña constituye una práctica tradicional en las comunidades amazónicas, que ha sido transmitida de generación en generación. Su aprovechamiento con fines comerciales y de exportación comenzó a inicios del siglo XX. En la actualidad, este producto se comercializa principalmente en dos presentaciones: con cáscara (“in shell”) y sin cáscara (“kernels”). La castaña sin cáscara representa cerca del 35 % del peso total del fruto con cáscara”. La castaña es comercializada principalmente como almendra, del cual se pueden obtener productos como aceites para la elaboración de jabón, shampoo, dulces, galletas, etc. (Zuidema, 2003).

2.2.1.4. Sistema de producción de castaña. La recolección de castaña se lleva a cabo directamente en los bosques. Los recolectores caminan por el interior del bosque en busca de los árboles de castaña, abriendo senderos angostos que conectan los distintos grupos de árboles. Esta labor coincide con la temporada de lluvias —entre los meses de noviembre y marzo en el caso del Perú—, cuando los frutos, conocidos como “cocos”, caen naturalmente desde la parte alta del árbol. Estos frutos poseen una cáscara dura y resistente, y suelen caer en un área cercana al árbol madre. Una vez en el suelo, los recolectores los abren con machetes para extraer las semillas de castaña que se encuentran en su interior. Las semillas recolectadas se almacenan en sacos de aproximadamente 60 kg y se transportan mediante motocicletas, vehículos todo terreno o motos cargueras hacia los centros de acopio o viviendas destinadas al almacenamiento temporal. Posteriormente, las semillas son vendidas a compradores —ya sean personas naturales o empresas— y luego trasladadas a las plantas procesadoras de la región, donde se continúa con el transporte y procesamiento por vía terrestre o fluvial (Zuidema, 2003).

En Perú, las áreas de bosques donde se suele recolectar castaña pertenecen a pequeñas concesiones (<1000 hectáreas) las cuales son manejadas por familias. Generalmente las áreas

donde se producía goma, son dónde se recolecta la castaña. Esto daba a entender que estas dos actividades eran parte de la economía para que las familias puedan mantenerse todo el año ya que la extracción de la goma se realizaba de abril a octubre y la de castaña de noviembre a marzo (Zuidema, 2003).

2.2.1.5. Importancia socioeconómica de la producción de la castaña. Según informe de Zudeima, en el 2003 la economía regional en el Norte de Bolivia dependía de manera sustancial de la recolección, transporte y procesamiento de castaña. En aquel periodo, alrededor de seis mil personas trabajaban en las plantas dedicadas al pelado y selección del fruto. La actividad de recolección se estimaba en un aproximado de 13 mil personas las cuales se movilizan un aproximado de 3 a 4 meses por año, llevando a sus familias. Lo cual la actividad castañera era de importancia en la economía de las familias del Norte de Bolivia y así como para las familias de la región de Puerto Maldonado-Madre de Dios-Perú (Zuidema, 2003).

2.2.1.6. Mercado nacional e internacional de la castaña. En 2023, la castaña amazónica se consolidó como un producto de gran relevancia comercial y estratégica en los mercados internacionales. Ese año, el mercado mundial alcanzó un valor aproximado de US\$ 229,1 millones, aunque registró una caída del 28,8 % respecto a 2022, reflejando su sensibilidad a las dinámicas globales. Alemania fue el principal país importador con el 17,2 % del valor total (US\$ 39,5 millones), seguida por Estados Unidos (US\$ 37,7 millones) y Reino Unido. En el nivel de exportadores, Bolivia lideró con el 47,5 % del total mundial (US\$ 115,4 millones), mientras que el Perú se ubicó en tercer lugar con una participación del 12,4 %, consolidándose como un actor relevante en este rubro. Las exportaciones peruanas estuvieron compuestas principalmente por castañas enteras (99,3 %) y en menor proporción por aceite de castaña (0,7 %). A nivel regional, Madre de Dios concentró el 44,6 % del valor exportado, seguida de Lima y Arequipa, lo que

evidencia la importancia económica y productiva de la Amazonía sur en la dinámica exportadora del país (CIEN, 2024).

2.2.2. Biochar

2.2.2.1. Definición. El biochar es un material sólido con alto contenido de carbono, que se obtiene a partir del proceso de pirólisis de materia orgánica —proceso termoquímico en el cual la biomasa se calienta en un ambiente con poco o nada de oxígeno—. Este material se distingue por su capacidad de almacenar carbono de manera estable, lo que contribuye a disminuir el impacto del cambio climático al reducir la liberación neta de gases de efecto invernadero (IBI, 2024).

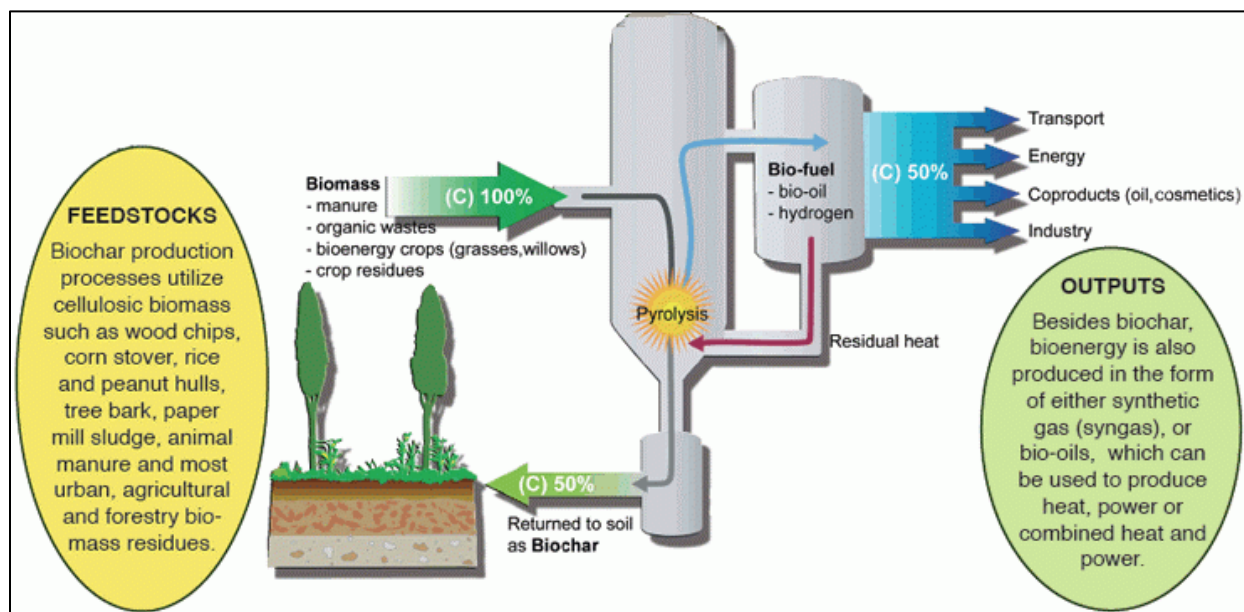
A diferencia del carbón vegetal, cuyo principal uso es como combustible, el biochar se produce con el propósito de mejorar suelos y aportar beneficios ambientales y productivos. Su estructura altamente porosa y su elevada superficie específica permiten retener agua y nutrientes, mejorando la fertilidad y la capacidad de intercambio catiónico del suelo. Además, su estabilidad química hace que el carbono permanezca almacenado durante siglos, lo que convierte al biochar en una herramienta eficaz para el secuestro de carbono a largo plazo (IBI, 2024).

2.2.2.2. Proceso de obtención. El biocarbón se obtiene principalmente mediante pirólisis o gasificación, procesos termoquímicos en los que la biomasa —como residuos agrícolas, forestales o estiércoles— se calienta a altas temperaturas con poco o sin presencia de oxígeno. Su producción puede realizarse a pequeña o gran escala, dependiendo de la disponibilidad de materia prima y de los objetivos del proyecto. Generalmente, se utiliza biomasa residual local para reducir costos de transporte y aprovechar materiales que, de otro modo, se desecharían o descompondrían. Durante el proceso, los gases liberados, como metano y monóxido de carbono, pueden combustionarse para generar energía o aprovecharse para producir biocombustibles líquidos,

quedando el biochar como producto final, rico en carbono y con alta estabilidad (IBI, 2024). En la Figura 3 se visualiza el proceso general para la obtención del biochar.

Figura 3

Proceso genérico de la obtención del biochar



Nota. Obtenido de IBI (2025).

2.2.2.3. Tecnologías de producción. Los hornos de biocarbón son unidades de producción de biocarbón de baja tecnología cuyo diseño principal tiene como función producir biocarbón. Esta categoría de unidades de producción de biocarbón puede ser adecuada para la producción de biocarbón de baja tecnología (DLT) limpia, saludable y distribuida por parte de pequeños agricultores y microempresarios de países en desarrollo; productores que utilizan residuos de jardín; pequeños agricultores y agricultores urbanos; viveros; huertos comunitarios; etc., para convertir la materia prima dispersa (TDF) disponible. La cámara de alimentación de estas unidades suele tener una capacidad de entre 400 y 500 litros. Su diseño funcional principal es la producción de biocarbón. Hasta la fecha, las principales tecnologías utilizadas en las unidades que pertenecen a esta categoría son las retortas; las unidades de tiro ascendente con encendido superior (TLUD) y

los híbridos TLUD/retorta; y las unidades de tiro abierto con alimentación superior (TFOD), como conos y pirámides (metálicas y de fosa) y anillos (IBI, 2025).

Los sistemas de producción de biochar en el CINCIA son el pirolizador de flujo continuo, el cilindro TLUD y kontiki.

2.2.2.3.1. Tecnología de producción - pirolizador de flujo continuo. El pirolizador industrial de flujo continuo desarrollado por el CINCIA opera bajo los mismos principios que el sistema TLUD, utilizando la combustión del gas de síntesis generado durante el proceso como fuente de calor para elevar la temperatura de la biomasa. El desplazamiento del material desde el alimentador hasta la salida del biocarbón ocurre mediante un tornillo sinfín rotatorio, cuya velocidad puede regularse desde el panel de control. Al inicio del proceso, la biomasa introducida es precalentada con gas, lo que permite que la máquina aumente gradualmente su temperatura. Conforme se calienta, la biomasa libera gas de síntesis, y cuando el interior del pirolizador alcanza alrededor de 350 °C, se activa el ventilador que inyecta aire al sistema. La combinación del oxígeno con el calor acumulado provoca la ignición del gas de síntesis, intensificando la temperatura interna. Una vez que el equipo alcanza aproximadamente 500 °C, la combustión del gas de síntesis proveniente de la biomasa suministra el calor necesario para iniciar la termodegradación continua del nuevo material que ingresa. A medida que la temperatura aumenta, se puede ajustar la velocidad del tornillo para optimizar la producción, al mismo tiempo que se regula el ingreso de aire para equilibrar la combustión del gas generado dentro del sistema (CINCIA, 2018). En la Figura 4 se visualiza la tecnología de producción industrial del biochar del CINCIA denominado pirolizador de flujo continuo.

Figura 4

Tecnología de producción - pirolizador de flujo continuo



Nota. Obtenido de CINCIA (2018).

2.2.2.3.2. Tecnología de producción - cilindro TLUD. El sistema TLUD funciona con un cilindro que se llena de biomasa y se deja abierto en la parte superior. En ese extremo se enciende un pequeño fuego, que luego se cubre con una tapa y una chimenea. En la base del cilindro existen aberturas que permiten el ingreso de aire primario, el cual impulsa el movimiento del calor desde la parte superior hacia abajo. Sin embargo, este flujo de aire debe mantenerse limitado para evitar que el carbón formado se oxide y se convierta en ceniza, puesto que un exceso de oxígeno favorece las reacciones de oxidación del carbono sólido ($C + O_2 \rightarrow CO_2$), provocando su combustión y la reducción del contenido de carbono fijo, quedando como residuo únicamente cenizas.

Durante el proceso, el calor avanza en dirección descendente mientras que los gases generados por la pirolisis (o gas de síntesis) ascienden junto con el aire primario. A medida que la zona de calor desciende, la biomasa se transforma progresivamente en biocarbón. En la parte superior del cilindro, los orificios de ventilación secundarios permiten que el gas de síntesis se

mezcle con aire adicional, lo que posibilita una combustión más completa y visible mediante una llama limpia. Cuando esta llama se apaga, se indica el final del proceso, ya que la producción de gas de síntesis cesa y la pirólisis concluye (CINCIA, 2018). En la Figura 5 se visualiza la tecnología de producción artesanal del biochar del CINCIA denominado cilindros TLUD.

Figura 5

Tecnología de producción - cilindros TLUD



Nota. Obtenido de CINCIA (2018).

2.2.2.3.3. Tecnología de producción - kontiki. Este sistema utiliza el principio de la pirólisis por llama invertida (*flame curtain pyrolysis*), en la cual la biomasa se introduce por capas en un recipiente cónico abierto. A medida que el material se quema, los gases volátiles generados ascienden y se mezclan con el aire, formando una “cortina de llama” en la superficie. Esta combustión de gases proporciona el calor necesario para continuar el proceso de pirólisis en las capas inferiores, minimizando las emisiones de humo y partículas. El diseño cónico del horno favorece la circulación del aire y la uniformidad térmica, permitiendo alcanzar temperaturas de entre 600 y 800 °C, óptimas para obtener un biochar altamente estable, con baja proporción de

alquitranes y alto contenido de carbono fijo (Ramírez et al., 2024). En la Figura 6 se visualiza la tecnología de producción semi-artesanal del biochar del CINCIA denominado kontiki.

Figura 6

Tecnología de producción - kontiki



Nota. Imagen tomada por los autores en la planta del CINCIA.

2.2.2.4. Propiedades. No todos los biocarbones presentan las mismas características, ya que sus propiedades y su rendimiento están determinados por diversos factores, entre ellos el tipo de biomasa utilizada, el tiempo de degradación, la temperatura alcanzada durante el proceso, la velocidad de calentamiento, la presión aplicada y el contenido inicial de humedad del material. Tanto la tecnología empleada en la producción como la naturaleza de la biomasa influyen directamente en las particularidades del biocarbón obtenido (CINCIA, 2018).

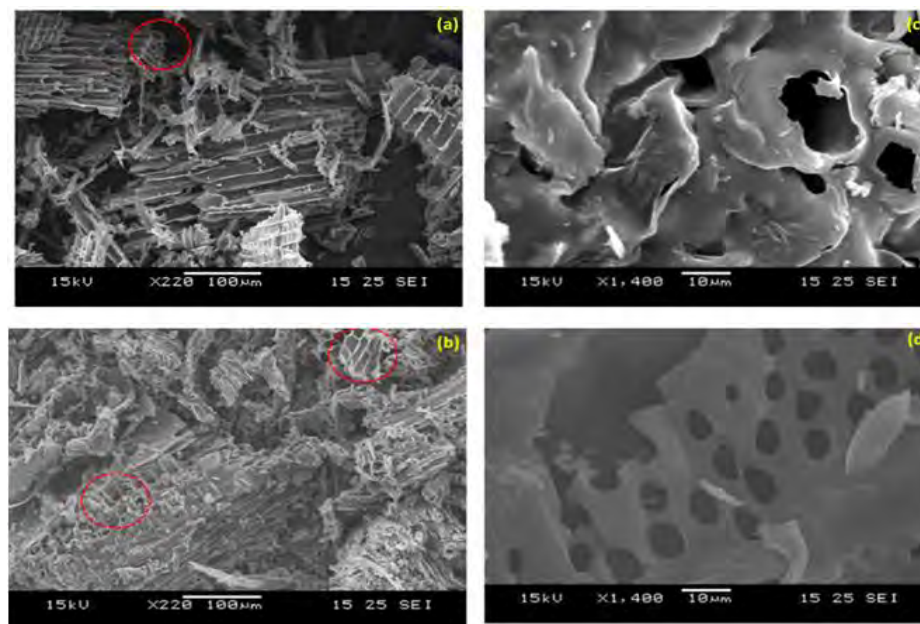
Por ejemplo, en la Figura 7 se muestra la morfología del biochar de madera el cual se hizo mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) en el cual se pueden observar la forma, superficie y la distribución de poros donde se observa la presencia de microporos y mesoporos. En este se observa que el biochar producido a 500°C posee poros más numerosos, de forma más

regular y distribuidos de manera más uniforme que el producido a 300°C. Esto se debe porque a mayor temperatura la eliminación de compuestos volátiles y orgánicos es más completa, desarrollando una red de poros más definida y por lo tanto una mayor capacidad para absorber y retener agua (Gupta et al., 2018).

En la Tabla 1 se presentan las características del biocarbón elaborado a partir de cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*) procedente de Madre de Dios. Los resultados evidencian que el material obtenido cumple con altos niveles de calidad, comparables con los estándares internacionales más rigurosos. El biocarbón fue generado mediante dos métodos: cilindros TLUD y pirolizador de flujo continuo. Al comparar ambos procesos, se identifican ligeras variaciones en las propiedades, mostrando una leve ventaja el producto obtenido con los cilindros (CINCIA, 2018).

Figura 7

Morfología microscópica del biochar



Nota. (a) Biochar producido a 300°C, (b) Biochar producido a 500°C, Poros formados durante la pirólisis de biochar a (c) 300°C y (d) 500°C. Obtenido de Gupta et al. (2018).

Tabla 1*Propiedades del biochar de cáscara de Castaña (Bertholletia excelsa)*

Parámetro	Unidades	Nivel para "calidad premium"	Propiedades del biocarbón	
			Cilindros TLUD	Pirolizador de flujo continuo
Densidad aparente	kg/m ³		486	511
H/C _{org}		< 0.7	0.19	0.35
Total PAH (componentes tóxicos)	mg/kg	< 4	1.5	3.9
Ceniza (550°C)	%		7.8	5.3
Carbono	%	> 50	87.7	84
Nitrógeno	%		1.07	1.03
Mercurio	g/tonelada	< 1	< 0.07	< 0.07
pH (en CaCl ₂)			9.6	8.9
Conductividad	μS/cm		1980	1300

Nota. Obtenido de *CINCIA (2018)*.

2.2.2.5. Aplicaciones en diferentes campos. El biocarbón posee una gran variedad de usos gracias a las propiedades físicas y químicas que posee, lo cual permiten su utilización en diversos sectores productivos. Según la IBI (2024) se tiene los siguientes:

- a) Agricultura: Mejora la salud del suelo - Reduce la acidez - Mejora la retención de agua y el drenaje - Aumenta la diversidad microbiana - Reduce la necesidad de fertilizantes químicos.
- b) Usos industriales y entorno construido: Sustituir materiales de origen fósil y mineral - Mejorar los productos existentes - Mejorar el aislamiento térmico - Preservar la integridad estructural - Aislar el dióxido de carbono.

- c) Gestión y conservación del paisaje: Proporcionar condiciones para una biodiversidad microbiana próspera - Disminuir la propagación de especies invasoras - Proporcionar biomasa para su uso final en proyectos de reducción de especies invasoras.
- d) Remediación de tierras y agua: Absorbe e inmoviliza metales pesados y contaminantes orgánicos - Elimina contaminantes inorgánicos como las PFAS - Elimina compuestos de azufre de los gases.
- e) Gestión de Residuos: Alternativa al vertido a cielo abierto o la quema de residuos - Convierte los residuos en un recurso valioso - Destruye contaminantes como las PFAS - Reduce los olores - Mitiga la contaminación de los vertederos.
- f) Pozos de Petróleo y Gas Abandonados: Rellenar pozos inactivos - Filtrar fugas de gas nocivo - Gases que contribuyen al calentamiento global, como el CO₂ y el metano.
- g) Gestión forestal (antes y después de los incendios): Enriquecer el suelo forestal - Proporcionar biomasa para proyectos de reducción de incendios - Beneficios de créditos de carbono - Reducir la contaminación atmosférica por partículas procedentes de la quema de residuos forestales al aire libre.
- h) Generación de Energía: Generar electricidad y calor mediante el proceso de pirólisis - Producir y vender biocombustibles o bioaceite a partir de los gases capturados durante la pirólisis.

2.2.2.6. Aplicación del biochar en la construcción. El biocarbón puede incorporarse a materiales duraderos como el cemento o el asfalto. En lugar de que la biomasa se descomponga y libere dióxido de carbono (CO₂), este se puede secuestrar y almacenar en el biocarbón por cientos

a miles de años. El biocarbón, rico en carbono, se utiliza posteriormente como componente del hormigón con huella de carbono negativa. Se están desarrollando materiales de construcción como laminados y aislantes con biocarbón, así como hormigón y asfalto con balance de carbono negativo. El hormigón a base de biocarbón también resulta muy útil para sellar pozos de petróleo y gas abandonados, especialmente para reducir las emisiones de metano (IBI, 2025).

2.2.2.7. Normas y certificaciones. La estandarización del biochar es esencial para garantizar su calidad, seguridad y trazabilidad en los diversos sectores donde se aplica. En este sentido, la IBI (2024) desempeña un rol importante en el desarrollo de normas y certificaciones que regulan su producción y uso responsable.

Desde 2009, la IBI impulsa los Estándares y Guías de Ensayo del Biocarbón utilizado en suelos, documento que define los parámetros técnicos que aseguran la calidad y seguridad del biochar, especialmente en su aplicación agrícola. Estos estándares consideran aspectos como el contenido de carbono fijo, el pH, la humedad y la presencia de metales pesados, y se han convertido en una referencia internacional también aplicable a sectores como la construcción y la captura de carbono. En 2024, la IBI estableció una alianza con Carbon Standards International (CSI) para fortalecer los mecanismos de certificación del biochar a nivel mundial. Como resultado, el Estándar IBI se integró con el Certificado Mundial de Biochar, creando un marco unificado que refuerza la fiabilidad, seguridad y sostenibilidad del biocarbón dentro de los mercados internacionales de carbono (IBI, 2025).

Como dato importante se tiene que la ASTM International tiene un comité técnico activo: el subcomité C09.28 “Biochar for Use in Concrete” (Advancing Standards Transforming Markets International, 2025).

2.2.3. *Concreto*

2.2.3.1. Definición. El concreto es la combinación del aglutinante (cemento Portland hidráulico) con el agua, agregados o áridos, en algunos casos aditivos. Esta mezcla al endurecerse genera una masa sólida o piedra artificial con capacidad de resistir importantes esfuerzos de compresión (Sánchez de Guzmán, 2001)

Características:

Según Avanto (2009), los principales factores del concreto la cual lo convierten en un material de construcción universal se tienen:

- a) Facilidad de verter en encofrados de casi todo tipo de formas manteniendo aun así su plasticidad.
- b) Su considerable resistencia a compresión, la cual lo convierte adecuado a elementos sometidos netamente a compresión.
- c) Alta resistencia al fuego y filtración del agua.

2.2.3.2. Componentes. Está compuesto por cemento, agua, agregados, aire y aditivos en ocasiones, para tener una mejor compresión, estos se definirán más detalladamente a continuación:

2.2.3.2.1. Cemento. “Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes” (ASOCRETO, 2010).

Cemento Portland. El cemento es un material aglutinante que posee la capacidad de unir partículas minerales mediante fuerzas de adhesión y cohesión, formando una masa sólida y resistente. En el campo de la construcción, el término “cemento” se utiliza principalmente para referirse al cemento Portland, obtenido de la combinación de materiales calcáreos y arcillosos o de otros compuestos con sílice, alúmina y óxidos de hierro. Estos insumos se procesan a elevadas

temperaturas y luego se combinan con yeso. Tras mezclarse con agua, el material inicia el proceso de hidratación, durante el cual adquiere rigidez y desarrolla su resistencia (ASOCRETO, 2010).

Proceso de Fabricación. Existen dos medios de fabricación de cemento vía húmeda y vía seca este último es el más económico y el de mayor empleo en nuestro medio, la diferencia entre ambos métodos es que el húmedo consume mayor energía por ende mayor combustión, mayor emisión de gases de efecto invernadero, la fabricación del cemento por vía seca comienza seleccionando y explotando las canteras de materia prima para ser sometidas al primer proceso de chancado reduciendo su tamaño a piedras de 5" aproximadamente para luego ser trasladadas a una segunda chancadora reduciendo su tamaño alrededor de 3/4", siendo estas las condiciones para ser molidas. Con bolas de acero dentro del molino estos materiales se muelen hasta convertirse en polvo, para posteriormente ser dosificadas y mezcladas para el tipo de cemento que se requiera obtener. Posteriormente esta mezcla se introduce a un horno giratorio a una velocidad de 30 a 90 rph y sometidas a temperaturas entre 1250 y 1900°C, dependiendo de la magnitud del horno este puede producir diario entre 30 a 700 toneladas. Las temperaturas en el horno primero producen la evaporación del agua libre, luego libera CO₂ y finalmente se fusiona un 20% a 30% de la carga total, ahí es cuando la sílice, alúmina y cal se combinan de nuevo y se aglomeran en nódulos generalmente con tamaños de diámetros entre 1/4" a 1" teniendo la tonalidad negra, reluciente y duro al enfriar, este se denomina "Clinker del cemento Portland". Este último pasa a un proceso de enfriamiento para luego ingresar en un molino y ser molido con bolas juntamente con el yeso en proporciones de 3% a 6% con esto se controla el endurecimiento, culminando esto se obtiene un polvo muy fino el cual es tamizado y posteriormente pesado, almacenado y distribuido. Después de la formación del Clinker, su molienda final se obtienen compuestos químicos como: Aluminio

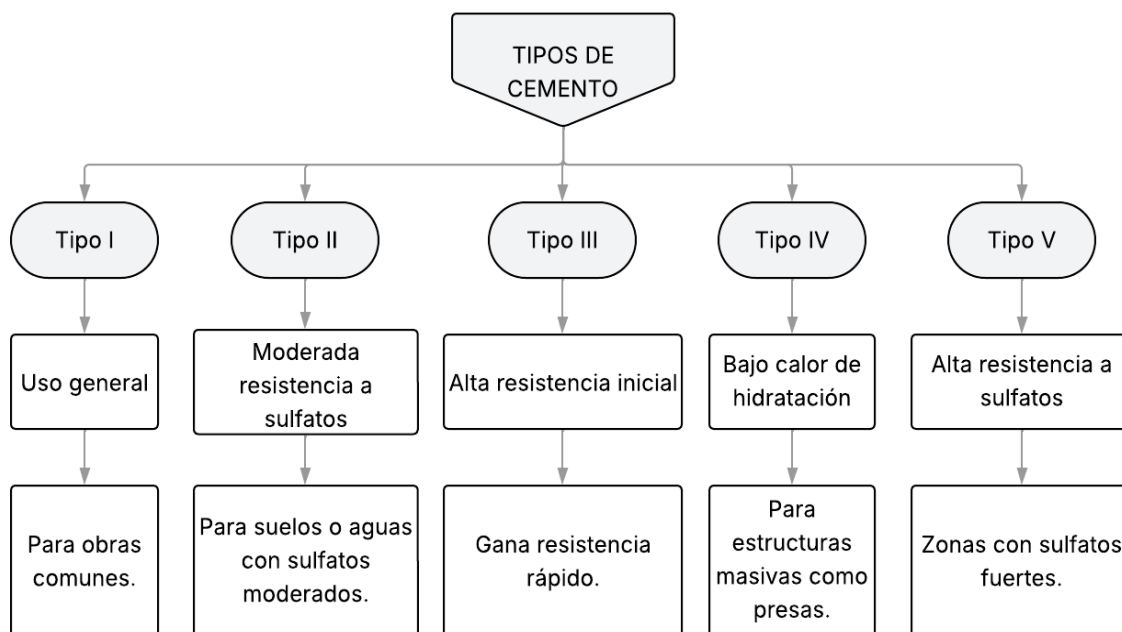
Ferrita Tricálcica (C_4AF), Aluminato Tricálcico (C_3A), Silicato Dicálcico (C_2S), Silicato Tricálcico (C_3S) (Pasquel, 1998)

Clasificación del Cemento Portland. “Los cementos Portland, se fabrican en cinco tipos cuyas propiedades se han normalizado sobre la base de la especificación ASTM de Normas para el cemento Portland (C150)” (Avanto, 2009).

Según este autor se clasifican en 5 tipos, lo cual se puede observar en la Figura 8.

Figura 8

Tipos de cemento según la ASTM C150 (2024)

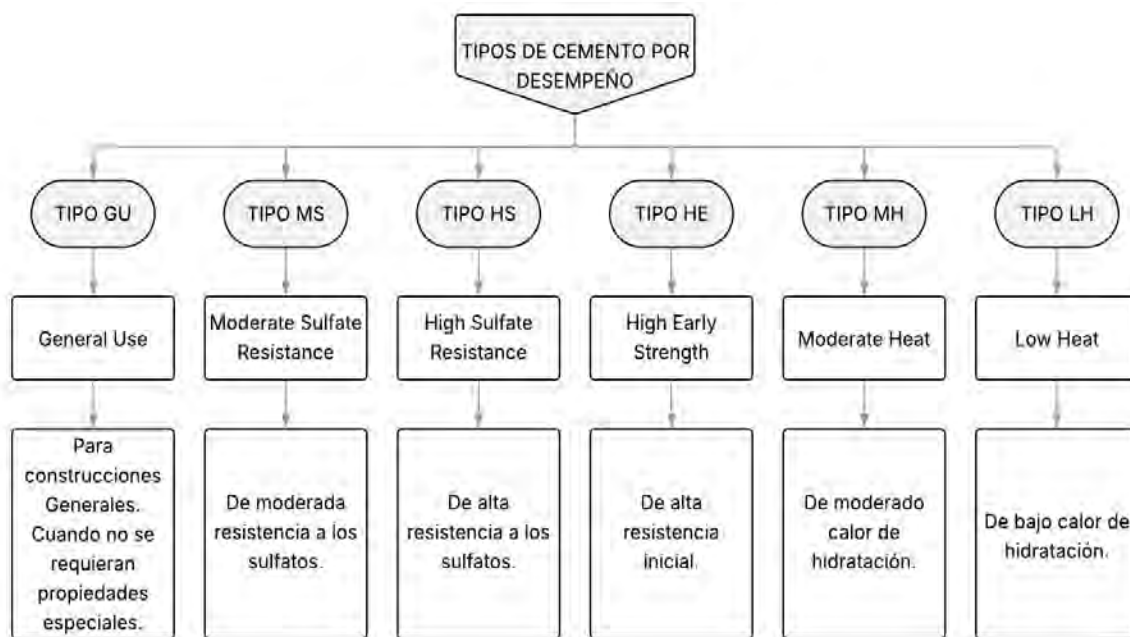


Nota. Adaptado de Avanto (2009). Esta corresponde a una clasificación clásica. Así mismo, existe la clasificación según desempeño y no por composición (Performance-based).

Así, mismo se tiene la clasificación de tipos de cemento según el performance del concreto, el cual se puede visualizar en la Figura 9.

Figura 9

Tipos de cemento según la ASTM C1157 (2008)



Nota. Adaptado de NTP 334.082 (2020).

Fraguado y endurecimiento. El fraguado es aquel cambio progresivo por la cual la pasta de cemento deja de ser plástica. Este proceso cuenta con dos fases: primero, la masa empieza a endurecerse ligeramente (Fraguado inicial); luego, alcanza una condición endurecida o rígida en la que ya no se puede deformar (Fraguado final) (Avanto, 2009).

Calor de hidratación. El proceso de endurecimiento implica transformaciones químicas que van acompañadas de la liberación de energía térmica. El calor de hidratación en secciones pequeñas es irrelevante sin embargo en vaciados de mayor sección donde el calor difícilmente se libera, ahí es cuando se toma en consideración el calor de hidratación; esta hidratación puede llegar a unos 50 °C aproximadamente en presas. Al ser menor la temperatura ambiente se generan cambios abruptos de temperatura ocasionando contracciones y consecuentemente rajaduras, por eso es que se recomienda emplear cemento con calor de hidratación baja o incorporar material

puzolánico. En otras palabras, cuando el calor de hidratación es reducido, la temperatura alcanzada por el concreto también se mantiene más baja (Avanto, 2009).

2.2.3.2.2. Agregados. Los agregados son el mayor contribuyente del concreto, generalmente dentro del metro cúbico del concreto este llega a representar el 70% la cual los convierte en un material económico en la construcción. Se les considera como sustancias sólidas o partículas añadidas al concreto ocupando un espacio dentro de la pasta cementante, en consecuencia, al ser combinadas brindan la resistencia mecánica. La calidad de estos agregados está determinada por su origen, superficie, granulometría, forma y densidad. Clasificándose por tamaños de partículas: el agregado fino entre 4.76 mm a 0.075 mm y el agregado grueso de 4.76 mm en adelante (ASOCRETO, 2010).

Clasificación de los agregados

a) Por su procedencia

i. Agregados artificiales

Estos agregados provienen de un proceso de transformación de materiales naturales que proveen productos secundarios que con tratamientos adicionales son habilitados para emplearse en la producción del concreto. Algunos de estos agregados están constituidos por la escoria de altos hornos, la arcilla horneada, concreto reciclado, microsílice y demás (Pasquel, 1998).

ii. Agregados naturales

Es aquel agregado que fue formado por un proceso geológico natural las cuales ocurrieron durante miles de años en el planeta, siendo estas extraídas, seleccionadas y procesadas para la optimización de su empleo en la producción

del concreto. La Norma ASTM C294 (2024) detalla la nomenclatura estándar de los agregados minerales naturales (Pasquel, 1998).

b) Por su gradación

La gradación hace referencia a cómo se distribuyen los tamaños de las partículas dentro de un agregado. Convencionalmente se estableció la clasificación entre agregado grueso (piedra) y agregado fino (arena) en función de las partículas mayores y las menores de 4.75 mm (Malla Standard ASTM #4) respectivamente (Pasquel, 1998).

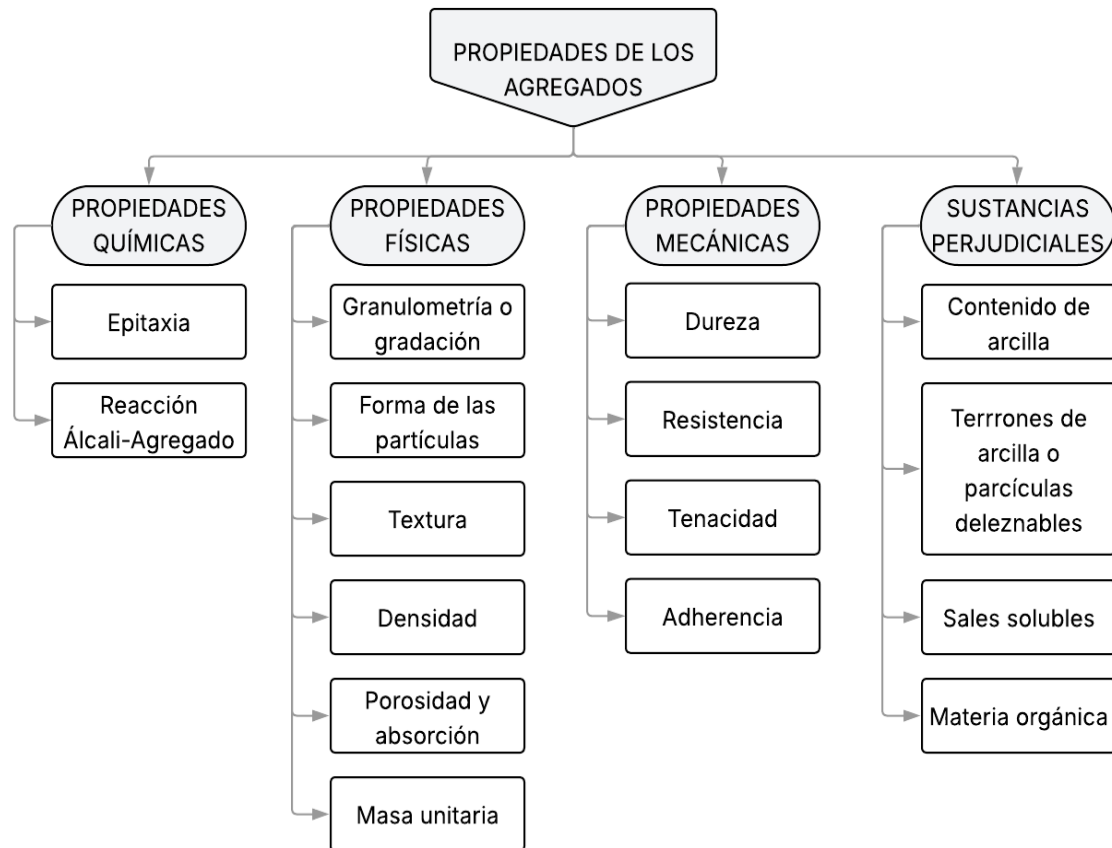
Agregado Grueso. El agregado grueso corresponde a partículas que quedan retenidas en el tamiz de 4.75 mm (N° 4). Este material procede de la fractura natural o de la trituración de rocas y debe ajustarse a los criterios especificados en la norma NTP 400.037 (2018). Entre sus formas más comunes se encuentran la grava y la piedra chancada (Avanto, 2009).

Agregado Fino. El agregado fino está constituido principalmente por arena y por partículas pétreas de tamaño reducido que pasan por el tamiz 9.5mm (3/8"). Estos materiales deben ajustarse a los valores exigidos en la NTP 400.037 (2018). Su origen habitual es la meteorización o el arrastre por corrientes fluviales o aéreas (Avanto, 2009).

Según ASOCRETO (2010), las propiedades de los agregados son como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Propiedades de los agregados



Nota. Adaptado de ASOCRETO (2010).

2.2.3.2.3. Agua. El agua desempeña una función clave en la preparación de morteros y concretos porque afecta su comportamiento mientras está fresco y durante el endurecimiento. La literatura técnica enfatiza la importancia de dosificarla adecuadamente para establecer la relación agua-cemento óptima. De igual forma, su participación en actividades como el lavado de agregados, la mezcla o el curado implica considerar tanto el volumen añadido como la calidad fisicoquímica del agua, ya que ambos factores influyen en el resultado final del material (ASOCRETO, 2010).

La NTP 339.088 (2019) aplica las siguientes definiciones:

- a)* Agua potable: calificado para ingesta humana.
- b)* Agua no potable: no calificado para ingesta humana, o que contienen cantidades de sustancias que afectan al agua en olor, sabor o color llegándose a considerar desagradables, aquí no se considera el agua de las operaciones de producción del concreto.
- c)* Agua combinada: resultado de la combinación de dos a más fuentes de agua, antes o durante la producción del concreto.
- d)* Agua generada durante la fabricación del concreto: este tipo de agua se origina a lo largo de las diferentes actividades que forman parte del proceso de producción del concreto, como la recuperada en el proceso de cemento Portland. Considera además el agua del lavado de camiones mezcladores, la lluvia almacenada en la planta y cualquier agua que incorpore residuos propios del concreto.

Avanto (2009) el agua debe cumplir una serie de requisitos en la producción del concreto, como se detalla a continuación:

- a)* Agua limpia y exento de cantidades perjudiciales como: material orgánico, ácidos, sales, álcalis, aceites y otras sustancias peligrosas que afecten al concreto o al acero.
- b)* En caso de agua de dudosa procedencia se realizará su respectivo análisis químico cuyos resultados serán comparados con el valor máximo admisible, detallado en la Tabla 2.

Tabla 2

Valores máximos admisibles de sustancias disueltas en el agua para concreto

Sustancias disueltas	Valor máximo admisible
Cloruros	300 ppm
Sulfatos	300 ppm
Sales de magnesio	150 ppm
Sales solubles	1500 ppm
pH	Mayor de 7
Sólidos en suspensión	1500 ppm
Materia orgánica	10 ppm

Nota. Obtenido de *Avanto* (2009).

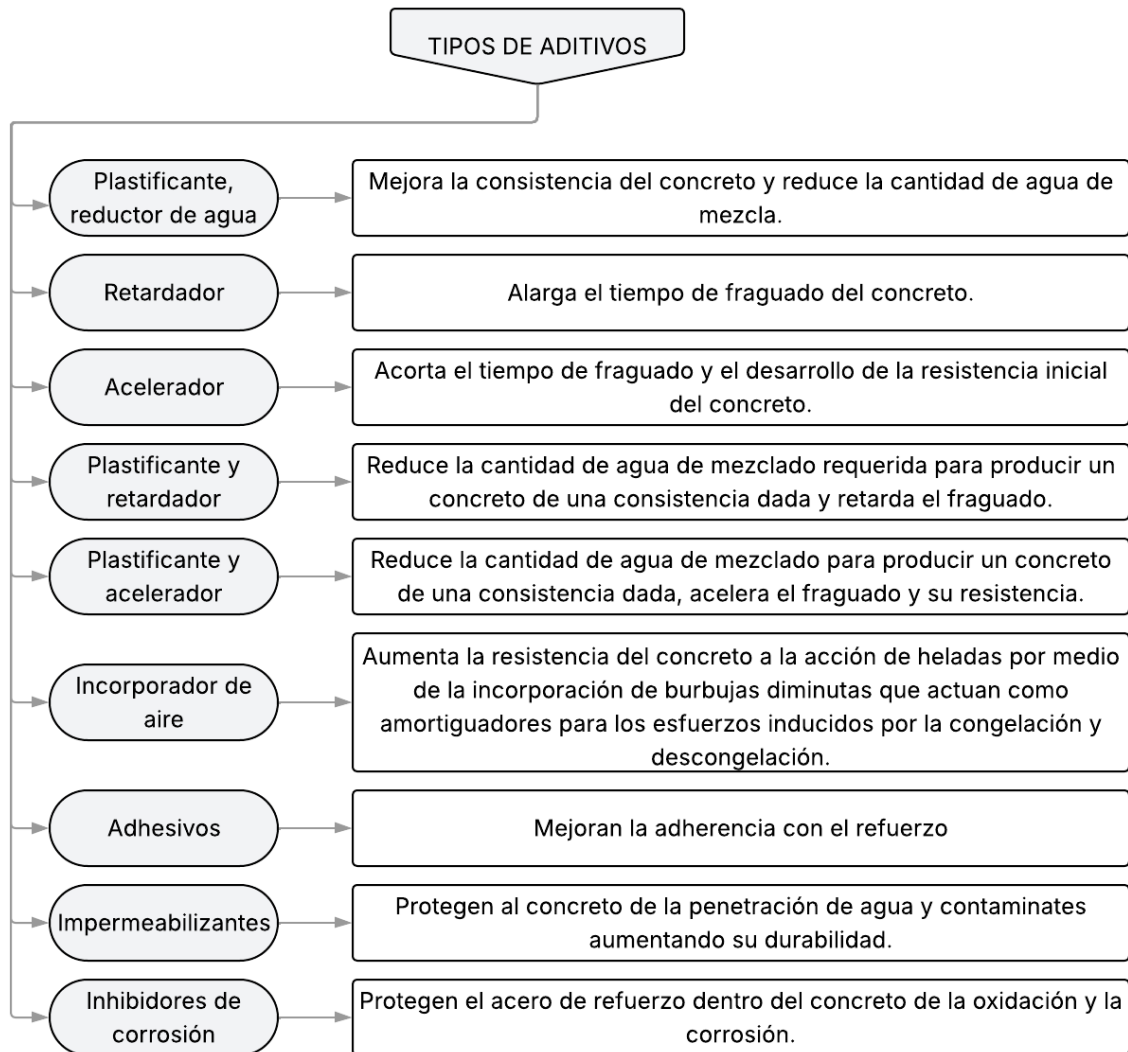
- c) Realizar a los 7 y 28 días de edad ensayos como la resistencia a compresión, elaborando testigos con el agua a evaluar, considerando satisfactoria resultados con resistencias superiores al 90% del testigo preparado con agua destilada o potable.
- d) Una manera ágil de reconocer ácidos en el agua es mediante papel tornasol, que se vuelve rojizo en soluciones ácidas. Para determinar sulfatos o yeso se emplea cloruro de bario; tras añadir ácido clorhídrico a 500 g de agua y luego cloruro de bario, la formación de un precipitado blanco confirma la presencia de sulfatos. Esta muestra debe analizarse en laboratorio para confirmar si está dentro de los parámetros. Los ensayos rápidos solo funcionan como referencia y no sustituyen los análisis hechos en laboratorio.

2.2.3.2.4. Aditivos. “Los aditivos son ingredientes del concreto o mortero que además del agua, agregados, cemento hidráulico y en algunos casos fibra de refuerzo, son adicionados a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado” (ASOCRETO, 2010).

Tipos de Aditivos. Se clasifica como que observa en la Figura 11.

Figura 11

Clasificación de los aditivos



Nota. Adaptado de *Avanto (2009)*.

Es conveniente evaluar previamente el empleo de aditivos, puesto que estas alteran ciertas propiedades del concreto, ya sea en su estado fresco y endurecido. En otras palabras, es de vital importancia saber suministrar y no abusar el uso de los aditivos ya que al emplearlas y finalmente evidenciar que algunas propiedades mejoren otras podrían disminuir, es por eso que se deben comprobar las recomendaciones del fabricante en condiciones de obra (Avanto, 2009).

2.2.3.3. Propiedades del concreto en estado fresco. Según ASOCRETO (2010) el concreto recién preparado debe fluir de forma que ocupe completamente las formaletas y rodee adecuadamente el refuerzo. Asimismo, debe formar una mezcla homogénea sin presencia notable de aire o agua retenida. Las propiedades verificables mediante procedimientos de ensayo son:

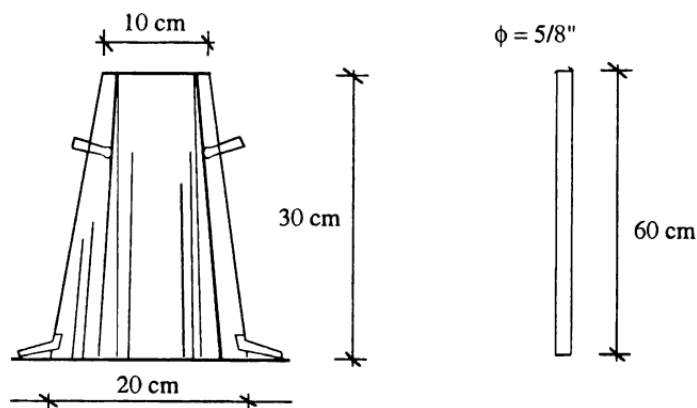
2.2.3.3.1. Trabajabilidad o manejabilidad. Se entiende como el esfuerzo que permite superar la fricción interna del concreto y la existente con el encofrado o el refuerzo para lograr una compactación eficiente. En resumen, indica qué tan bien puede colocarse y compactarse sin producir segregación. Está representada por la compacidad, cohesividad, plasticidad y la consistencia o movilidad del material.

- a) *La compacidad:* Se refiere facilidad con la que el concreto puede compactarse o consolidarse, disminuyendo los vacíos y consiguientemente el aire atrapado .
- b) *La cohesividad:* Es la capacidad del concreto fresco para conservarse como una mezcla completamente uniforme y estable, evitando de tal forma la segregación.
- c) *La plasticidad:* Se refiere a la propiedad del concreto fresco que le permite cambiar de forma de manera continua sin sufrir fractura alguna.
- d) *La consistencia o movilidad:* Es la aptitud del concreto fresco para desplazarse y adaptarse a la geometría de los encofrados, llenando los huecos alrededor de los elementos que rodea (ASOCRETO, 2010).
- i) *Ensayo de asentamiento:* También se le conoce como ensayo de revenimiento o “slump test”, se utiliza para evaluar el comportamiento del concreto fresco. Esto desarrolló Duft Abrams y el ASTM la adopta en 1921. Este ensayo consiste en verter la muestra en el molde que tiene la forma de un tronco de cono, para posteriormente desmoldar y medir el asentamiento. El tronco de cono tiene un

diámetro de 20 cm y 10 cm en la base superior e inferior respectivamente, y una altura de 30 cm. Este equipo está fabricado de una plancha de acero galvanizado como mínimo 1.5 mm de espesor, con asas y aletas de pie soldadas para facilitar la operación la compactación se realiza con una barra de acero liso de 5/8" de diámetro, longitud de 60cm y la punta semiesférica (Avanto, 2009). Las dimensiones del tronco de cono se pueden observar en la Figura 12.

Figura 12

Tronco de cono para Slump



Nota. Obtenido de Avanto (2009).

- ii) *Clases de mezclas según su asentamiento:* estas clases de mezclas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3

Mezclas según su asentamiento

Consistencia	Slump	Trabajabilidad	Método de compactación
Seca	0" a 2"	poco trabajable	vibración normal
Plástica	3" a 4"	trabajable	vibración ligera chuseado
Fluida	> 5"	muy trabajable	chuseado

Nota. Obtenido de Avanto (2009).

2.2.3.3.2. Segregación. “Se define como la separación de los materiales que constituyen una mezcla heterogénea (como es el concreto), de manera que su distribución deje de ser uniforme por falta de cohesión” (Sánchez de Guzmán, 2001).

2.2.3.3.3. Exudación o sangrado. Es un fenómeno de segregación que provoca que el agua de mezclado emerja a la superficie del concreto fresco. La causa es que los elementos sólidos no retienen toda el agua mientras se asientan en el proceso de fraguado (ASOCRETO, 2010).

2.2.3.4. Propiedades del concreto en estado endurecido

2.2.3.4.1. Resistencia. Es la capacidad del concreto para soportar distintos tipos de esfuerzos, los cuales se clasifican en compresión, tracción, flexión y corte. El material muestra una elevada resistencia a la compresión, pero su respuesta frente a la tracción es bastante limitada, siendo esta es la principal razón por la cual se le da mayor importancia a la resistencia a compresión simple (ASOCRETO, 2010).

A continuación, ASOCRETO (2010) presenta una serie de factores los cuales inciden en la resistencia, y estas son:

i) Relación Agua – Cemento

La relación a/c corresponde al cociente entre la cantidad de agua en masa (sin contar la absorbida por los agregados) y la masa de cemento utilizada. Es el factor principal que controla la resistencia de un concreto densificado correctamente. Si esta relación disminuye, la resistencia aumenta; sin embargo, un valor excesivamente bajo produce mezclas secas, complicadas de compactar y con mayor porosidad, reduciendo finalmente su resistencia.

ii) *Contenido y tipo de cemento*

El tipo y la cantidad de cemento tienen un papel determinante en la resistencia final del concreto, ya que el cemento es la parte activa químicamente de la mezcla. La rapidez con que cada cemento adquiere resistencia influye en el comportamiento a compresión del concreto. Cambiar de marca, aunque sea del mismo tipo, puede modificar la resistencia obtenida; por ello, no se deben hacer sustituciones sin un análisis riguroso previo.

iii) *Características de los agregados o áridos*

Textura y forma: Los agregados con superficie áspera o geometría angular generan concretos más resistentes que los redondeados o lisos, ya que proporcionan una mejor interconexión entre los granos gruesos y el mortero.

Granulometría: Cuando los agregados presentan una granulometría continua, es posible producir mezclas con alta densidad y compacidad, lo que se traduce en mayores valores de resistencia.

Resistencia: La resistencia propia del agregado y su rigidez también influyen en la capacidad resistente del concreto.

iv) *Fraguado del concreto*

Las variaciones de temperatura y el tiempo de fraguado influyen directamente en la resistencia del concreto. En condiciones frías, la hidratación se vuelve más lenta porque parte del calor se disipa en el ambiente, ocasionando un fraguado tardío y baja resistencia temprana. En escenarios cálidos, la resistencia aumenta rápido en edades tempranas, pero tras siete días muestra una disminución.

v) *Curado del concreto*

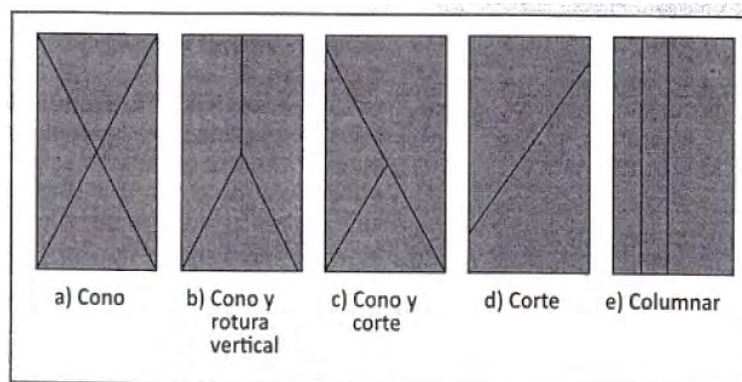
Consiste en impedir que el concreto pierda humedad antes de tiempo, asegurando que se mantenga en condiciones térmicas favorables por un periodo establecido. El proceso de curado debe prolongarse mínimo 7 días, dentro del intervalo de 10 °C a 32 °C. En los ensayos con cilindros de concreto, se debe conservar el curado hasta que estos alcancen por lo menos el 70% de la resistencia requerida.

a) *Resistencia a la compresión*

En la mayoría de diseños estructurales se asume que el concreto trabaja sobre todo a compresión, por eso este tipo de resistencia es el indicador más representativo de su calidad (ASOCRETO, 2010). En la Figura 13 se presentan los diferentes tipos de falla de las muestras cilíndricas de concreto como resultado del ensayo de resistencia a la compresión.

Figura 13

Tipo de falla de los cilindros de concreto



Nota. Obtenido de ASOCRETO (2010).

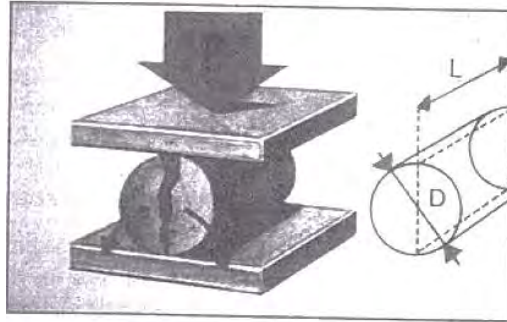
b) *Resistencia a la tracción*

El concreto no responde bien ante esfuerzos de tracción, lo que favorece el agrietamiento. Esta falla se debe tanto a la contracción del fraguado como a las

variaciones de temperatura, que inducen esfuerzos internos de tracción (ASOCRETO, 2010). En la Figura 14 se muestra el esquema del ensayo a tracción indirecta de muestras cilíndricas.

Figura 14

Ensayo de tracción indirecta



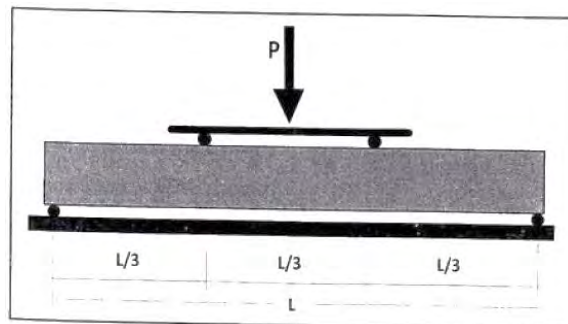
Nota. Obtenido de ASOCRETO (2010).

c) Resistencia a la flexión

Los elementos que trabajan a flexión presentan una zona en compresión y otra donde predominan los esfuerzos de tracción. Este comportamiento es especialmente relevante en estructuras de concreto simple, como las losas utilizadas en pavimentos (ASOCRETO, 2010). En la Figura 15 se muestra el esquema del ensayo a flexión.

Figura 15

Ensayo de flexión con carga en dos puntos



Nota. Obtenido de ASOCRETO (2010).

d) Resistencia a cortante

El concreto tiene poca capacidad para enfrentar esfuerzos de corte; sin embargo, las normas de ingeniería toman este comportamiento en consideración. Este tipo de sollicitación es clave en vigas y zapatas, donde a menudo se generan fuerzas que exceden la resistencia del concreto (ASOCRETO, 2010).

2.2.3.4.2. Durabilidad. De acuerdo con el comité 116 del ACI, esta característica es la habilidad para resistir la acción del medio ambiente, los ataques químicos, la abrasión y otras condiciones de servicio, de tal manera que sus características y propiedades se mantengan a lo largo de su vida útil (ASOCRETO, 2010).

2.2.3.4.3. Permeabilidad. “La propiedad cuantificable a la que con mayor frecuencia se asocia con la durabilidad es la permeabilidad, definida como la capacidad de permitir el paso de un fluido (líquido o gas) a través del concreto” (ASOCRETO, 2010).

2.2.4. Diseño de mezclas del concreto

El diseño de mezclas consiste en definir qué materiales formarán el concreto y en qué proporciones deben combinarse, de modo que el producto final cumpla con los niveles de resistencia, durabilidad, peso, costo y calidad superficial que requiere la obra. En cuanto a cantidades y proporciones, ASOCRETO (2010) afirma que el cemento ocupa entre un 7% y 15% del volumen de la mezcla, proveyendo eficientemente propiedades de adherencia y cohesión; asimismo, los agregados, esencialmente grava y arena, ocupan entre el 59% y 76% del volumen. El agua que participa en el proceso de hidratación del cemento suele representar aproximadamente entre el 14 % y el 18 % del volumen total de la mezcla. Además, durante el amasado y colocación, una pequeña fracción de aire queda retenida dentro del concreto, generalmente en un rango que oscila entre el 1 % y el 3 %.

2.2.4.1. Método ACI para diseño de mezclas. El ACI establece en la guía ACI 211.1 (2004) una metodología sistemática para definir las proporciones de una mezcla de concreto de peso normal. Esta normativa plantea dos enfoques principales: uno que parte de un peso aproximado del concreto por unidad de volumen y otro que utiliza el método del volumen absoluto para distribuir cada componente dentro de la mezcla. Ambos procedimientos buscan cumplir criterios esenciales relacionados con la trabajabilidad, la resistencia, la uniformidad y la durabilidad del concreto (Cordero et al., 2019).

Para aplicar adecuadamente la ACI 211.1 (2004), es indispensable contar con información detallada de los materiales disponibles. Entre los datos técnicos que deben recopilarse se incluyen:

- i)* La gradación o distribución de tamaños de los agregados.
- ii)* El peso unitario correspondiente a cada tipo de agregado.
- iii)* La absorción y densidad aparente de los agregados.
- iv)* La demanda de agua de la mezcla considerando las características de los agregados.
- v)* La densidad de los materiales cementantes.
- vi)* La combinación adecuada de agregados que permita obtener un concreto con la densidad requerida.

A través de la guía ACI 211.1 (2004), se establece una serie de pasos lógicos y directos para diseñar mezclas de concreto, con especificaciones que abarcan variables como la relación a/c, mínimo contenido de cemento, contenido de aire, asentamiento, máximo tamaño del agregado, resistencia y otras propiedades relacionadas con el material cementante, aditivos y agregados (Cordero et al., 2019).

2.3. Marco Normativo

En esta investigación se emplearon las Normas Técnicas Peruanas (NTP) y las normas ASTM equivalentes para la ejecución de los ensayos de caracterización de materiales y del concreto. Estas normas regulan procedimientos como la granulometría, el peso unitario, la absorción, la resistencia mecánica y otros parámetros esenciales para garantizar la calidad y reproducibilidad de los resultados. Es importante señalar que, en la actualidad, no existe una normativa específica para regular las propiedades, clasificación o uso del biochar en aplicaciones de ingeniería civil. Por ello, en la investigación se adaptó los ensayos en base a normativa referencial vigente.

Capítulo III

3. Metodología de la investigación

3.1. Hipótesis

3.1.1. *Hipótesis general*

HG: La incorporación del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento y como adición, mejora las propiedades físico-mecánicas y reduce el costo del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

3.1.2. *Hipótesis específica*

HE-01: La sustitución parcial en volumen del agregado fino por biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), en porcentajes menores o iguales al 15% mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

HE-02: La sustitución parcial en peso del cemento por biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), en porcentajes menores o iguales al 3% mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

HE-03: La adición del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), en porcentajes menores o iguales al 5% mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'_c=210$ kgf/cm² en la ciudad del Cusco, 2024.

HE-04: El uso del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*), es económicamente viable, principalmente en forma de adición, en el concreto con una resistencia de diseño $f'c=210 \text{ kgf/cm}^2$ en la ciudad del Cusco, 2024.

3.2. Alcance o nivel de investigación

El presente estudio corresponde a un nivel de investigación *explicativo*, ya que busca describir, comparar y explicar las posibles causas y efectos de la incorporación de biochar en las propiedades físico-mecánicas del concreto, en comparación con un concreto patrón.

3.3. Tipo de investigación

La presente investigación corresponde al tipo *aplicado*, ya que se orienta al uso práctico de los conocimientos científicos en un contexto real. En este caso, se busca analizar la influencia del biochar en las propiedades físico-mecánicas del concreto elaborado con materiales locales de la ciudad del Cusco. De esta manera, el estudio trasciende lo teórico, generando información útil y aplicable para el sector de la construcción, al evaluar la factibilidad del biochar como material de sustitución o adición en mezclas de concreto.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de la presente investigación es *cuasi-experimental*, ya que se manipula la variable independiente —el biochar producido a partir de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*)— en diferentes porcentajes de sustitución y adición, con el propósito de evaluar su efecto en las propiedades físico-mecánicas y en la viabilidad económica del concreto. Se estableció un grupo control (concreto convencional con $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$) y varios grupos experimentales (con incorporación de biochar), lo cual permite realizar comparaciones sistemáticas.

Este estudio no corresponde a un experimento puro, dado que no existe un control absoluto de todas las variables externas que podrían influir en los resultados. Factores como la variabilidad

natural de los agregados de cantera, las condiciones ambientales durante el proceso de curado y las particularidades en la producción del biochar escapan al control total del investigador. En este sentido, el diseño se clasifica como cuasi-experimental al encontrarse dentro de los diseños experimentales, pero sin cumplir con la aleatorización ni el control absoluto que caracterizan al experimento puro.

3.5. Enfoque de investigación

La presente investigación se orienta bajo un enfoque *cuantitativo*, ya que se apoya en la obtención y análisis de datos numéricos obtenidos a partir de ensayos normalizados en laboratorio. En estos ensayos se evaluarán propiedades físico-mecánicas del concreto en estado fresco y endurecido, como el asentamiento, temperatura, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta, resistencia a la flexión, densidad, absorción y porcentaje de vacíos, al incorporar biochar en distintos niveles de sustitución y adición. Este enfoque hace posible observar de forma objetiva las variaciones en el desempeño del concreto, comprobar las hipótesis planteadas y establecer con claridad relaciones de causa y efecto entre las variables estudiadas.

3.6. Identificación de variables e indicadores

3.6.1. Variable independiente

X: % de biochar de coco y cáscara de castaña (*Bertholletia excelsa*)

Definición conceptual: El biochar es un material carbonoso obtenido mediante pirólisis de residuos de biomasa. Se caracteriza por su estructura porosa, baja densidad aparente, alta absorción y estabilidad química, propiedades que permiten considerarlo como un material alternativo (IBI, 2024).

Definición operacional: Se mide a través de las formas y porcentajes de incorporación en la mezcla de concreto:

- a)* Como sustitución parcial del agregado fino (arena gruesa) en porcentajes de 10%, 15% y 20% con relación al volumen del agregado fino.
- i)* Sust-Ar-BC_10%: Diseño de mezcla con sustitución parcial del agregado fino (arena gruesa) por biochar en 10% en volumen.
 - ii)* Sust-Ar-BC_15%: Diseño de mezcla con sustitución parcial del agregado fino (arena gruesa) por biochar en 15% en volumen.
 - iii)* Sust-Ar-BC_20%: Diseño de mezcla con sustitución parcial del agregado fino (arena gruesa) por biochar en 20% en volumen.
- b)* Como sustitución parcial del cemento en porcentajes de 1%, 2% y 3% con relación al peso del cemento.
- i)* Sust-Cm-BC_1%: Diseño de mezcla con sustitución parcial del cemento por biochar en 1% en peso.
 - ii)* Sust-Cm-BC_2%: Diseño de mezcla con sustitución parcial del cemento por biochar en 2% en peso.
 - iii)* Sust-Cm-BC_3%: Diseño de mezcla con sustitución parcial del cemento por biochar en 3% en peso.
- c)* Como adición en porcentaje de 1%, 3% y 5% con relación al peso del cemento.
- i)* Adi-BC_1%: Diseño de mezcla con adición de biochar en 1% en peso.
 - ii)* Adi-BC_3%: Diseño de mezcla con adición de biochar en 3% en peso.
 - iii)* Adi-BC_5%: Diseño de mezcla con adición de biochar en 5% en peso.

De esta manera, cada nivel de incorporación se contrastará con el grupo control (concreto convencional sin biochar), evaluándose los cambios en las propiedades físico-mecánicas y en la viabilidad económica de las mezclas.

3.6.2. Variable Dependiente

Y1: Propiedades físico-mecánicas del concreto (Variable Dependiente)

Definición conceptual: Son las características que definen el comportamiento del concreto en estado, determinando así su calidad y resistencia estructural (ASOCRETO, 2010).

Definición operacional: Se evalúan mediante ensayos normalizados:

Propiedades mecánicas:

- a) Resistencia a la compresión
- b) Resistencia a tracción indirecta
- c) Resistencia a la flexión

Propiedades físicas:

- a) Densidad, absorción y porcentaje de vacíos en concreto endurecido

Y2: Viabilidad económica (Variable Dependiente Secundaria)

Definición conceptual: La viabilidad económica de un proyecto vinculado al concreto consiste en determinar si los beneficios económicos obtenidos, tales como la reducción de costos de materiales o los ingresos generados por la comercialización de agregados reciclados, compensan y superan los costos de producción y operación, permitiendo que la alternativa evaluada sea económicamente rentable y financieramente competitiva (Los Santos et al., 2024).

Definición operacional: Se mide mediante el costo unitario por metro cúbico de concreto producido, considerando el costo de materiales (cemento, agregados, agua, biochar) y procesamiento del biochar. Se compara el costo del grupo control frente a los grupos experimentales.

Tabla 4

Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operativa	Dimensión	Indicador	Unidad de medida	Instrumento / método de medición	Nivel de medición
X: % de biochar de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>) (Variable Independiente)	El biochar es un material carbonoso obtenido mediante pirólisis de residuos de biomasa. Se caracteriza por su estructura porosa, baja densidad aparente, alta absorción y estabilidad química, propiedades que permiten considerarlo como un material alternativo (IBI, 2024).	Se mide a través de las formas y porcentajes de incorporación en la mezcla de concreto: Sustitución parcial del agregado fino, sustitución parcial del cemento y adición.	Forma y porcentaje de incorporación	* Sustitución parcial de arena (10%, 15%, 20% v/v) * Sustitución parcial de cemento (1%, 2%, 3% p/p) * Adición (1%, 3%, 5% p/p)	Porcentaje de sustitución / adición	Diseño de Mezclas con el Método ACI 211.1	Cuantitativa discreta
Y1: Propiedades físico-mecánicas del concreto (Variable Dependiente)	Son las características que definen el comportamiento del concreto en estado, determinando así su calidad y resistencia estructural (ASOCRETO, 2010).	Se evalúan mediante ensayos normalizados: Resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta y resistencia a la flexión.	Concreto Fresco	* Asentamiento * Temperatura	mm °C	Ensayo NTP 339.035 Ensayo NTP 339.184	Cuantitativa continua
			Concreto Endurecido	* Resistencia a la compresión	kgf/cm ²	Ensayo NTP 339.034	
				* Resistencia a la tracción indirecta	kgf/cm ²	Ensayo NTP 339.084	
				* Resistencia a la flexión	kgf/cm ²	Ensayo NTP 339.078	
				* Densidad * Absorción * Porcentaje de Vacíos	g/cm ³ % %	Ensayo NTP 339.187	
Y2: Viabilidad económica (Variable Dependiente Secundaria)	La viabilidad económica de un proyecto vinculado al concreto consiste en determinar si los beneficios económicos obtenidos, compensan y superan los costos de producción y operación, permitiendo que la alternativa evaluada sea económicamente rentable y financieramente competitiva (Los Santos et al., 2024).	Se mide mediante el costo unitario por metro cúbico de concreto producido, considerando el costo de materiales (cemento, agregados, agua, biochar) y procesamiento del biochar	Económica	* Costo por m ³ de concreto	S/ por m ³	Análisis de costos unitarios	Cuantitativa continua

3.7. Población y muestra

3.7.1. Unidad de análisis

La unidad de análisis corresponde a cada muestra de concreto elaborada y ensayada en el laboratorio, la cual representa una mezcla específica de concreto patrón o con diferentes porcentajes de biochar como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento o como adición. Cada muestra permite evaluar las propiedades físico-mecánicas del concreto, como resistencia a compresión, densidad, absorción de agua y porcentaje de vacíos.

3.7.2. Población de estudio

La población está constituida por todas las muestras de concreto que podrían elaborarse con las dosificaciones de biochar y concreto patrón bajo condiciones de laboratorio en la ciudad del Cusco, 2024. Es decir, cualquier probeta que cumpla con los mismos criterios de diseño, materiales, curado y ensayos estandarizados forma parte de la población. En la presente investigación se elaboró un total de 200 muestras cilíndricas de 10 cm x 20 cm y 30 vigas de 15 cm x 15 cm x 60 cm.

3.7.3. Muestra

La muestra es no probabilística por conveniencia, ya que las probetas se seleccionaron y fabricaron intencionalmente según los porcentajes de biochar a estudiar respetando el diseño experimental planificado. Este tipo de muestreo es común en investigaciones experimentales de laboratorio, donde el objetivo es evaluar y comparar el comportamiento del concreto bajo condiciones controladas, más que extrapolar los resultados a toda la población de concreto existente.

3.7.4. *Tamaño de muestra*

La selección de la muestra se realiza mediante un muestro intencional, debido a que se establecen previamente las dosificaciones a ensayar en función de los objetivos de la investigación.

Para el concreto endurecido, se fabricaron 200 probetas cilíndricas y 30 vigas, ensayadas según normas NTP y ASTM.

Para el concreto fresco (slump y temperatura) no existe tamaño de muestra, pues no se elaboran probetas; cada mezcla se mide una sola vez antes del vaciado, por lo que cada mezcla representa una medición independiente.

En la Tabla 5 se muestra la cantidad total de muestras cilíndricas ensayadas a compresión.

En la Tabla 6 se muestra la cantidad total de muestras cilíndricas ensayadas a tracción indirecta.

En la Tabla 7 se muestra la cantidad total de vigas ensayadas a flexión.

En la Tabla 8 se muestra la cantidad total de muestras cilíndricas elaboradas para el ensayo de densidad, absorción y porcentaje de vacíos.

Tabla 5

Tamaño de la muestra – ensayo de resistencia a la compresión

Ensayo	Tipo de incorporación	Porcentaje de biochar	N° de muestras por edad de curado			Subtotal
			3 días	7 días	28 días	
Resistencia a la compresión	Concreto control	0%	3	3	6	12
	Sustituto parcial del agregado fino	10%	3	3	6	12
		15%	3	3	6	12
		20%	3	3	6	12
	Sustituto parcial del cemento	1%	3	3	6	12
		2%	3	3	6	12
		3%	3	3	6	12
	Adición	1%	3	3	6	12
		3%	3	3	6	12
		5%	3	3	6	12
Total (muestras cilíndricas 10cmx20cm)						120

Tabla 6*Tamaño de muestra – ensayo de resistencia a la tracción indirecta*

Ensayo	Tipo de incorporación	Porcentaje de biochar	N° de muestras por edad de curado		Subtotal
			7 días	28 días	
Resistencia a la tracción indirecta	Concreto control	0%	3	3	6
	Sustituto parcial del agregado fino	10%	3	3	6
		15%	3	3	6
		20%	3	3	6
	Sustituto parcial del cemento	1%	3	3	6
		2%	3	3	6
		3%	3	3	6
	Adición	1%	3	3	6
		3%	3	3	6
		5%	3	3	6
Total (muestras cilíndricas 10cmx20cm)					60

Tabla 7*Tamaño de muestra – ensayo de resistencia a la flexión*

Ensayo	Tipo de incorporación	Porcentaje de biochar	Nº de muestras por edad	Subtotal
			de curado 28 días	
Resistencia a la flexión	Concreto control	0%	3	3
	Sustituto parcial del agregado fino	10%	3	3
		15%	3	3
		20%	3	3
	Sustituto parcial del cemento	1%	3	3
		2%	3	3
		3%	3	3
	Adición	1%	3	3
		3%	3	3
		5%	3	3
Total (muestras prismáticas - vigas 15cmx15cmx60cm)				30

Tabla 8

Tamaño de muestra – ensayo de densidad, absorción y porcentaje de vacíos

Ensayo	Tipo de incorporación	Porcentaje de biochar	Nº de muestras por edad de curado	Subtotal
			28 días	
Densidad, absorción y porcentaje de vacíos	Concreto control	0%	2	2
	Sustituto parcial del agregado fino	10%	2	2
		15%	2	2
		20%	2	2
		Sustituto parcial del cemento	1%	2
		2%	2	2
		3%	2	2
		Adición	1%	2
		3%	2	2
		5%	2	2
Total (muestras cilíndricas 10cmx20cm)				20

3.8. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos constituye una etapa fundamental en el desarrollo de la presente investigación, ya que permite obtener información precisa, confiable y verificable acerca del comportamiento del concreto con incorporación de biochar proveniente de residuos de coco y cáscara de castaña. A través de este proceso, se recopilan los datos necesarios para analizar las propiedades físico-mecánicas del material y evaluar el efecto de la sustitución parcial de agregado fino por biochar en distintas proporciones.

En esta investigación se emplearon técnicas observacionales, experimentales y documentales, que permitieron registrar con detalle cada etapa del proceso, desde la producción del biochar hasta la obtención de resultados en laboratorio. Los instrumentos seleccionados se alinearon con las normas ASTM y ACI, garantizando la validez técnica y científica de los datos recolectados.

Tabla 9*Técnicas e instrumentos de recolección de datos*

Técnica	Instrumento	Descripción
Observación directa y sistemática	Cámara fotográfica y video.	Se aplicó durante las etapas de producción del biochar, elaboración de mezclas y ensayos en laboratorio. Permitió registrar de forma visual y aspectos como la trabajabilidad del concreto, homogeneidad de las mezclas y comportamiento durante el curado.
Medición experimental	Balanza electrónica, horno de secado, cono de Abrams, termómetro digital, máquina universal de ensayos, etc.	Fue la técnica principal empleada para cuantificar las propiedades del concreto fresco y endurecido. Todos los ensayos se desarrollaron conforme a las normas NTP y ASTM.
Registro documental	Formatos de registro de datos en laboratorio y cuaderno de campo.	Se utilizaron para anotar los resultados de las mediciones, observaciones y condiciones experimentales. Estos registros sirvieron como fuente primaria para el procesamiento y análisis de datos.

3.9. Técnicas e instrumentos de análisis de datos

El análisis de datos permitió interpretar los resultados obtenidos en los ensayos de concreto fresco y endurecido, con el propósito de determinar el efecto del biochar en las propiedades físico-mecánicas del concreto. Para ello, se emplearon técnicas estadísticas de enfoque cuantitativo que facilitaron la organización, procesamiento, comparación e interpretación de la información recolectada.

En primer lugar, se aplicó un análisis estadístico descriptivo, mediante el cual se calcularon medidas de tendencia central (promedios) y dispersión (desviación estándar, coeficiente de variación, etc.), lo que permitió resumir el comportamiento de cada mezcla y evaluar la variabilidad entre probetas del mismo grupo. Asimismo, se utilizaron gráficos comparativos para visualizar la tendencia de los resultados y contrastar el desempeño de las mezclas con biochar respecto al concreto patrón.

De manera complementaria, se realizó un análisis comparativo, orientado a identificar incrementos o disminuciones en las propiedades del concreto al incorporar biochar en distintas proporciones. Este análisis permitió establecer si la presencia de biochar produjo mejoras, deterioro o comportamientos similares al concreto de referencia.

Para el procesamiento de los datos se emplearon instrumentos digitales, destacando:

- a) Microsoft Excel, empleado para la tabulación, elaboración de gráficos y cálculos complementarios.
- b) Normas técnicas NTP y ASTM, como referencia para validar los criterios de aceptación, comparación y consistencia de los resultados experimentales.

Este conjunto de técnicas e instrumentos permitió garantizar un análisis riguroso y coherente con los objetivos planteados en la investigación.

3.10. Flujograma de trabajo

El desarrollo de la presente investigación se estructuró de manera secuencial y organizada, con el propósito de garantizar la coherencia metodológica y el cumplimiento de los objetivos planteados. En la Figura 16 se muestra el flujograma de trabajo donde se presenta de forma esquemática las principales fases del estudio, divididas en tres etapas.

La primera etapa comprende la adquisición de materiales (cemento, agregados, aditivo superplastificante y biochar) y su caracterización física y mecánica, con el objetivo de verificar que cumplan con las especificaciones técnicas establecidas en las normas correspondientes.

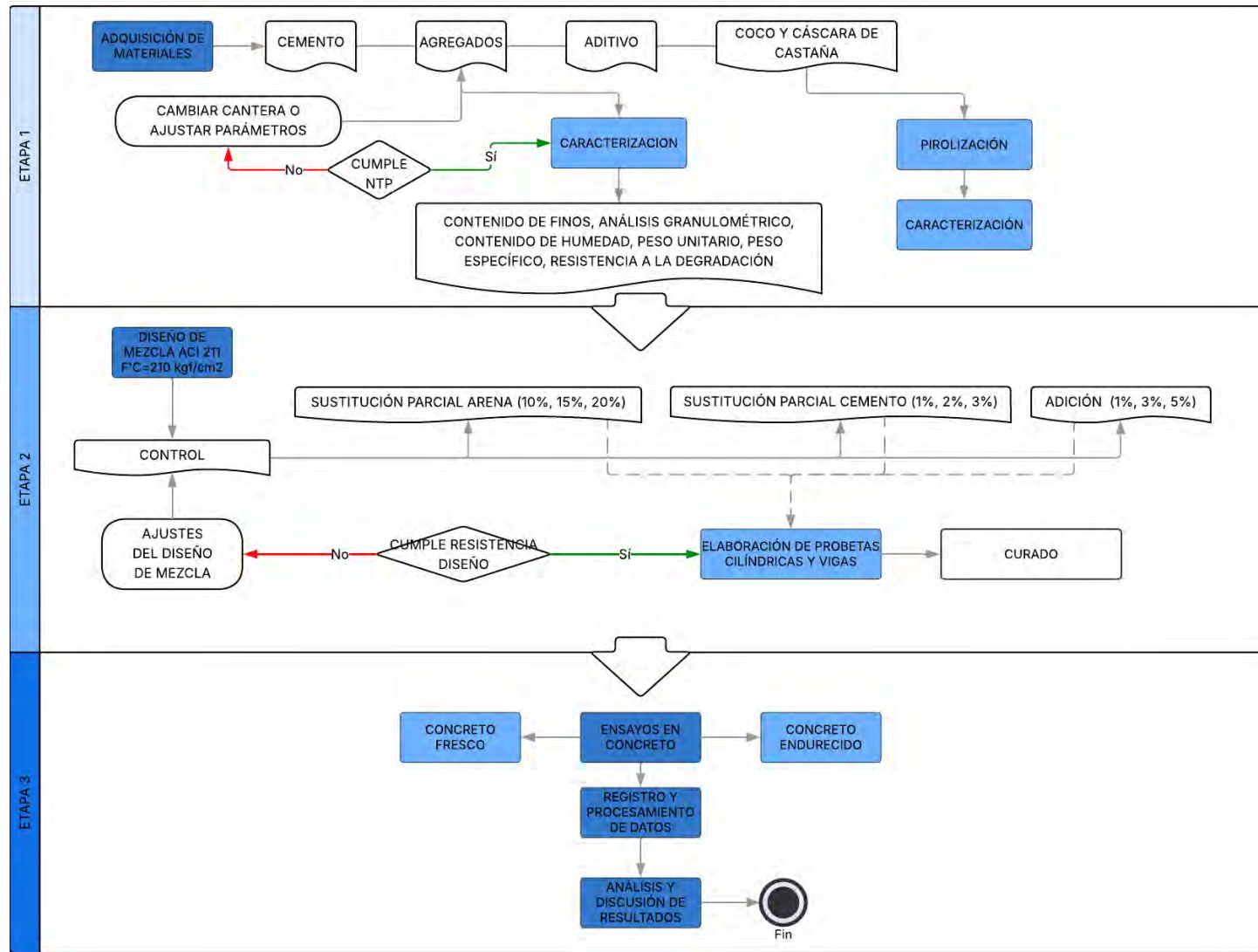
La segunda etapa abarca el diseño de mezclas de acuerdo con el método ACI 211.1 (2004) para una resistencia de diseño de $f'c = 210 \text{ kgf/cm}^2$. En primera instancia, se elaboró una mezcla patrón y se moldearon briquetas de control para corroborar que se alcanzara la resistencia de diseño; en caso contrario, se realizaron los ajustes necesarios. Posteriormente, se procedió a la

fabricación de probetas cilíndricas y vigas correspondientes a las diferentes condiciones de estudio: concreto patrón, reemplazo parcial del agregado fino por biochar con superplastificante, reemplazo parcial del cemento y adición de biochar.

Finalmente, la tercera etapa incluye la ejecución de los ensayos en el concreto fresco y endurecido, así como el registro y procesamiento de los datos mediante hojas de cálculo de Microsoft Excel. Los resultados obtenidos fueron comparados con los del concreto patrón, permitiendo realizar el análisis y la discusión del comportamiento del concreto con biochar bajo las condiciones experimentales establecidas.

Figura 16

Flujograma de trabajo



3.11. Desarrollo del procedimiento experimental

El presente apartado describe de manera detallada el desarrollo de la investigación, desde la adquisición de materiales hasta la ejecución de los ensayos en concreto fresco y endurecido, incluyendo la secuencia de procedimientos, los equipos e instrumentos utilizados, las fórmulas aplicadas para los cálculos respectivos y la normativa empleada, garantizando la replicabilidad y confiabilidad de los resultados.

3.11.1. Adquisición de materiales

3.11.1.1. Biochar. El biochar se produjo en el CINCIA. El coco y cáscaras de castaña fueron recolectados en campo en los castaños de Puerto Maldonado.

3.11.1.1.1. Proceso de producción del biochar. Se realizó la producción mediante el sistema de cilindros TLUD como pirolizador artesanal.

Características del cilindro TLUD: Es un cilindro metálico reutilizado de aproximadamente de 55 galones o 208L de capacidad (altura 88-89 cm, diámetro interior 56 cm aproximadamente y diámetro exterior de 57.5 cm aproximadamente). En la parte superior presenta una serie de hendiduras verticales o cortes delgados distribuidos de manera uniforme alrededor del perímetro. En la parte inferior – base, cuenta con 45 orificios de 1 cm de diámetro aproximadamente. Cuenta con una tapa modificada la cual presenta orificios de ventilación adicionales en el perímetro y también un orificio central sobre el cual se coloca la chimenea metálica que en este caso corresponde a una calamina enrollada.

Paso 1: Visita técnica al CINCIA (Figura 17).

Paso 1: Recolección (Figura 18) y almacén de la biomasa (Figura 19).

Paso 2: Se coloca el cilindro sobre 3 ladrillos de 9 cm de altura (Figura 20).

Paso 2: Se coloca la biomasa dentro del cilindro metálico hasta completar la capacidad útil. La parte superior queda abierta (Figura 21).

Paso 3: En la superficie superior de la biomasa se enciende un pequeño fuego con la ayuda de unas ramas de árboles, que inicia la combustión controlada desde la parte superior hacia abajo.

Paso 4: Una vez iniciado el fuego, se instala la tapa modificada y la chimenea metálica, las cuales regulan el flujo de aire y mejoran el tiraje del sistema (Figura 22).

Paso 5: En la base del cilindro existen aberturas que permiten la entrada de aire primario.

Este suministro de aire impulsa el movimiento del calor y mantiene la combustión superior, pero debe ser limitado para evitar que el biocarbón se oxide y se transforme en ceniza.

Paso 6: El calor avanza gradualmente hacia abajo, generando una zona activa de pirólisis que transforma progresivamente la biomasa en biocarbón.

Paso 7: Los gases producidos (gas de síntesis) ascienden junto con el aire primario hacia la parte superior del cilindro. En la parte superior, los orificios de ventilación secundarios permiten el ingreso de aire adicional. Este aire se mezcla con el gas de síntesis, generando una combustión más completa y una llama limpia (Figura 23). Se mide la temperatura durante el proceso de pirolización (Figura 24 y 25).

Paso 9: Cuando la llama superior desaparece significa que la producción de gases de síntesis ha terminado y que el proceso de pirólisis se ha completado (Figura 26).

Paso 10: Al finalizar la pirólisis, el biocarbón obtenido permanece a alta temperatura, por lo que es necesario realizar un proceso de “quenching” o enfriamiento rápido (Figura 27). Esta etapa consiste en apagar la llama y reducir la temperatura del material mediante la aplicación de agua, con el fin de detener la combustión residual y evitar la oxidación del biocarbón, que podría transformarlo en ceniza. Finalmente se procede a almacenar el biochar (Figura 28).

Figura 17

Visita técnica al CINCIA



Figura 18

Recolección de la biomasa residual (coco y cáscaras de castaña)



Figura 19

Almacén de biomasa en el CINCIA



Nota. Se muestra el lugar de acopio de la biomasa recolectada, se puede apreciar residuos forestales (madera) y los residuos agrícolas (coco y cáscara de castaña) en sacos negros.

Figura 20

Equipo para sinterización (pirólisis) de materia prima - cilindro TLUD



Figura 21

Encendido del fuego para iniciar el proceso de pirólisis



Figura 22

Colocación de la tapa modificada y chimenea metálica



Figura 23

Pirólisis con llama limpia



Nota. Se puede visualizar el cambio de color en el cuerpo del cilindro a medida que avanza la pirólisis.

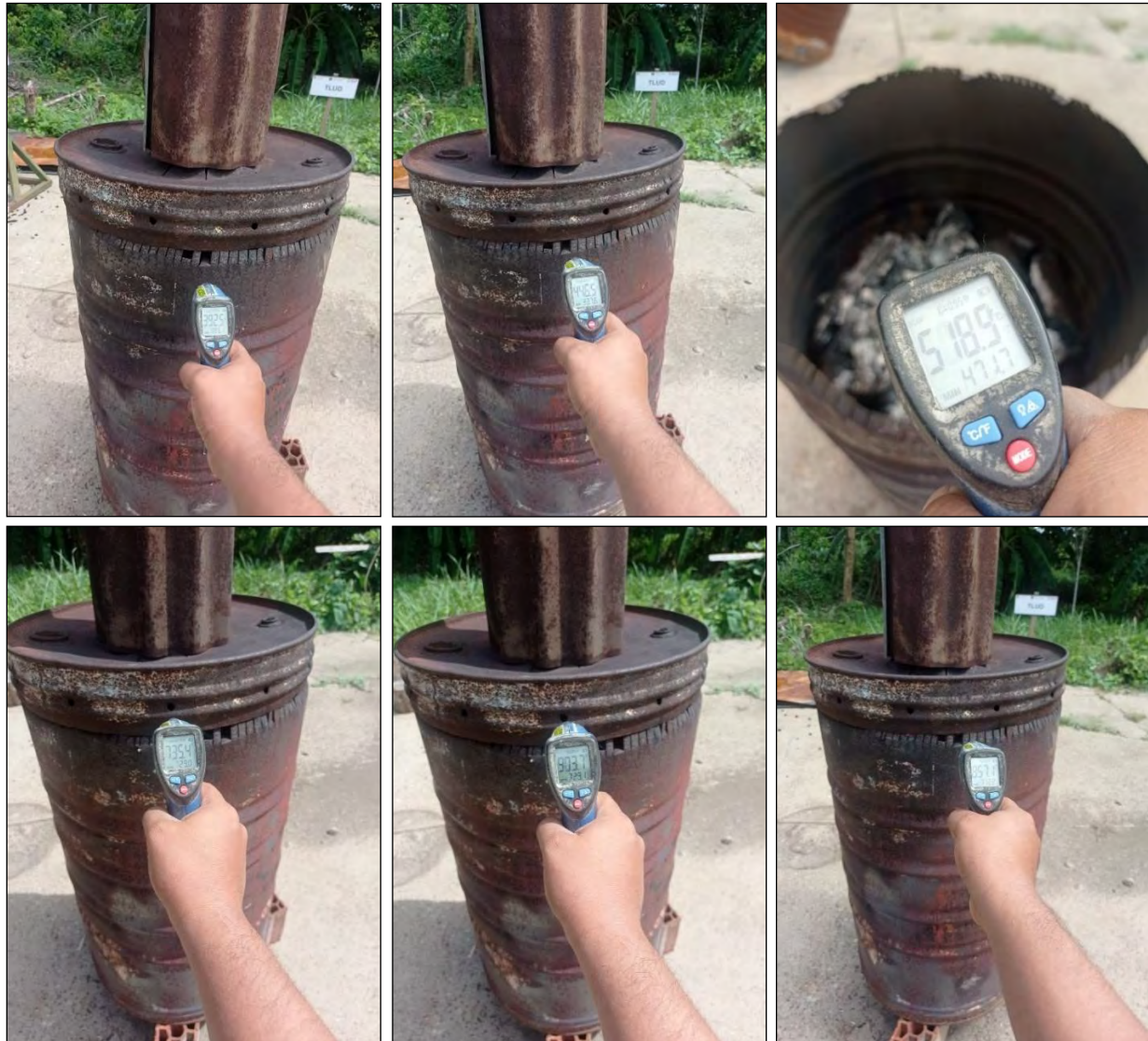
Figura 24

Medición de la temperatura de pirólisis con el equipo portátil (pirómetro)



Figura 25

Fluctuaciones en la medición de temperatura de pirólisis con el pirómetro



Nota. La temperatura en este sistema no se puede controlar como en un pirolizador industrial de flujo continuo, por lo que la temperatura varía durante el proceso de producción del biochar. En estas imágenes se muestra que las temperaturas variaron de 392.5°C a 957.1°C, siendo esta última la más alta, por lo general la temperatura se mantuvo alrededor de 500°C a 700°C durante gran parte del proceso.

Figura 26

Finalización del proceso de pirólisis



Figura 27

Enfriamiento y extinción del biochar ("quenching")



Figura 28

Almacenamiento del biochar



3.11.1.2. Cemento. Se usó el cemento tipo HS “Yura Max” el cual es de uso comercial en la ciudad del Cusco, utilizado para cualquier tipo de infraestructura. Posee factor R, el cual protege contra agregados dañinos y de baja calidad, otorga al concreto o al mortero mayor resistencia al ataque de sulfatos y así mismo proporciona impermeabilidad. Esta es capaz de resistir el intemperismo adverso, ataques químicos, abrasión, entre otros (YURA S.A., 2024). Se puede observar a mayor detalle sus características técnicas en la sección de anexos.

3.11.1.3. Agregados. Se usó agregados locales, se usó agregado grueso de la Cantera de Vicho y agregado fino de la cantera de Cunyac.

La Cantera de Vicho se encuentra en la zona sur del Cusco, en el distrito de San Salvador, provincia de Calca – Cusco, a 3100 m.s.n.m. El agregado es de origen ígneo, lo que significa que proviene de roca volcánica. La roca predominante tiene una resistencia natural aceptable, lo que permite su uso para concretos estructurales. Se puede observar que este agregado tiene un % considerable de material fino, por lo que para diseño de mezclas en laboratorio es necesario realizar un previo lavado para cumplir con la normativa vigente.

Figura 29

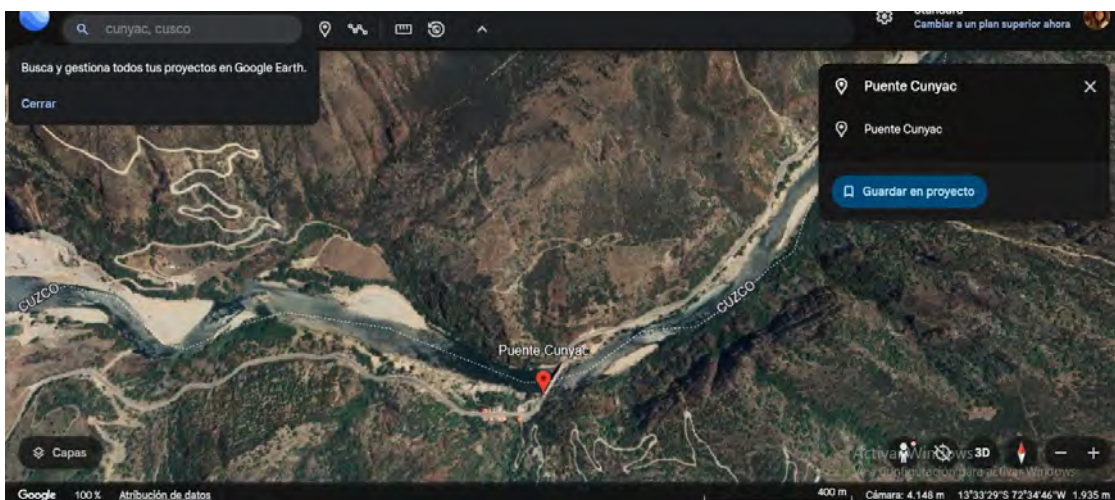
Ubicación de la cantera Vicho en Google Earth



La Cantera de Cunyac, se sitúa en la ruta hacia Abancay, cerca del río Apurímac. Su origen está asociado a depósitos fluviales del río Apurímac lo que se refleja en una arena con granos mayormente redondeados y de textura lisa. Estas características favorecen la trabajabilidad del concreto en estado fresco. El yacimiento se distingue también por la limpieza natural del material, lo que permite su uso para diseños de mezcla en laboratorio.

Figura 30

Ubicación de la cantera Cunyac en Google Earth



Agua. El agua se utilizó de la EPS SEDACUSCO S.A.

Aditivo. Se utilizó aditivo superplastificante de Industrias Ulmen S.A. únicamente para las mezclas con sustitución parcial de arena por biochar.

3.11.2. Caracterización del biochar

3.11.2.1. Composición química del biochar

3.11.2.1.1. Objetivo. Determinar la composición química elemental del biochar mediante un analizador portátil de Fluorescencia de Rayos X (XRF), con el fin de identificar y cuantificar los elementos presentes en el material. Los resultados se reportan en partes por millón (ppm), considerando un intervalo de precisión equivalente a $\pm 3\sigma$, donde σ representa la desviación estándar del equipo durante el proceso de medición.

3.11.2.1.2. Equipos y/o instrumentos. Para el análisis químico se utilizó un Analizador XRF portátil (Fluorescencia de Rayos X), el cual permite obtener resultados rápidos, no destructivos y reproducibles, adecuados para muestras sólidas en polvo como el biochar.

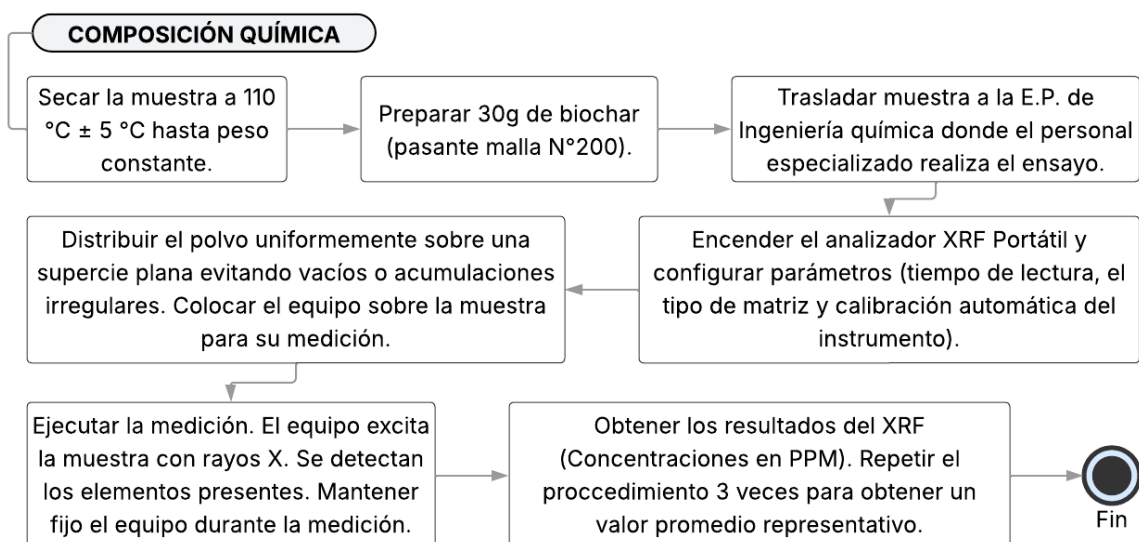
3.11.2.1.3. Normativa referencial. Se desarrolló siguiendo las recomendaciones técnicas generales para análisis mediante XRF, basadas en la ISO 13196 (2013) — Determinación de elementos químicos por fluorescencia de rayos X y el manual técnico del fabricante del equipo XRF utilizado.

3.11.2.1.4. Muestreo. Para el ensayo se tomó una muestra representativa de 30 g de biochar en polvo, previamente tamizado hasta obtener material pasante la malla N° 200 (75 μm). Este tamaño de partícula permite obtener una superficie homogénea y óptima para el análisis por XRF.

3.11.2.1.5. Procedimiento. El procedimiento se realizó como se muestra en la Figura 31 y Figura 32.

Figura 31

Flujograma - composición química del biochar por XFR



Nota. Adaptado de ISO 13196 (2013).

Figura 32

Composición química del biochar por XFR



3.11.2.2. Contenido de carbono fijo del biochar

3.11.2.2.1. Objetivo. Determinar el contenido de carbono fijo presente en el biochar utilizado en la investigación, con el propósito de estimar la cantidad de carbono que podría ser retenido al incorporarse en el concreto.

3.11.2.2.2. Laboratorio responsable. El análisis fue realizado por el personal técnico del Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ciencias de la UNSAAC, quienes efectuaron el procedimiento con sus propios protocolos internos.

3.11.2.2.3. Muestreo. Se entregó al laboratorio una muestra representativa de 30 g de biochar en polvo, previamente tamizado hasta obtener material pasante la malla N° 200 (75 μ m).

3.11.2.2.4. Normativa referencial. El laboratorio reportó el resultado de carbono fijo conforme a los métodos derivados del análisis proximal para biomasa como la ASTM D3172 (2013) y ASTM D5142 (1998), aplicados según su procedimiento interno.

3.11.2.2.5. Procedimiento. El procedimiento específico se realizó íntegramente dentro del laboratorio por el personal técnico especializado; por ello, en esta tesis únicamente se detallan las condiciones generales del análisis:

- a) Se sometió la muestra a un análisis proximal para determinar su contenido de humedad, materia volátil y cenizas.
- b) El carbono fijo fue calculado por diferencia, siguiendo el método estándar utilizado por el laboratorio.
- c) Los resultados fueron entregados en un reporte oficial emitido por la Facultad de Ciencias.

3.11.2.3. Alcalinidad (pH) del biochar

3.11.2.3.1. Objetivo. Determinar el valor de pH del biochar utilizado en la investigación, con el fin de conocer su nivel de alcalinidad y evaluar su posible influencia en el comportamiento del concreto al incorporarse a las mezclas de concreto.

3.11.2.3.2. Laboratorio responsable. El análisis fue realizado por el personal técnico del Laboratorio de Análisis Químico de la Facultad de Ciencias de la UNSAAC, quienes ejecutaron

el procedimiento aplicando sus propios protocolos internos establecidos para determinación de pH en materiales sólidos.

3.11.2.3.3. Muestreo. Para este ensayo se entregó al laboratorio una muestra representativa de 30 g de biochar en polvo, previamente tamizado hasta obtener material pasante la malla N° 200 (75 μ m). La misma muestra fue empleada para los ensayos de carbono fijo y pH.

3.11.2.3.4. Normativa referencial. El laboratorio realizó la determinación de pH conforme a los métodos utilizados para biomasa y suelos, basados en procedimientos derivados de normas internacionales como ASTM y metodologías de análisis químico estándar empleadas en el laboratorio.

3.11.2.3.5. Procedimiento. El procedimiento específico fue realizado íntegramente por el personal técnico del laboratorio; por ello, en esta tesis se describen únicamente las condiciones generales del análisis:

- a) La muestra de biochar en polvo fue acondicionada según los protocolos internos del laboratorio.
- b) Se preparó una suspensión biochar-agua en proporciones determinadas por el método estándar interno.
- c) La mezcla fue agitada y posteriormente dejada en reposo el tiempo requerido por el procedimiento.
- d) Se procedió a medir el pH empleando un equipo de lectura electroquímica calibrado previamente con soluciones patrón.
- e) Finalmente, el laboratorio registró los valores obtenidos y emitió un reporte oficial con el resultado.

3.11.2.4. Análisis granulométrico del biochar como arena

3.11.2.4.1. Objetivo. Determinar la distribución granulométrica del biochar utilizado como reemplazo parcial del agregado fino, a fin de obtener un material con una gradación controlada que permita su empleo en la elaboración del concreto.

3.11.2.4.2. Normativa referencial. NTP 400.012 (2021).

3.11.2.4.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó tamices normalizados (N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200), balanza digital de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, molino manual molidor de granos, molino eléctrico de granos, cepillo de cerdas suaves, recipientes para almacenamiento de material retenido.

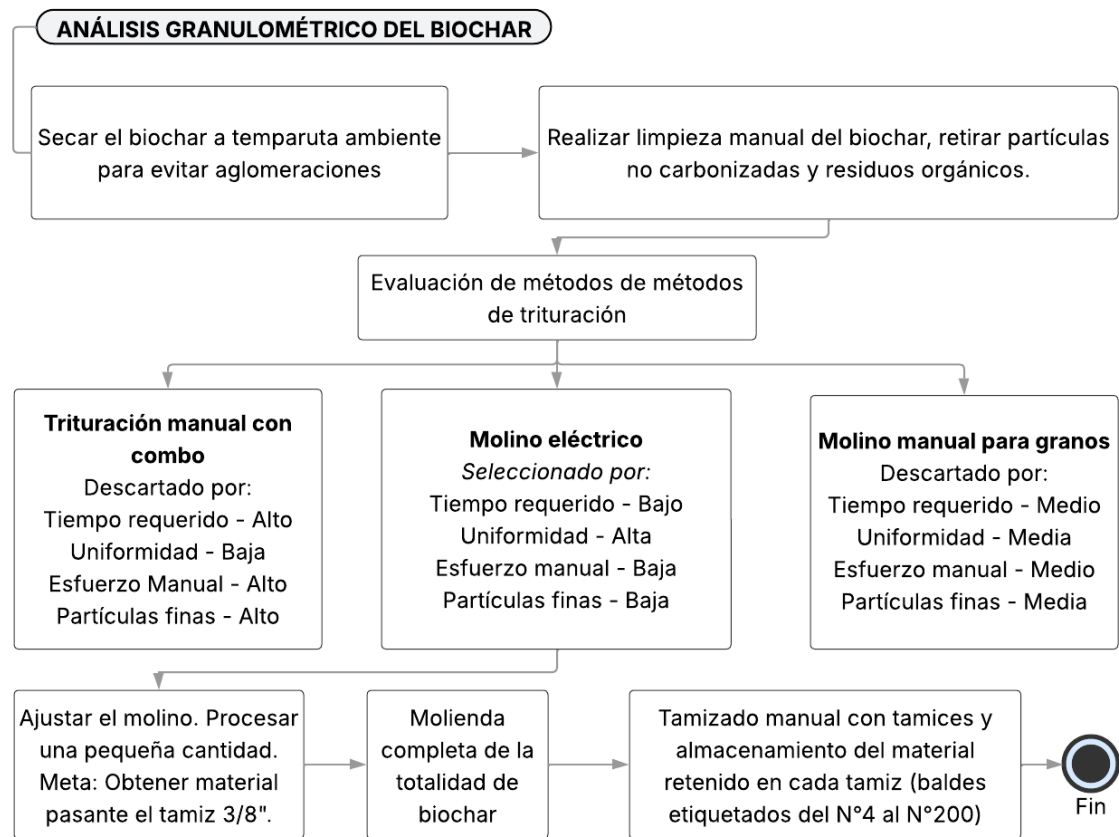
3.11.2.4.4. Muestreo. Para el análisis granulométrico se empleó la totalidad del biochar producido. Este material fue previamente limpiado, secado y acondicionado. Antes del proceso de trituración y tamizado se retiraron de manera manual partículas no carbonizadas y restos orgánicos que pudieran alterar los resultados de los ensayos.

3.11.2.4.5. Procedimiento. El procedimiento seguido para obtener la distribución granulométrica del biochar fue el que se muestra en la Figura 33 y 34.

La granulometría controlada escogida para reemplazo del agregado fino tuvo la siguiente distribución, la cual se encuentra en función al porcentaje del peso retenido que debe haber en cada malla: Malla N° 4 (5%), N° 8 (10%), N° 16 (25%), N° 30 (25%), N° 50 (20%) y N° 100 (15%).

Figura 33

Flujograma – análisis granulométrico del biochar



Nota. Adaptado de NTP 400.012 (2021).

Figura 34

Análisis granulométrico del biochar



3.11.2.4.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

El cálculo del módulo de fineza se calcula mediante la Ec. (1).

$$MF = \frac{\sum \%Ret. Acum. (N^{\circ}100; N^{\circ}50; N^{\circ}30; N^{\circ}16; N^{\circ}8; N^{\circ}4; 3/8"; 3/4")}{100} \quad \dots (Ec. 1)$$

Donde:

MF = Módulo de Fineza

3.11.2.5. Peso específico y absorción del biochar como arena

3.11.2.5.1. Objetivo. Determinar la densidad promedio de las partículas del biochar como agregado fino (arena) sin incluir los orificios entre partículas, densidad relativa (gravidad específica) y la absorción del biochar como arena.

3.11.2.5.2. Normativa referencial. NTP 400.022 (2024).

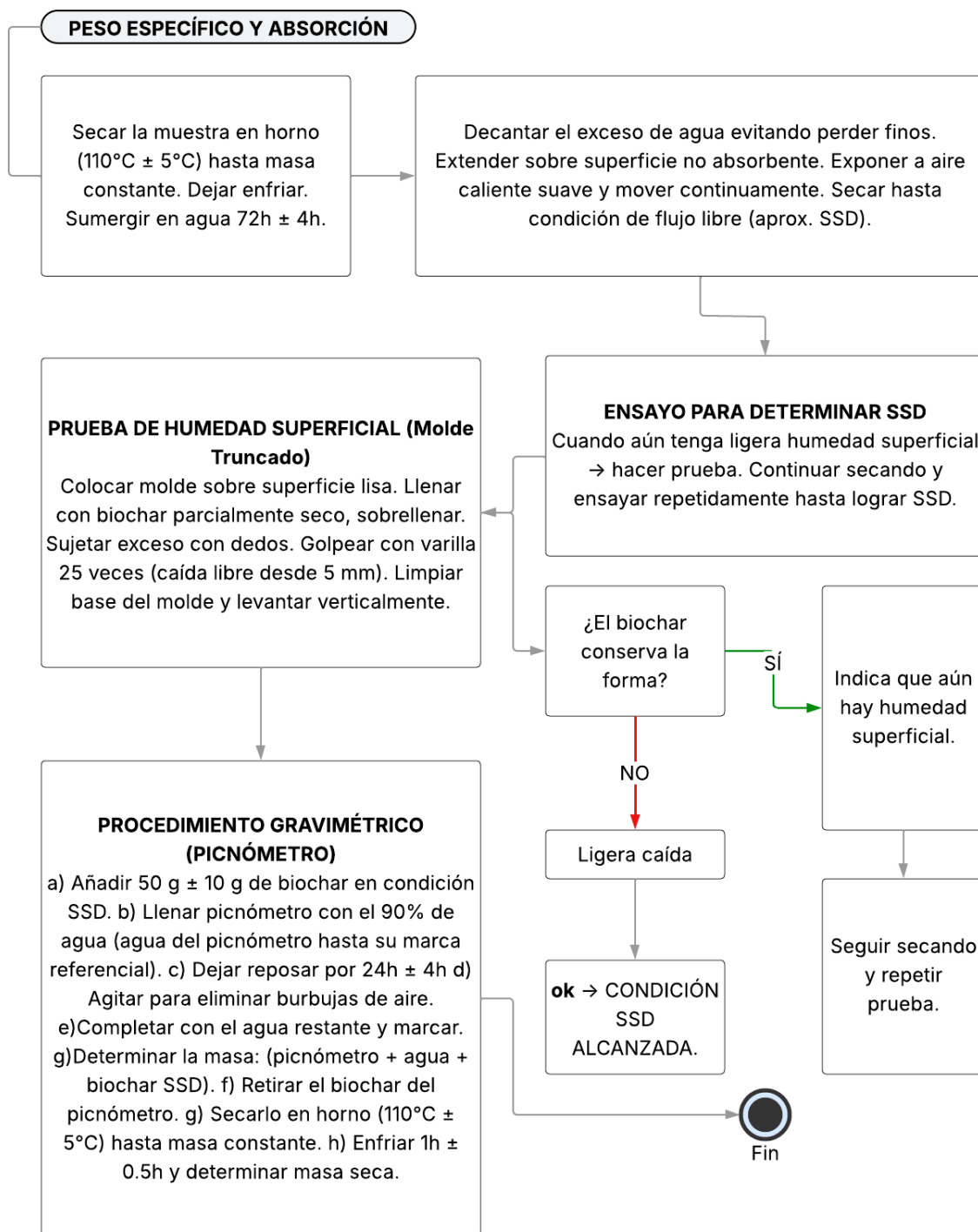
3.11.2.5.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, picnómetro, molde metálico en forma de tronco de cono de 7.5 cm de altura y barra compactadora para los ensayos de humedad y horno.

3.11.2.5.4. Muestreo. El tamaño de la muestra fue de 100 g.

3.11.2.5.5. Procedimiento. Se realizó el peso unitario suelto y compactado como se muestra en la Figura 35 y 36.

Figura 35

Flujograma - peso específico y absorción del biochar como arena



Nota. Adaptado de NTP 400.022 (2024).

Figura 36

Peso específico y absorción del biochar como arena



3.11.2.5.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

La densidad relativa (gravedad específica) (seca al horno seco) (OD) se calcula con la Ec.

(2).

$$OD = \frac{A}{B + S - C} \quad \dots \text{(Ec. 2)}$$

La densidad relativa (gravedad específica) saturado superficialmente seca (SSD) se calcula con la Ec. (3).

$$SSD = \frac{S}{B + S - C} \quad \dots \text{(Ec. 3)}$$

La densidad relativa aparente (gravedad específica aparente se calcula con la Ec. (4).

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{B + A - C} \quad \dots (\text{Ec. 4})$$

La absorción se calcula con la Ec. (5).

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 5})$$

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno (g)

B = masa del picnómetro llenado de agua hasta la marca de calibración (g)

C = masa del picnómetro lleno de la muestra y el agua hasta la marca de calibración (g)

S = masa de la muestra de saturado superficialmente seca por el método gravimétrico (g)

3.11.2.6. Peso Unitario y vacíos del biochar como arena

3.11.2.6.1. Objetivo. Determinar el peso unitario “densidad de masa” del biochar como agregado fino (arena) en condición suelto o compactado y los vacíos entre partículas.

3.11.2.6.2. Normativa referencial. NTP 400.017 (2020).

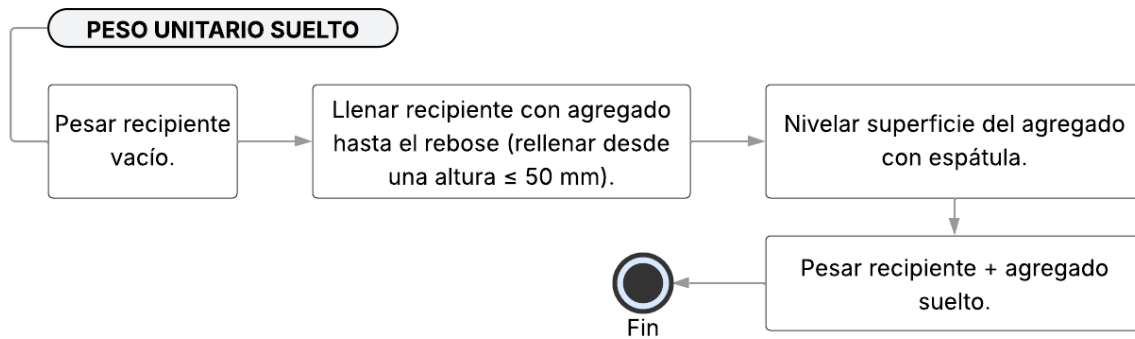
3.11.2.6.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, varilla de apisonado de acero de 16mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud con un extremo redondeado, recipiente cilíndrico de acero, cucharón y brocha.

3.11.2.6.4. Muestreo. El tamaño de la muestra fue de 125% a 200% de la capacidad requerida para rellenar el recipiente. Antes de ejecutar los ensayos se procedió a preparar la muestra de biochar combinando los pesos retenidos en cada tamiz.

3.11.2.6.5. Procedimiento. Se realizó el peso unitario suelto y compactado como se muestra en la Figura 37, 38, 39 y 40.

Figura 37

Flujograma – peso unitario suelto del biochar como arena



Nota. Adaptado de NTP 400.017 (2020).

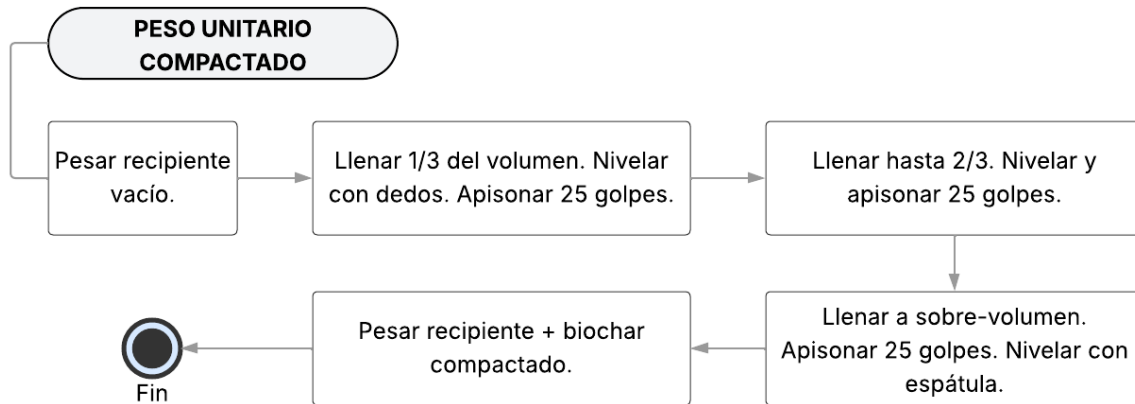
Figura 38

Peso unitario suelto del biochar como arena



Figura 39

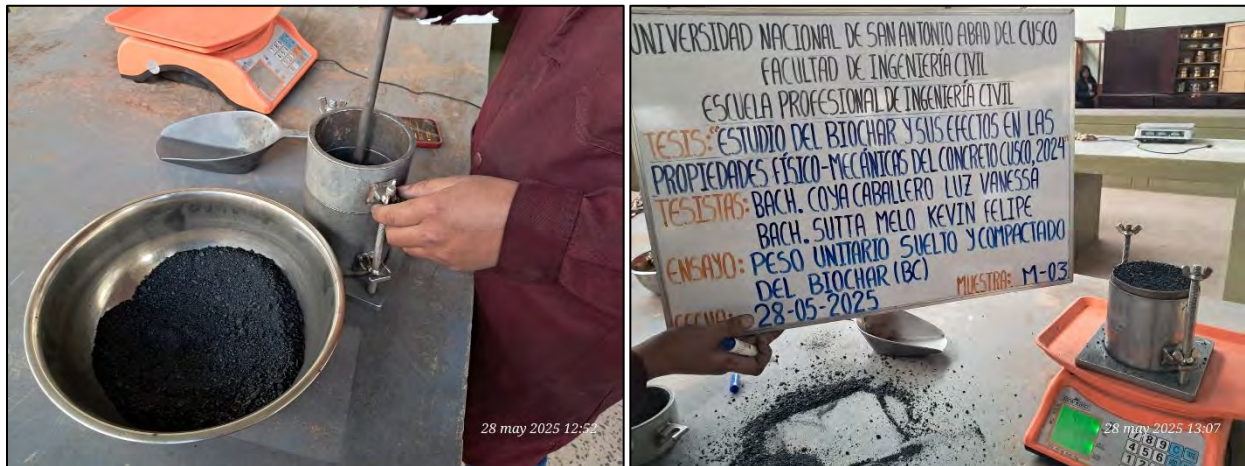
Flujograma – peso unitario compactado del biochar como arena



Nota. Adaptado de NTP 400.017 (2020).

Figura 40

Peso unitario compactado del biochar como arena



3.11.2.6.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

La densidad de masa del biochar se calcula con la Ec. (6).

$$M = \frac{(G - T)}{V} \quad \dots \text{(Ec. 6)}$$

Donde:

M = densidad de masa del biochar (kg/m³)

G = masa del biochar más el recipiente (kg)

T = masa del recipiente (kg)

V = volumen del recipiente (m³)

El porcentaje de vacíos del biochar se calcula con la Ec. (7).

$$\%Vacíos = 100 [(S \times W) - M] / (S \times W) \quad \dots \text{(Ec. 7)}$$

Donde:

M = densidad de masa del biochar (kg/m³)

S = gravedad específica de masa (base seca) (kg/m³)

W = densidad del agua (kg/m³) = 1000 kg/m³

3.11.2.7. Finura del biochar como cemento y aditivo

3.11.2.7.1. Objetivo. Determinar y clasificar las partículas finas de biochar que pueden emplearse como reemplazo parcial del cemento o como aditivo mineral en el concreto, utilizando como criterio granulométrico el material que pasa completamente el tamiz N° 200 (75 µm). Esta caracterización permite identificar la fracción ultrafina del biochar con mayor potencial de interacción con la matriz cementicia.

3.11.2.7.2. Muestreo. Para este análisis se utilizó todo el biochar pasante del tamiz N° 200, obtenido durante el proceso de tamizado realizado en el análisis granulométrico del biochar como arena. Este material, al ser la fracción más fina del biochar, se consideró adecuado para su uso como componente cementante o como aditivo mineral en las mezclas de concreto.

3.11.2.7.3. Procedimiento. No hay más procedimiento. La granulometría son todas las partículas pasantes el tamiz N°200. La granulometría para esta categoría se definió como el conjunto total de partículas de biochar que pasan la malla N° 200, razón por la cual dicha fracción fue directamente clasificada y almacenada como “biochar fino para uso cementante/aditivo”.

3.11.2.8. Densidad del biochar como cemento y aditivo

3.11.2.8.1. Objetivo. Determinar el peso específico (densidad relativa) del biochar fino destinado a ser utilizado como reemplazo parcial del cemento o como aditivo mineral en el concreto, con el fin de evaluar su comportamiento volumétrico, y su incidencia en el diseño de mezclas. Este valor permite comparar el biochar con el cemento Portland convencional.

3.11.2.8.2. Normativa referencial. NTP 334.005 (2018).

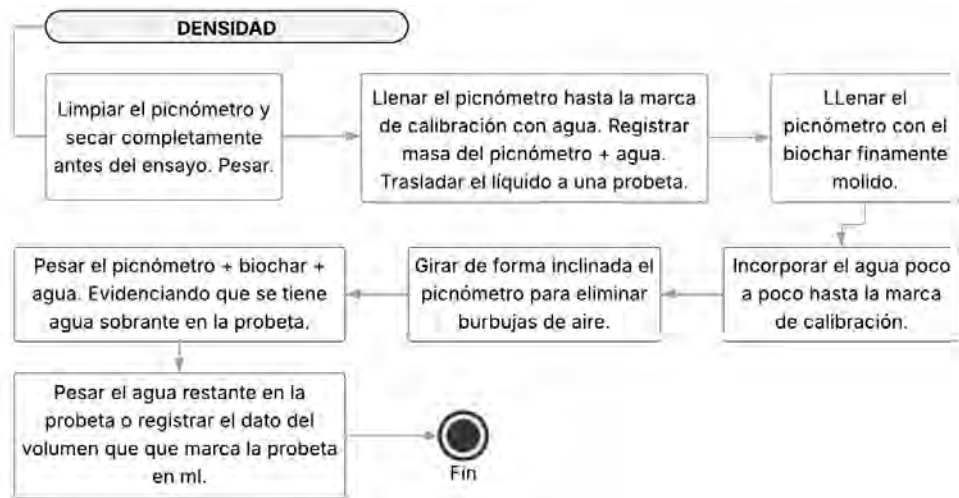
3.11.2.8.3. Equipos y/o instrumentos. Picnómetro de 250 ml (de vidrio calibrado), balanza digital con sensibilidad de 0.01g, alcohol etílico (utilizado como líquido de referencia), embudo pequeño, paño absorbente, recipientes.

3.11.2.8.4. Muestreo. Para el ensayo se empleó el biochar pasante la malla N° 100, obtenido durante el análisis granulométrico del biochar usado como arena. Esta fracción ultrafina fue seleccionada por su similitud de tamaño con el cemento y su potencial uso como aditivo mineral. La muestra fue cuarteada previamente para obtener una porción representativa.

3.11.2.8.5. Procedimiento. El procedimiento se adaptó debido a las características porosas del biochar, este se observa en la Figura 41.

Figura 41

Flujograma – densidad del biochar como cemento y/o aditivo



Nota. Adaptado de NTP 334.005 (2018).

Figura 42

Densidad del biochar como cemento y/o aditivo



3.11.2.8.6. Cálculos. Se usó la siguiente fórmula.

La densidad del biochar se calcula con la Ec. (8).

$$\rho \left(\frac{Mg}{m^3} \right) = \rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa biochar (g)}}{\text{volumen del líquido desplazado (cm}^3\text{)}} \quad \dots \text{ (Ec. 8)}$$

Donde:

ρ = densidad del biochar

3.11.3. Caracterización del Agregado Grueso

Se realizaron los siguientes ensayos al agregado grueso (Vicho) con tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ pulgada:

Tabla 10

Ensayos realizados al agregado grueso

N°	Norma	Descripción	Cantidad
01	NTP 400.018	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 μm (N°200) por lavado en agregados	3
02	NTP 400.012	AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global	3
03	NTP 339.185	AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado	3
04	NTP 400.021	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso.	3
05	NTP 400.017	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados.	3
06	NTP 400.019	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Angeles	3

3.11.3.1. Materiales más Finos que Pasan por el tamiz N° 200 del Agregado Grueso

3.11.3.1.1. Objetivo. Determinar por vía húmeda el contenido de polvo o material que pasa el tamiz de 75 μm (N°200) en el agregado para elaboración de concretos. Se realiza para evaluar el recubrimiento superficial que tiene el agregado grueso como consecuencia de material fino y su potencial de perjudicar el comportamiento del concreto.

3.11.3.1.2. Normativa. NTP 400.018 (2020).

3.11.3.1.3. Equipos y/o instrumentos. Tamiz N° 16 y N°200, recipiente metálico, balanza con precisión a 0.1% del peso medido, horno.

3.11.3.1.4. Muestreo. La cantidad mínima según el tamaño máximo nominal del agregado grueso fue de 2500 g, descrito en la Tabla 11.

Tabla 11

Cantidad mínima de muestra – contenido de finos por lavado con agua del agregado grueso

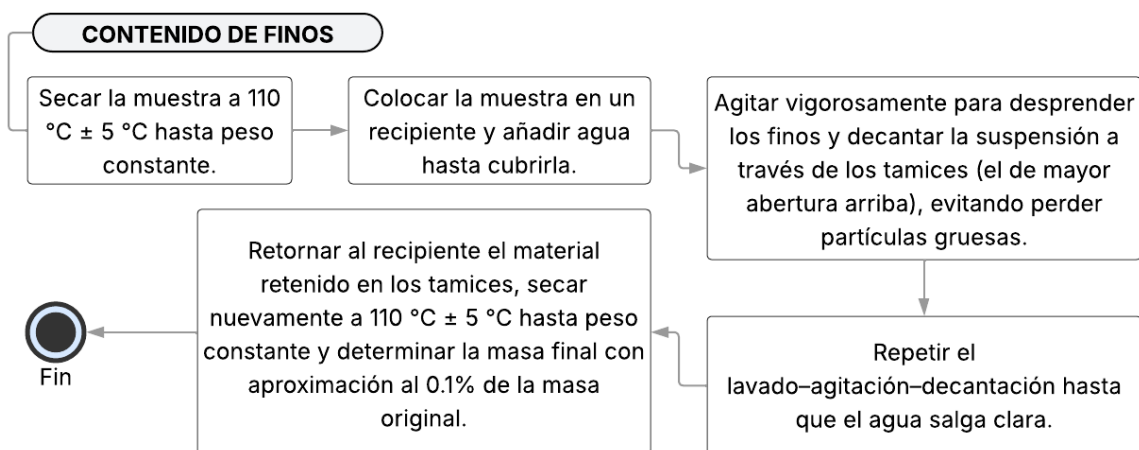
Tamaño máximo nominal	Cantidad mínima (g)
N°4 o más pequeño	300
3/8 pulg.	1000
3/4 pulg.	2500
1 1/2 pulg. o más grande	5000

Nota. Adaptado de NTP 400.018 (2020).

3.11.3.1.5. Procedimiento. Se utilizó el procedimiento A (de lavado con agua), el cual se describe en la Figura 43.

Figura 43

Flujograma – contenido de finos por lavado con agua del agregado grueso



Nota. Adaptado de NTP 400.018 (2020).

Figura 44

Contenido de finos por lavado con agua del agregado grueso



3.11.3.1.6. Cálculo. Se utilizó la siguiente fórmula.

El porcentaje de material fino que pasa por el tamiz N°200 para el agregado grueso se calcula con la Ec. (9).

$$A = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 9)}$$

Donde:

A = porcentaje del material más fino que pasa por el tamiz N°200

P1 = peso de la muestra original (g)

P2 = peso de la muestra ensayada (g)

3.11.3.2. Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

3.11.3.2.1. Objetivo. Determinar la gradación del agregado grueso propuesto por tamaño de partículas, cuyos resultados deberán cumplir los requisitos que exige la especificación técnica de la obra.

3.11.3.2.2. Normativa. NTP 400.012 (2021).

3.11.3.2.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, tamices ($\frac{3}{4}$ ", $\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{8}$ ", N°4, N°8, N°16, N°50), tapa y fondo, agitador mecánico de tamices y horno.

3.11.3.2.4. Muestreo. La cantidad mínima de la muestra para nuestro agregado grueso de tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " fue de 5kg, descrito en la Tabla 12.

Tabla 12

Cantidad mínima de muestra – análisis granulométrico del agregado grueso

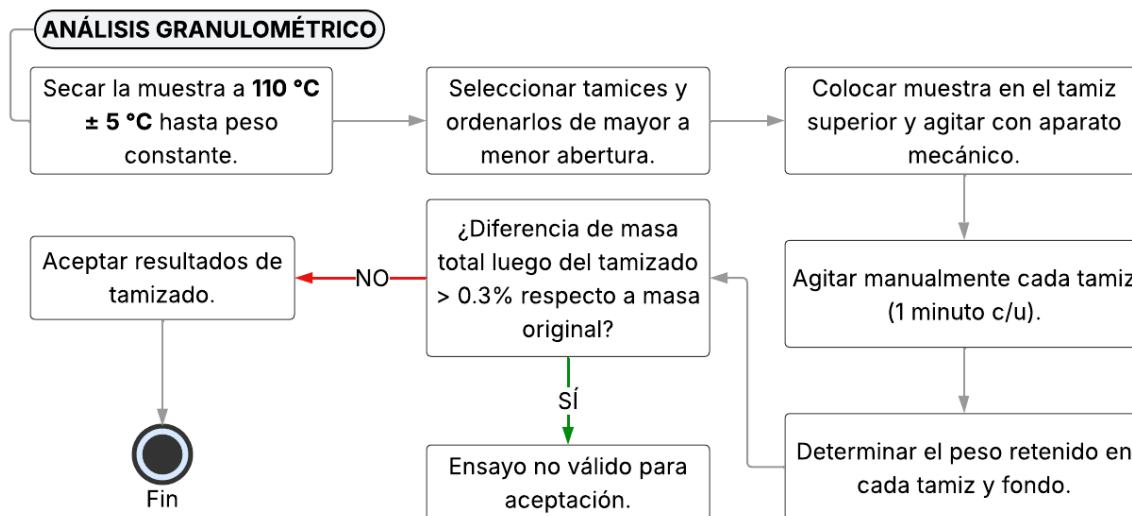
Tamaño máximo nominal (pulg.)	Masa mínima de muestra de ensayo (kg)
$\frac{3}{8}$	1
$\frac{1}{2}$	2
$\frac{3}{4}$	5
1	10
1 $\frac{1}{2}$	15
2	20
2 $\frac{1}{2}$	35
3	60
3 $\frac{1}{2}$	100
4	150
5	300

Nota. Adaptado de NTP 400.012 (2021).

3.11.3.2.5. Procedimiento. El procedimiento se describe en la Figura 45.

Figura 45

Flujograma – análisis granulométrico del agregado grueso



Nota. Adaptado de NTP 400.012 (2021).

Figura 46

Análisis granulométrico del agregado grueso



3.11.3.2.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

El módulo de fineza del agregado grueso se calcula con la Ec. (10).

$$MF = \frac{\sum \%Ret. Acum. (N^{\circ}100; N^{\circ}50; N^{\circ}30; N^{\circ}16; N^{\circ}8; N^{\circ}4; 3/8"; 3/4")}{100} \quad (Ec. 10)$$

Donde:

MF = Módulo de Fineza

3.11.3.3. Contenido de Humedad del Agregado Grueso

3.11.3.3.1. Objetivo. Determinar el porcentaje de humedad evaporable en el agregado grueso por secado, esta humedad incluye la humedad superficial y la contenida en los poros.

3.11.3.3.2. Normativa. NTP 339.185 (2021).

3.11.3.3.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, horno, recipientes metálicos.

3.11.3.3.4. Muestreo. La cantidad mínima de la muestra para nuestro agregado grueso de tamaño máximo nominal de ¾” fue de 3kg, según lo estipulado en la Tabla 13.

Tabla 13

Cantidad mínima de muestra – contenido de humedad del agregado grueso

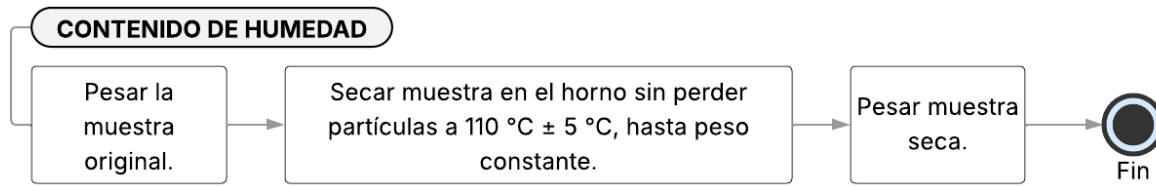
Tamaño máximo nominal (pulg)	Cantidad mínima (kg)
Nº4	0.5
3/8	1.5
1/2	2
3/4	3
1	4
1 1/2	6
2	8
2 1/2	10
3	13
3 1/2	16
4	18
6	50

Nota. Adaptado de NTP 339.185 (2021).

3.11.3.3.5. Procedimiento. El procedimiento se describe en la Figura 47 y 48.

Figura 47

Flujograma – contenido de humedad del agregado grueso



Nota. Adaptado de NTP 339.185 (2021).

Figura 48

Contenido de humedad del agregado grueso



3.11.3.3.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

El contenido de humedad del agregado grueso se calcula con la Ec. (11).

$$p = 100(W - D)/D \quad \dots \text{(Ec. 11)}$$

Donde:

p = contenido total de humedad evaporable del agregado grueso (%)

W = masa de la muestra húmeda original (g)

D = masa de la muestra seca (g)

3.11.3.4. Peso Específico y Absorción del Agregado Grueso

3.11.3.4.1. Objetivo. Determinar el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca y peso específico aparente y la absorción del agregado grueso, utilizado para el cálculo y corrección de diseños de mezclas.

3.11.3.4.2. Normativa. NTP 400.021 (2020).

3.11.3.4.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza con una precisión de 0.05% de la carga de muestra (esta debe estar equipada con un aparato adecuado para suspender el recipiente de la muestra en el agua), canasta de alambre, tanque de agua, tamiz N°4, horno a temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

3.11.3.4.4. Muestreo. Se rechazó todo material que pasa el tamiz N°4 por tamizado en seco. La masa mínima de la muestra fue de 3 kg según el cuadro mostrado (Tabla 14).

Tabla 14

Cantidad mínima de muestra – peso específico y absorción del agregado grueso

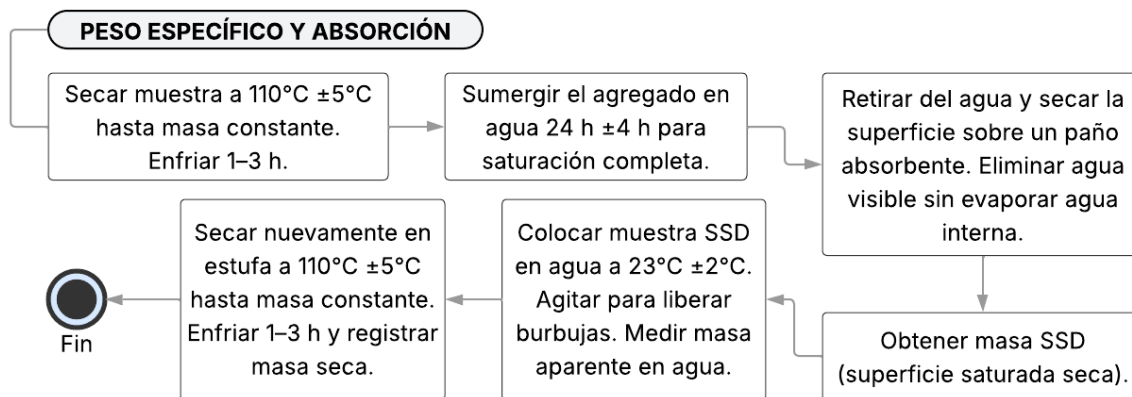
Tamaño máximo nominal (pulg.)	Masa mínima de muestra de ensayo (kg)
1/2	2
3/4	3
1	4
1 1/2	5
2	8
2 1/2	12
3	18
3 1/2	25
4	40
5	75

Nota. Adaptado de NTP 400.021 (2020).

3.11.3.4.5. Procedimiento. Se realizó el procedimiento como se muestra en la Figura 49 y 50.

Figura 49

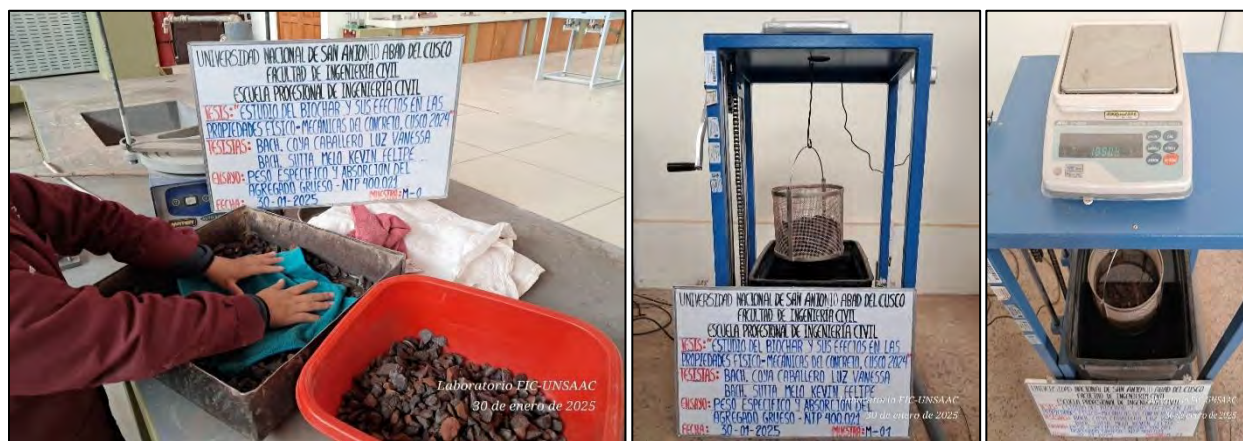
Flujograma – peso específico y absorción del agregado grueso



Nota. Adaptado de NTP 400.021 (2020).

Figura 50

Peso específico y absorción del agregado grueso



3.11.3.4.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

La densidad Relativa (Gravedad Específica) (OD) se calcula con la Ec. (12).

$$OD = \frac{A}{B - C} \quad \dots \text{(Ec. 12)}$$

La densidad Relativa (Gravedad Específica) (SSD) se calcula con la Ec. (13).

$$SSD = \frac{B}{B - C} \quad \dots \text{(Ec. 13)}$$

La densidad Relativa Aparente (Gravedad Específica Aparente) se calcula con la Ec. (14).

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{A - C} \quad \dots \text{(Ec. 14)}$$

La absorción se calcula con la Ec. (15).

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 15)}$$

Donde:

A = masa de la muestra secada al horno en el aire (g)

B = masa de la muestra de ensayo de superficie saturada seca en el aire (g)

C = masa aparente de la muestra de ensayo saturada en agua (g)

3.11.3.5. Peso Unitario y Vacíos del Agregado Grueso

3.11.3.5.1. Objetivo. Determinar el peso unitario “densidad de masa” del agregado grueso en condición suelto o compactado y los vacíos entre partículas.

3.11.3.5.2. Normativa. NTP 400.017 (2020).

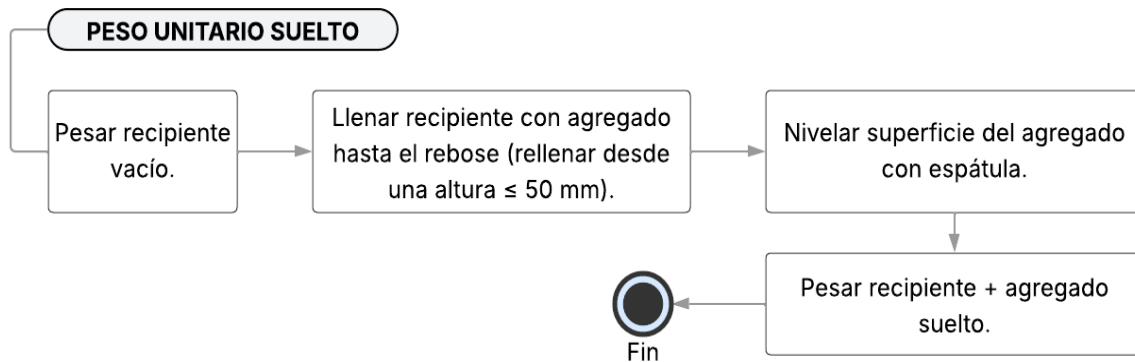
3.11.3.5.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, varilla de apisonado de acero de 16mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud con un extremo redondeado, recipiente cilíndrico de acero, cucharón y brocha.

3.11.3.5.4. Muestreo. El tamaño de la muestra fue de 125% a 200% de la capacidad requerida para rellenar el recipiente.

3.11.3.5.5. Procedimiento. Se realizó el peso unitario suelto y compactado como se muestra en la Figura 51, 52, 53 y 54.

Figura 51

Flujograma – peso unitario suelto del agregado grueso



Nota. Adaptado de NTP 400.017 (2020).

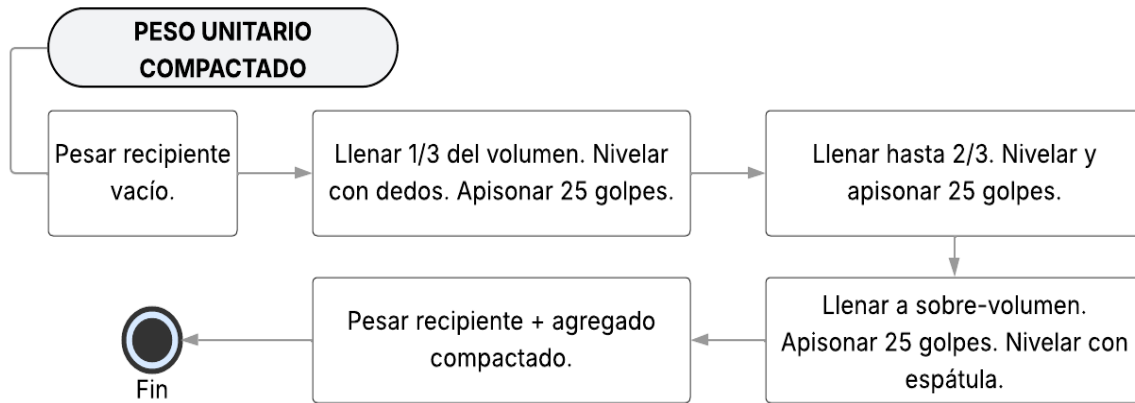
Figura 52

Peso unitario suelto del agregado grueso



Figura 53

Flujograma – peso unitario compactado del agregado grueso



Nota. Adaptado de NTP 400.017 (2021).

Figura 54

Peso unitario compactado del agregado grueso



3.11.3.5.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

La densidad de masa del agregado grueso se calcula con la Ec. (16).

$$M = \frac{(G - T)}{V} \quad \dots \text{(Ec. 16)}$$

Donde:

M = densidad de masa del agregado (kg/m³)

G = masa del agregado más el recipiente (kg)

T = masa del recipiente (kg)

V = volumen del recipiente (m³)

El porcentaje de vacíos del agregado grueso se calcula con la Ec. (17).

$$\% \text{ Vacíos} = 100 [(S \times W) - M] / (S \times W) \quad \dots (\text{Ec. 17})$$

Donde:

M = densidad de masa del agregado (kg/m³)

S = gravedad específica de masa (base seca) (kg/m³)

W = densidad del agua (kg/m³) = 1000 kg/m³

3.11.3.6. Resistencia a la Abrasión del Agregado Grueso

3.11.3.6.1. Objetivo. Determinar la resistencia a la degradación utilizando la máquina de Los Ángeles, Este es un indicador de la calidad relativa o sobre la competencia de agregados de varias fuentes teniendo una composición similar.

3.11.3.6.2. Normativa. NTP 400.019 (2020).

3.11.3.6.3. Equipos y/o instrumentos. Máquina de los Ángeles, tamices, balanza con exactitud al 0.1% de la carga de ensayo, esferas de acero de acuerdo con la gradación.

Se determinó el número de esferas de acuerdo con la gradación a la cual pertenece, según la Tabla 15 el agregado grueso de Vicho pertenece a la gradación B por tener material retenido en ½” y 3/8”; por lo tanto, el número de esferas utilizado fue de 11.

Tabla 15*Gradación de las muestras de ensayo – resistencia a la abrasión*

Tamiz (abertura)		Masa de tamaño indicado (g)			
Que pasa	Retenido sobre	Gradación			
		A	B	C	D
1 1/2 pulg	1 pulg	1250 ± 25	-	-	-
1 pulg	3/4 pulg	1250 ± 25	-	-	-
3/4 pulg	1/2 pulg	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
1/2 pulg	3/8 pulg	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
3/8 pulg	1/4 pulg	-	-	2500 ± 10	-
1/4 pulg	Nº4	-	-	2500 ± 10	-
Nº4	Nº8	-	-	-	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Nota. Adaptado de NTP 400.019 (2020).**Tabla 16***Número de esferas – resistencia a la abrasión*

Gradación	Nº de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Nota. Adaptado de NTP 400.019 (2020).

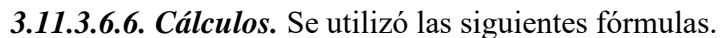
3.11.3.6.4. Muestreo. Se obtuvo una muestra de acuerdo con la NTP 400.010 (2016) y se reducirá a un tamaño de acuerdo con la NTP 400.043 (2015).

3.11.3.6.5. Procedimiento. Se realizó el procedimiento como se muestra en la Figura 55.

Flujograma – resistencia a la abrasión



Resistencia a la abrasión


$$\% \text{ Pérdida} = \frac{C - Y}{C} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 18})$$

Donde:

C = masa original de la muestra de ensayo (g)

Y = masa final de la muestra de ensayo (g)

3.11.4. Caracterización del Agregado Fino

Se realizaron los siguientes ensayos al agregado fino (Cunyac):

Tabla 17

Ensayos realizados al agregado fino

N°	Norma	Descripción	Cantidad
01	NTP 400.018	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 µm (N°200) por lavado en agregados	3
02	NTP 400.012	AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global	3
03	NTP 339.185	AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado	3
05	NTP 400.022	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino	3
04	NTP 400.017	AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados.	3

3.11.4.1. Materiales más Finos que Pasan por el tamiz N° 200 del Agregado Fino

3.11.4.1.1. Objetivo. Determinar por vía húmeda el contenido de polvo o material que pasa el tamiz de 75 µm (N°200) en el agregado para elaboración de concretos. Se realiza para evaluar el recubrimiento superficial que tiene el agregado fino como consecuencia de material fino y su potencial de perjudicar el comportamiento del concreto.

3.11.4.1.2. Normativa. NTP 400.018 (2020).

3.11.4.1.3. Equipos y/o instrumentos. Tamiz N° 16 y N°200, recipiente metálico, balanza con precisión a 0.1% del peso medido, horno.

3.11.4.1.4. Muestreo. La cantidad mínima según el tamaño máximo nominal del agregado fino fue de 300 g, descrito en la Tabla 18.

Tabla 18

Cantidad mínima de muestra – contenido de finos por lavado con agua del agregado fino

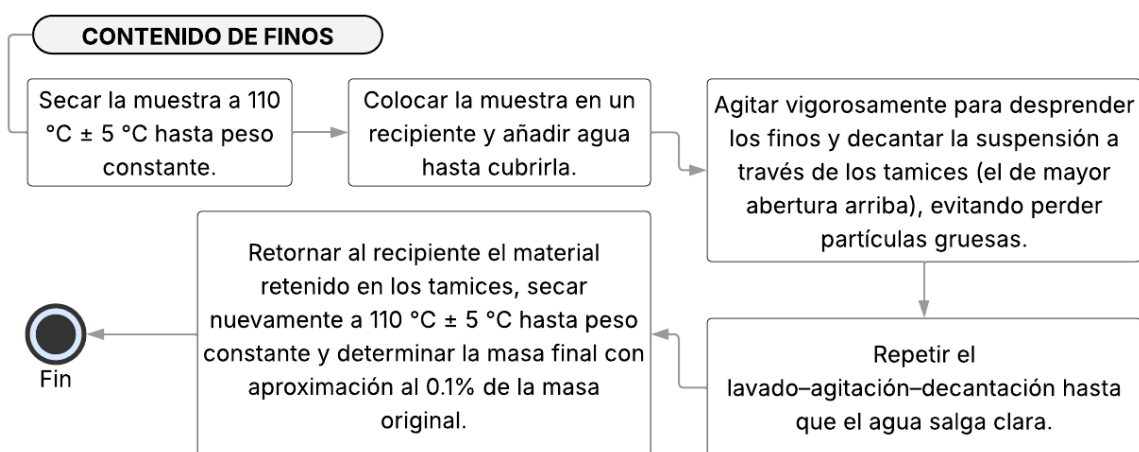
Tamaño máximo nominal	Cantidad mínima (g)
Nº4 o más pequeño	300
3/8 pulg.	1000
3/4 pulg.	2500
1 1/2 pulg. o más grande	5000

Nota. Adaptado de NTP 400.018 (2020)

3.11.4.1.5. Procedimiento. Se utilizó el procedimiento A (de lavado con agua), el cual se describe en la Figura 57 y 58.

Figura 57

Flujograma – contenido de finos por lavado con agua del agregado fino



Nota. Adaptado de NTP 400.018 (2020).

Figura 58

Contenido de finos por lavado con agua del agregado fino



Cálculo. Se utilizó la siguiente fórmula.

El porcentaje de material más fino que pasa por el tamiz N°200 del agregrado fino se calcula con la Ec. (19).

$$A = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 19)}$$

Donde:

A = porcentaje del material más fino que pasa por el tamiz N°200

P1 = peso de la muestra original (g)

P2 = peso de la muestra ensayada (g)

3.11.4.2. Análisis Granulométrico del Agregado Fino

3.11.4.2.1. Objetivo. Determinar la gradación del agregado fino propuesto por tamaño de partículas, cuyos resultados deberán cumplir los requisitos que exige la especificación técnica de la obra.

3.11.4.2.2. Normativa. NTP 400.012 (2021).

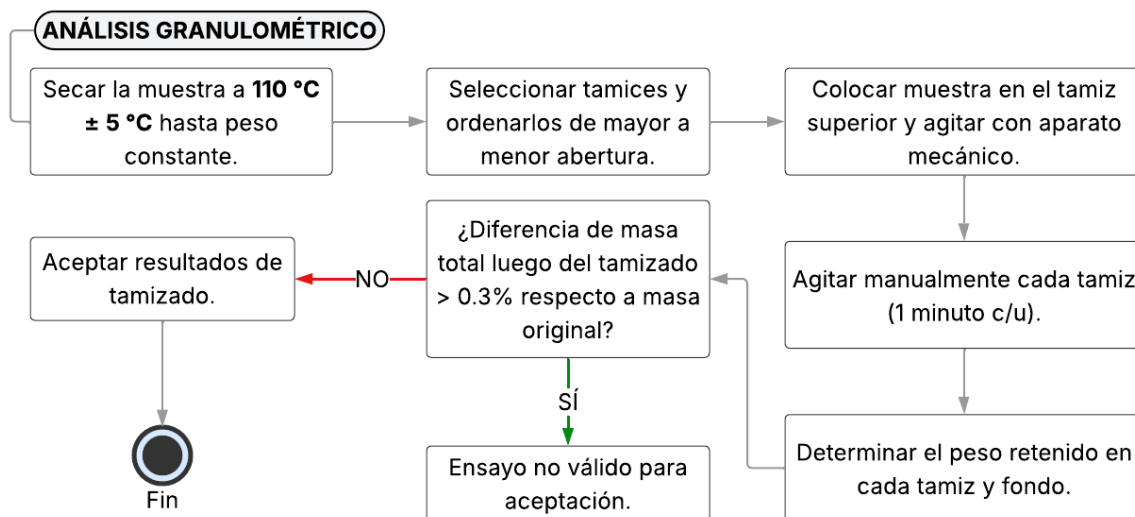
3.11.4.2.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, tamices (3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 y N°200), tapa y fondo, agitador mecánico de tamices y horno.

3.11.4.2.4. Muestreo. La cantidad mínima de la muestra para el agregado fino fue de 300g, según lo descrito en la NTP.

3.11.4.2.5. Procedimiento. El procedimiento se describe en la siguiente Figura 59 y 60.

Figura 59

Flujograma – análisis granulométrico del agregado fino



Nota. Adaptado de NTP 400.012 (2021).

Figura 60

Análisis granulométrico del agregado fino



3.11.4.2.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

El módulo de fineza del agregado fino se calcula con la Ec. (19).

$$MF = \frac{\sum \%Ret. Acum. (N^{\circ}100; N^{\circ}50; N^{\circ}30; N^{\circ}16; N^{\circ}8; N^{\circ}4; 3/8"; 3/4")}{100} \quad \dots (Ec. 19)$$

Donde:

MF = Módulo de Fineza

3.11.4.3. Contenido de Humedad del Agregado Fino

3.11.4.3.1. Objetivo. Determinar el porcentaje de humedad evaporable en el agregado fino por secado, esta humedad incluye la humedad superficial y la contenida en los poros.

3.11.4.3.2. Normativa. NTP 339.185 (2021).

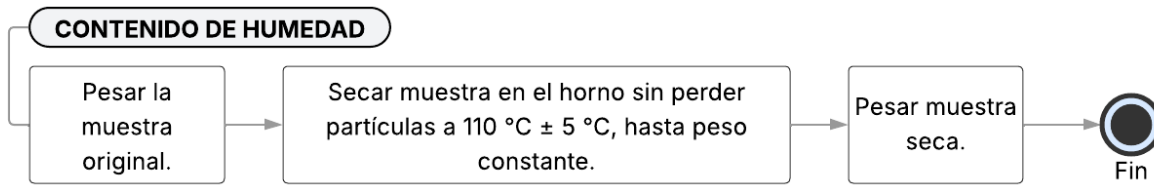
3.11.4.3.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, horno, recipientes metálicos con tapa.

3.11.4.3.4. Muestreo. La cantidad mínima de la muestra para el agregado fino de Cunyac fue de 100g,

3.11.4.3.5. Procedimiento. El procedimiento se describe en la Figura 61 y 62.

Figura 61

Flujograma – contenido de humedad del agregado fino



Nota. Adaptado de NTP 339.185 (2021)

Figura 62

Contenido de humedad del agregado fino



3.11.4.3.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

El contenido de humedad del agregado fino se calcula con la Ec. (20).

$$p = 100(W - D)/D \quad \dots \text{(Ec. 20)}$$

Donde:

p = contenido total de humedad evaporable del agregado grueso (%)

W = masa de la muestra húmeda original (g)

D = masa de la muestra seca (g)

3.11.4.4. Peso Específico y Absorción del Agregado Fino

3.11.4.4.1. Objetivo. Determinar la densidad promedio de las partículas de agregado fino sin incluir los orificios entre partículas, densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.

3.11.4.4.2. Normativa. NTP 400.022 (2024).

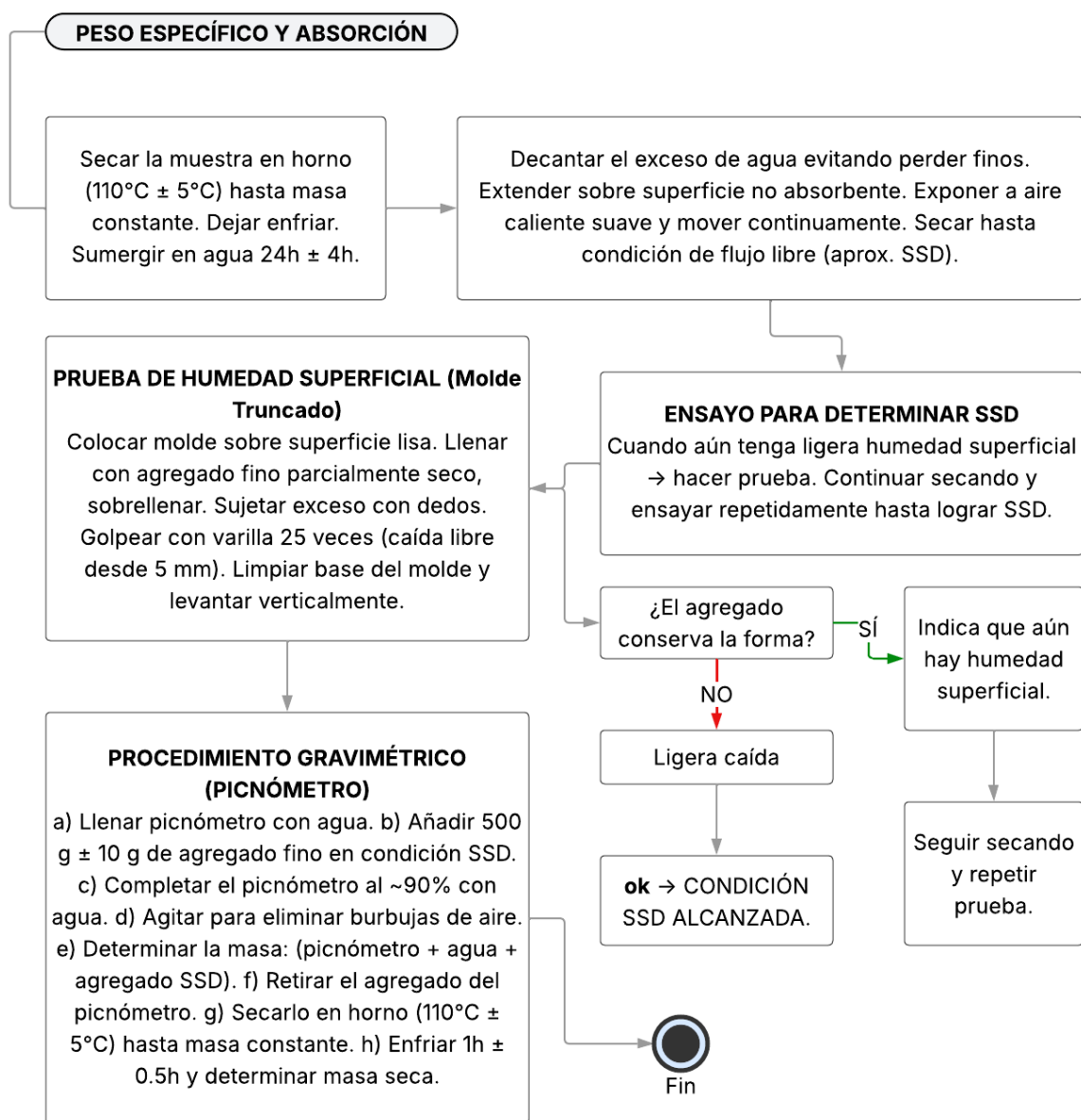
3.11.4.4.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, picnómetro, molde metálico en forma de tronco de cono de 7.5 cm de altura y barra compactadora para los ensayos de humedad y horno.

3.11.4.4.4. Muestreo. El tamaño de la muestra fue de 500 g.

3.11.4.4.5. Procedimiento. Se realizó el peso unitario suelto y compactado como se muestra en la Figura 63 y 64.

Figura 63

Flujograma – peso específico y absorción del agregado fino



Nota. Adaptado de NTP 400.022 (2024).

Figura 64

Peso específico y absorción del agregado fino



3.11.4.4.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

La densidad relativa (gravedad específica) (seca al horno seco) (OD) se calcula con la Ec.

(21).

$$OD = \frac{A}{B + S - C} \quad \dots \text{(Ec. 21)}$$

La densidad relativa (gravedad específica) saturado superficialmente seca (SSD) se calcula con la Ec. (22).

$$SSD = \frac{S}{B + S - C} \quad \dots \text{(Ec. 22)}$$

La densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) se calcula con la Ec. (23).

$$\text{Gravedad específica aparente} = \frac{A}{B + A - C} \quad \dots (\text{Ec. 23})$$

La absorción se calcula con la Ec. (24).

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} \times 100 \quad \dots (\text{Ec. 24})$$

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno (g)

B = masa del picnómetro llenado de agua hasta la marca de calibración (g)

C = masa del picnómetro lleno de la muestra y el agua hasta la marca de calibración (g)

S = masa de la muestra de saturado superficialmente seca por el método gravimétrico (g)

3.11.4.5. Peso Unitario y Vacíos del Agregado Fino

3.11.4.5.1. Objetivo. Determinar el peso unitario “densidad de masa” del agregado fino en condición suelto o compactado y los vacíos entre partículas.

3.11.4.5.2. Normativa. NTP 400.017 (2020).

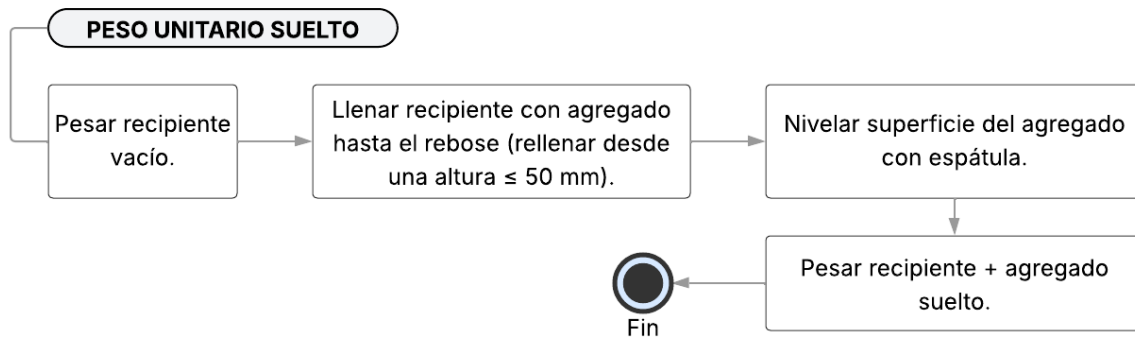
3.11.4.5.3. Equipos y/o instrumentos. Balanza de precisión con aproximación de 0.1% de la masa de la muestra, varilla de apisonado de acero de 16mm de diámetro y aproximadamente 600 mm de longitud con un extremo redondeado, recipiente cilíndrico de acero, cucharón y brocha.

3.11.4.5.4. Muestreo. El tamaño de la muestra fue de 125% a 200% de la capacidad requerida para rellenar el recipiente.

3.11.4.5.5. Procedimiento. Se realizó el peso unitario suelto y compactado como se muestra en la Figura 65, 66, 67 y 68.

Figura 65

Flujograma – peso unitario suelto del agregado fino



Nota. Adaptado de NTP 400.017 (2020).

Figura 66

Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido

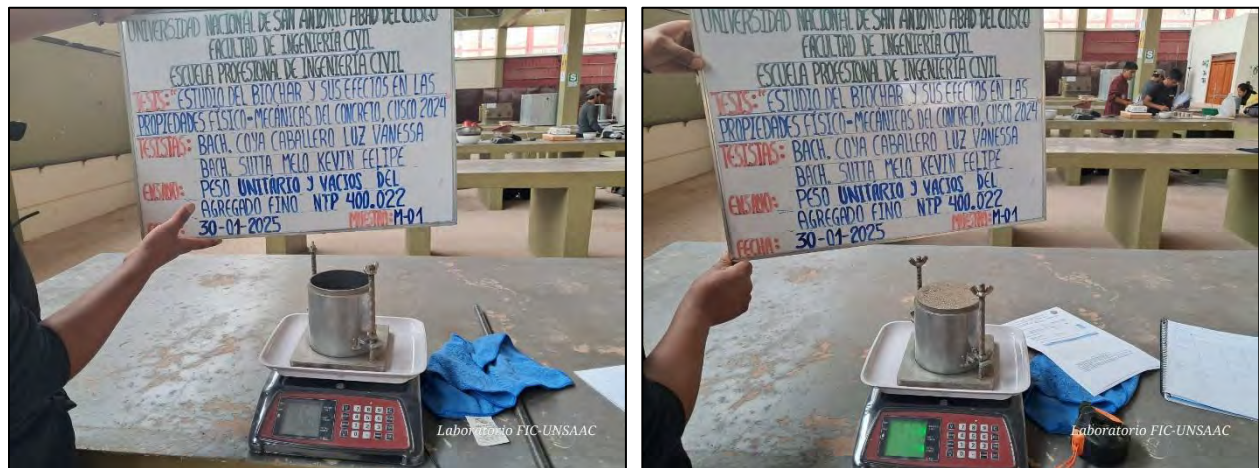
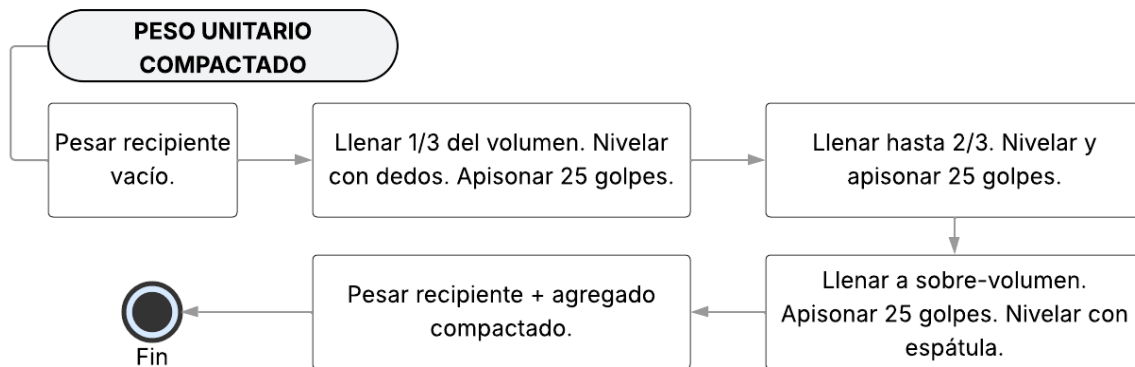


Figura 67

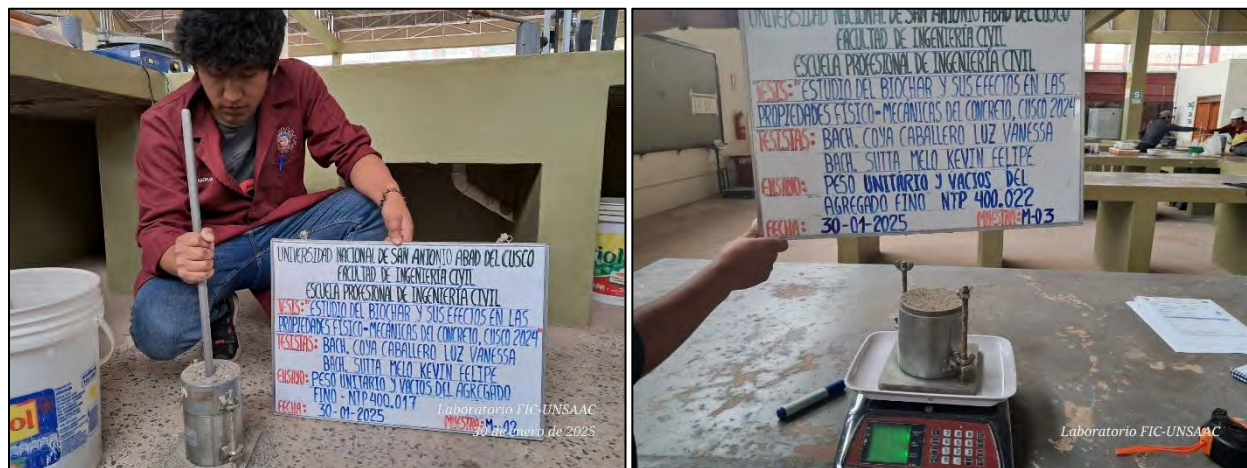
Flujograma – peso unitario compactado del agregado fino



Nota. Adaptado de NTP 400.017 (2020).

Figura 68

Peso unitario compactado del agregado fino



3.11.4.5.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

La densidad de masa del agregado fino se calcula con la Ec. (25).

$$M = \frac{(G - T)}{V} \quad \dots \text{(Ec. 25)}$$

Donde:

M = densidad de masa del agregado (kg/m³)

G = masa del agregado más el recipiente (kg)

T = masa del recipiente (kg)

V = volumen del recipiente (m³)

El porcentaje de vacíos del agregado fino se calcula con la Ec. (26).

$$\% \text{ Vacíos} = 100 [(S \times W) - M] / (S \times W) \quad \dots (\text{Ec. 26})$$

Donde:

M = densidad de masa del agregado (kg/m³)

S = gravedad específica de masa (base seca) (kg/m³)

W = densidad del agua (kg/m³) = 1000 kg/m³

3.11.5. Diseño de Mezclas de Concreto

3.11.5.1. Diseño de Mezclas del Concreto Control $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$

3.11.5.1.1. Objetivo. Establecer las proporciones óptimas de los materiales que conforman el concreto patrón (sin incorporación de biochar), utilizando el método de diseño de mezclas ACI 211.1, con el fin de obtener un concreto de resistencia característica $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y adecuadas para su uso como referencia en la comparación con las mezclas modificadas con biochar.

3.11.5.1.2. Procedimiento. El procedimiento realizado se detalla a continuación.

Paso 1. En primer lugar, se estableció las especificaciones del concreto: la resistencia característica a compresión f'_c requerido, el asentamiento (slump) objetivo, el tipo de cemento a utilizar y el grado de exposición al que estará sometida la estructura; estos parámetros guían todas las decisiones posteriores de diseño. Se eligió un slump de 3" a 4" puesto que este tipo de mezclas posee una consistencia plástica, es trabajable y se utiliza una vibración ligera por chuseado. Asimismo, en la Tabla 01 muestra que para elementos estructurales como muros, vigas y columnas el

asentamiento máximo es de 4". El ambiente se consideró normal, sin ningún tipo de exposición especial.

Tabla 19

Selección del asentamiento

Consistencia	Slump	Trabajabilidad	Método de compactación
Seca	0" - 2"	poco trabajable	vibración normal
Plástica	3" - 4"	trabajable	vibración ligera chuseado
Fluida	> 5"	muy trabajable	chuseado

Nota. Adaptado de Avanto (2009).

Tabla 20

Asentamientos recomendados para varios tipos de construcción

Tipos de construcción	Asentamiento (mm)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	75	25
Zapatas, cajones y muros de subestructura sin esfuerzo	75	25
Muros y vigas reforzados	100	25
Columnas	100	25
Pavimentos y losas	75	25
Concreto en masa	50	25

Nota. Adaptado de ACI (2002).

Tabla 21

Especificaciones del concreto

Item	Descripción	Datos
01	Resistencia a la compresión (kg/cm ²)	210
02	Asentamiento (plg)	3" - 4"
03	Cemento	Tipo HS
04	Exposición	Ambiente Normal

Tabla 22*Características del cemento*

Item	Descripción	
01	Cemento	YURA MAX
02	Tipo	Tipo HS
03	Peso Específico (g/cm ³)	2.75

Paso 2. Se recopilaban los resultados de los ensayos de laboratorio del agregado grueso (proveniente de Vicho) con tamaño máximo nominal de ¾” y del agregado fino (procedente de Cunyac). El tamaño máximo nominal del agregado grueso se seleccionó en ¾”, dado que este no debe superar 1/5 de la menor dimensión del elemento estructural. Para una estructura como una losa de 10 cm de espesor, o para el molde de PVC de 4”x8”, cuya menor dimensión también es de 10 cm, el tamaño máximo nominal permitido no debe exceder los 20 mm. En consecuencia, el agregado de ¾” (19.05 mm) cumple con este requisito.

Tabla 23*Características de los agregados*

Item	Características	Agregado grueso	Agregado Fino
08	Cantera	VICHO	CUNYAC
01	Tamaño Máximo (in)	¾"	-
02	Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1485.25	1614.07
03	Peso Unitario Compactado (kg/m ³)	1696.76	1747.93
04	Peso Específico de Masa (g/cm ³)	2.70	2.59
05	Contenido de Humedad (%)	0.40	0.66
06	Porcentaje de Absorción	1.46	2.72
07	Módulo de Fineza	6.79	2.65

Paso 3. Se determinó la resistencia promedio a la compresión requerida. Dado que la resistencia especificada a compresión es de 210 kg/cm², y considerando los valores indicados en la tabla correspondiente del ACI 211.1 (2004) para este nivel de

resistencia, se añadió un incremento de 84 kg/cm². En consecuencia, la resistencia promedio necesaria para el diseño resultó en 294 kg/cm².

Tabla 24

Determinación de la resistencia promedio a la compresión requerida

Resistencia especificada a la compresión (kg/cm ²)	Resistencia promedio requerida a la compresión (kg/cm ²)
$f_c < 21$	$f'_{cr} = f_c + 70$
$21 \leq f_c \leq 35$	$f'_{cr} = f_c + 84$
$f_c > 35$	$f'_{cr} = f_c + 98$

Nota. Adaptado de ACI (2002).

La resistencia promedio requerida se calcula con la Ec. (27).

$$f'_{cr} = f'_c + 84 \quad \dots \text{ (Ec. 27)}$$

Paso 4. Se seleccionó la relación agua – cemento (a/c) en función a la resistencia promedio requerida a la compresión para un concreto sin aire incorporado. Se seleccionó los valores de la tabla y se realizó la interpolación correspondiente, dando como resultado una relación a/c de 0.56.

Tabla 25

Selección de la relación agua – cemento (a/c)

Resistencia promedio requerida a la compresión (kg/cm ²)	Relación agua - cemento (a/C)	
	Concreto sin aire	Concreto con aire
450	0.38	---
400	0.43	---
350	0.48	0.40
300	0.55	0.46
250	0.62	0.53
200	0.70	0.61
150	0.80	0.71

Nota. Adaptado de ACI (2002).

Paso 5. Se realizó la estimación del contenido de agua y aire en la mezcla. Según la Tabla 01, para un tamaño máximo nominal del agregado grueso de ¾", un asentamiento de 3" a 4" y un concreto sin aire incorporado, el contenido de agua es de 205 L/m³ y una cantidad aproximada de aire de 2%.

Tabla 26

Estimación del contenido de agua y aire en la mezcla

Asentamiento (pulg)	Agua en l/m³ para el tamaño nominal máximo indicado						
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"
Concreto Sin Aire Incorporado							
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160
Concreto Con Aire Incorporado							
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133
6" a 7"	216	205	197	184	174	166	154
Cantidad aproximada de aire (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3

Nota. Adaptado de ACI (2002).

Paso 6. Se calculó el contenido de cemento mediante la Ec. (28), donde se obtuvo el valor del cemento igual a 366.07Kg/m³:

$$C = \frac{a}{a/C} \quad \dots \text{(Ec. 28)}$$

Donde:

a = Cantidad de agua por unidad de volumen estimado (kg/m³)

a/C = Relación agua – cemento seleccionado

C = Cantidad de cemento por unidad de volumen (kg/m³)

Paso 7. Se realizó la estimación del contenido de agregado grueso (Vicho) en volumen. Se realizó la estimación del contenido de agregado grueso (proveniente de la cantera de Vicho) en función del volumen. Para ello, se seleccionaron los valores correspondientes de la Tabla 27, considerando un tamaño máximo nominal del

agregado grueso de $\frac{3}{4}$ " y un módulo de fineza del agregado fino de 2.65. Posteriormente, se efectuó la interpolación respectiva obteniendo un volumen de agregado grueso compactado igual 0.63m^3 .

Tabla 27

Estimación del contenido de agregado grueso

Tamaño máximo nominal del agregado grueso (in)	Volumen del agregado grueso compactado por unidad de volumen para concreto para diferentes módulos de fineza de agregado fino			
	Módulo de Fineza del agregado fino			3
	2.4	2.6	2.8	
3/8"	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.8	0.78	0.76
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota. Adaptado de ACI (2002).

Paso 8. Posteriormente se realizó la estimación de contenido de agregado fino, para ello se siguió el método del volumen absoluto donde el volumen de los materiales se calcula con la Ec. (29), obteniendo un volumen del cemento igual a 0.1331m^3 , un volumen del agua igual a 0.2050m^3 , un volumen de agregado grueso igual a 0.3963m^3 y un volumen de aire teórico igual a 0.02m^3 ; dando como resultado una sumatoria de 0.7544m^3 . Por consiguiente el volumen del agregado fino resulta 0.2456m^3 .

$$V = \frac{W}{D} \quad \dots \text{(Ec. 29)}$$

Donde:

D = densidad del material (kg/m³)

V = volumen ocupado por el material (m³)

W = cantidad de material requerido para la mezcla por unidad de volumen (kg)

Paso 9. Se realizó la estimación de la cantidad de materiales en peso en condición seca conociendo su densidad y volumen. Se consideró los agregados en condición seca, debida a su baja humedad, finalizando así el diseño de mezcla. Obteniendo un peso seco del cemento igual 366.07 Kg, agua igual a 205.00 litros, agregado grueso igual a 1068.96 Kg y agregado fino igual a 635.03 Kg.

Paso 10. Una vez obtenida la dosificación por m³, se realizó el proceso de mezclado y se visualizó que la mezcla cumpla con el slump objetivo mediante la prueba de revenimiento con el cono de abrams.

Paso 11. Una vez alcanzado el slump objetivo, se realizó el vaciado de 06 probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura para someterlas al ensayo de resistencia a la compresión a los 7 días y 28 días.

Paso 12. De los resultados del ensayo se observó que las probetas cilíndricas cumplieron con la resistencia especificada a la compresión. Por lo que se puede decir que el diseño es correcto. Caso contrario se debe realizar los ajustes necesarios a la mezcla.

3.11.5.2. Diseño de mezclas del concreto con sustitución parcial de arena por biochar

3.11.5.2.1. Objetivo. Establecer las proporciones óptimas de los materiales que conforman el concreto con sustitución parcial de la arena o agregado fino por biochar con una granulometría controlada en porcentajes de 10%, 15% y 20% en volumen, utilizando como referencia el diseño de mezclas del concreto control, con el fin de evaluar los efectos que tiene el biochar en la mezcla.

3.11.5.2.2. Procedimiento. El procedimiento realizado se detalla a continuación.

Paso 1. En primer lugar, se obtuvo el peso específico de masa del biochar el cual es importante para realizar las conversiones de peso a volumen y viceversa. De resultado

se observó que el peso específico del biochar es mucho menor que del agregado fino de cunyac, por lo que se decidió realizar el reemplazo en volumen.

Paso 2. Posteriormente se visualizó que al reemplazar el agregado fino por biochar la mezcla se volvía menos trabajable a medida que el porcentaje de sustitución aumentaba, por lo que decidió utilizar un aditivo superplastificante.

Tabla 28

Características del aditivo

Ítem	Descripción	Datos
01	Aditivo	Ulmen R-2027
02	Tipo	Superplastificante
03	Apariencia / Café	Líquida / Café
04	Peso Específico (g/mL3)	1.11
05	Dosificación	0.3% - 2% del Peso del Cemento

Paso 3. Se procedió a calcular el contenido de aditivo para cada porcentaje de reemplazo. Se realizaron pruebas experimentales para verificar la trabajabilidad en cada dosificación.

Tabla 29

Cantidad de aditivo para cada porcentaje de sustitución de agregado fino por biochar

% Reemp. BC	Dosificación (%)	Aditivo (Kg/m3)
0	0.00	0.00
10	0.06	0.22
15	0.08	0.29
20	0.10	0.37

Paso 4. Teniendo la dosificación del aditivo para cada porcentaje se procedió a realizar la estimación del agregado fino por el método del volumen absoluto, esta vez

considerando el volumen que ocupa el aditivo en un metro cúbico de concreto. Se obtuvo el volumen a ocupar en cada porcentaje de reemplazo.

Paso 5. Posteriormente se realizó la estimación de la cantidad de materiales en peso.

Paso 6. Se obtuvo la cantidad de materiales en peso y volumen con agregados en condición de seca por m³ de concreto.

Paso 7. Se procedió a realizar la dosificación de concreto con reemplazo de agregado fino por biochar. Se calculó el volumen ocupado por el biochar al reemplazar el agregado fino en cada dosificación multiplicando el porcentaje de sustitución por el volumen del agregado fino. Luego, el volumen obtenido se convirtió en peso, multiplicando el volumen ocupado por el biochar con su densidad. El peso del biochar obtenido para la dosificación fue igual a la suma de los pesos retenidos de la malla N°4 a la N°100, cumpliendo una granulometría controlada.

Paso 8. Finalmente, se obtuvo la dosificación en peso de cada material.

3.11.5.3. Diseño de mezclas del concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

3.11.5.3.1. Objetivo. Establecer las proporciones óptimas de los materiales que conforman el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar finamente molido pasante la malla N°200 en porcentajes de 1%, 2% y 3% en peso, utilizando como referencia el diseño de mezclas del concreto control, con el fin de evaluar los efectos que tiene el biochar en la mezcla.

3.11.5.3.2. Procedimiento. El procedimiento realizado se detalla a continuación.

1. A partir de las cantidades de los materiales en peso y volumen con agregados en condición seca por m³ de concreto, obtenidas del diseño del concreto control, se procede a realizar la dosificación del concreto con reemplazo de cemento por biochar

en peso del cemento. Para ello se multiplica los porcentajes de reemplazo establecidos por la cantidad de cemento en kilogramos, determinándose así la masa de biochar en cada mezcla y concluyéndose de esta manera el diseño. No se utilizó aditivo.

3.11.5.4. Diseño de mezclas del concreto con adición de biochar

3.11.5.4.1. Objetivo. Establecer las proporciones óptimas de los materiales que conforman el concreto con adición de biochar finamente molido pasante la malla N°200 en porcentajes de 1%, 3% y 5% en peso, utilizando como referencia el diseño de mezclas del concreto control, con el fin de evaluar los efectos que tiene el biochar en la mezcla.

3.11.5.4.2. Procedimiento. El procedimiento realizado se detalla a continuación.

Paso 1. A partir de las cantidades de los materiales en peso y volumen con agregados en condición seca por m³ de concreto, obtenidas del diseño del concreto control, se procede a realizar la dosificación del concreto con adición de biochar con relación al peso del cemento. Para ello se multiplica los porcentajes de adición establecidos por la cantidad de cemento en kilogramos, determinándose así la masa de biochar a incorporarse en cada mezcla y concluyéndose de esta manera el diseño. No se utilizó aditivo.

3.11.6. Elaboración y curado de especímenes de concreto

3.11.6.1. Objetivo. Preparar los materiales, mezclar el concreto, elaborar y curar especímenes de concreto bajo condiciones de laboratorio.

3.11.6.2. Normativa. NTP 339.183 (2020).

3.11.6.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó moldes cilíndricos de PVC de 4” de diámetro y 8” de altura que cumplen la normativa ASTM C470 (2023) de la marca MACENSA, moldes primáticos (vigas) de acero de 15 cm de ancho, 15 cm de altura y 60 cm de longitud,

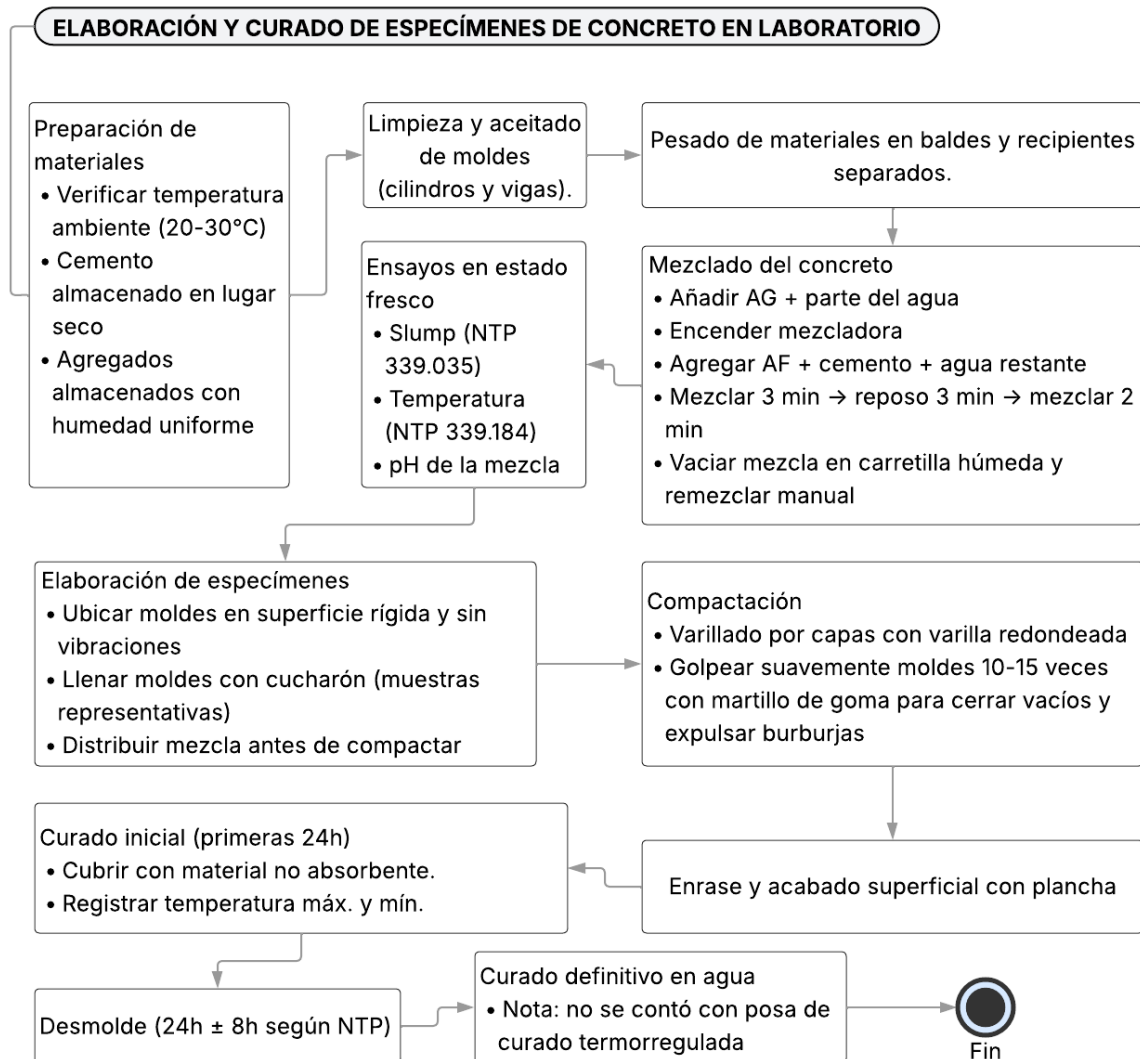
varillas de compactación de sección circular recta y con el extremo del compactado redondeado, cono de Abrams que cumple con los requisitos de la NTP 339.035 (2022), balanza para determinar el peso de los materiales con exactitud de 0.3% de la carga, termómetro, mezcladora de concreto eléctrica de 210L (Capacidad ½ bolsa), carretilla, martillo de goma, baldes, plancha de empastar, cucharón, aceite mineral, y guantes de jebe. Se optó por vigas de las dimensiones mencionadas puesto que una longitud de 60 cm permite establecer una luz adecuada entre apoyos, aproximadamente, cumpliendo con la condición de que la luz sea aproximadamente tres veces la altura de la sección, lo que favorece la aparición de esfuerzos de tracción en la fibra inferior, condición fundamental para evaluar el módulo de rotura del concreto.

3.11.6.4. Procedimiento. El procedimiento de elaboración y curado de especímenes de concreto para el concreto control se detalla en la Figura 69 y 70, sin embargo, para el concreto modificado con biochar se tomaron las siguientes consideraciones:

- a) Para el caso del concreto con sustitución parcial de arena por biochar, se pesó el biochar por la cantidad de material retenido en cada tamiz y luego se mezcló en seco. En el proceso de mezclado, el aditivo superplastificante se añadió junto con el agua de mezcla. Posterior al mezclado de los primeros 3 minutos, se agregó el biochar.
- b) Para el caso del concreto con sustitución parcial de cemento por biochar, en el proceso de mezclado, el biochar se añadió luego de añadir el cemento a la mezcla.
- c) Para el caso del concreto con adición de biochar, en el proceso de mezclado, el biochar se añadió luego de añadir el cemento a la mezcla.

Figura 69

Flujograma - elaboración y curado de especímenes de concreto



Nota. Adaptado de NTP 339.183 (2020)

Tabla 30*Número de capas requerida por espécimen*

Tipo y tamaño del espécimen	Modo de consolidación	N° de capas de aproximada profundidad
Cilindros		
Diámetro (pulg)		
3 o 4	varillado	2
6	varillado	3
9	varillado	4
Hasta de 9	vibración	2
Prismas y cilindros horizontales		
Profundidad (pulg)		
Hasta 8	varillado	2
Más de 8	varillado	3 o más
Hasta 8	vibración	1
Más de 8	vibración	2 o más

Nota. Adaptado de NTP 339.183 (2020).**Tabla 31***Diámetro de varilla y número de varillados a ser usados al moldar especímenes*

Cilindro		
Diámetro del cilindro (pulg)	Diámetro de la varilla (pulg)	Número de golpes/capa
3 a < 6	3/8	25
6	5/8	25
8	5/8	50
10	5/8	75
Vigas y prismas		
Área superficial superior del espécimen (cm ²)	Diámetro de la varilla (pulg)	Número de golpes/capa
		25
160 o menos	3/8	Una por cada 7 cm ²
165 a 310	3/8	
320 a más	5/8	Una por cada 14 cm ²

Nota. Adaptado de NTP 339.183 (2020).

Figura 70

Elaboración y curado de especímenes de concreto



3.11.7. Ensayos en concreto fresco

3.11.7.1. Temperatura del concreto fresco

3.11.7.1.1. Objetivo. Determinar la temperatura de mezclas de concreto recién mezclado.

3.11.7.1.2. Normativa. NTP 339.184 (2021).

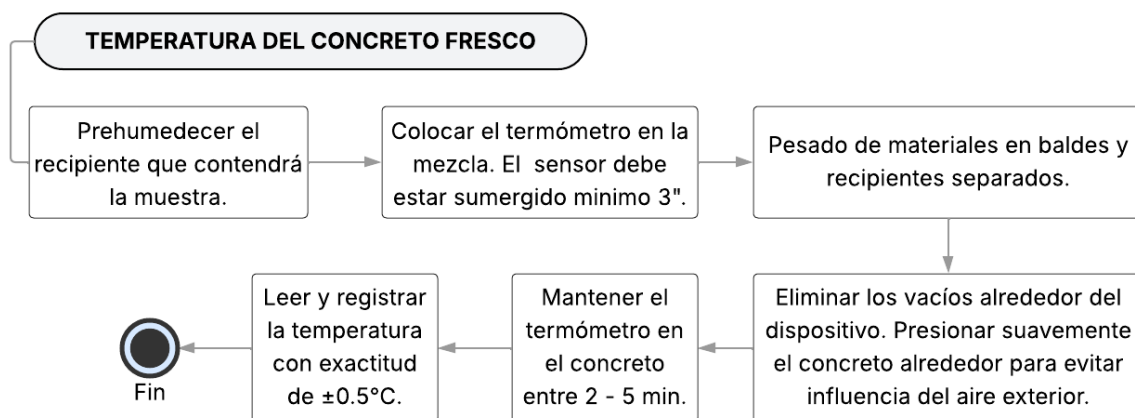
3.11.7.1.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó un recipiente amplio para proporcionar al menos 3 pulgadas de concreto en todas las direcciones alrededor del sensor del dispositivo para la medición de temperatura, un termómetro digital capaz de medir la temperatura con una exactitud de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ y cuyo diseño permitió una inmersión de 75 mm a más durante la operación.

3.11.7.1.4. Muestreo. La temperatura de la mezcla se midió después de la descarga en una muestra que rodeaba al dispositivo de medición en por lo menos 3 pulgadas en todas las direcciones, en un recipiente previamente humedecido con agua.

3.11.7.1.5. Procedimiento. El procedimiento se muestra en la Figura 71 y 72.

Figura 71

Flujograma - medición de la temperatura del concreto fresco



Nota. Adaptado de NTP 339.184 (2021).

Figura 72

Medición de la temperatura del concreto fresco



3.11.7.2. Asentamiento del concreto

3.11.7.2.1. Objetivo. Determinar la consistencia y trabajabilidad del concreto fresco mediante la medición del asentamiento (slump), con el fin de evaluar si la mezcla presenta la fluidez adecuada para su colocación, consolidación y trabajabilidad en obra.

3.11.7.2.2. Normativa. NTP 339.035 (2022).

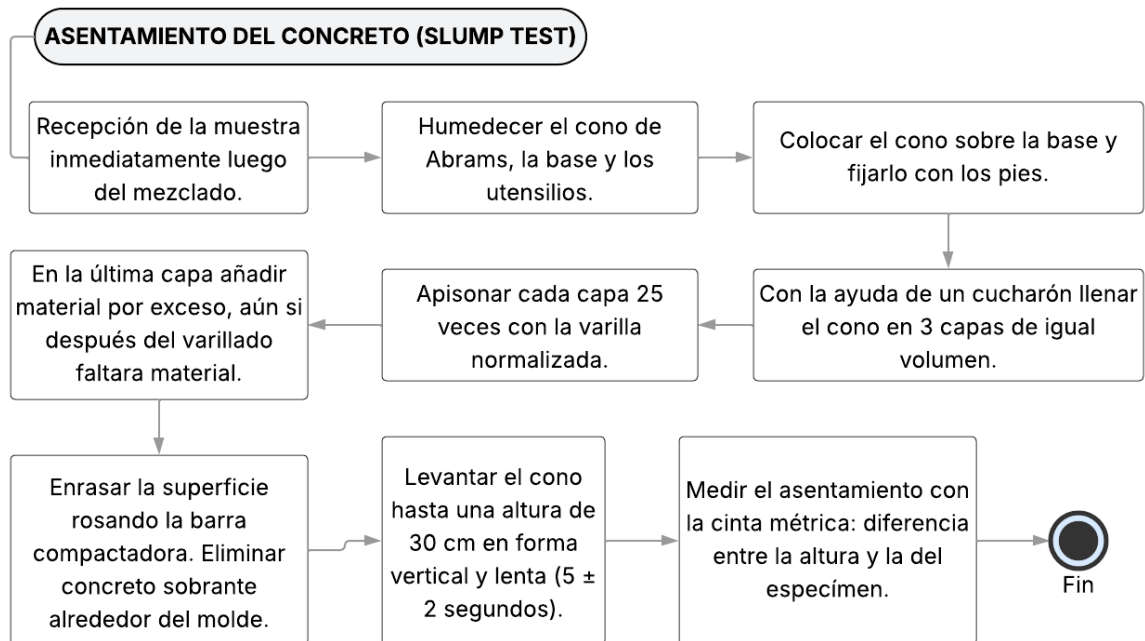
3.11.7.2.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó un cono de Abrams, una varilla compactadora de acero de 16 mm de diámetro y 600 mm de longitud (punta semiesférica), base rígida no absorbente, cinta métrica, y un recipiente para contener el concreto fresco.

3.11.7.2.4. Muestreo. La muestra de concreto fresco se obtuvo directamente de la mezcladora eléctrica inmediatamente después del proceso de mezclado final.

3.11.7.2.5. Procedimiento. El procedimiento se realizó como se muestra la Figura 73 y 74.

Figura 73

Flujograma - asentamiento del concreto (slump test)



Nota. Adaptado de NTP 339.035 (2022).

Figura 74

Asentamiento del concreto (slump test)



3.11.8. Dimensionamiento y pesado de las muestras de concreto

3.11.8.1. Objetivo. Establecer las dimensiones reales de los especímenes de concreto, tanto cilíndricos como prismáticos, con el fin de obtener medidas precisas de diámetro, altura, ancho y longitud según corresponda y su peso antes de los ensayos mecánicos. Estos datos permiten corregir variaciones respecto a las dimensiones teóricas y asegurar exactitud en la interpretación de los resultados experimentales.

3.11.8.2. Normativa. Se usó las normativas para ensayos de concreto endurecido, la NTP 339.034 (2015), la NTP 339.084 (2022) y la NTP 339.078 (2012).

3.11.8.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó vernier digital de precisión, cinta métrica metálica, amoladora angular, disco para lijar (de 125 mm, grano 40, para madera y metal-Shopstar), nivel de mano y balanza, brocha y trapo para limpieza superficial de especímenes.

3.11.8.4. Muestreo. Se consideraron todos los especímenes de concreto endurecido obtenidos durante la etapa experimental. Cada muestra fue evaluada individualmente para determinar sus dimensiones reales mediante un conjunto de mediciones repetidas que permitieron calcular valores promedios representativos.

3.11.8.5. Procedimiento. El procedimiento se detalla a continuación:

- a) Limpieza e inspección inicial: Cada espécimen fue secado hasta alcanzar una condición de saturado superficialmente seco con la ayuda de un trapo, limpiado de cualquier partícula que pueda interferir en las mediciones. Luego se realizó una inspección visual para verificar la presencia de posibles imperfecciones como grietas, desprendimientos o deformaciones superficiales.
- b) Acondicionamiento de los especímenes cilíndricos: Antes de realizar las mediciones, los cilindros fueron nivelados en sus superficies superior e inferior. Para ello, se utilizó un disco de lijado de 125 mm, grano 40, colocado en una amoladora. Se lijaron ambos extremos del cilindro de manera uniforme hasta obtener superficies planas y paralelas. La nivelación fue verificada empleando un nivel de mano, asegurando que la superficie cumpliera con los requisitos para posteriores ensayos de compresión.
- c) Medición de las dimensiones de los cilindros: Las mediciones se realizaron con un vernier digital de alta precisión y una cinta métrica de metal. Se tomaron tres mediciones del diámetro con el vernier, ubicadas en la parte inferior-media-superior del espécimen. Asimismo, se tomaron tres mediciones de la altura con cinta métrica en diferentes puntos del perímetro. Para cada una de las dimensiones, se obtuvo un valor promedio, el cual fue considerado como medida oficial del espécimen.
- d) Medición de las vigas prismáticas: Para las vigas, se midieron las tres dimensiones principales: ancho, alto y longitud con cinta métrica. Se tomaron tres mediciones del ancho en cada cara lateral. Se tomaron tres mediciones del alto, una en cada cara lateral, también. Para la longitud, se realizaron tres mediciones distribuidas a lo largo del elemento. De igual manera, se calculó el valor promedio para cada dimensión.

- e) Registro del peso de los especímenes de concreto: Las muestras cilíndricas se pesaron en una balanza con precisión de 0.1% del peso de la muestra, mientras que las vigas se pesaron en una balanza industrial 150 kg con plataforma.

Figura 75

Dimensionamiento de muestras cilíndricas



Nota. Realizado de acuerdo a la NTP 339.034 (2015).

Figura 76

Dimensionamiento de muestras prismáticas (vigas)



Nota. Realizado de acuerdo a la NTP 339.078 (2012).

3.11.9. Ensayos en concreto endurecido

3.11.9.1. Resistencia a la compresión en muestra cilíndricas

3.11.9.1.1. Objetivo. Determinar la resistencia a la compresión del concreto mediante el ensayo de especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, con el fin de evaluar el comportamiento mecánico del material y verificar si cumple con la resistencia especificada en el diseño de mezcla.

3.11.9.1.2. Normativa. NTP 339.034 (2015) y NTP 339.216 (2007).

3.11.9.1.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó una máquina universal Instron 600XD de 60 tn de capacidad, 02 almohadillas de neopreno de 4" de dureza 60 marca Forney y 02 platos retenedores de acero, trapo y guantes.

3.11.9.1.4. Muestreo. Las muestras cilíndricas ensayadas corresponden a los especímenes moldeados previamente según su diseño de mezcla, curados hasta la edad establecida (3, 7 y 28 días).

3.11.9.1.5. Procedimiento. El procedimiento se detalla en la Figura 77.

Tabla 32

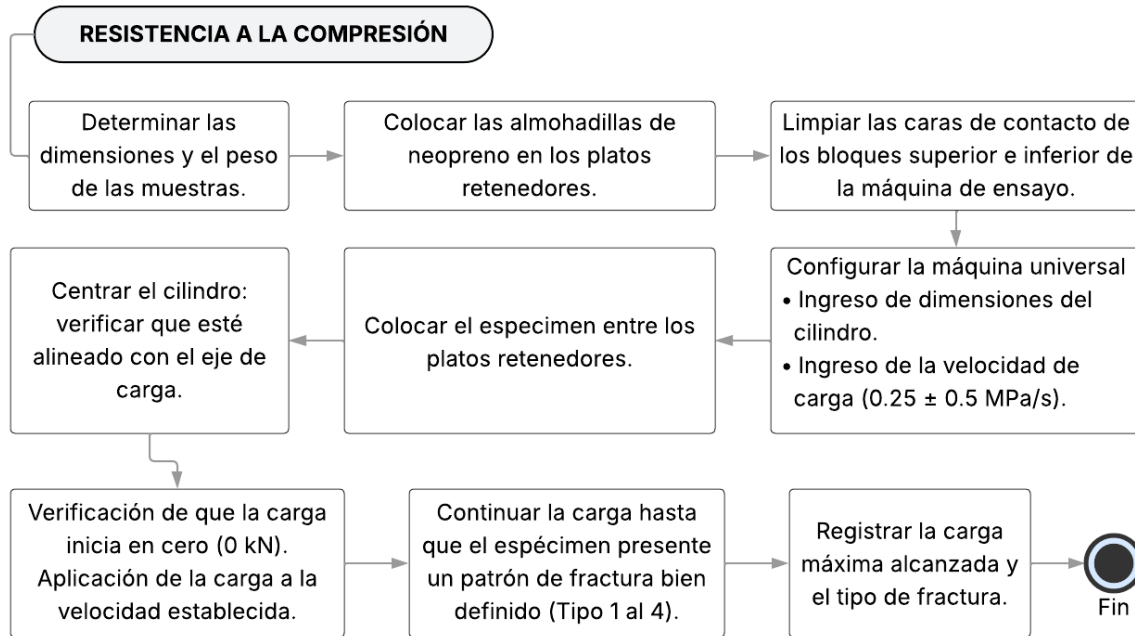
Dureza del Neopreno

RC Cilindro (Mpa)	Dureza shore A	Calificación de ensayo requerido	Máximo re- usos
10 a 40	50	Ninguno	100
17 a 50	60	Ninguno	100
28 a 50	70	Ninguno	100
50 a 80	70	Requerido	50
Mayor que 80	-	No permitido	-

Nota. Adaptado de 339.216 (2007).

Figura 77

Flujograma - resistencia a la compresión



Nota. Adaptado de NTP 339.034 (2015).

Figura 78

Resistencia a la compresión



3.11.9.1.6. Cálculos. Se usó la siguiente fórmula.

El cálculo de la resistencia a la compresión se calcula con la Ec. (30).

$$f'c = \frac{P}{A} \quad (\text{Ec. 30})$$

Donde:

$f'c$ = resistencia a la compresión (kg/cm²)

P = carga máxima alcanzada (kg)

A = área promedio de la sección transversal (cm²)

3.11.9.2. Resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral de muestras cilíndricas

3.11.9.2.1. Objetivo. Determinar la resistencia a la tracción indirecta del concreto mediante la aplicación una fuerza compresiva diametral a toda la longitud de una probeta cilíndrica hasta que ocurra la falla. Este ensayo permite evaluar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción, parámetro fundamental para estimar su comportamiento estructural y para determinar la longitud de desarrollo del refuerzo de acero del concreto.

3.11.9.2.2. Normativa. NTP 334.084 (2022).

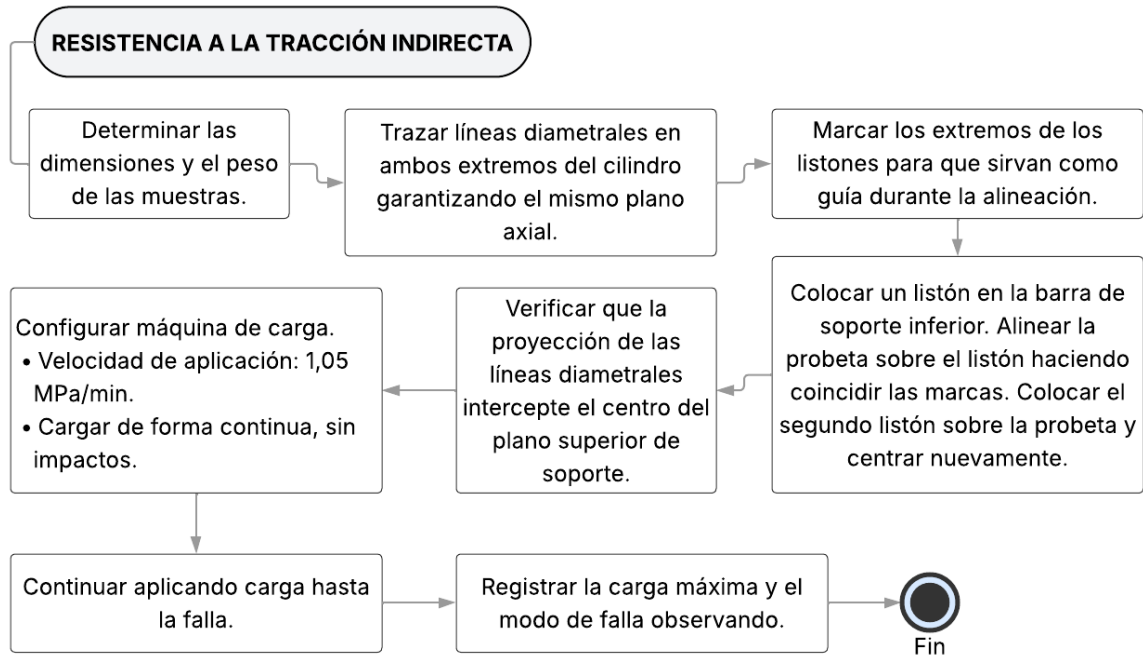
3.11.9.2.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó una máquina universal Instron 600XD de 60 tn de capacidad, 2 listones delgados de madera terciada (3 mm de espesor, 25 mm de ancho y 20.5 cm de longitud) para cada muestra para que la carga sea repartida de manera uniforme a toda la longitud generatriz de la probeta cilíndrica. Los listones de madera no fueron reutilizados. También se usó regla, escuadra y marcadores.

3.11.9.2.4. Muestreo. Las muestras cilíndricas ensayadas corresponden a los especímenes de 4"x8", curados hasta la edad establecida (7 y 28 días). Las muestras fueron ensayadas manteniendo condiciones de humedad.

3.11.9.2.5. Procedimiento. El procedimiento se detalla en la Figura 79 y 80.

Figura 79

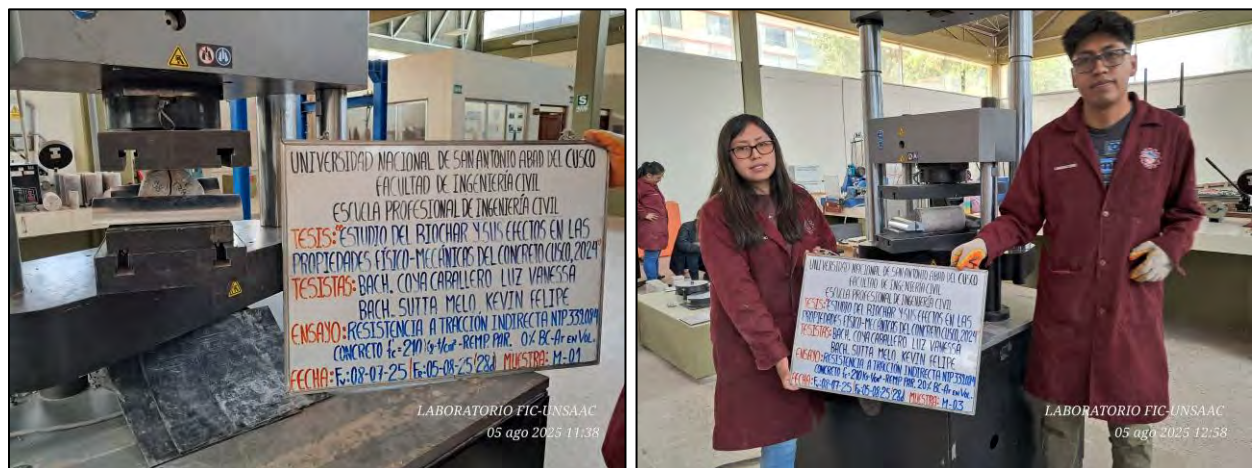
Flujograma - resistencia a la tracción indirecta



Nota. Adaptado de NTP 339.084 (2022).

Figura 80

Resistencia a la tracción indirecta



3.11.9.2.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

El cálculo de la resistencia a la tracción indirecta se calcula con la Ec. (31).

$$T = \frac{2P}{\pi ld} \quad \dots \text{(Ec. 31)}$$

Donde:

T = resistencia a la tracción indirecta (MPa)

P = máxima carga aplicada indicada por la máquina de ensayo (N)

l = longitud (mm)

d = diámetro (mm)

3.11.9.3. Resistencia a la flexión en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo

3.11.9.3.1. Objetivo. Evaluar la resistencia a la flexión (módulo de rotura) de las vigas prismáticas de concreto mediante un ensayo de carga aplicada en dos puntos situados en los tercios del claro. El ensayo permite determinar la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción en la zona inferior de la viga.

3.11.9.3.2. Normativa. NTP 339.078 (2012).

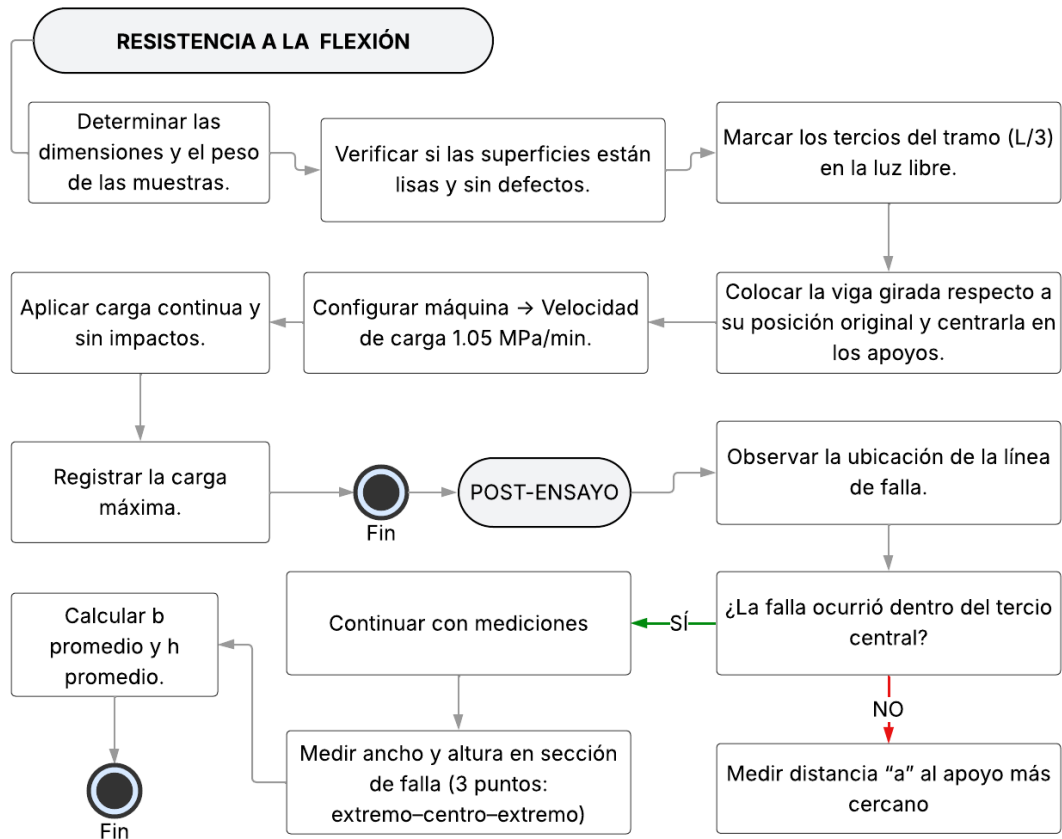
3.11.9.3.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó una máquina universal Instron 600XD de 60 tn de capacidad, soportes de carga para configuración de viga simplemente apoyada, regla, escuadra y marcadores.

3.11.9.3.4. Muestreo. Las vigas ensayadas corresponden a especímenes de 15cm x 15cm x 60cm, curados hasta la edad establecida (7 y 28 días).

3.11.9.3.5. Procedimiento. El procedimiento se detalla en la Figura 81 y 82.

Figura 81

Flujograma - resistencia a la flexión



Nota. Adaptado de NTP 339.078 (2012).

Figura 82

Resistencia a la flexión



3.11.9.3.6. Cálculos. Se utilizó la siguiente fórmula.

Si la falla ocurre dentro del tercio medio de la luz (L) el cálculo se realiza con la Ec. (32).

$$M_R = \frac{PL}{bh^2} \quad \dots \text{(Ec. 32)}$$

Donde:

MR = módulo de rotura (MPa)

P = carga máxima de rotura indicada por la máquina de ensayo (N)

L = luz libre entre apoyos (mm)

b = ancho promedio de la viga en la sección de la falla (mm)

h = altura promedio de la viga en la sección de la falla (mm)

Si la falla ocurre fuera del tercio medio de la luz (L) el cálculo se realiza con la Ec (33):

$$M_R = \frac{3Pa}{bh^2} \quad \dots \text{(Ec. 33)}$$

Donde:

a = distancia promedio entre la línea de falla y el apoyo más cercano, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la viga (mm)

3.11.9.4. Densidad, absorción y porcentaje de vacíos en concreto endurecido

3.11.9.4.1. Objetivo. Determinar la densidad aparente, absorción de agua y porcentaje de vacíos del concreto endurecido, con el fin de evaluar la compactación, permeabilidad y calidad del material. Estos parámetros permiten comparar el comportamiento del concreto patrón y el concreto con biochar, identificando posibles variaciones en la porosidad interna del material.

3.11.9.4.2. Normativa. NTP 339.187 (2018).

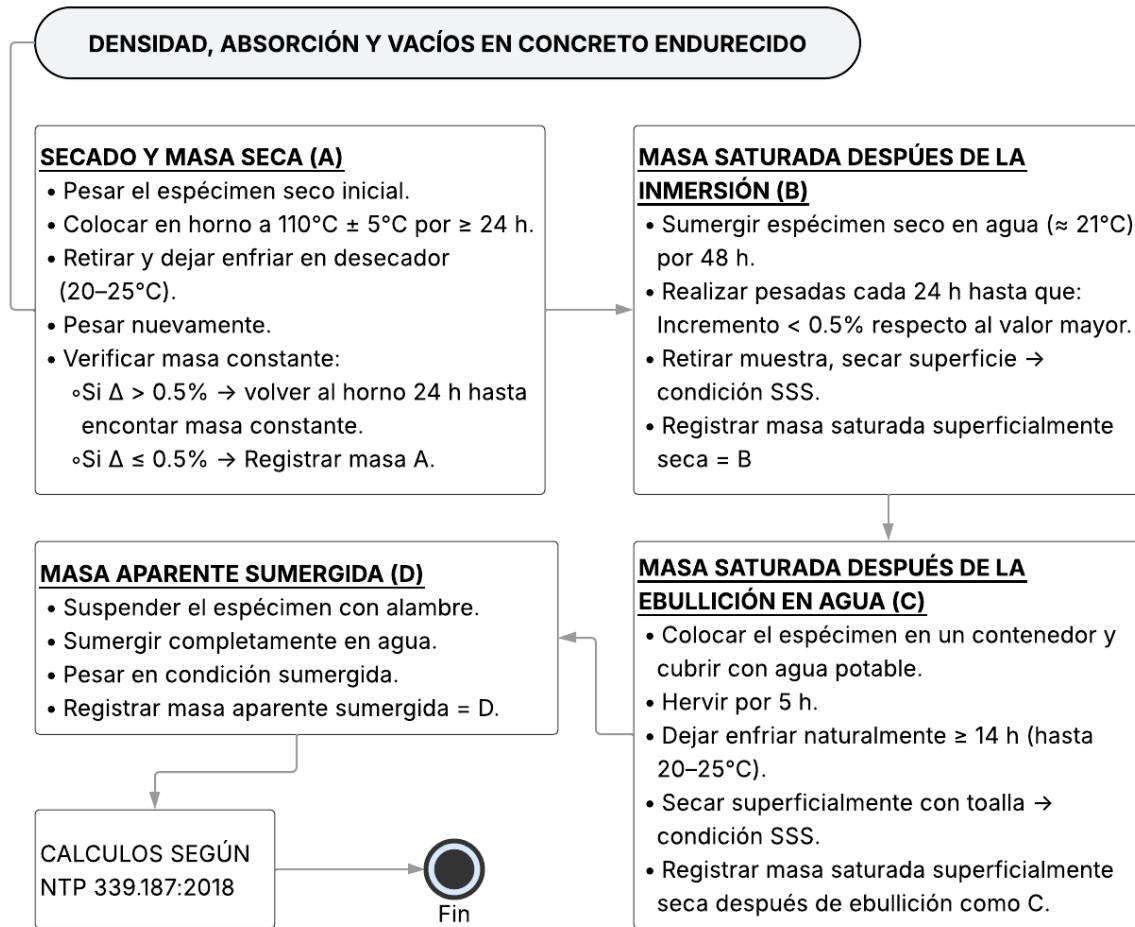
3.11.9.4.3. Equipos y/o instrumentos. Se utilizó balanza digital con precisión de 0.025% de la carga, horno regulado a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, recipientes metálicos, cocina, cortadora de concreto, contenedor para sumergir los especímenes y con un alambre adecuado para suspenderlo en agua.

3.11.9.4.4. Muestreo. Son todas las muestras de concreto cortadas a la mitad.

3.11.9.4.5. Procedimiento. El procedimiento se detalla en la Figura 83 y 84.

Figura 83

Flujograma - densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido



Nota. Adaptado de NTP 339.187 (2018).

Figura 84

Densidad, absorción y vacíos en concreto endurecido



3.11.9.4.6. Cálculos. Se utilizó las siguientes fórmulas.

$$\text{Absorción después de la inmersión (\%)} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 34)}$$

$$\text{Absorción después de la inmersión y ebullición (\%)} = \frac{C - A}{A} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 35)}$$

$$\text{Densidad seca} = \frac{A}{C - D} \times \rho = g_1 \quad \dots \text{(Ec. 36)}$$

$$\text{Densidad después de la inmersión} = \frac{B}{C - D} \times \rho \quad \dots \text{(Ec. 37)}$$

$$\text{Densidad después de la inmersión y ebullición} = \frac{C}{C - D} \times \rho \quad \dots \text{(Ec. 38)}$$

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{A - D} \times \rho = g_2 \quad \dots \text{(Ec. 39)}$$

$$\text{Volumen de poros permeables (vacíos)(\%)} = \frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100 \quad \dots \text{(Ec. 40)}$$

Donde:

A = masa de la muestra seca al horno, al aire (g)

B = masa de la muestra saturada superficialmente seca, después de la inmersión (g)

C = masa de la muestra superficialmente seca, después de la inmersión y ebullición (g)

D = masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de la inmersión y ebullición (g)

g_1 = densidad seca (Mg/m^3)

g_2 = densidad aparente (Mg/m^3)

ρ = densidad del agua = $1 \text{ Mg/m}^3 = 1 \text{ g/cm}^3$

Capítulo IV

4. Resultados de la investigación

4.1. Caracterización de los materiales

4.1.1. Caracterización del biochar

4.1.1.1. Composición química del biochar

En la Tabla 33 se evidencia los resultados del ensayo sobre la composición química por Fluorescencia de Rayos X de tres (03) muestras de biochar, considerándose como resultado final al promedio de estos valores.

Tabla 33

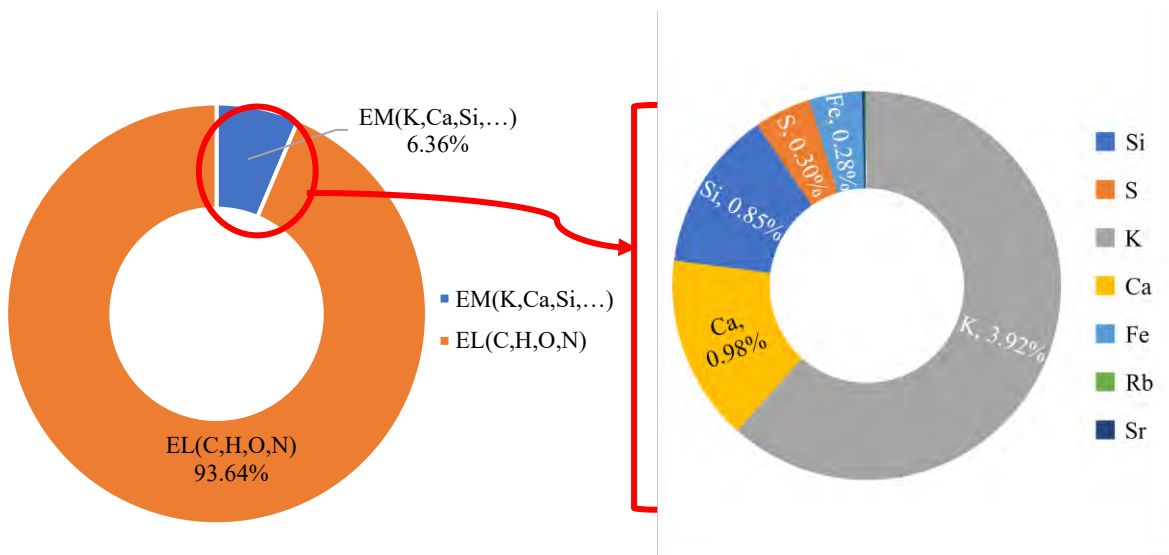
Composición química del biochar por Fluorescencia de Rayos X

Elemento	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Promedio (ppm)	Promedio (%)
	ppm	ppm	ppm		
Si	9210	8150	8220	8526.67	0.85
S	3285	2911	2832	3009.33	0.30
K	43300	38160	36100	39186.67	3.92
Ca	10880	9490	9120	9830.00	0.98
Fe	2841	2710	2825	2792.00	0.28
Rb	87	88	93	89.33	0.01
Sr	174	178	186	179.33	0.02
EL(C,H,O,N)	930223	938313	940624	936386.67	93.64
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

En la Figura 85 se observa, en el gráfico de la izquierda, la composición química del biochar, donde se evidencia que el 93.64% corresponde a elementos livianos (LE). El porcentaje restante, equivalente al 6.36%, está conformado por elementos metálicos. Estos se detallan en el gráfico de la derecha.

Figura 85

Composición química del biochar por Fluorescencia de Rayos X



4.1.1.2. Contenido de carbono fijo del biochar

En la Tabla 34 se evidencia los resultados del ensayo químico contenido de carbono fijo del biochar de Coco y Cáscara de Castaña, obteniendo un contenido de carbono del 91.17%.

Tabla 34

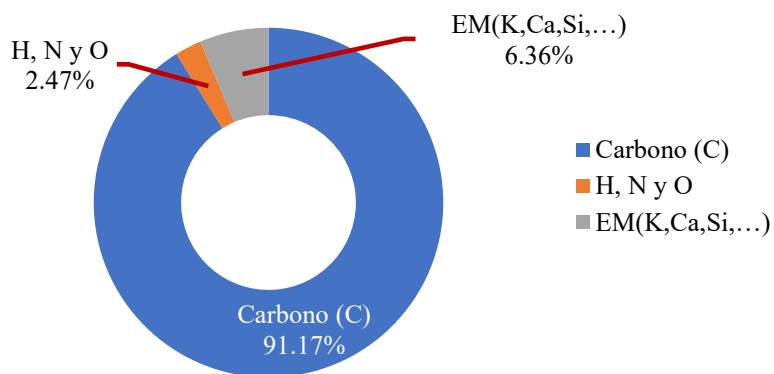
Contenido de carbono fijo del biochar

Ítem	Descripción	Método de producción	Carbono (%)
A	Coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>)	TLUD	91.17

En la Figura 86 se evidencia la proporción de carbono presente dentro de los elementos livianos (LE), en concordancia con el análisis de composición química del biochar de coco y cáscara de castaña. Se observa que el 93.64% de la composición corresponde a LE, de los cuales el 91.17% pertenece al Carbono, mientras que el 2.47% restante corresponde al Hidrógeno, Nitrógeno y Oxígeno.

Figura 86

Contenido de carbono fijo del biochar



4.1.1.3. Alcalinidad (pH) del biochar

En la Tabla 35 se logra evidenciar los resultados del ensayo de alcalinidad (pH) del biochar de Coco y Cáscara de Castaña, mediante el método potenciométrico.

Tabla 35

Alcalinidad (pH) del biochar

Ítem	Descripción	Método de producción	pH	
A	Coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>)	TLUD	9.40	Alcalino

Figura 87

Alcalinidad (pH) del biochar



Nota. Se evidencia en la escala potenciométrica del Ph que el biochar de Coco y Cáscara de Castaña marca un valor de 9.40 siendo considerado Alcalino.

4.1.1.4. Análisis granulométrico del biochar como agregado fino

En la Tabla 36 se evidencia los resultados del análisis granulométrico del biochar de forma controlada como sustitución parcial de la arena.

Tabla 36

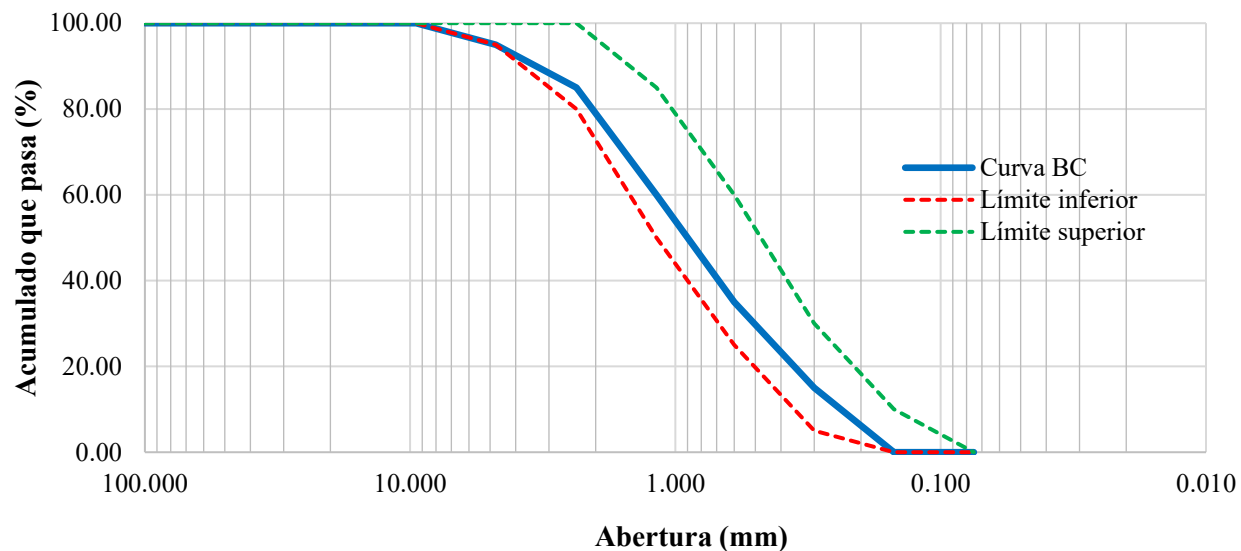
Análisis granulométrico controlado del biochar como agregado fino

Masa de la muestra seca (g):		586.16							
Error en peso (%):		0.00							
Abertura de tamices		Peso	Peso	Parcial	Acumulado	Acumulado	Huso		
Nombre	mm	retenido (g)	retenido corregido (g)	retenido (%)	retenido (%)	que pasa (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)	
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
1/2 in	12.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
3/8 in	9.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100	
No. 4	4.750	29.31	29.31	5.00	5.00	95.00	95	100	
No. 8	2.360	58.62	58.62	10.00	15.00	85.00	80	100	
No. 16	1.180	146.54	146.54	25.00	40.00	60.00	50	85	
No. 30	0.600	146.54	146.54	25.00	65.00	35.00	25	60	
No. 50	0.300	117.23	117.23	20.00	85.00	15.00	5	30	
No. 100	0.150	87.92	87.92	15.00	100.00	0.00	0	10	
No. 200	0.075	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0	0	
< No. 200		0.00	0.00	0.00	85.00	15.00	0	0	
Total		586.16	586.16	85.00			MF (%)	3.10	

En la figura 88 se evidencia la gráfica de la curva granulométrica correspondiente al ensayo del análisis granulométrico del biochar de coco y cascara de castaña.

Figura 88

Curva granulométrica del biochar como agregado fino



4.1.1.5. Peso específico y absorción del biochar como agregado fino

En la tabla 37 se logra evidenciar los resultados del ensayo sobre el peso específico y absorción del biochar de coco y cascara de castaña.

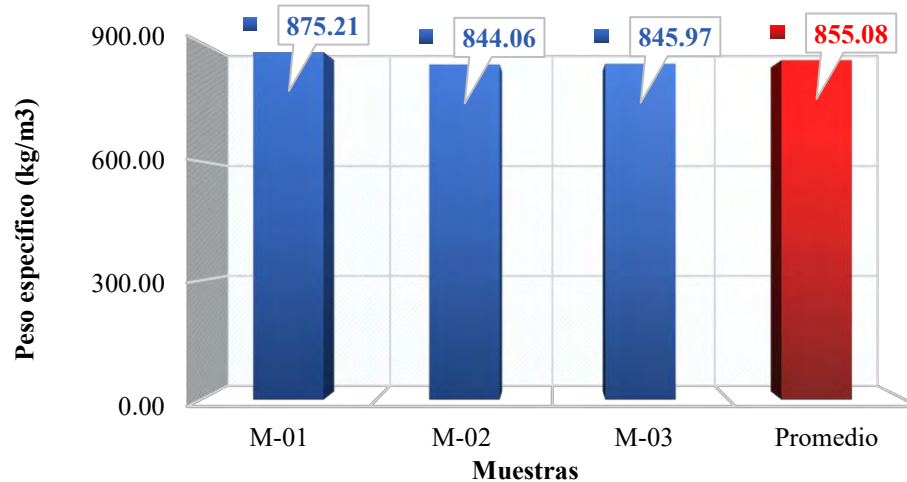
Tabla 37

Peso específico y absorción del biochar como agregado fino

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Recipiente (g)	166.58	144.47	166.56	
B	Peso del Recipiente + Muestra Seca (g)	212.80	190.91	212.86	
C	Peso de la Muestra Seca (g)	46.22	46.44	46.30	
D	Peso del Recipiente + Muestra Sat. Superf. Seca (g)	236.47	214.16	236.72	
E	Peso Muestra Saturada Superficialmente Seca (g)	69.89	69.69	70.16	
F	Peso del Picnómetro (g)	194.80	195.61	182.65	
G	Peso del Picnómetro + Agua (g)	693.44	695.79	691.03	
H	Peso del Picnómetro + Agua + Muestra Sat. Superf. Seca (gr)	710.52	710.46	706.46	
I	Peso Específico de Masa (gr/cm ³)	0.88	0.84	0.85	0.86
J	Peso Específico de Masa Sat. Superf. Seca (gr/cm ³)	1.32	1.27	1.28	1.29
K	Peso Específico Aparente (gr/cm ³)	1.59	1.46	1.50	1.52
L	Temperatura del Agua (°C)	16.70	16.70	16.70	
M	Factor Corrección por Temperatura	1.00	1.00	1.00	
Peso Especifico de Masa (kg/m ³)		875.21	844.06	845.97	855.08
Absorción (%)		51.21	50.06	51.53	50.94

Figura 89

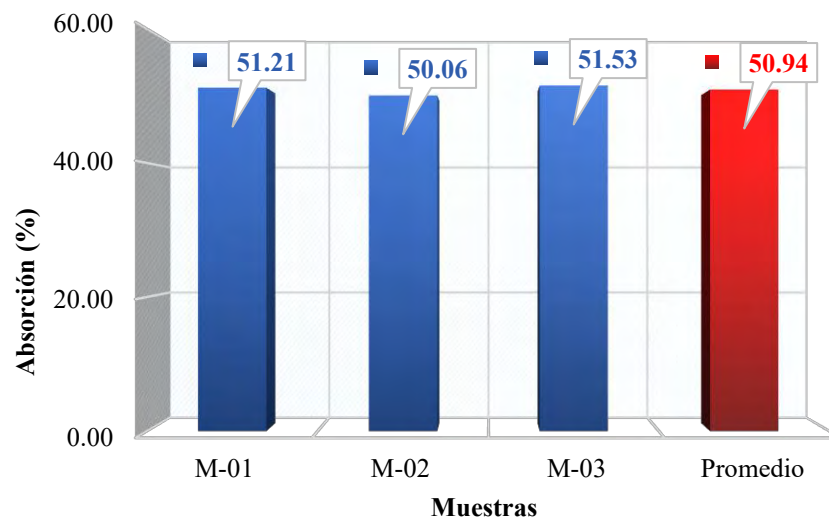
Peso específico de masa del biochar como agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso específico de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso específico promedio.

Figura 90

Porcentaje de absorción del biochar como agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de absorción de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de absorción promedio.

4.1.1.6. Peso unitario y vacíos del biochar como agregado fino

En la Tabla 38 se presentan los resultados del ensayo de peso unitario suelto y porcentaje de vacíos del biochar utilizado como reemplazo parcial del agregado fino, considerando tres muestras identificadas como M-01, M-02 y M-03. A partir de los valores obtenidos, se determinó un peso unitario suelto promedio de 381.44 kg/m³ y un porcentaje de vacíos promedio de 55.39%.

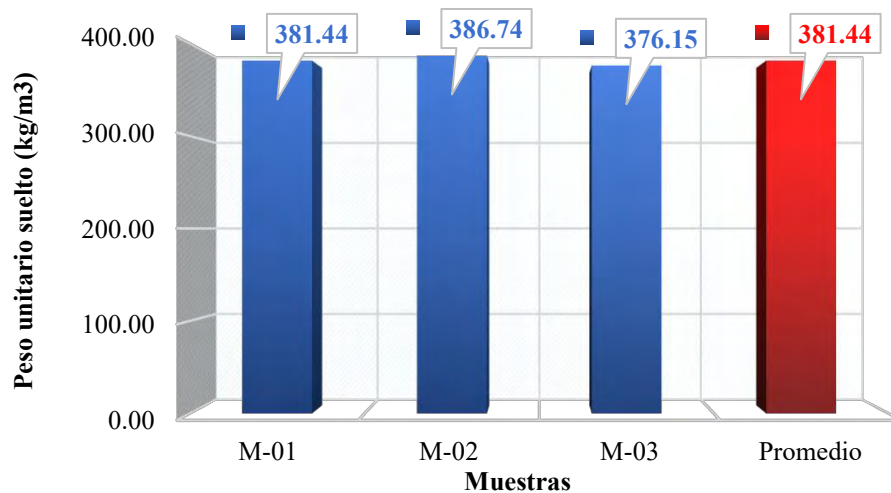
Tabla 38

Peso unitario y vacíos del biochar como arena - suelto

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Molde (g)	4200.00	4200.00	4200.00	
B	Peso del Molde + Muestra Suelta (g)	4560.00	4565.00	4555.00	
C	Peso de la Muestra Suelta (g)	360.00	365.00	355.00	
D	Altura del molde (cm)	11.55	11.55	11.55	
E	Diámetro del Molde (cm)	10.20	10.20	10.20	
F	Volumen del Molde (cm ³)	943.78	943.78	943.78	
G	Peso Específico (kg/m ³)	855.08	855.08	855.08	
	Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	381.44	386.74	376.15	381.44
	Vacíos (%)	55.39	54.77	56.01	55.39

Figura 91

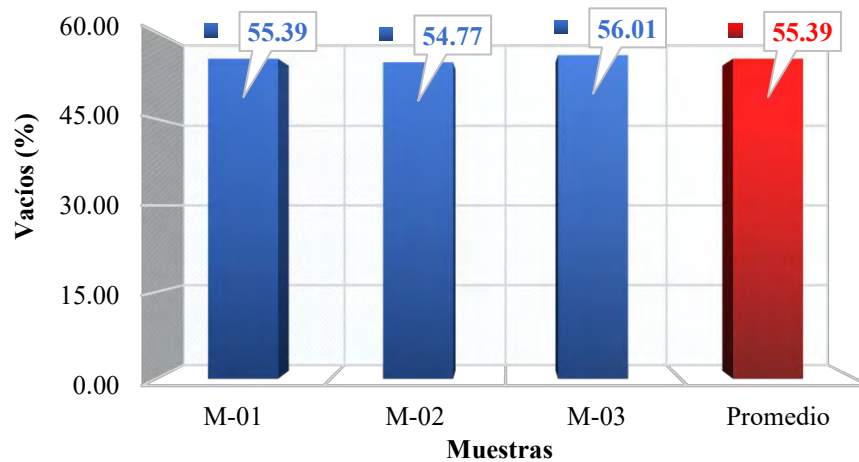
Peso unitario suelto del biochar como arena



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso unitario suelto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso unitario suelto promedio.

Figura 92

Porcentaje de vacíos del biochar como arena - suelto



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de vacíos suelto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de vacíos suelto promedio.

En la Tabla 39 se presentan los resultados del ensayo de peso unitario compacto y porcentaje de vacíos del biochar utilizado como reemplazo de arena, considerando tres muestras identificadas como M-01, M-02 y M-03. A partir de los valores obtenidos, se determinó un peso unitario compacto promedio de 494.46 kg/m³ y un porcentaje de vacíos promedio de 42.17%.

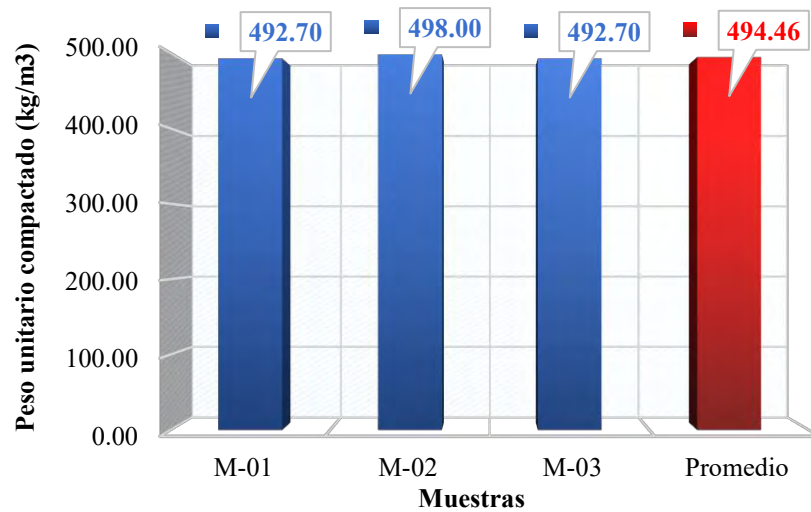
Tabla 39

Peso unitario y vacíos del biochar como arena - compacto

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Molde (g)	4200.00	4200.00	4200.00	
B	Peso del Molde + Muestra Suelta (g)	4665.00	4670.00	4665.00	
C	Peso de la Muestra Suelta (g)	465.00	470.00	465.00	
D	Altura del molde (cm)	11.55	11.55	11.55	
E	Diámetro del Molde (cm)	10.20	10.20	10.20	
F	Volumen del Molde (cm ³)	943.78	943.78	943.78	
G	Peso Específico (kg/m ³)	855.08	855.08	855.08	
Peso Unitario Compacto (kg/m ³)		492.70	498.00	492.70	494.46
Vacíos (%)		42.38	41.76	42.38	42.17

Figura 93

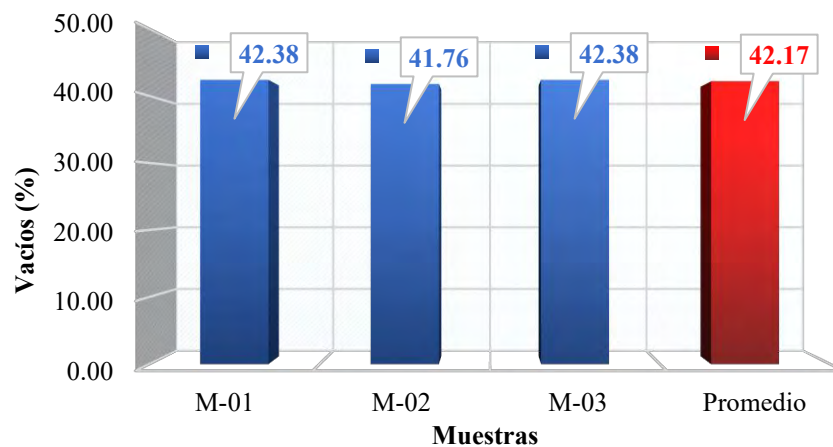
Peso unitario compacto del biochar como arena



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso unitario compacto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso unitario compacto promedio.

Figura 94

Porcentaje de vacíos del biochar como arena - compacto



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de vacíos compacto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de vacíos compacto promedio.

4.1.1.7. Densidad del biochar finamente molido

En la Tabla 40 se evidencia los resultados del ensayo de la densidad del biochar finamente molido para su uso como sustitución parcial del cemento y adición de tres (03) muestras, tomando como resultado ideal al promedio con un valor de 1195.34 Kg/cm³.

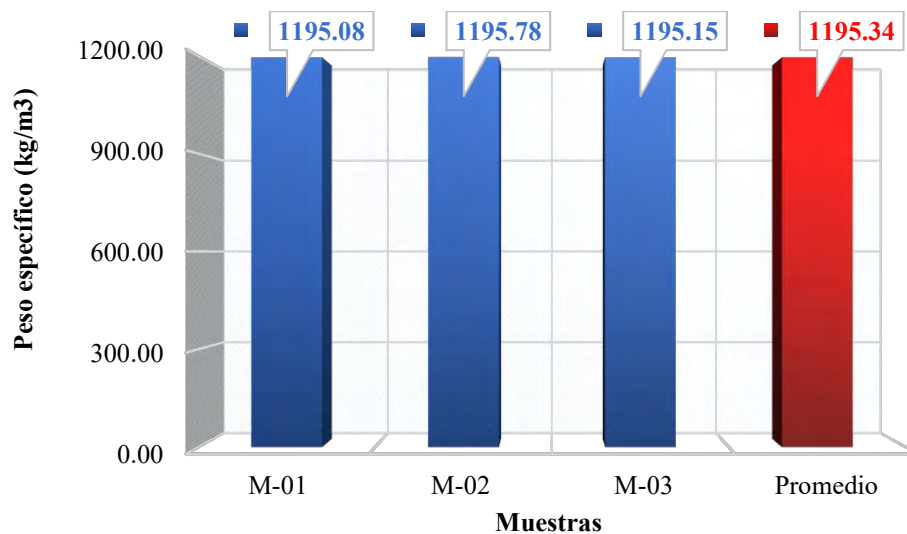
Tabla 40

Densidad del biochar finamente molido

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Picnómetro (g)	194.80	194.80	194.80	
B	Peso del Picnómetro + Agua (g)	886.36	886.61	886.22	
C	Peso del Picnómetro + Agua + Biochar (g)	902.79	903.11	902.65	
D	Peso de Biochar Finamente Molido (g)	100.65	100.78	100.62	
E	Peso del Agua Desplazada (g)	84.22	84.28	84.19	
F	Densidad del Agua (gr/cm3)	1.00	1.00	1.00	
G	Volumen del Agua Desplazada (g)	84.22	84.28	84.19	
H	Densidad del Biochar Finamente Molido (gr/cm ³)	1.20	1.20	1.20	
I	Temperatura del Agua (°C)	16.70	16.70	16.70	
J	Factor Corrección por Temperatura	1.00	1.00	1.00	
Densidad del Biochar (kg/m ³)		1195.08	1195.78	1195.15	1195.34

Figura 95

Densidad del biochar finamente molido



Nota. Las barras de color azul representan los valores de la densidad del biochar de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa a la densidad promedio.

4.1.2. Caracterización del agregado grueso

4. 1.2.1. Materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado grueso

En la Tabla 41 se evidencia el resultado del ensayo sobre materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado grueso exactamente de tres (03) muestras tomadas para el ensayo de las cuales el promedio es tomado como resultado final con un valor en porcentaje (%) de 1.42.

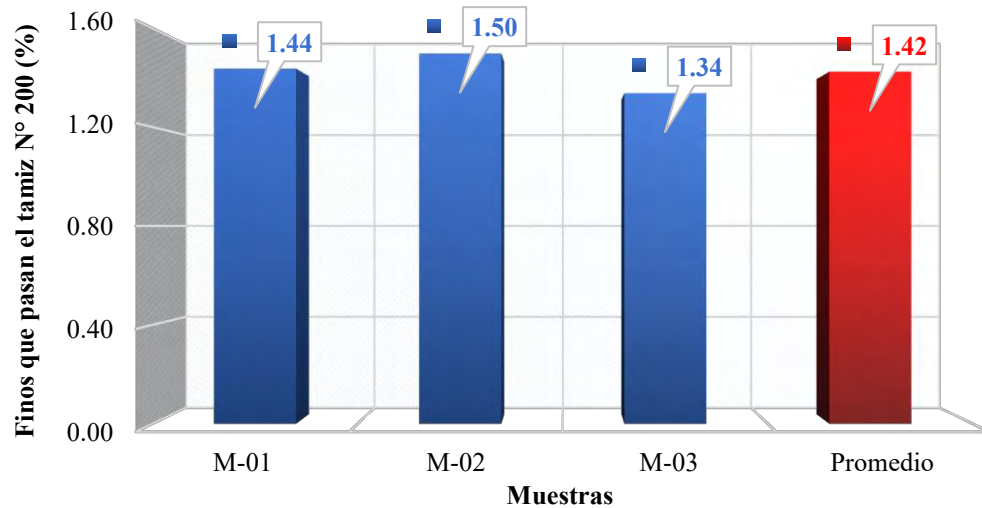
Tabla 41

Materiales que pasan por el tamiz N° 200 del agregado grueso

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso de la Muestra Original (g)	3009.84	3015.27	3000.79	
B	Peso del Recipiente (g)	566.85	566.85	566.85	
C	Peso del Recipiente + Muestra Ensayada (g)	3533.47	3536.97	3527.52	
D	Peso de la Muestra Ensayada (g)	2966.62	2970.12	2960.67	
Material que pasa el tamiz N°200 (%)		1.44	1.50	1.34	1.42

Figura 96

Porcentaje de finos que pasan el tamiz N° 200 del agregado grueso



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de finos que pasan el tamiz N° 200 de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje promedio.

4.1.2.2. Análisis granulométrico del agregado grueso

En las Tablas 42, 43 y 44 se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado grueso proveniente de la cantera Vicho, para el cual se seleccionaron tres (03) muestras. Se observa que el agregado evaluado cumple con los parámetros granulométricos correspondientes al Huso 67. Así mismo, en las Figuras 97, 98 y 99 se aprecia que las curvas granulométricas de las tres muestras se encuentran dentro de los límites establecidos por dicho huso. De igual manera, se determinaron los valores del Módulo de Fineza del agregado grueso (Figura 103), obteniéndose un resultado promedio de 6.79. Finalmente, se identificó el Tamaño Máximo Nominal que es de 3/4".

Tabla 42

Análisis granulométrico del agregado grueso – Muestra 01

Masa de la muestra seca (g):		3254.26						
Error en peso (%):		0.02						
Abertura de tamices		Peso	Peso	Parcial	Acumulado	Acumulado	Huso 67	
Nombre	mm	retenido	retenido	retenido	retenido	que pasa	Mínimo	Máximo
		(g)	corregido (g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	90	100
1/2 in	12.500	1728.33	1728.61	53.12	53.12	46.88	40	70
3/8 in	9.500	866.45	866.59	26.63	79.75	20.25	20	55
No. 4	4.750	644.73	644.84	19.82	99.56	0.44	0	10
No. 8	2.360	13.13	13.13	0.40	99.97	0.03	0	5
No. 16	1.180	0.00	0.00	0.00	99.97	0.03	0	0
No. 30	0.600	0.00	0.00	0.00	99.97	0.03	0	0
No. 50	0.300	0.00	0.00	0.00	99.97	0.03	0	0
No. 100	0.150	0.00	0.00	0.00	99.97	0.03	0	0
No. 200	0.075	0.00	0.00	0.00	99.97	0.03	0	0
< No. 200		1.09	1.09	0.03	100.00	0.00	0	0
Total		3253.73	3254.26	100.00				
							MF (%)	6.79
							TMN (plg)	3/4
							TM (plg)	3/4

Figura 97

Curva granulométrica del agregado grueso – Muestra 01

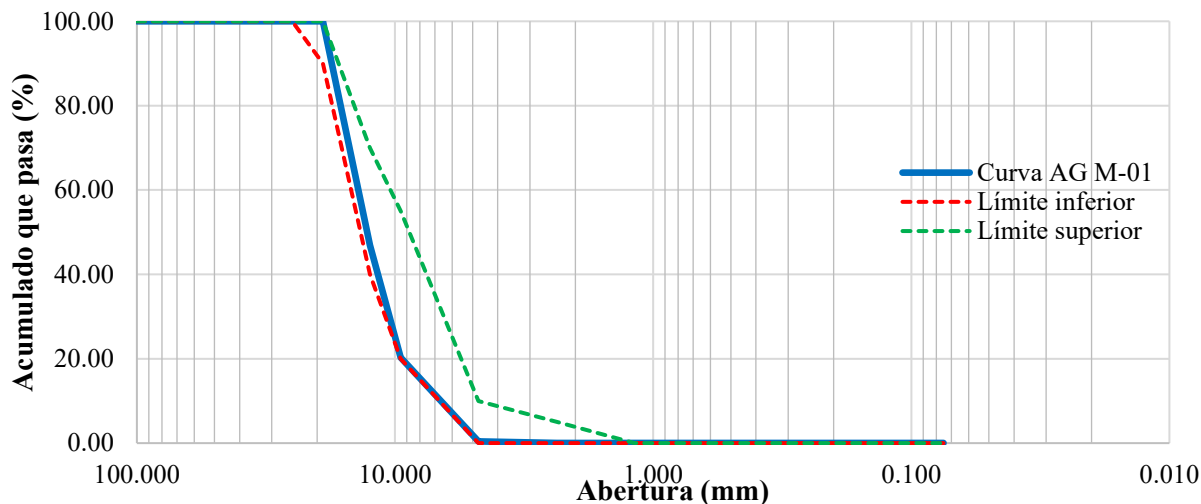


Tabla 43

Análisis granulométrico del agregado grueso – Muestra 02

Masa de la muestra seca (g):		3030.81						
Error en peso (%):		-0.01						
Abertura de tamices		Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	Parcial retenido (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Huso 67	
Nombre	mm						Mínimo (%)	Máximo (%)
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	90	100
1/2 in	12.500	1779.62	1779.44	58.71	58.71	41.29	40	70
3/8 in	9.500	624.10	624.04	20.59	79.30	20.70	20	55
No. 4	4.750	609.10	609.04	20.09	99.40	0.60	0	10
No. 8	2.360	16.10	16.10	0.53	99.93	0.07	0	5
No. 16	1.180	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 30	0.600	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 50	0.300	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 100	0.150	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 200	0.075	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
< No. 200		2.20	2.20	0.07	100.00	0.00	0	0
Total		3031.12	3030.81	100.00				
						MF (%)	6.78	
						TMN (plg)	3/4	
						TM (plg)	3/4	

Curva granulométrica del agregado grueso – Muestra 02



Masa de la muestra seca (g):		3049.36						
Error en peso (%):		0.05						
Abertura de tamices		Peso	Peso	Parcial	Acumulado	Acumulado	Huso 67	
Nombre	mm	retenido	retenido	retenido	retenido	que pasa	Mínimo	Máximo
		(g)	corregido (g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	90	100
1/2 in	12.500	1699.15	1699.97	55.75	55.75	44.25	40	70
3/8 in	9.500	715.44	715.78	23.47	79.22	20.78	20	55
No. 4	4.750	613.96	614.26	20.14	99.37	0.63	0	10
No. 8	2.360	17.26	17.27	0.57	99.93	0.07	0	5
No. 16	1.180	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 30	0.600	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 50	0.300	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 100	0.150	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
No. 200	0.075	0.00	0.00	0.00	99.93	0.07	0	0
< No. 200		2.08	2.08	0.07	100.00	0.00	0	0
Total		3047.89	3049.36	100.00			MF (%)	6.78
							TMN (plg)	3/4
							TM (plg)	3/4

Figura 99

Curva granulométrica del agregado grueso – Muestra 03

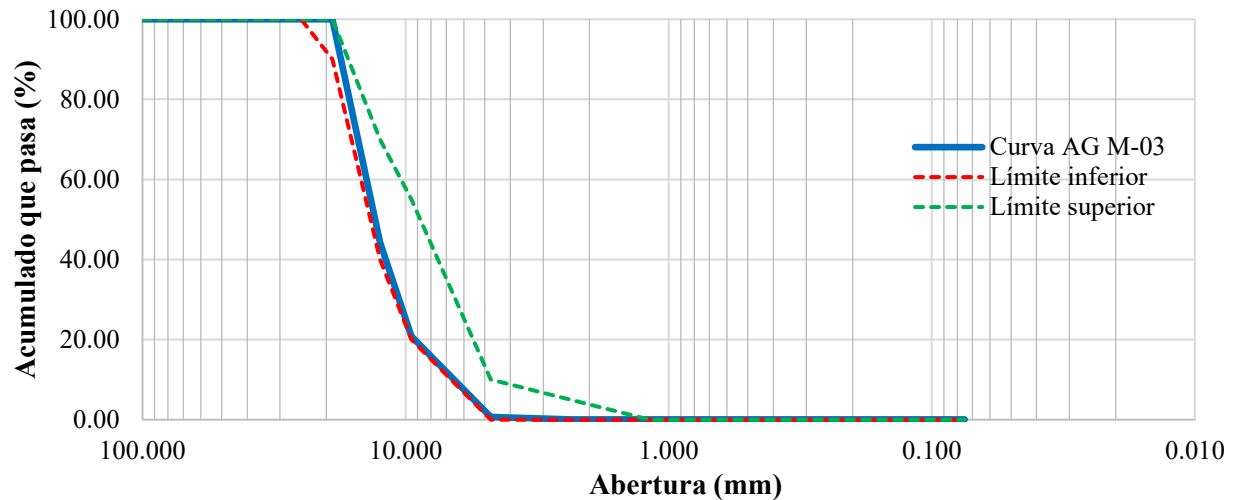
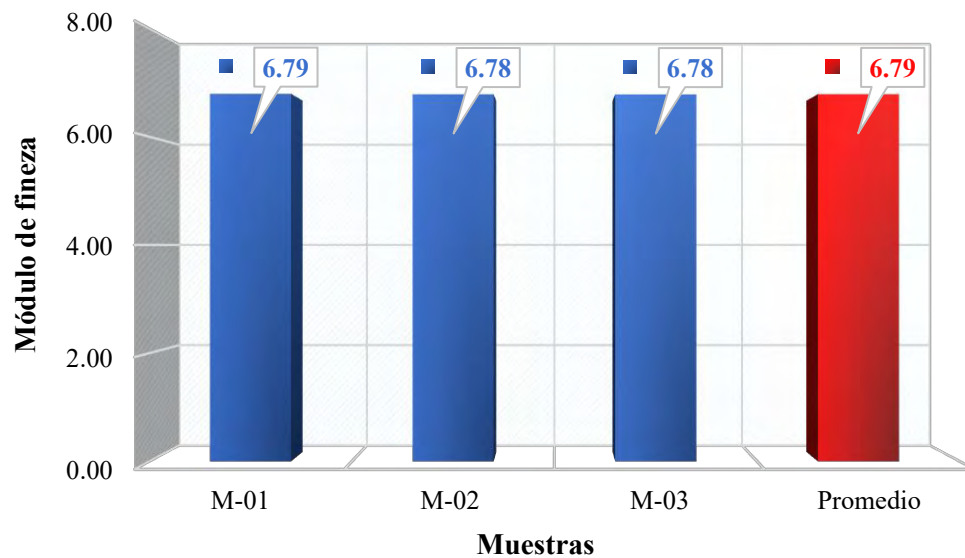


Figura 100

Módulo de fineza del agregado grueso



Nota. Se evidencia el resultado del Módulo de Fineza del agregado grueso mediante un diagrama de barras, en el cual se comparan los valores obtenidos para las tres (03) muestras evaluadas (barras de color azul). Como resultado final, se considera el promedio de dichos valores, obteniéndose un Módulo de Fineza Promedio de 6.79 (barra de color rojo).

4.1.2.3. Contenido de humedad del agregado grueso

En la Tabla 45 se visualiza los resultados del ensayo de contenido de humedad del agregado grueso de tres (03) muestras, se tomó como resultado un contenido de humedad promedio de 0.40%.

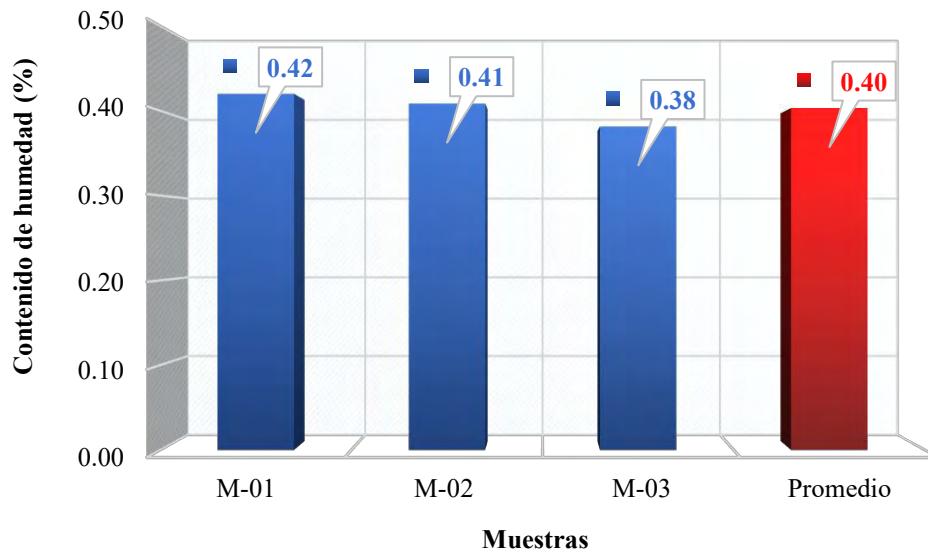
Tabla 45

Contenido de humedad de agregado grueso

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Recipiente (g)	114.60	70.82	138.26	
B	Peso del Recipiente + Muestra Húmeda (g)	628.70	673.17	696.10	
C	Peso de la Muestra Húmeda (g)	514.10	602.35	557.84	
D	Peso del Recipiente + Muestra Seca (g)	626.55	670.72	693.98	
E	Peso de la Muestra Seca (g)	511.95	599.90	555.72	
Contenido de Humedad $100(C-E)/E$ (%)		0.42	0.41	0.38	0.40

Figura 101

Diagrama de barras del contenido de humedad



Nota. Las barras de color azul representan los valores del contenido de humedad de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al contenido de humedad promedio.

4.1.2.4. Peso específico y absorción del agregado grueso

En la Tabla 46 se tiene los resultados del ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso, obteniéndose los valores finales del peso específico de 2697.66 Kg/cm³ y porcentaje de absorción de 1.46%.

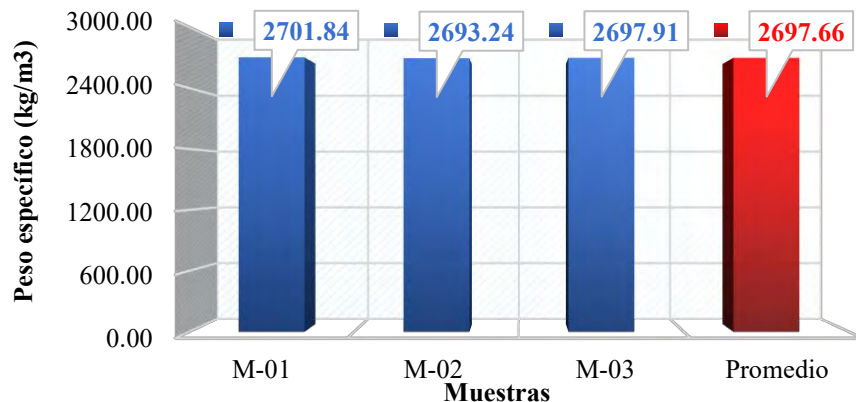
Tabla 46

Peso específico y absorción del agregado grueso

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Recipiente (g)	342.51	565.00	305.05	
B	Peso del Recipiente + Muestra Seca (g)	3332.91	3579.00	3304.86	
C	Peso de la Muestra Seca (g)	2990.40	3014.00	2999.81	
D	Peso del Recipiente + Muestra Sat. Superf. Seca (g)	3375.61	3625.40	3347.65	
E	Peso Muestra Saturada Superficialmente Seca (g)	3033.10	3060.40	3042.60	
F	Peso de la Canastilla en el Agua (g)	875.00	875.00	875.00	
G	Peso de la Canastilla + Muestra Saturada en el Agua (g)	2801.30	2816.30	2805.70	
H	Peso de la Muestra Saturada en el agua (gr)	1926.30	1941.30	1930.70	
I	Peso Específico de Masa (gr/cm3)	2.70	2.69	2.70	
J	Peso Específico de Masa Sat. Superf. Seca (gr/cm3)	2.74	2.73	2.74	
K	Peso Específico Aparente (gr/cm3)	2.81	2.81	2.81	
L	Temperatura del Agua (°C)	16.70	16.70	16.70	
M	Factor Corrección por Temperatura	1.00	1.00	1.00	
Peso Específico de Masa (kg/m3)		2701.84	2693.24	2697.91	2697.66
Absorción (%)		1.4279	1.5395	1.4264	1.46

Figura 102

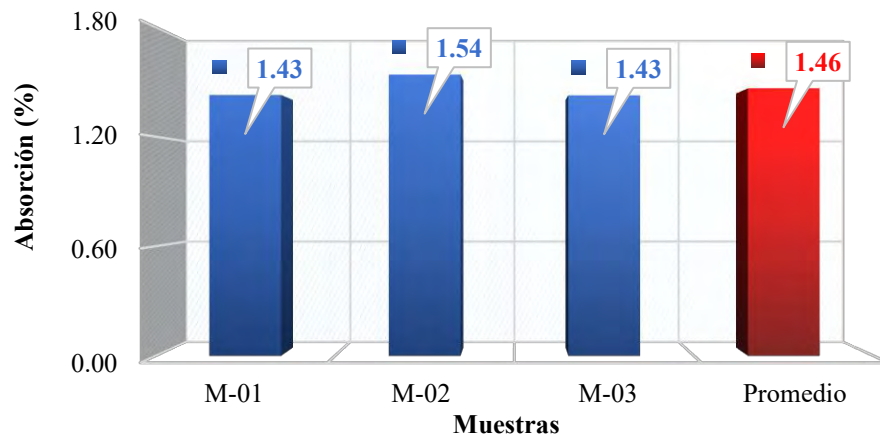
Peso específico de masa del agregado grueso



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso específico de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso específico promedio.

Figura 103

Porcentaje de absorción del agregado grueso



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de absorción de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de absorción promedio.

4.1.2.5. Peso unitario y vacíos del agregado grueso

En la Tabla 47 se presentan los resultados del ensayo de peso unitario suelto y porcentaje de vacíos del agregado grueso, considerando tres muestras identificadas como M-01, M-02 y M-03. A partir de los valores obtenidos, se determinó un peso unitario suelto promedio de 1485.25 kg/m³ y un porcentaje de vacíos promedio de 44.94%.

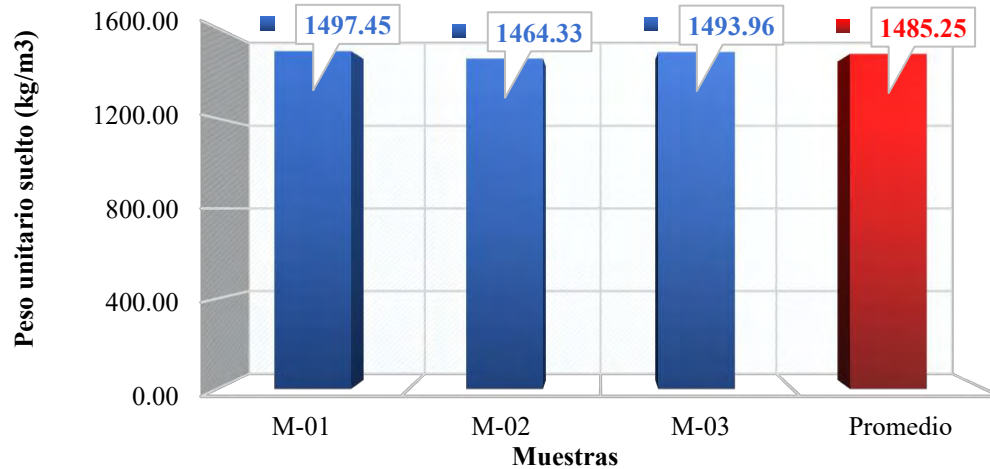
Tabla 47

Peso unitario suelto y vacíos del agregado grueso

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Molde (g)	7955.00	7955.00	7955.00	
B	Peso del Molde + Muestra Suelta (g)	12250.00	12155.00	12240.00	
C	Peso de la Muestra Suelta (g)	4295.00	4200.00	4285.00	
D	Altura del molde (cm)	16.90	16.90	16.90	
E	Diámetro del Molde (cm)	14.70	14.70	14.70	
F	Volumen del Molde (cm ³)	2868.21	2868.21	2868.21	
G	Peso Específico (kg/m ³)	2697.66	2697.66	2697.66	
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)		1497.45	1464.33	1493.96	1485.25
Vacíos (%)		44.49	45.72	44.62	44.94

Figura 104

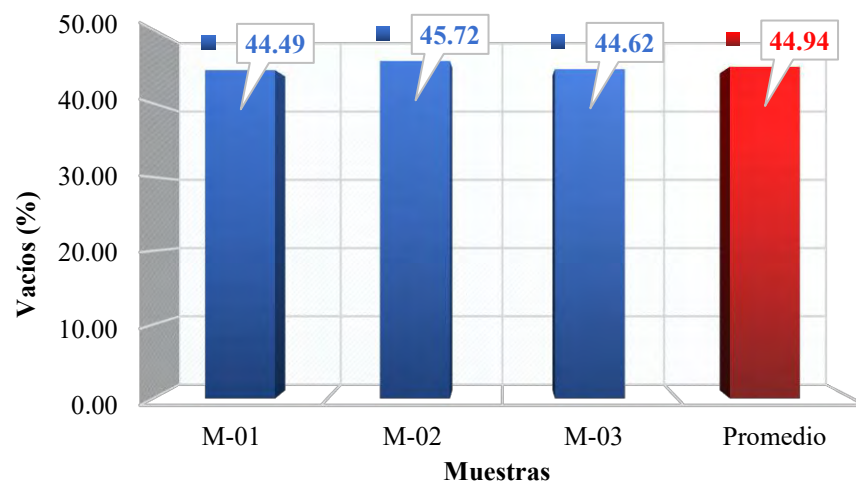
Peso unitario suelto del agregado grueso



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso unitario suelto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso unitario suelto promedio.

Figura 105

Porcentaje de vacíos del agregado grueso - suelto



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de vacíos suelto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de vacíos suelto promedio.

En la Tabla 48 se presentan los resultados del ensayo de peso unitario compacto y porcentaje de vacíos del agregado grueso, considerando tres muestras identificadas como M-01, M-02 y M-03. A partir de los valores obtenidos, se determinó un peso unitario compacto promedio de 1696.76 kg/m³ y un porcentaje de vacíos promedio de 37.10%.

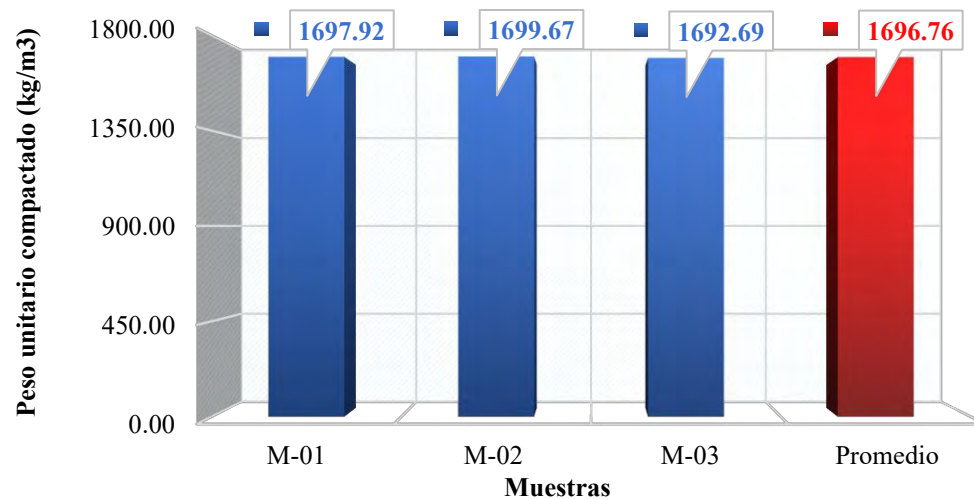
Tabla 48

Peso unitario compacto y vacíos del agregado grueso

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Molde (g)	7955.00	7955.00	7955.00	
B	Peso del Molde + Muestra Suelta (g)	12825.00	12830.00	12810.00	
C	Peso de la Muestra Suelta (g)	4870.00	4875.00	4855.00	
D	Altura del molde (cm)	16.90	16.90	16.90	
E	Diámetro del Molde (cm)	14.70	14.70	14.70	
F	Volumen del Molde (cm ³)	2868.21	2868.21	2868.21	
G	Peso Específico (kg/m ³)	2697.66	2697.66	2697.66	
Peso Unitario Compacto (kg/m ³)		1697.92	1699.67	1692.69	1696.76
Vacíos (%)		37.06	36.99	37.25	37.10

Figura 106

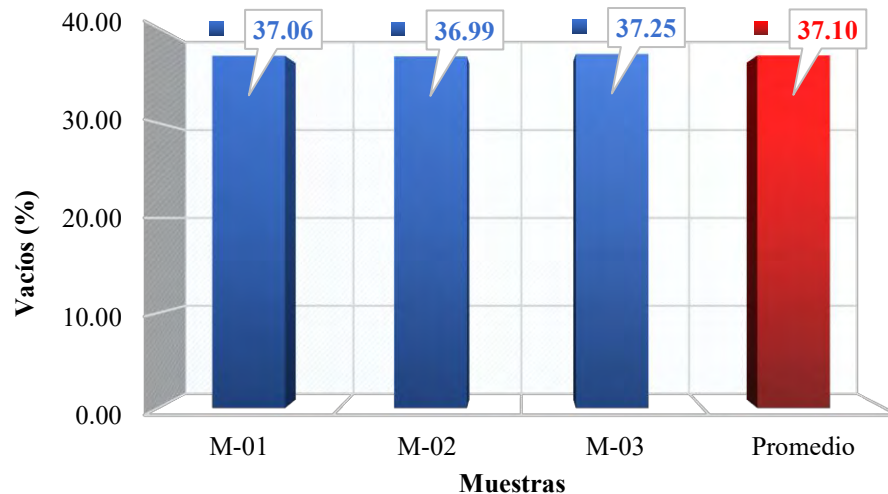
Peso unitario compacto del agregado grueso



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso unitario compacto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso unitario compacto promedio.

Figura 107

Porcentaje de vacíos del agregado grueso - compacto



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de vacíos compactado de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de vacíos compactado promedio.

4.1.2.6. Resistencia a la abrasión del agregado grueso

En la Tabla 49 se logra evidenciar el resultado del ensayo de resistencia a la abrasión en la máquina de los ángeles considerando para este ensayo una cantidad de tres (03) muestras, llegando a obtener una pérdida de material por abrasión promedio del 24.73%.

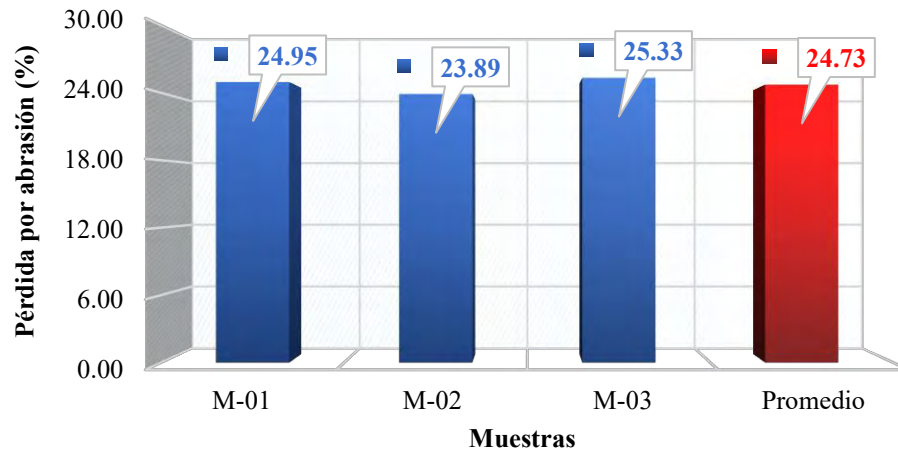
Tabla 49

Resistencia a la abrasión del agregado grueso

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso Total de la Muestra Seca (g)	5001.49	5001.80	5001.23	
B	Peso del Recipiente (g)	306.21	566.53	493.70	
C	Peso Recipiente + Peso Retenido en el Tamiz N°12 (g)	4059.66	4373.35	4227.94	
D	Peso Total de la Muestra Retenido en el Tamiz N° 12 (g)	3753.45	3806.82	3734.24	
Pérdida por Abrasión $100(A-D)/A$ (%)		24.95	23.89	25.33	24.73

Figura 108

Resistencia a abrasión del agregado grueso



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de pérdida de material por abrasión de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de pérdida de material por abrasión promedio.

4.1.3. Caracterización del agregado fino

4.1.3.1. Materiales finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino

En la Tabla 50 se evidencia el resultado del ensayo sobre materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino exactamente de tres (03) muestras tomadas para el ensayo de las cuales el promedio es tomado como resultado final con un valor en porcentaje (%) de 3.12.

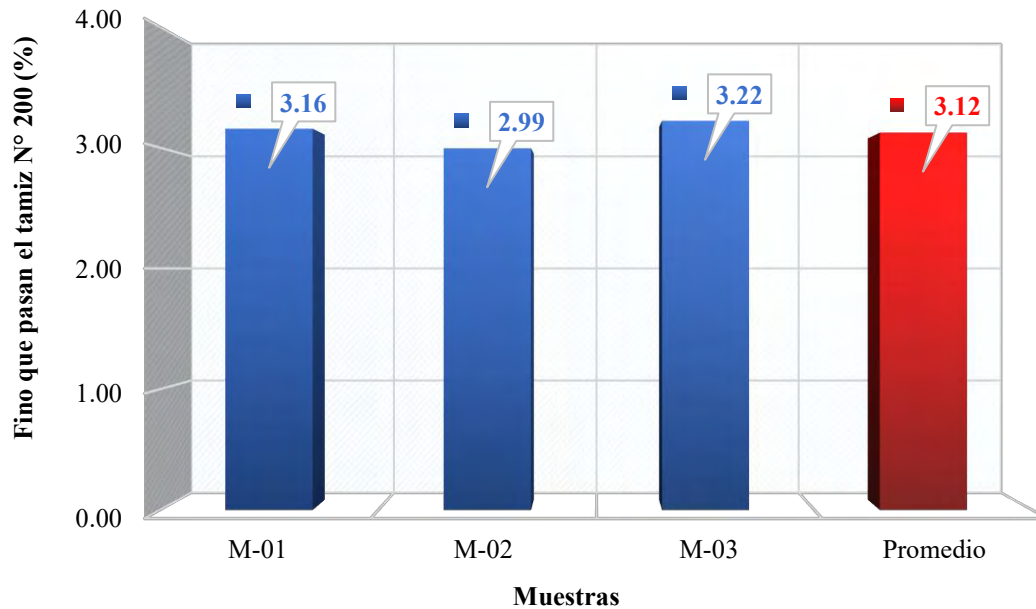
Tabla 50

Materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso de la Muestra Original (g)	323.81	314.59	315.59	
B	Peso del Recipiente (g)	350.66	109.91	76.08	
C	Peso del Recipiente + Muestra Ensayada (g)	664.25	415.08	381.50	
D	Peso de la Muestra Ensayada (g)	313.59	305.17	305.42	
Material que pasa el tamiz N°200 (%)		3.16	2.99	3.22	3.12

Figura 109

Porcentaje de finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de finos que pasa por el tamiz N° 200 de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje promedio de los finos que pasa por el tamiz N° 200.

4.1.3.2. Análisis granulométrico del agregado fino

En las Tablas 51, 52 y 53 se presentan los resultados del análisis granulométrico del agregado fino proveniente de la cantera Cunyac, para el cual se seleccionaron tres (03) muestras. Se observa que el agregado evaluado cumple con los parámetros granulométricos correspondientes al Huso único. Asimismo, en las Figuras 110, 111 y 112 se aprecia las curvas granulométricas de las tres muestras las cuales se encuentran dentro de los límites establecidos por dicho huso. De igual manera, se determinaron los valores del Módulo de Fineza del agregado fino, obteniéndose un resultado promedio de 2.65.

Tabla 51

Análisis granulométrico del agregado fino – Muestra 01

Masa de la muestra seca (g):		586.75						
Error en peso (%):		0.10						
Abertura de tamices		Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	Parcial retenido (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Huso	
Nombre	mm						Mínimo (%)	Máximo (%)
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2 in	12.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/8 in	9.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
No. 4	4.750	56.61	56.67	9.66	9.66	90.34	95	100
No. 8	2.360	43.36	43.40	7.40	17.06	82.94	80	100
No. 16	1.180	44.07	44.11	7.52	24.57	75.43	50	85
No. 30	0.600	100.92	101.02	17.22	41.79	58.21	25	60
No. 50	0.300	200.02	200.22	34.12	75.91	24.09	5	30
No. 100	0.150	60.85	60.91	10.38	86.30	13.70	0	10
No. 200	0.075	70.92	70.99	12.10	98.39	1.61	0	0
< No. 200		9.41	9.42	1.61	77.52	22.48	0	0
Total		586.16	586.75	77.52				
						MF (%)	2.55	

Figura 110

Curva granulométrica del agregado fino – Muestra 01

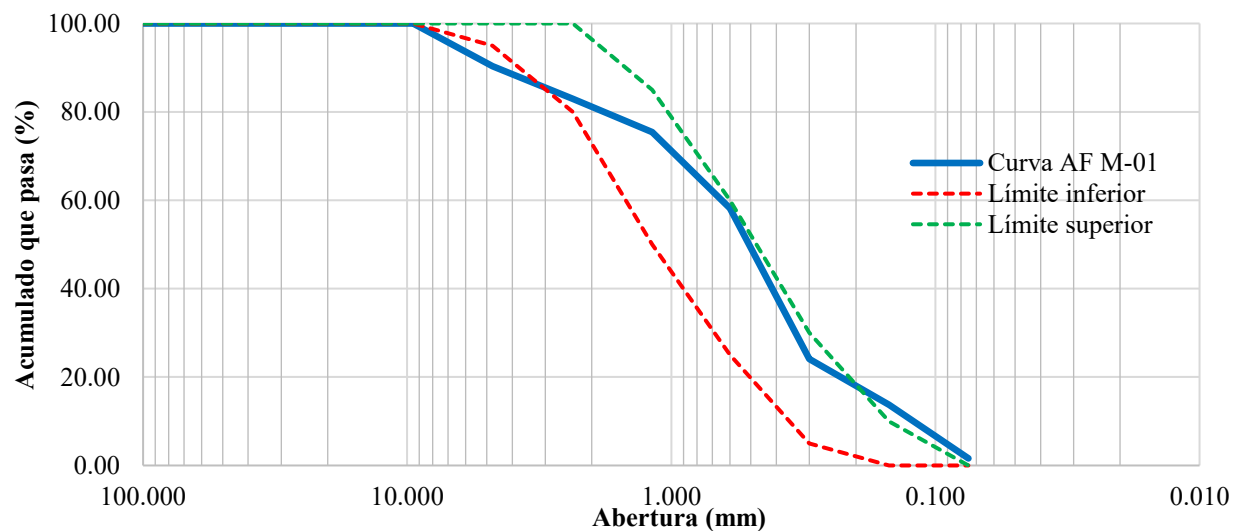


Tabla 52

Análisis granulométrico del agregado fino – Muestra 02

Masa de la muestra seca (g):		571.15						
Error en peso (%):		0.11						
Abertura de tamices		Peso	Peso	Parcial	Acumulado	Acumulado	Huso	
Nombre	mm	retenido	retenido	retenido	retenido	que pasa	Mínimo	Máximo
		(g)	corregido (g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2 in	12.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/8 in	9.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
No. 4	4.750	43.15	43.20	7.56	7.56	92.44	95	100
No. 8	2.360	55.34	55.40	9.70	17.26	82.74	80	100
No. 16	1.180	48.28	48.33	8.46	25.73	74.27	50	85
No. 30	0.600	113.02	113.14	19.81	45.53	54.47	25	60
No. 50	0.300	199.71	199.93	35.00	80.54	19.46	5	30
No. 100	0.150	58.31	58.37	10.22	90.76	9.24	0	10
No. 200	0.075	47.57	47.62	8.34	99.10	0.90	0	0
< No. 200		5.15	5.16	0.90	81.44	18.56	0	0
Total		570.53	571.15	81.44			MF (%)	2.67

Figura 111

Curva granulométrica del agregado fino – Muestra 02

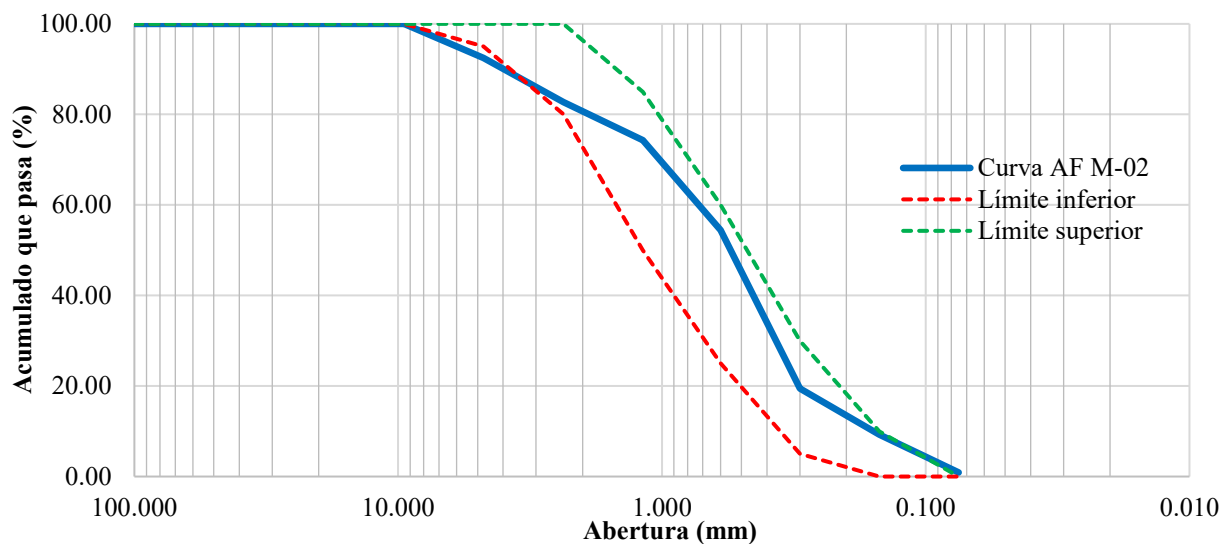


Tabla 53

Análisis granulométrico del agregado fino – Muestra 03

Masa de la muestra seca (g):		515.19						
Error en peso (%):		0.18						
Abertura de tamices		Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	Parcial retenido (%)	Acumulado retenido (%)	Acumulado que pasa (%)	Huso	
Nombre	mm						Mínimo (%)	Máximo (%)
4 in	100.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 1/2 in	90.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3 in	75.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 1/2 in	63.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
2 in	50.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 1/2 in	37.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1 in	25.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/4 in	19.000	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
1/2 in	12.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
3/8 in	9.500	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	100	100
No. 4	4.750	39.27	39.34	7.64	7.64	92.36	95	100
No. 8	2.360	46.32	46.40	9.01	16.64	83.36	80	100
No. 16	1.180	55.65	55.75	10.82	27.46	72.54	50	85
No. 30	0.600	111.36	111.56	21.65	49.12	50.88	25	60
No. 50	0.300	160.60	160.88	31.23	80.35	19.65	5	30
No. 100	0.150	51.02	51.11	9.92	90.27	9.73	0	10
No. 200	0.075	44.60	44.68	8.67	98.94	1.06	0	0
< No. 200		5.46	5.47	1.06	81.41	18.59	0	0
Total		514.28	515.19	81.41			MF (%)	2.71

Figura 112

Curva granulométrica del agregado fino – Muestra 03

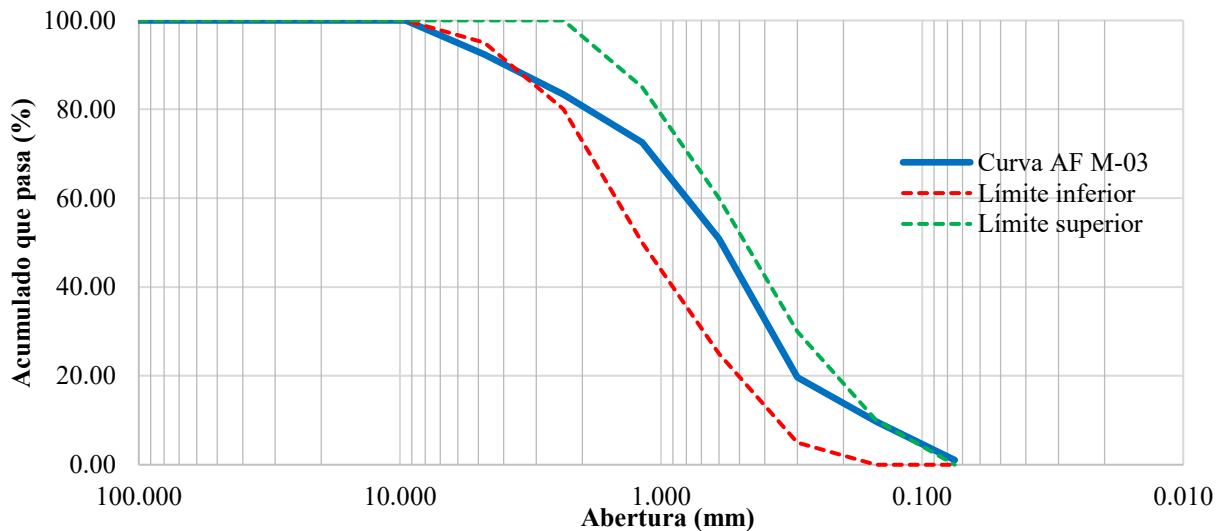
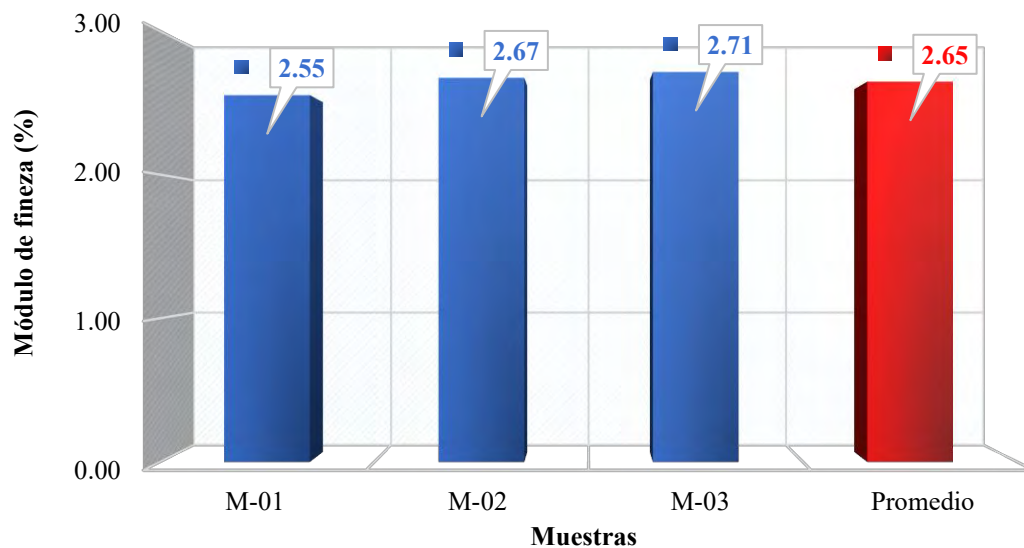


Figura 113

Módulo de fineza del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del módulo de fineza de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al módulo de fineza promedio.

4.1.3.3. Contenido de humedad del agregado fino

En la Tabla 54 se logra visualizar el resultado del ensayo de contenido de humedad realizada a tres (03) muestras del agregado fino, obteniendo un valor promedio de contenido de humedad del 0.66%.

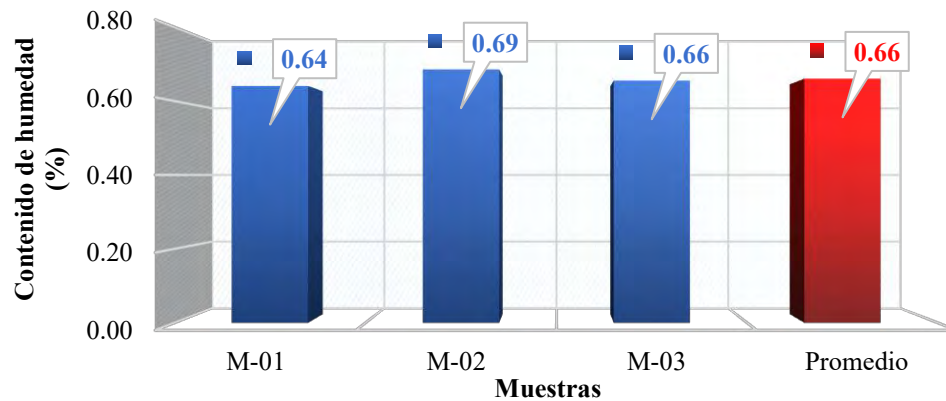
Tabla 54

Contenido de humedad del agregado fino

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Recipiente (g)	40.14	33.74	39.66	
B	Peso del Recipiente + Muestra Húmeda (g)	208.23	187.99	191.75	
C	Peso de la Muestra Húmeda (g)	168.09	154.25	152.09	
D	Peso del Recipiente + Muestra Seca (g)	207.16	186.94	190.76	
E	Peso de la Muestra Seca (g)	167.02	153.20	151.10	
Contenido de Humedad $100(C-E)/E$ (%)		0.64	0.69	0.66	0.66

Figura 114

Contenido de humedad del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del contenido de humedad de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al contenido de humedad promedio.

4.1.3.4. Peso específico y absorción del agregado fino

En la Tabla 55 se evidencia los resultados del ensayo de peso específico y absorción realizada a tres (03) muestras del agregado fino, obteniendo un peso específico promedio de 2585.32 Kg/m³ y un porcentaje de absorción promedio de 2.72%.

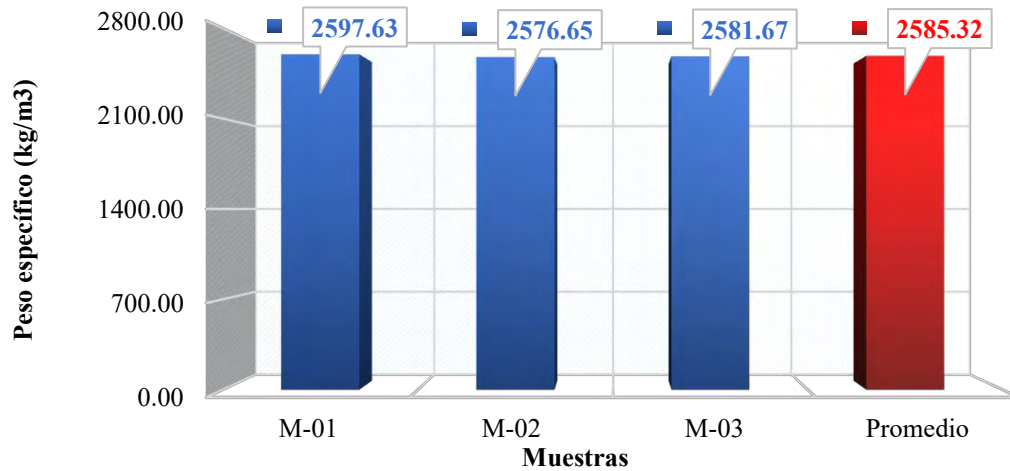
Tabla 55

Peso específico y absorción del agregado fino

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Recipiente (g)	76.05	195.57	305.36	
B	Peso del Recipiente + Muestra Seca (g)	565.86	682.30	790.74	
C	Peso de la Muestra Seca (g)	489.81	486.73	485.38	
D	Peso del Recipiente + Muestra Sat. Superf. Seca (g)	576.32	696.37	805.91	
E	Peso Muestra Saturada Superficialmente Seca (g)	500.27	500.80	500.55	
F	Peso del Picnómetro (g)	875.00	875.00	875.00	
G	Peso del Picnómetro + Agua (g)	677.40	681.58	677.40	
H	Peso del Picnómetro + Agua + Muestra Sat. Superf. Seca (gr)	989.11	993.48	989.94	
I	Peso Específico de Masa (gr/cm3)	2.60	2.58	2.58	2.59
J	Peso Específico de Masa Sat. Superf. Seca (gr/cm3)	2.65	2.65	2.66	2.66
K	Peso Específico Aparente (gr/cm3)	2.75	2.78	2.81	2.78
L	Temperatura del Agua (°C)	16.70	16.70	16.70	
M	Factor Corrección por Temperatura	1.00	1.00	1.00	
Peso Específico de Masa (kg/m3)		2597.63	2576.65	2581.67	2585.32
Absorción (%)		2.14	2.89	3.13	2.72

Figura 115

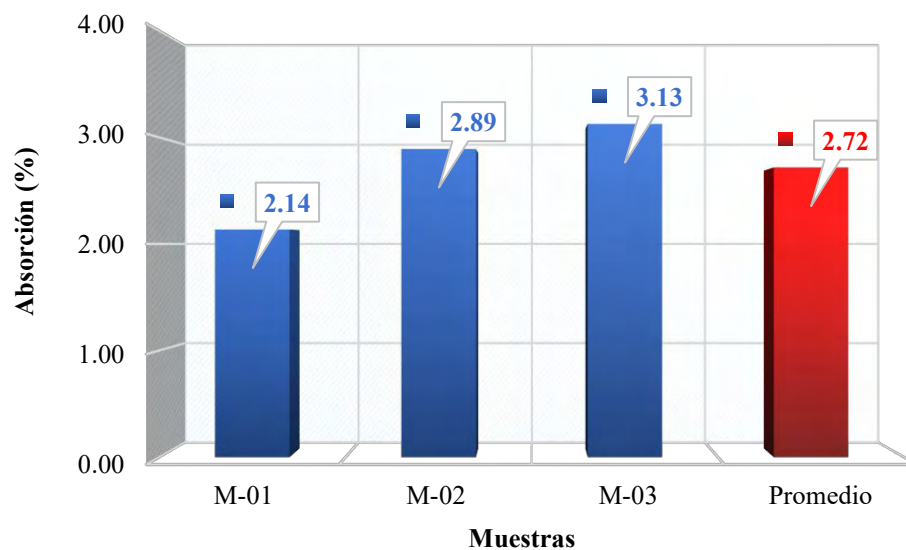
Peso específico del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso específico de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso específico promedio.

Figura 116

Porcentaje de absorción del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de absorción de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de absorción promedio.

4.1.3.5. Peso unitario y vacíos del agregado fino

En la Tabla 56 se presentan los resultados del ensayo de peso unitario suelto y porcentaje de vacíos del agregado fino, considerando tres muestras identificadas como M-01, M-02 y M-03. A partir de los valores obtenidos, se determinó un peso unitario suelto promedio de 1614.07 kg/m³ y un porcentaje de vacíos promedio de 37.57%.

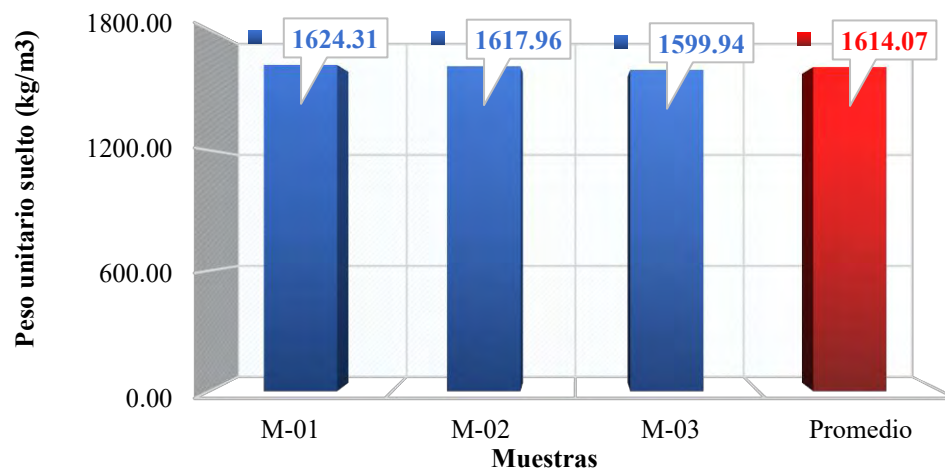
Tabla 56

Peso unitario y vacíos del agregado fino – suelto

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Molde (g)	4217.00	4217.00	4217.00	
B	Peso del Molde + Muestra Suelta (g)	5750.00	5744.00	5727.00	
C	Peso de la Muestra Suelta (g)	1533.00	1527.00	1510.00	
D	Altura del molde (cm)	11.55	11.55	11.55	
E	Diámetro del Molde (cm)	10.20	10.20	10.20	
F	Volumen del Molde (cm ³)	943.78	943.78	943.78	
G	Peso Específico (kg/m ³)	2585.32	2585.32	2585.32	
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)		1624.31	1617.96	1599.94	1614.07
Vacíos (%)		37.17	37.42	38.11	37.57

Figura 117

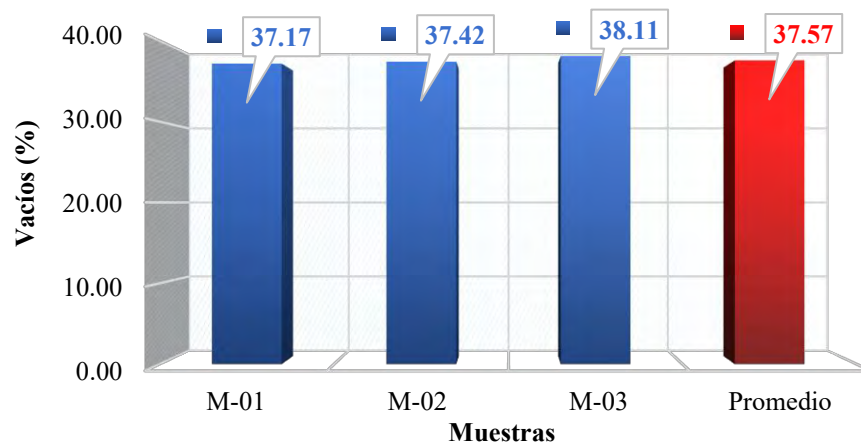
Peso unitario suelto del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso unitario suelto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso unitario suelto promedio.

Figura 118

Porcentaje de vacíos del agregado fino – suelto



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de vacíos suelto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de vacíos suelto promedio.

En la Tabla 57 se presentan los resultados del ensayo de peso unitario compacto y porcentaje de vacíos del agregado fino, considerando tres muestras identificadas como M-01, M-02 y M-03. A partir de los valores obtenidos, se determinó un peso unitario compacto promedio de 1747.93 kg/m³ y un porcentaje de vacíos promedio de 32.39%.

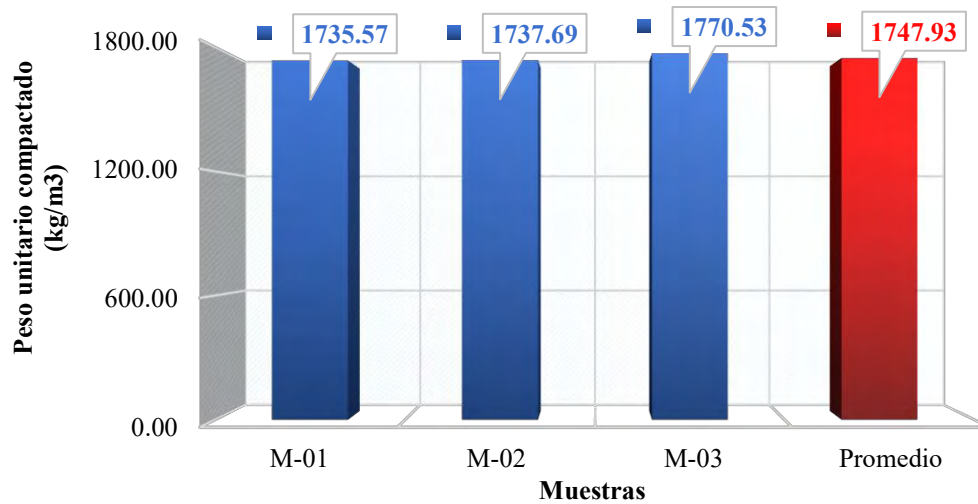
Tabla 57

Peso unitario y vacíos del agregado fino – compacto

Ítem	Datos	M-01	M-02	M-03	Promedio
A	Peso del Molde (g)	4217.00	4217.00	4217.00	
B	Peso del Molde + Muestra Suelta (g)	5855.00	5857.00	5888.00	
C	Peso de la Muestra Suelta (g)	1638.00	1640.00	1671.00	
D	Altura del molde (cm)	11.55	11.55	11.55	
E	Diámetro del Molde (cm)	10.20	10.20	10.20	
F	Volumen del Molde (cm ³)	943.78	943.78	943.78	
G	Peso Específico (kg/m ³)	2585.32	2585.32	2585.32	
Peso Unitario Compacto (kg/m ³)		1735.57	1737.69	1770.53	1747.93
Vacíos (%)		32.87	32.79	31.52	32.39

Figura 119

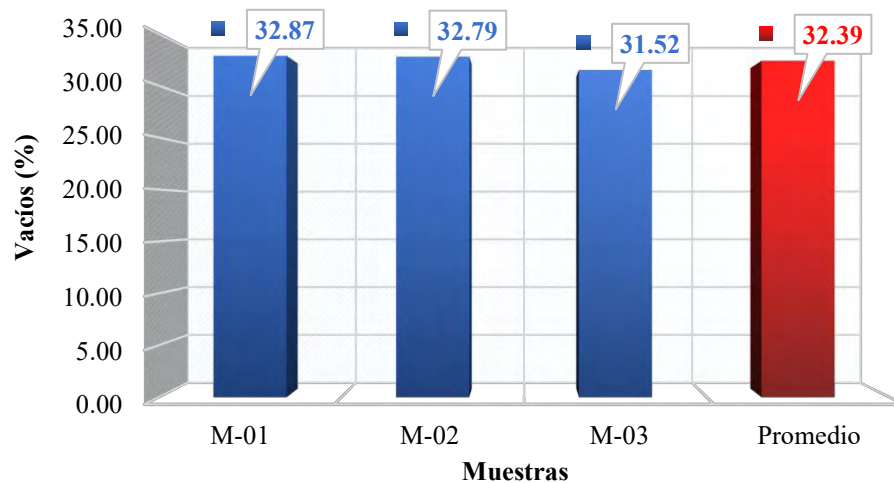
Peso unitario compacto del agregado fino



Nota. Las barras de color azul representan los valores del peso unitario compacto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al peso unitario compacto promedio.

Figura 120

Porcentaje de vacíos del agregado fino – compacto



Nota. Las barras de color azul representan los valores del porcentaje de vacíos compacto de las tres (03) muestras mientras que la barra de color rojo representa al porcentaje de vacíos compacto promedio.

4.2. Resultados del diseño de mezclas

4.2.1. Condiciones de diseño y características de los materiales

Teniendo en cuenta las especificaciones del concreto como se detallan en la Tabla 21, las características del cemento evidenciadas en la Tabla 22 y además las características de los agregados, el aditivo y el biochar finamente molido visualizadas en las Tablas 58, 59 y 60 respectivamente, se procedió con los cálculos respectivos al diseño de mezclas mediante el Método ACI 211.1 (2004).

Tabla 58

Características físicas y volumétricas de los agregados

Ítem	Descripción	Agregado grueso	Agregado fino	Biochar como Ag. fino
01	Cantera	Vicho	Cunyac	
02	Tamano máximo (in)	3/4"	-	-
03	Peso unitario suelto (kg/m ³)	1485.25	1614.07	381.44
04	Peso unitario compactado (kg/m ³)	1696.76	1747.93	494.46
05	Peso específico de masa (g/cm ³)	2.70	2.59	0.86
06	Contenido de humedad (%)	0.40	0.66	-
07	Porcentaje de absorción	1.46	2.72	50.94
08	Módulo de fineza	6.79	2.65	3.10

Tabla 59

Características del aditivo

Ítem	Descripción	Parámetros
01	Aditivo Superplastificante	ULMEN R-27
02	Tipo	Tipo HS
03	Apariencia/Color	Líquida/Café
04	Dosificación	0.3% a 2% en peso del cemento
05	Peso Específico (g/cm ³)	1.11

Tabla 60*Características del biochar finamente molido*

Ítem	Descripción	Parámetros
01	Densidad (Kg/m ³)	1195.34

4.2.2. Resultados del diseño de mezclas

Tomando en cuenta las condiciones de diseño y parámetros se logra evidenciar en la Tabla 61 los resultados del diseño de mezclas.

Tabla 61*Resultados del diseño de mezclas*

Ítem	Descripción	Valor	Unidad
01	Resistencia de Diseño (f'cr)	: 294	Kg/cm ²
02	Asentamiento del Concreto (SLUMP)	: 3 a 4	pulg
03	Tamaño Maximo Nominal del Agregado Grueso	: 3/4	pulg
04	Relacion de Agua - Cemento (a/c)	: 0.56	
05	Volumen de agua del diseño	: 205.00	Litros
06	Contenido de Aire Atrapado	: 2.00	%
07	Contenido de Cemento	: 366.07	Kg
08	Cantidad de cemento (Bolsas de 42.5 Kg)	: 8.61	Bolsas
09	Volumen del Agregado Grueso Compacto	: 0.63	m ³
10	Volumen Absoluto de la pasta		
11	Vol. Cemento	: 0.1331	m ³
12	Vol. Agua	: 0.2050	m ³
13	Vol. Aire	: 0.0200	m ³
14	Volumen Absoluto de los Agregados		
15	Vol. Agregado Grueso	: 0.3963	m ³
16	Vol. Agregado Fino	: 0.2456	m ³
17	Peso de los Materiales		
18	Cemento	: 366.07	Kg/m ³
19	Agregado Fino	: 635.03	Kg/m ³
20	Agregado Grueso	: 1068.96	Kg/m ³
21	Agua	: 205.00	lt/m ³

4.2.3. Dosificación del concreto control para 1m³

La Tabla 62 presenta la dosificación empleada para producir 1 m³ de concreto control. En ella se muestran las cantidades de cada material tanto en peso como en volumen, lo que permite comprender de manera clara la composición de la mezcla. Además, se incluye el equivalente por bolsa de cemento para ambas proporciones, facilitando su aplicación práctica. En conjunto, la tabla ofrece una visión ordenada y precisa de la participación de cada componente en el concreto final.

Tabla 62

Dosificación del concreto control

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m ³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m ³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m ³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m ³	1.00 m ³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m ³	1.85 m ³	0.0457	m ³	0.39	m ³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m ³	2.98 m ³	0.0836	m ³	0.72	m ³
04	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m ³	1.54 m ³	23.8000	lt	205.00	lt
05	Aire								0.0200 m ³					
Total			2275.06						1.0000 m ³					

4.2.4. Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino

En las Tablas 63, 64 y 65 se muestra la dosificación para 1 m³ de concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en niveles de 10%, 15% y 20% en volumen. Cada mezcla incorpora además un aditivo superplastificante en proporciones de 0.06%, 0.08% y 0.10% del peso del cemento, respectivamente. Las tablas presentan las cantidades en peso y los volúmenes de cada material, permitiendo comprender la composición de las mezclas y comparar cómo varían sus proporciones, así como el efecto del aditivo, a medida que aumenta el porcentaje de sustitución del agregado fino.

Tabla 63*Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%*

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporcion en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m³	1.00 m³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	571.07 Kg	1.56 Kg	66.3	Kg	571.07	Kg	0.2209 m³	1.66 m³	0.0411	m³	0.35	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar como Ar	855.1	20.99 Kg	0.06 Kg	2.4	Kg	20.99	Kg	0.0245 m³	0.18 m³	0.0064	m³	0.06	m³
05	Aditivo	1110.0	0.22 Kg	0.001 Kg	0.03	Kg	0.22	Kg	0.0002 m³	0.00 m³	0.0230	m³	0.20	lt
06	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
07	Aire								0.0200 m³					
Total			2232.30						1.0000 m³					

Tabla 64*Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%*

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporcion en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m³	1.00 m³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	539.20 Kg	1.47 Kg	62.6	Kg	539.20	Kg	0.2086 m³	1.57 m³	0.0388	m³	0.33	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar como Ar	855.1	31.47 Kg	0.09 Kg	3.7	Kg	31.47	Kg	0.0368 m³	0.28 m³	0.0096	m³	0.08	m³
05	Aditivo	1110.0	0.29 Kg	0.001 Kg	0.03	Kg	0.29	Kg	0.0003 m³	0.00 m³	0.0306	m³	0.26	lt
06	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
07	Aire								0.0200 m³					
Total			2210.99 Kg						1.0000 m³					

Tabla 65*Dosificación del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%*

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporcion en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m³	1.00 m³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	507.34 Kg	1.39 Kg	58.9	Kg	507.34	Kg	0.1962 m³	1.47 m³	0.0365	m³	0.31	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar como Ar	855.1	41.95 Kg	0.11 Kg	4.9	Kg	41.95	Kg	0.0491 m³	0.37 m³	0.0128	m³	0.11	m³
05	Aditivo	1110.0	0.37 Kg	0.001 Kg	0.04	Kg	0.37	Kg	0.0003 m³	0.00 m³	0.0383	m³	0.33	lt
06	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
07	Aire								0.0200 m³					
Total			2189.69 Kg						1.0000 m³					

4.2.5. Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento

En las Tablas 66, 67 y 68 se presenta la dosificación para 1 m³ de concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en niveles de 1%, 2% y 3% en peso. Estas mezclas permiten analizar cómo cambia la composición del concreto al reemplazar parte del cemento. Las tablas muestran las cantidades en peso y los volúmenes de cada material, facilitando la comparación entre proporciones. Además, se evidencia un ligero aumento en la suma de los volúmenes absolutos, alcanzando 0.0017, 0.0035 y 0.0052 m³ para las sustituciones del 1%, 2% y 3%, respectivamente.

Tabla 66

Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m ³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m ³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m ³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	362.41 Kg	0.99 Kg	1.0	bls	8.5	bls	0.1318 m ³	0.99 m ³	1.00	bls	8.5	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m ³	1.85 m ³	0.0457	m ³	0.39	m ³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m ³	2.98 m ³	0.0836	m ³	0.72	m ³
04	Biochar	1195.3	3.66 Kg	0.01 Kg	0.4	Kg	3.66	Kg	0.0031 m ³	0.02 m ³	0.0011	m ³	0.01	m ³
05	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m ³	1.54 m ³	23.8000	lt	205.00	lt
06	Aire								0.0200					
Total			2275.06 Kg						1.0017 m ³					

Tabla 67

Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m ³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m ³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m ³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	358.75 Kg	0.98 Kg	1.0	bls	8.4	bls	0.1305 m ³	0.98 m ³	1.00	bls	8.4	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m ³	1.85 m ³	0.0457	m ³	0.39	m ³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m ³	2.98 m ³	0.0836	m ³	0.72	m ³
04	Biochar	1195.3	7.32 Kg	0.02 Kg	0.9	Kg	7.32	Kg	0.0061 m ³	0.05 m ³	0.0022	m ³	0.02	m ³
05	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m ³	1.54 m ³	23.8000	lt	205.00	lt
06	Aire								0.0200					
Total			2275.06 Kg						1.0035 m ³					

Tabla 68

Dosificación del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	355.09 Kg	0.97 Kg	1.0	bls	8.4	bls	0.1291 m³	0.97 m³	1.00	bls	8.4	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m³	1.85 m³	0.0457	m³	0.39	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar	1195.3	10.98 Kg	0.03 Kg	1.3	Kg	10.98	Kg	0.0092 m³	0.07 m³	0.0033	m³	0.03	m³
05	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
06	Aire								0.0200					
Total			2275.06 Kg						1.0052 m³					

4.2.6. Dosificación del concreto con adición de biochar

En las Tablas 69, 70 y 71 se presenta la dosificación para 1 m³ de concreto con adición de biochar en porcentajes de 1%, 3% y 5% del peso del cemento. Estas tablas muestran las cantidades en peso y los volúmenes de cada material, permitiendo evaluar cómo varía la composición del concreto conforme aumenta la adición del biochar. Además, se aprecia un ligero incremento en los volúmenes absolutos, alcanzando 0.0031, 0.0092 y 0.0153 m³ para los porcentajes mencionados.

Tabla 69

Dosificación del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m³	1.00 m³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m³	1.85 m³	0.0457	m³	0.39	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar	1195.3	3.66 Kg	0.01 Kg	0.4	Kg	3.66	Kg	0.0031 m³	0.02 m³	0.0011	m³	0.01	m³
05	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
06	Aire								0.0200					
Total			2278.72 Kg						1.0031 m³					

Tabla 70*Dosificación del concreto con adición de biochar de biochar en peso del cemento en 3%*

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m³	1.00 m³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m³	1.85 m³	0.0457	m³	0.39	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar	1195.3	10.98 Kg	0.03 Kg	1.3	Kg	10.98	Kg	0.0092 m³	0.07 m³	0.0033	m³	0.03	m³
05	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
06	Aire								0.0200					
Total			2286.04 Kg						1.0092 m³					

Tabla 71*Dosificación del concreto con adición de biochar de biochar en peso del cemento en 5%*

Ítem	Material	Peso específico (Kg/m³)	Proporción en peso						Proporción en volumen					
			Peso	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto		Volumen	Proporción	Por bolsa de cemento		Por m³ de concreto	
01	Cemento	2750.0	366.07 Kg	1.00 Kg	1.0	bls	8.6	bls	0.1331 m³	1.00 m³	1.00	bls	8.6	bls
02	Agregado Fino	2585.3	635.03 Kg	1.73 Kg	73.7	Kg	635.03	Kg	0.2456 m³	1.85 m³	0.0457	m³	0.39	m³
03	Agregado Grueso	2697.7	1068.96 Kg	2.92 Kg	124.1	Kg	1068.96	Kg	0.3963 m³	2.98 m³	0.0836	m³	0.72	m³
04	Biochar	1195.3	18.30 Kg	0.05 Kg	2.1	Kg	18.30	Kg	0.0153 m³	0.12 m³	0.0056	m³	0.05	m³
05	Agua	1000.0	205.00 lt	0.56 lt	23.8	lt	205.00	lt	0.2050 m³	1.54 m³	23.8000	lt	205.00	lt
06	Aire								0.0200					
Total			2293.37 Kg						1.0153 m³					

4.3. Resultados de los ensayos en el concreto fresco

4.3.1. Temperatura

En la Tabla 72 se presentan las temperaturas registradas para cada una de las dosificaciones evaluadas: concreto control, concreto con sustitución parcial del agregado fino, concreto con sustitución parcial del cemento y concreto con adición de biochar, cada una con sus respectivos porcentajes. Para cada mezcla se realizaron tres mediciones, cuyo promedio se muestra en la tabla y se tomó como resultado final. Esta información permite comparar el comportamiento térmico de las distintas composiciones de concreto y analizar cómo varía la temperatura. Cabe señalar que las

Figuras 121 y 123 ofrecen una representación más detallada de las temperaturas mostradas gráficamente.

Tabla 72

Registro de las temperaturas tomadas al concreto fresco durante su preparación

Ítem	Descripción	T. Ambiente (°C)	Temperatura concreto (°C)			
			T1	T2	T3	Promedio
01	Control	24.5	22.1	22.2	22.1	22.1
02	Sust-Ar-BC_10%	16.6	16.9	16.9	16.9	16.9
03	Sust-Ar-BC_15%	18.0	17.3	17.2	17.3	17.3
04	Sust-Ar-BC_20%	17.1	17.3	17.3	17.2	17.3
05	Sust-Cm-BC_1%	16.3	18.1	18	18.1	18.1
06	Sust-Cm-BC_2%	14.9	15.7	15.8	15.7	15.7
07	Sust-Cm-BC_3%	14.0	15.3	15.3	15.3	15.3
08	Adi-BC_1%	17.1	16.9	16.9	16.8	16.9
09	Adi-BC_3%	19.8	19.3	19.3	19.3	19.3
10	Adi-BC_5%	20.5	20.8	20.7	20.7	20.7

Figura 121

Representación gráfica de las temperaturas promedio

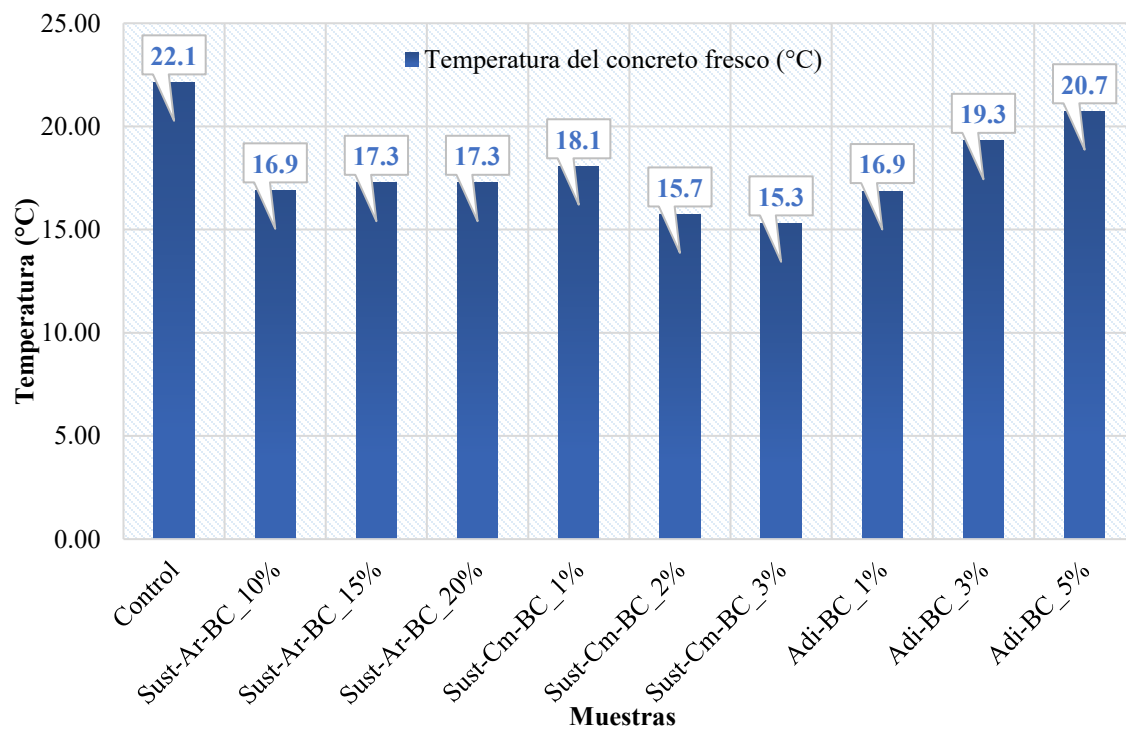
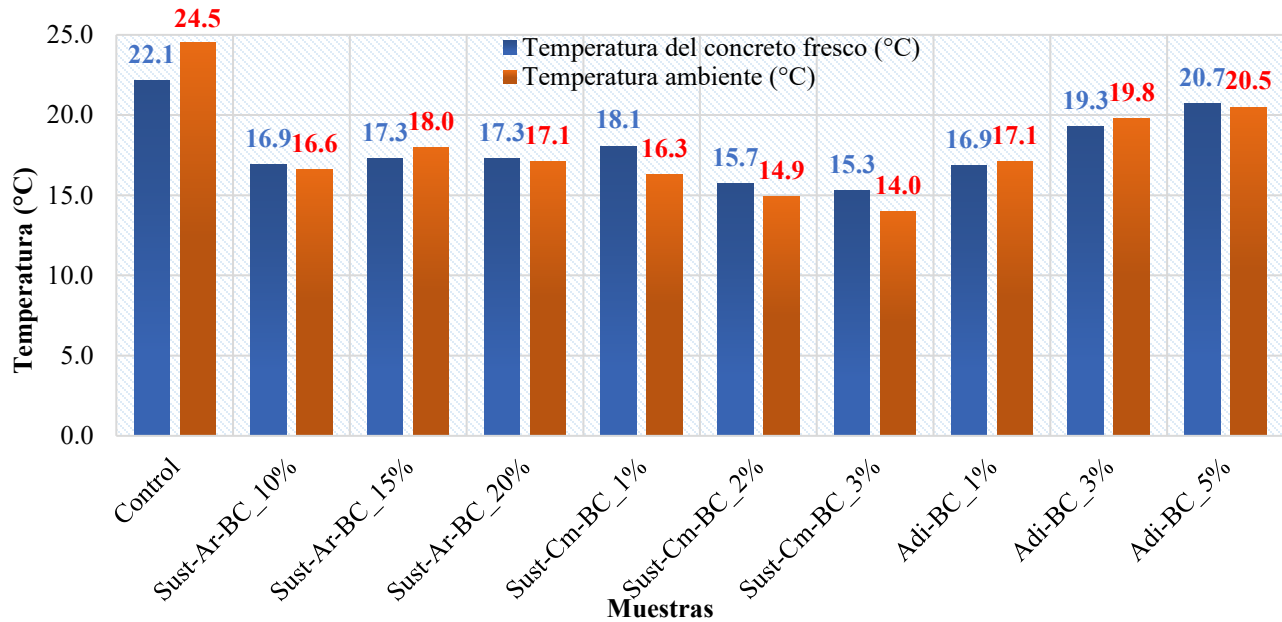


Figura 122

Representación gráfica de las temperaturas promedio adyacentes a la temperatura ambiente



4.3.2. Asentamiento

En la Tabla 73 se presentan los resultados del ensayo de asentamiento (slump) del concreto en estado fresco y en la Figura 123 se evidencia la representación gráfica de los asentamientos, realizado antes del vaciado. Para cada dosificación se efectuaron tres mediciones M-01, M-02 y M-03, el promedio fue considerado como el resultado final.

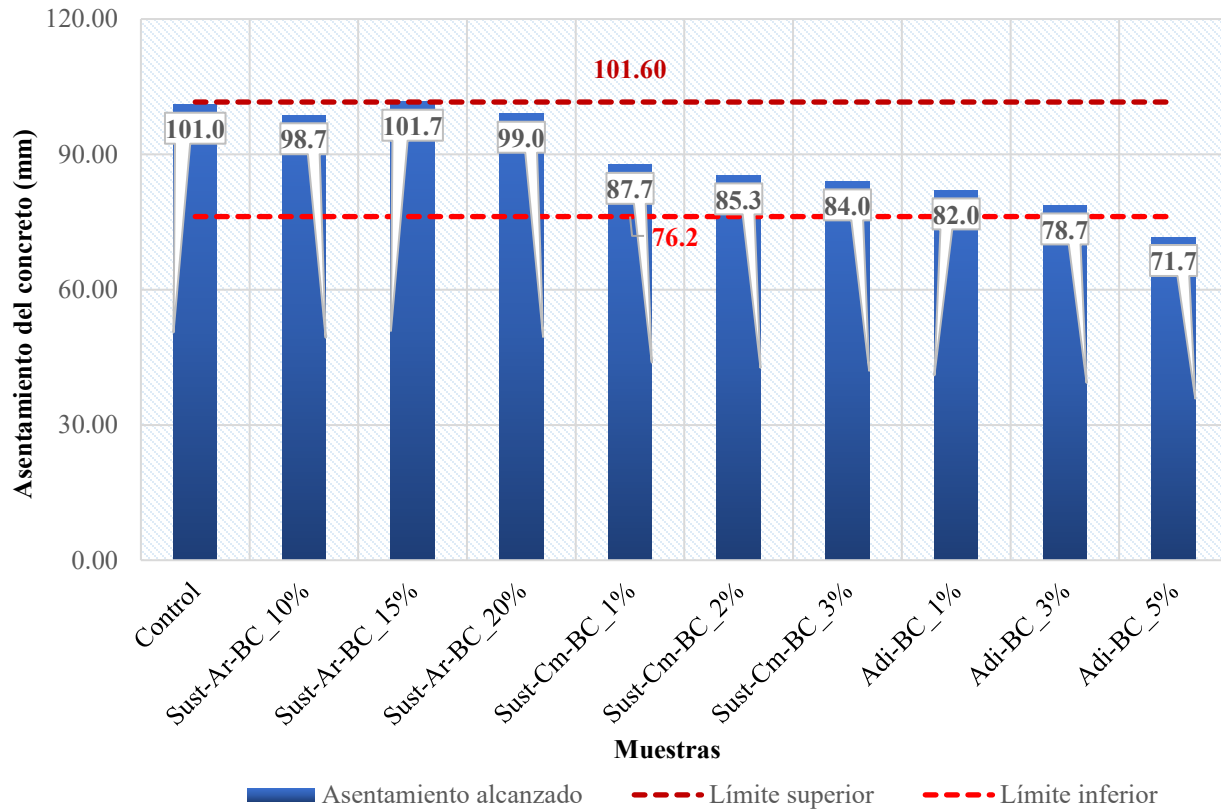
Tabla 73

Registro del asentamiento (slump) del concreto fresco

Ítem	Descripción	Asentamiento del concreto (mm)				Promedio (plg)
		M1	M2	M3	Promedio	
01	Control	98.0	100.0	105.0	101.0	4.0
02	Sust-Ar-BC_10%	98.0	100.0	98.0	98.7	3.9
03	Sust-Ar-BC_15%	101.0	102.0	102.0	101.7	4.0
04	Sust-Ar-BC_20%	98.0	100.0	99.0	99.0	3.9
05	Sust-Cm-BC_1%	86.0	87.0	90.0	87.7	3.5
06	Sust-Cm-BC_2%	85.0	86.0	85.0	85.3	3.4
07	Sust-Cm-BC_3%	84.0	83.0	85.0	84.0	3.3
08	Adi-BC_1%	82.0	80.0	84.0	82.0	3.2
09	Adi-BC_3%	79.0	79.0	78.0	78.7	3.1
10	Adi-BC_5%	72.0	72.0	71.0	71.7	2.8

Figura 123

Representación gráfica de los promedios del asentamiento del concreto fresco



Nota. Se logra evidenciar que las barras representan a los valores de los asentamientos promedio las cuales se encuentran dentro del límite superior 101.60mm e inferior 76.2mm.

4.4. Resultados de los ensayos en el concreto endurecido

4.4.1. Dimensionamiento de testigos cilíndricos para compresión

En las Tablas del 74 al 83 se muestran los dimensionamientos de los testigos cilíndricos correspondientes al concreto control, concreto con sustitución parcial de arena, concreto con sustitución parcial de cemento y concreto con adición de biochar, elaborados para el ensayo de resistencia a la compresión. En cada dosificación se elaboraron 03 muestras para ensayarlas a los 3 días, 03 muestras para ensayarlas a los 7 días y otras 06 muestras para ensayarlas a los 28 días de curado.

Tabla 74

Dimensionamiento de briquetas del concreto control para compresión

		f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 0									
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Control	07-07-25	10-07-25	3	10.20	10.11	10.19	10.17	20.75	20.65	20.75	20.72	3860.01
2	Control	07-07-25	10-07-25	3	10.14	10.17	10.14	10.15	20.35	20.25	20.20	20.27	3871.93
3	Control	07-07-25	10-07-25	3	10.06	10.14	10.08	10.09	19.95	20.05	20.00	20.00	3875.21
4	Control	07-07-25	14-07-25	7	10.07	10.12	10.18	10.12	20.00	20.05	20.00	20.02	3890.56
5	Control	07-07-25	14-07-25	7	10.21	10.18	10.12	10.17	20.80	20.75	20.78	20.78	3985.32
6	Control	07-07-25	14-07-25	7	10.31	10.24	10.12	10.22	20.80	20.83	20.79	20.81	3986.21
7	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.06	10.11	10.17	10.11	20.10	20.15	20.09	20.11	3852.01
8	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.07	10.09	10.15	10.10	20.00	20.00	20.00	20.00	3811.93
9	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.09	10.08	10.18	10.12	20.00	20.07	20.02	20.03	3845.21
10	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.17	10.21	10.13	10.17	20.75	20.72	20.70	20.72	4016.46
11	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.18	10.19	10.14	10.17	20.71	20.70	20.75	20.72	3995.67
12	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.18	10.24	10.13	10.19	20.81	20.80	20.80	20.80	4013.29

Tabla 75

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10% para compresión

		f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 10									
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	10.10	10.16	10.12	10.13	20.15	20.25	20.25	20.22	3785.14
2	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	10.15	10.09	10.18	10.14	20.25	20.30	20.22	20.26	3795.28
3	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	10.14	10.12	10.19	10.15	20.22	20.20	20.25	20.22	3790.75
4	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	10.18	10.13	10.12	10.15	20.20	20.17	20.22	20.20	3810.35
5	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	10.14	10.13	10.19	10.15	20.15	20.17	20.13	20.15	3808.23
6	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	10.14	10.16	10.18	10.16	20.25	20.30	20.27	20.27	3814.66
7	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	10.19	10.20	10.18	20.27	20.31	20.25	20.28	3839.94
8	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.18	10.10	10.22	10.17	20.30	20.31	20.21	20.27	3822.40
9	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.12	10.13	10.21	10.15	20.40	20.37	20.40	20.39	3852.86
10	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	10.12	10.19	10.16	20.29	20.22	20.30	20.27	3841.35
11	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.12	10.11	10.19	10.14	20.31	20.28	20.30	20.30	3882.74
12	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.13	10.11	10.18	10.14	20.28	20.30	20.25	20.28	3848.26

Tabla 76

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15% para compresión

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		15					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	10.16	10.17	10.18	10.17	20.30	20.42	20.23	20.32	3715.78
2	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	10.09	10.12	10.16	10.12	20.22	20.18	20.20	20.20	3721.37
3	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	10.10	10.11	10.18	10.13	20.18	20.12	20.12	20.14	3718.89
4	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	10.13	10.13	10.17	10.15	20.22	20.21	20.23	20.22	3783.93
5	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	10.12	10.18	10.18	10.16	20.25	20.27	20.24	20.25	3785.62
6	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	10.17	10.17	10.12	10.15	20.85	20.84	20.83	20.84	3786.21
7	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.10	10.13	10.16	10.13	20.14	20.12	20.11	20.12	3759.80
8	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.12	10.11	10.18	10.14	20.31	20.31	20.28	20.30	3752.77
9	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.15	10.14	10.18	10.16	20.30	20.28	20.29	20.29	3798.00
10	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.12	10.10	10.15	10.13	20.18	20.20	20.21	20.20	3694.91
11	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.19	10.10	10.19	10.16	20.35	20.37	20.37	20.36	3776.48
12	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.11	10.13	10.19	10.14	20.31	20.29	20.29	20.30	3783.44

Tabla 77

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20% para compresión

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		20					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	10.17	10.16	10.18	10.17	20.25	20.32	20.30	20.29	3710.84
2	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	10.14	10.13	10.18	10.15	20.32	20.31	20.28	20.30	3712.65
3	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	10.11	10.15	10.19	10.15	20.30	20.33	20.31	20.31	3710.12
4	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	10.13	10.13	10.18	10.15	20.30	20.35	20.22	20.29	3710.68
5	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	10.13	10.17	10.15	20.35	20.40	20.35	20.37	3716.11
6	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	10.10	10.09	10.16	10.12	20.22	20.30	20.28	20.27	3715.21
7	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.15	10.15	10.19	10.16	20.38	20.23	20.35	20.32	3742.30
8	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.13	10.14	10.19	10.15	20.35	20.41	20.34	20.37	3742.30
9	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.14	10.13	10.19	10.16	20.31	20.36	20.40	20.36	3760.68
10	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.12	10.12	10.17	10.14	20.40	20.29	20.29	20.33	3721.69
11	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.13	10.14	10.17	10.15	20.31	20.31	20.31	20.31	3754.78
12	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.12	10.13	10.19	10.15	20.35	20.30	20.32	20.32	3750.53

Tabla 78

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1% para compresión

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		1					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.04	10.07	10.15	10.09	20.00	20.00	20.00	20.00	3779.99
2	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.08	10.11	10.21	10.13	20.08	20.08	20.06	20.07	3778.64
3	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	10.14	10.20	10.16	20.10	20.08	20.08	20.09	3780.79
4	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.26	10.19	10.13	10.19	20.75	20.72	20.77	20.75	3988.37
5	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.20	10.24	10.13	10.19	20.72	20.69	20.68	20.70	3985.98
6	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.24	10.30	10.13	10.22	20.80	20.72	20.72	20.75	3970.79
7	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	10.12	10.17	10.14	20.10	20.20	20.15	20.15	3798.47
8	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	10.11	10.18	10.14	20.15	20.20	20.21	20.19	3860.77
9	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	10.13	10.18	10.15	20.11	20.16	20.19	20.15	3849.18
10	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	10.12	10.18	10.14	20.12	20.18	20.17	20.16	3865.13
11	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	10.12	10.17	10.14	20.13	20.17	20.16	20.15	3824.65
12	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	10.12	10.17	10.14	20.14	20.18	20.15	20.16	3858.36

Tabla 79

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2% para compresión

f' c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		2					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	10.06	10.14	10.11	20.10	20.20	20.20	20.17	3789.59
2	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	10.12	10.12	10.19	10.14	20.19	20.15	20.27	20.20	3788.47
3	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	10.13	10.11	10.18	10.14	20.15	20.09	20.05	20.10	3785.99
4	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	10.14	10.14	10.16	20.65	20.72	20.72	20.70	3945.16
5	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	10.23	10.21	10.11	10.18	20.71	20.80	20.70	20.74	3948.68
6	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	10.20	10.17	10.13	10.17	20.75	20.82	20.80	20.79	3938.32
7	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.07	10.08	10.15	10.10	20.01	20.15	20.12	20.09	3778.09
8	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.09	10.11	10.18	10.12	20.15	20.20	20.11	20.15	3811.84
9	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.11	10.15	10.12	20.15	20.28	20.22	20.22	3833.99
10	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.11	10.17	10.12	20.14	20.22	20.20	20.19	3825.22
11	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.07	10.12	10.17	10.12	20.12	20.25	20.18	20.18	3818.39
12	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.11	10.16	10.12	20.16	20.26	20.16	20.19	3800.16

Tabla 80

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3% para compresión

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		3					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.12	10.12	10.11	10.12	20.09	20.15	20.21	20.15	3789.19
2	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	10.08	10.16	10.12	20.18	20.12	20.11	20.14	3794.05
3	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.10	10.08	10.16	10.11	20.00	20.09	20.01	20.03	3792.54
4	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.18	10.26	10.13	10.19	20.68	20.72	20.78	20.73	3962.42
5	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.20	10.17	10.14	10.17	20.70	20.70	20.78	20.73	3941.16
6	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.21	10.20	10.11	10.17	20.72	20.68	20.62	20.67	3998.37
7	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.11	10.11	10.17	10.13	20.25	20.23	20.19	20.22	3847.96
8	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	10.11	10.16	10.12	20.00	20.12	20.12	20.08	3800.03
9	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.07	10.07	10.13	10.09	20.12	20.19	20.15	20.15	3811.11
10	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.10	10.14	10.11	20.15	20.20	20.18	20.18	3830.53
11	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.09	10.14	10.10	20.17	20.15	20.16	20.16	3825.81
12	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.09	10.09	10.13	10.10	20.16	20.14	20.20	20.17	3840.38

Tabla 81

Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1% para compresión

f' c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		1					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.17	10.11	10.18	10.15	20.00	20.10	20.00	20.03	3858.09
2	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.18	10.17	10.19	10.18	20.10	20.15	20.20	20.15	3860.18
3	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.16	10.14	10.18	10.16	20.18	20.10	20.08	20.12	3878.25
4	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.22	10.21	10.12	10.18	20.70	20.72	20.78	20.73	3978.65
5	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.24	10.20	10.14	10.19	20.80	20.80	20.80	20.80	3985.69
6	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	10.13	10.19	10.16	20.22	20.25	20.20	20.22	3988.19
7	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.11	10.12	10.18	10.14	20.30	20.20	20.25	20.25	3916.41
8	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.09	10.14	10.19	10.14	20.28	20.30	20.25	20.28	3906.83
9	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.09	10.14	10.17	10.13	20.29	20.23	20.22	20.25	3892.33
10	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.09	10.12	10.18	10.13	20.25	20.29	20.24	20.26	3910.25
11	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	10.13	10.18	10.14	20.20	20.28	20.26	20.25	3898.32
12	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.12	10.17	10.12	20.28	20.27	20.25	20.27	3902.59

Tabla 82

Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3% para compresión

f' c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		3					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio	
1	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.10	10.14	10.12	10.12	20.19	20.19	20.17	20.18	3809.28
2	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.13	10.12	10.19	10.14	20.19	20.15	20.11	20.15	3805.11
3	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	10.09	10.15	10.12	20.21	20.20	20.15	20.19	3800.96
4	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.23	10.23	10.13	10.20	20.70	20.71	20.78	20.73	3938.06
5	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.15	10.28	10.15	10.19	20.85	20.70	20.80	20.78	3940.19
6	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	10.10	10.20	10.16	20.20	20.20	20.20	20.20	3931.68
7	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	10.11	10.18	10.14	20.11	20.30	20.18	20.20	3844.90
8	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.08	10.11	10.16	10.12	20.12	20.16	20.15	20.14	3830.29
9	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.15	10.15	10.19	10.16	20.29	20.25	20.21	20.25	3870.72
10	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	10.14	10.18	10.15	20.22	20.20	20.10	20.17	3850.65
11	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.11	10.14	10.16	10.14	20.18	20.24	20.12	20.18	3862.98
12	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	10.13	10.20	10.14	20.16	20.18	20.17	20.17	3835.54

Tabla 83

Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5% para compresión

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		5							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Altura (H) (cm)				Peso (g)		
					D1	D2	D3	Dpromedio	H1	H2	H3	Hpromedio			
1	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10.11	10.16	10.20	10.16	20.19	20.32	20.29	20.27	3841.31		
2	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10.13	10.20	10.14	10.16	20.19	20.21	20.19	20.20	3842.49		
3	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10.10	10.06	10.16	10.11	20.07	20.20	20.17	20.15	3845.95		
4	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	10.22	10.22	10.11	10.19	20.72	20.68	20.80	20.73	3941.16		
5	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	10.20	10.16	10.13	10.16	20.72	20.70	20.73	20.72	3939.92		
6	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	10.14	10.16	10.19	10.16	20.02	20.11	20.09	20.07	3943.81		
7	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.15	10.10	10.19	10.15	20.18	20.15	20.23	20.19	3841.16		
8	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	10.11	10.18	10.14	20.25	20.35	20.20	20.27	3932.65		
9	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	10.13	10.17	10.13	20.20	20.20	20.18	20.19	3850.87		
10	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	10.11	10.19	10.14	20.22	20.18	20.19	20.20	3865.29		
11	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.11	10.10	10.18	10.13	20.20	20.24	20.21	20.22	3892.73		
12	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	10.12	10.18	10.15	20.24	20.20	20.22	20.22	3885.46		

4.4.2. Resistencia a la compresión

En las del Tablas 84 al 93 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para los testigos cilíndricos correspondientes al concreto control, al concreto con sustitución parcial de arena, al concreto con sustitución parcial de cemento y al concreto con adición de biochar. Cada dosificación fue evaluada mediante 03 muestras ensayadas a los 3 días, 03 muestras ensayadas a los 7 días y 06 muestras ensayadas a los 28 días de curado, cuyos valores individuales permitieron obtener un promedio, el cual se consideró como el resultado final del análisis. Esta información facilita la comparación del desempeño mecánico entre las diferentes mezclas y permite identificar cómo influyen las modificaciones realizadas en la resistencia del concreto. La Figura 127 muestra los tipos de fracturas o falla que pueden presentarse en especímenes cilíndricos de concreto durante el ensayo de resistencia a la compresión.

Figura 124

Esquema de los patrones de tipos de fracturas – adaptado de la NTP 339.034 (2015)

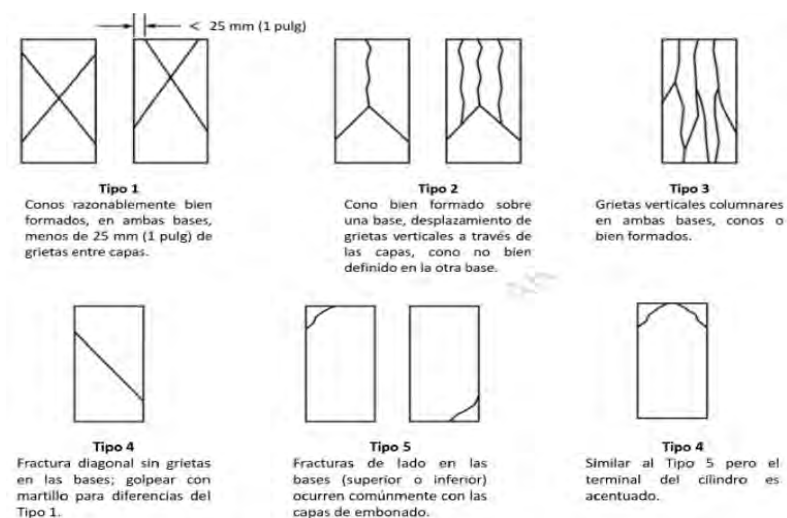


Tabla 84

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto control

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										0		
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla
1	Control	07-07-25	10-07-25	3	10.17	20.72	81.20	3860.01	1682.10	2.29	19202	8709.88	107.27	104.03	51.08	3
2	Control	07-07-25	10-07-25	3	10.15	20.27	80.90	3871.93	1639.53	2.36	18585	8430.01	104.21		49.62	3
3	Control	07-07-25	10-07-25	3	10.09	20.00	79.97	3875.21	1599.41	2.42	17740	8046.73	100.62		47.91	3
4	Control	07-07-25	14-07-25	7	10.12	20.02	80.47	3890.56	1610.70	2.42	29073	13187.29	163.88	160.23	78.04	2
5	Control	07-07-25	14-07-25	7	10.17	20.78	81.25	3985.32	1688.08	2.36	29097	13198.18	162.44		77.35	3
6	Control	07-07-25	14-07-25	7	10.22	20.81	82.08	3986.21	1707.85	2.33	27936	12671.56	154.38		73.51	3
7	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.11	20.11	80.30	3852.01	1615.17	2.38	38587	17502.77	217.96	220.30	103.79	3
8	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.10	20.00	80.13	3811.93	1602.58	2.38	38667	17539.06	218.89		104.23	3
9	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.12	20.03	80.40	3845.21	1610.39	2.39	40641	18434.45	229.29		109.18	3
10	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.17	20.72	81.21	4016.46	1682.86	2.39	40627	18428.10	226.93	217.21	108.06	3
11	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.17	20.72	81.25	3995.67	1683.48	2.37	37892	17187.52	211.54		100.73	3
12	Control	07-07-25	04-08-25	28	10.19	20.80	81.47	4013.29	1694.90	2.37	39015	17696.91	217.21		103.43	3

Tabla 85

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										10		
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla
1	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	10.13	20.22	80.55	3785.14	1628.51	2.32	18820	8536.61	105.98	106.18	50.46	3
2	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	10.14	20.26	80.78	3795.28	1636.24	2.32	19058	8644.56	107.02		50.96	3
3	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	10.15	20.22	80.89	3790.75	1635.81	2.32	18821	8537.06	105.54		50.26	2
4	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	20.20	80.83	3810.35	1632.58	2.33	28917	13116.53	162.27	160.81	77.27	2
5	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	20.15	80.93	3808.23	1630.73	2.34	29025	13165.52	162.68		77.47	2
6	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	10.16	20.27	81.00	3814.66	1642.22	2.32	28126	12757.74	157.50		75.00	2
7	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.18	20.28	81.45	3839.94	1651.45	2.33	39647	17983.58	220.80	221.04	105.14	3
8	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.17	20.27	81.18	3822.40	1645.89	2.32	40848	18528.34	228.22		108.68	2
9	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.15	20.39	80.97	3852.86	1650.91	2.33	38809	17603.47	217.42		103.53	3
10	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	20.27	81.02	3841.35	1642.28	2.34	38109	17285.95	213.35	215.68	101.60	3
11	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.14	20.30	80.75	3882.74	1639.04	2.37	38398	17417.04	215.68		102.70	3
12	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	10.14	20.28	80.76	3848.26	1637.54	2.35	41084	18635.39	230.75		109.88	3

Tabla 86

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%

f'c (kgf/cm2): 210										Biochar (BC) (%): 15						
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla
1	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	10.17	20.32	81.20	3715.78	1649.73	2.25	17173	7789.54	95.93	98.67	45.68	3
2	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	10.12	20.20	80.51	3721.37	1626.31	2.29	17387	7886.61	97.96		46.65	2
3	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	10.13	20.14	80.56	3718.89	1622.44	2.29	18136	8226.35	102.12		48.63	2
4	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	20.22	80.83	3783.93	1634.46	2.32	27488	12468.35	154.25	158.53	73.45	3
5	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	10.16	20.25	81.08	3785.62	1642.11	2.31	28101	12746.40	157.21		74.86	3
6	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	20.84	80.94	3786.21	1686.79	2.24	29288	13284.81	164.13		78.16	2
7	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.13	20.12	80.56	3759.80	1621.10	2.32	39386	17865.19	221.77	211.76	105.60	3
8	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.14	20.30	80.69	3752.77	1638.02	2.29	37292	16915.37	209.63		99.82	3
9	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	20.29	81.01	3798.00	1643.79	2.31	37892	17187.52	212.15		101.03	3
10	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.13	20.20	80.52	3694.91	1626.15	2.27	38158	17308.18	214.97	210.59	102.37	3
11	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	20.36	81.09	3776.48	1651.35	2.29	36017	16337.04	201.46		95.93	3
12	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	10.14	20.30	80.79	3783.44	1639.69	2.31	37506	17012.44	210.59		100.28	2

Tabla 87

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%

f'c (kgf/cm2): 210									Biochar (BC) (%): 20							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla
1	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	10.17	20.29	81.26	3710.84	1648.86	2.25	16998	7710.16	94.88	92.89	45.18	2
2	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	10.15	20.30	80.89	3712.65	1642.39	2.26	16696	7573.18	93.62		44.58	2
3	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	10.15	20.31	80.96	3710.12	1644.49	2.26	16094	7300.12	90.17		42.94	4
4	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	20.29	80.84	3710.68	1640.34	2.26	26321	11939.00	147.68	145.73	70.32	2
5	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	10.15	20.37	80.90	3716.11	1647.62	2.26	25627	11624.21	143.69		68.42	2
6	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	10.12	20.27	80.38	3715.21	1628.99	2.28	25840	11720.83	145.82		69.44	3
7	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	20.32	81.13	3742.30	1648.60	2.27	36932	16752.07	206.48	203.48	98.32	2
8	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.15	20.37	80.96	3742.30	1648.81	2.27	34820	15794.09	195.09		92.90	3
9	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.16	20.36	81.02	3760.68	1649.30	2.28	37420	16973.43	209.50		99.76	3
10	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.14	20.33	80.72	3721.69	1640.82	2.27	35743	16212.75	200.85	205.49	95.64	3
11	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.15	20.31	80.84	3754.78	1641.85	2.29	36622	16611.46	205.49		97.85	3
12	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	10.15	20.32	80.86	3750.53	1643.25	2.28	36271	16452.25	203.48		96.89	3

Tabla 88

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										1				
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla		
1	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.09	20.00	79.94	3779.99	1598.88	2.36	20705	9391.63	117.48	116.09	55.94	3		
2	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.13	20.07	80.65	3778.64	1618.98	2.33	20336	9224.25	114.37		54.46	3		
3	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.16	20.09	81.09	3780.79	1628.81	2.32	20811	9439.71	116.41		55.43	2		
4	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	20.75	81.56	3988.37	1692.06	2.36	29100	13199.54	161.84	167.12	77.07	3		
5	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	20.70	81.56	3985.98	1687.98	2.36	30267	13728.88	168.33		80.16	3		
6	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.22	20.75	82.09	3970.79	1703.03	2.33	30980	14052.29	171.19		81.52	3		
7	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.15	80.73	3798.47	1626.66	2.34	38394	17415.23	215.73	220.53	102.73	3		
8	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.19	80.79	3860.77	1630.80	2.37	38885	17637.94	218.33		103.97	3		
9	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.15	20.15	80.87	3849.18	1629.82	2.36	39916	18105.59	223.88		106.61	3		
10	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.16	80.83	3865.13	1629.24	2.37	39536	17933.23	221.87		105.65	3		
11	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.15	80.73	3824.65	1626.93	2.35	39156	17760.86	220.01		104.77	3		
12	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.16	80.78	3858.36	1628.27	2.37	39776	18042.09	223.35		106.36	3		

Tabla 89

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										2				
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla		
1	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	10.11	20.17	80.33	3789.59	1619.99	2.34	20378	9243.31	115.07	115.51	54.79	2		
2	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	20.20	80.82	3788.47	1632.79	2.32	20814	9441.07	116.82		55.63	2		
3	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	20.10	80.72	3785.99	1622.15	2.33	20403	9254.65	114.66		54.60	3		
4	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	20.70	81.04	3945.16	1677.28	2.35	29980	13598.70	167.80	163.85	79.90	6		
5	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	10.18	20.74	81.43	3948.68	1688.59	2.34	29157	13225.39	162.41		77.34	5		
6	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	10.17	20.79	81.17	3938.32	1687.50	2.33	28872	13096.12	161.34		76.83	3		
7	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	20.09	80.16	3778.09	1610.70	2.35	38670	17540.42	218.82	218.81	104.20	2		
8	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.15	80.51	3811.84	1622.55	2.35	38426	17429.74	216.49		103.09	3		
9	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.22	80.36	3833.99	1624.54	2.36	39171	17767.67	221.11		105.29	3		
10	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.19	80.39	3825.22	1622.77	2.36	38930	17658.35	219.66		104.60	2		
11	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.18	80.44	3818.39	1623.47	2.35	38799	17598.93	218.79		104.19	3		
12	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.19	80.36	3800.16	1622.67	2.34	38613	17514.56	217.96		103.79	3		

Tabla 90

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										3		
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla
1	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.12	20.15	80.39	3789.19	1619.83	2.34	19033	8633.22	107.39	109.82	51.14	2
2	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.12	20.14	80.50	3794.05	1621.00	2.34	19388	8794.25	109.25		52.02	3
3	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.11	20.03	80.35	3792.54	1609.60	2.36	19985	9065.04	112.83		53.73	3
4	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	20.73	81.53	3962.42	1689.87	2.34	27091	12288.27	150.72	155.52	71.77	1
5	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.17	20.73	81.23	3941.16	1683.69	2.34	27790	12605.33	155.18		73.89	2
6	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.17	20.67	81.29	3998.37	1680.46	2.38	28790	13058.92	160.65		76.50	3
7	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	20.22	80.54	3847.96	1628.83	2.36	37902	17192.06	213.45	217.59	101.64	3
8	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.08	80.46	3800.03	1615.69	2.35	38591	17504.58	217.55		103.59	3
9	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.09	20.15	79.97	3811.11	1611.56	2.36	39096	17733.65	221.77		105.60	3
10	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.11	20.18	80.21	3830.53	1618.34	2.37	38671	17540.87	218.69	216.12	104.14	3
11	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	20.16	80.12	3825.81	1615.19	2.37	38498	17462.40	217.96		103.79	3
12	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.10	20.17	80.17	3840.38	1616.79	2.38	38199	17326.77	216.12		102.92	3

Tabla 91

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										1		
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla
1	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.15	20.03	80.92	3858.09	1621.08	2.38	21114	9577.15	118.35	120.53	56.36	3
2	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.18	20.15	81.39	3860.18	1639.96	2.35	22093	10021.22	123.13		58.63	3
3	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10.16	20.12	81.09	3878.25	1631.51	2.38	21474	9740.44	120.12		57.20	3
4	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.18	20.73	81.44	3978.65	1688.54	2.36	29996	13605.96	167.07	167.70	79.56	3
5	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	20.80	81.57	3985.69	1696.63	2.35	29254	13269.39	162.68		77.47	3
6	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	20.22	81.04	3988.19	1638.92	2.43	30972	14048.66	173.35		82.55	3
7	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.25	80.71	3916.41	1634.31	2.40	40149	18211.28	225.65	225.37	107.45	3
8	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.28	80.71	3906.83	1636.46	2.39	40498	18369.58	227.61		108.39	3
9	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	20.25	80.66	3892.33	1633.18	2.38	39630	17975.87	222.85		106.12	3
10	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	20.26	80.56	3910.25	1632.11	2.40	40186	18228.06	226.27	225.11	107.75	3
11	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.25	80.73	3898.32	1634.47	2.39	40064	18172.72	225.11		107.20	3
12	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.27	80.43	3902.59	1630.06	2.39	39847	18074.30	224.72		107.01	3

Tabla 92

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										3				
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla		
1	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.12	20.18	80.46	3809.28	1624.00	2.35	22037	9995.82	124.23	125.10	59.16	3		
2	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.14	20.15	80.81	3805.11	1628.27	2.34	21785	9881.51	122.28		58.23	2		
3	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10.12	20.19	80.49	3800.96	1624.91	2.34	22856	10367.31	128.80		61.33	3		
4	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.20	20.73	81.63	3938.06	1692.25	2.33	32216	14612.93	179.01	177.89	85.24	3		
5	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	20.78	81.58	3940.19	1695.60	2.32	32389	14691.40	180.08		85.75	3		
6	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	20.20	81.00	3931.68	1636.28	2.40	31177	14141.65	174.58		83.13	3		
7	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.20	80.73	3844.90	1630.43	2.36	41443	18798.23	232.86	235.97	110.89	3		
8	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.12	20.14	80.36	3830.29	1618.65	2.37	42700	19368.39	241.03		114.78	3		
9	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.16	20.25	81.14	3870.72	1643.03	2.36	41859	18986.92	234.01		111.43	3		
10	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.15	20.17	80.93	3850.65	1632.73	2.36	42280	19177.89	236.95		112.84	3		
11	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.18	80.72	3862.98	1628.98	2.37	42072	19083.54	236.41		112.58	3		
12	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.17	80.76	3835.54	1628.92	2.35	41758	18941.11	234.54		111.68	3		

Tabla 93

Resistencia a la compresión de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										5			
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Hp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Tipo de falla	
1	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10.16	20.27	81.03	3841.31	1642.22	2.34	21410	9711.41	119.85	120.98	57.07	3	
2	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10.16	20.20	81.01	3842.49	1636.23	2.35	21040	9543.58	117.80		56.10	3	
3	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10.11	20.15	80.22	3845.95	1616.25	2.38	22159	10051.15	125.29		59.66	3	
4	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	10.19	20.73	81.48	3941.16	1689.31	2.33	29513	13386.87	164.30	169.91	78.24	3	
5	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	20.72	81.12	3939.92	1680.45	2.34	30452	13812.79	170.28		81.09	3	
6	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	10.16	20.07	81.13	3943.81	1628.58	2.42	31329	14210.60	175.15		83.41	3	
7	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.15	20.19	80.88	3841.16	1632.73	2.35	40504	18372.31	227.15	230.43	108.17	3	
8	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.27	80.74	3932.65	1636.30	2.40	41893	19002.35	235.36		112.07	2	
9	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	20.19	80.64	3850.87	1628.45	2.36	40676	18450.32	228.79		108.95	3	
10	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.14	20.20	80.79	3865.29	1631.61	2.37	41003	18598.65	230.22		109.63	3	
11	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.13	20.22	80.60	3892.73	1629.36	2.39	41199	18687.55	231.87		110.41	2	
12	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	10.15	20.22	80.84	3885.46	1634.68	2.38	40852	18530.16	229.21		109.15	3	

Figura 125

Comparación de los resultados de las resistencias a compresión en testigos cilíndricos – 3 días

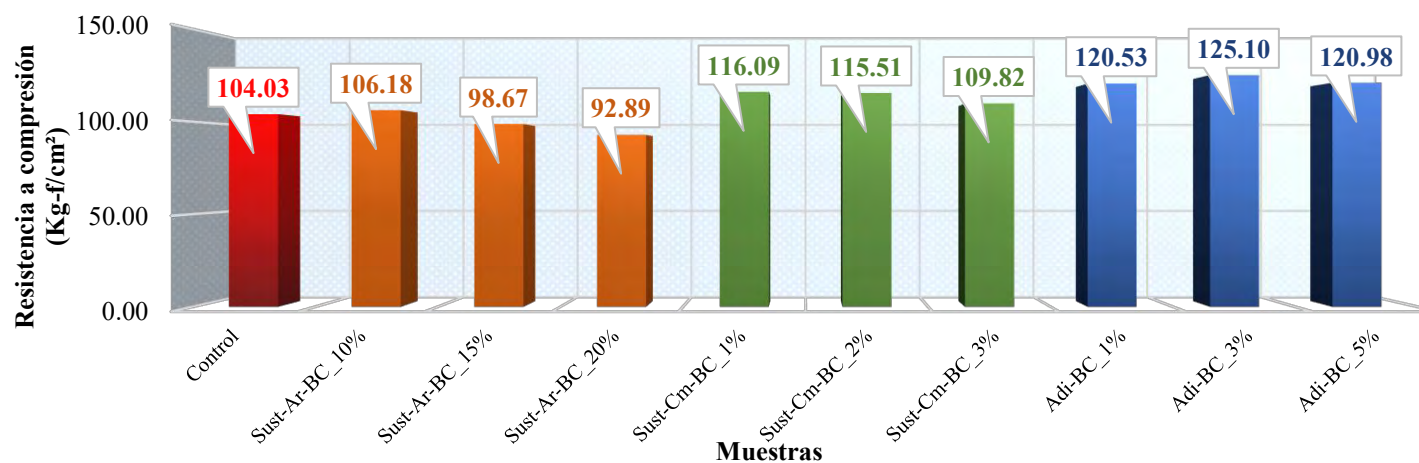


Figura 126

Comparación de los resultados de las resistencias a compresión en testigos cilíndricos – 7 días

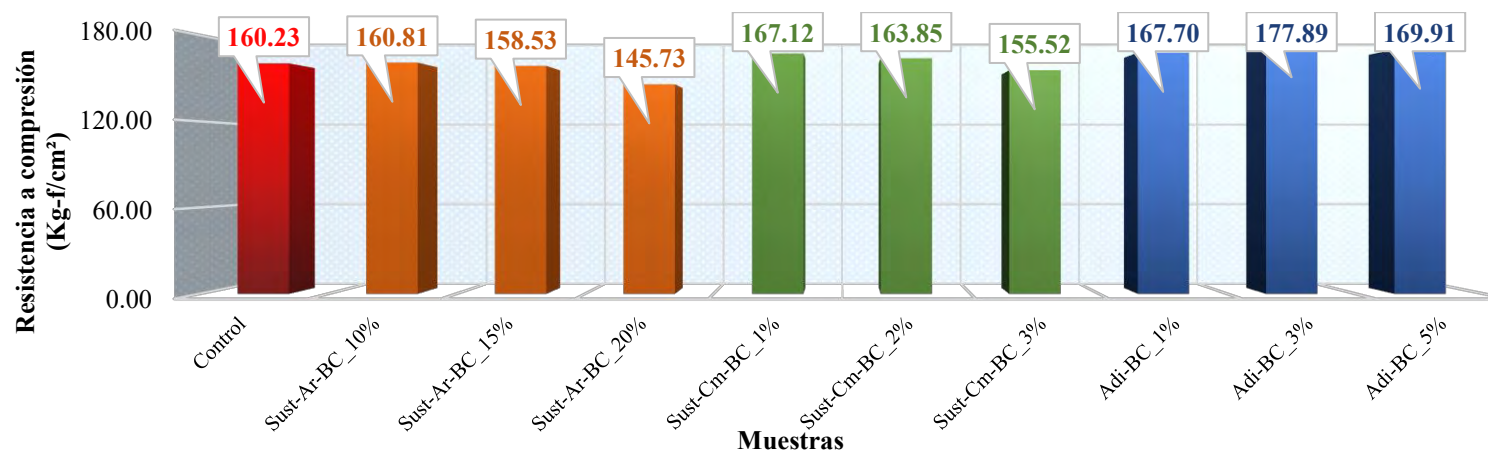
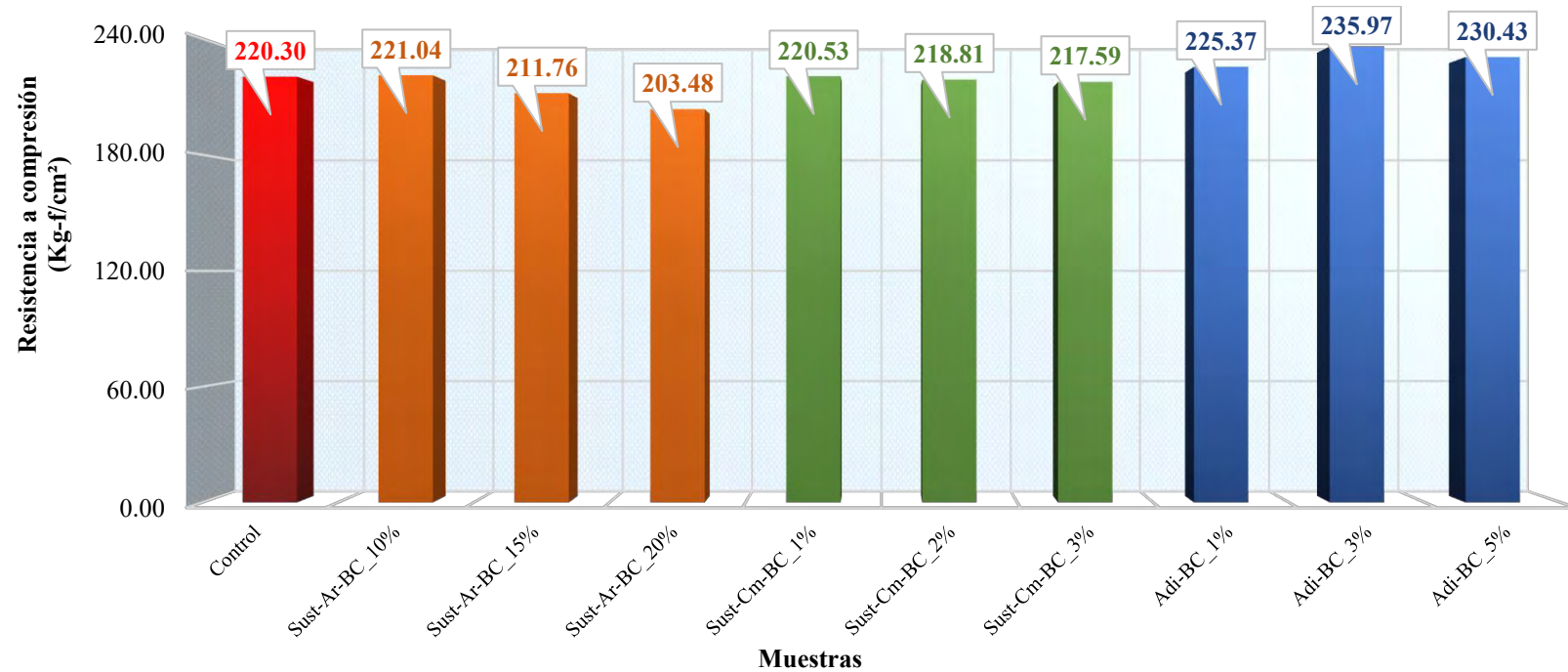


Figura 127

Comparación de los resultados de las resistencias a compresión en testigos cilíndricos – 28 días



4.4.3. Dimensionamiento de testigos cilíndricos para tracción

En las Tablas del 94 al 103 se presentan los dimensionamientos de los testigos cilíndricos correspondientes al concreto control, concreto con sustitución parcial de arena, concreto con sustitución parcial de cemento y concreto con adición de biochar, elaborados para el ensayo de resistencia a la tracción indirecta. En cada dosificación se elaboraron 03 muestras para ensayarlas a los 7 días de curado y otras 03 muestras para ensayarlas a los 28 días de curado.

Tabla 94

Dimensionamiento de briquetas del concreto control para tracción indirecta

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		0					
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Control	08-07-25	15-07-25	7	10.09	10.12	10.19	10.13	20.05	20.10	20.10	20.08	3948.37
2	Control	08-07-25	15-07-25	7	10.07	10.17	10.19	10.14	20.12	20.15	20.08	20.12	3915.55
3	Control	08-07-25	15-07-25	7	10.13	10.14	10.19	10.15	20.11	20.12	20.20	20.14	3942.22
4	Control	08-07-25	05-08-25	28	10.13	10.13	10.19	10.15	20.12	20.28	20.12	20.17	3951.28
5	Control	08-07-25	05-08-25	28	10.13	10.12	10.19	10.15	20.12	20.25	20.11	20.16	3917.88
6	Control	08-07-25	05-08-25	28	10.14	10.13	10.18	10.15	20.25	20.15	20.18	20.19	3950.15

Tabla 95

Dimensionamiento de briquetas concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10% para tracción indirecta

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		10					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	15-07-25	7	10.15	10.18	10.19	10.17	20.30	20.35	20.33	20.33	3799.67
2	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	15-07-25	7	10.16	10.14	10.19	10.16	20.30	20.32	20.33	20.32	3805.41
3	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	15-07-25	7	10.15	10.12	10.19	10.15	20.32	20.30	20.33	20.32	3789.61
4	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	05-08-25	28	10.12	10.10	10.18	10.13	20.21	20.24	20.28	20.24	3795.40
5	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	05-08-25	28	10.13	10.14	10.20	10.15	20.36	20.30	20.38	20.35	3815.71
6	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	05-08-25	28	10.14	10.12	10.19	10.15	20.32	20.31	20.36	20.33	3794.69

Tabla 96

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15% para tracción indirecta

		f'c (kgf/cm2): 210				Biochar (BC) (%): 15							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	15-07-25	7	10.12	10.10	10.17	10.13	20.30	20.40	20.30	20.33	3769.38
2	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	15-07-25	7	10.12	10.13	10.18	10.14	20.30	20.31	20.31	20.31	3775.97
3	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	15-07-25	7	10.14	10.11	10.18	10.15	20.48	20.35	20.40	20.41	3794.11
4	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	05-08-25	28	10.14	10.13	10.20	10.15	20.32	20.31	20.31	20.31	3787.15
5	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	05-08-25	28	10.13	10.15	10.18	10.15	20.35	20.35	20.31	20.34	3756.42
6	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	05-08-25	28	10.14	10.14	10.20	10.16	20.30	20.40	20.40	20.37	3802.66

Tabla 97

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20% para tracción indirecta

		f'c (kgf/cm2): 210				Biochar (BC) (%): 20							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	15-07-25	7	10.18	10.17	10.19	10.18	20.51	20.48	20.55	20.51	3716.17
2	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	15-07-25	7	10.16	10.16	10.20	10.17	20.50	20.50	20.50	20.50	3747.28
3	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	15-07-25	7	10.18	10.19	10.20	10.19	20.50	20.50	20.52	20.51	3721.54
4	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	05-08-25	28	10.16	10.15	10.20	10.17	20.55	20.50	20.54	20.53	3722.04
5	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	05-08-25	28	10.11	10.16	10.19	10.16	20.42	20.52	20.45	20.46	3737.46
6	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	05-08-25	28	10.12	10.16	10.20	10.16	20.41	20.56	20.48	20.48	3758.77

Tabla 98

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1% para tracción indirecta

		f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 1									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.12	10.15	10.16	10.14	20.22	20.20	20.21	20.21	3805.72
2	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.16	10.10	10.15	10.14	20.40	20.12	20.21	20.24	3834.81
3	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.13	10.13	10.18	10.15	20.22	20.35	20.30	20.29	3852.71
4	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.14	10.12	10.20	10.15	20.31	20.25	20.12	20.23	3798.47
5	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	10.13	10.18	10.15	20.31	20.21	20.22	20.25	3860.77
6	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.14	10.14	10.20	10.16	20.35	20.37	20.34	20.35	3849.18

Tabla 99

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2% para tracción indirecta

		f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 2									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	22-07-25	7	10.13	10.14	10.17	10.14	20.20	20.20	20.30	20.23	3824.08
2	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	22-07-25	7	10.11	10.12	10.18	10.14	20.20	20.20	20.30	20.23	3816.34
3	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	22-07-25	7	10.15	10.10	10.18	10.15	20.22	20.29	20.26	20.26	3839.88
4	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	10.14	10.19	10.16	20.28	20.40	20.20	20.29	3847.96
5	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	10.14	10.20	10.15	20.28	20.26	20.29	20.28	3800.03
6	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	10.14	10.19	10.15	20.27	20.35	20.30	20.31	3811.11

Tabla 100

Dimensionamiento de briquetas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3% para tracción indirecta

		f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 3									
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.07	10.09	10.13	10.10	20.13	20.11	20.05	20.10	3830.13
2	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.16	10.10	10.13	10.13	20.00	20.05	20.12	20.06	3800.04
3	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	10.08	10.14	10.12	20.08	20.12	20.09	20.10	3783.92
4	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.11	10.12	10.16	10.13	20.12	20.12	20.12	20.12	3778.09
5	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.11	10.10	10.13	10.11	20.10	20.10	20.20	20.13	3811.84
6	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.11	10.10	10.16	10.12	20.11	20.18	20.15	20.15	3833.99

Tabla 101

Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1% para tracción indirecta

		f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 1									
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Adi-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.11	10.14	10.17	10.14	20.30	20.22	20.28	20.27	3876.25
2	Adi-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.15	10.11	10.17	10.14	20.32	20.31	20.33	20.32	3896.78
3	Adi-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.18	10.13	10.17	10.16	20.38	20.35	20.39	20.37	3910.19
4	Adi-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	10.13	10.20	10.15	20.35	20.18	20.34	20.29	3916.41
5	Adi-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.14	10.14	10.19	10.16	20.18	20.25	20.31	20.25	3906.83
6	Adi-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.12	10.13	10.19	10.15	20.25	20.32	20.18	20.25	3892.33

Tabla 102

Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3% para tracción indirecta

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		3					
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Adi-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.13	10.11	10.17	10.14	20.18	20.23	20.20	20.20	3866.45
2	Adi-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.13	10.14	10.17	10.14	20.35	20.28	20.25	20.29	3825.99
3	Adi-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.17	10.16	10.18	10.17	20.28	20.40	20.32	20.33	3858.83
4	Adi-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.12	10.14	10.19	10.15	20.15	20.30	20.22	20.22	3844.90
5	Adi-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.18	10.15	10.20	10.17	20.38	20.28	20.30	20.32	3830.29
6	Adi-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	10.14	10.21	10.16	20.18	20.31	20.18	20.22	3870.72

Tabla 103

Dimensionamiento de briquetas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5% para tracción indirecta

f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		5					
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Diámetro (D) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (g)
					D1	D2	D3	Dpromedio	L1	L2	L3	Lpromedio	
1	Adi-BC_5%	15-07-25	22-07-25	7	10.11	10.16	10.19	10.15	20.40	20.30	20.35	20.35	3835.69
2	Adi-BC_5%	15-07-25	22-07-25	7	10.19	10.10	10.18	10.16	20.35	20.40	20.21	20.32	3870.14
3	Adi-BC_5%	15-07-25	22-07-25	7	10.12	10.14	10.17	10.14	20.38	20.35	20.30	20.34	3900.05
4	Adi-BC_5%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	10.13	10.19	10.16	20.39	20.45	20.40	20.41	3841.16
5	Adi-BC_5%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	10.14	10.21	10.16	20.30	20.45	20.38	20.38	3932.65
6	Adi-BC_5%	15-07-25	12-08-25	28	10.12	10.13	10.19	10.15	20.39	20.32	20.38	20.36	3850.87

4.4.4. Resistencia a la tracción indirecta

En las Tablas del 104 al 113 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta por compresión diametral para los testigos cilíndricos correspondientes al concreto control, al concreto con sustitución parcial de arena, al concreto con sustitución parcial de cemento y al concreto con adición de biochar. Cada dosificación fue evaluada mediante 03 muestras ensayadas a los 7 días y 03 muestras ensayadas a los 28 días de curado, cuyos valores individuales permitieron obtener un promedio, el cual se consideró como el resultado final del análisis. Esta información facilita la comparación del desempeño mecánico entre las diferentes mezclas y permite identificar cómo influyen las modificaciones realizadas en la resistencia a la tracción indirecta de la briqueta cilíndrica.

Tabla 104

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto control

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										0	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción prom. (Kgf/cm2)	
1	Control	08-07-25	15-07-25	7	10.13	20.08	80.66	3948.37	1619.90	2.44	8259	3746.22	11.72	11.22	
2	Control	08-07-25	15-07-25	7	10.14	20.12	80.81	3915.55	1625.58	2.41	7527	3414.19	10.65		
3	Control	08-07-25	15-07-25	7	10.15	20.14	80.96	3942.22	1630.83	2.42	8003	3630.10	11.30		
4	Control	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.17	80.88	3951.28	1631.66	2.42	16693	7571.82	23.55	23.27	
5	Control	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.16	80.87	3917.88	1630.36	2.40	15635	7091.92	22.07		
6	Control	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.19	80.88	3950.15	1633.27	2.42	17168	7787.27	24.19		

Tabla 105

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):											10
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)	
1	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	15-07-25	7	10.17	20.33	81.28	3799.67	1652.06	2.30	9045	4102.74	12.63		
2	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	15-07-25	7	10.16	20.32	81.06	3805.41	1646.92	2.31	9546	4329.99	13.36		
3	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	15-07-25	7	10.15	20.32	80.98	3789.61	1645.30	2.30	9946	4511.43	13.92		
4	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	05-08-25	28	10.13	20.24	80.65	3795.40	1632.70	2.32	17419	7901.13	24.52		
5	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.35	80.98	3815.71	1647.73	2.32	15975	7246.14	22.33		
6	Sust-Ar-BC_10%	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.33	80.89	3794.69	1644.43	2.31	16554	7508.77	23.17		

Tabla 106

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):											15
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)	
1	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	15-07-25	7	10.13	20.33	80.62	3769.38	1639.20	2.30	10602	4808.99	14.86		
2	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	15-07-25	7	10.14	20.31	80.76	3775.97	1640.07	2.30	9733	4414.81	13.65		
3	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	15-07-25	7	10.15	20.41	80.85	3794.11	1650.15	2.30	10136	4597.61	14.13		
4	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.31	80.95	3787.15	1644.38	2.30	18293	8297.57	25.61		
5	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	05-08-25	28	10.15	20.34	80.90	3756.42	1645.19	2.28	16748	7596.76	23.43		
6	Sust-Ar-BC_15%	08-07-25	05-08-25	28	10.16	20.37	81.07	3802.66	1651.19	2.30	17001	7711.52	23.73		

Tabla 107

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):											20	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)		
1	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	15-07-25	7	10.18	20.51	81.34	3716.17	1668.54	2.23	9031	4096.39	12.49	13.08		
2	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	15-07-25	7	10.17	20.50	81.24	3747.28	1665.49	2.25	9439	4281.46	13.07			
3	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	15-07-25	7	10.19	20.51	81.51	3721.54	1671.50	2.23	9901	4491.02	13.69			
4	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	05-08-25	28	10.17	20.53	81.23	3722.04	1667.60	2.23	15809	7170.84	21.87	22.26		
5	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	05-08-25	28	10.16	20.46	81.00	3737.46	1657.61	2.25	16475	7472.93	22.89			
6	Sust-Ar-BC_20%	08-07-25	05-08-25	28	10.16	20.48	81.09	3758.77	1660.98	2.26	15864	7195.79	22.01			

Tabla 108

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):											1	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)		
1	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.21	80.74	3805.72	1631.72	2.33	7960	3610.60	11.22	10.73		
2	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.24	80.67	3834.81	1633.12	2.35	7300	3311.22	10.27			
3	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.15	20.29	80.87	3852.71	1640.77	2.35	7632	3461.82	10.70			
4	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.23	80.96	3798.47	1637.47	2.32	16471	7471.12	23.16	23.66		
5	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.25	80.85	3860.77	1636.94	2.36	17161	7784.10	24.12			
6	Sust-Cm-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	20.35	81.07	3849.18	1650.11	2.33	16977	7700.64	23.71			

Tabla 109

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%

		f'c (kgf/cm2):		Biochar (BC) (%):											
		210		2											
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)	
1	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.23	80.82	3824.08	1635.22	2.34	6625	3005.05	9.32		
2	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.23	80.73	3816.34	1633.39	2.34	6311	2862.62	8.88	8.95	
3	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	22-07-25	7	10.15	20.26	80.83	3839.88	1637.43	2.35	6150	2789.59	8.64		
4	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	20.29	81.10	3847.96	1645.79	2.34	18379	8336.57	25.74		
5	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.28	80.97	3800.03	1641.74	2.31	17944	8139.26	25.17	24.81	
6	Sust-Cm-BC_2%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.31	80.95	3811.11	1643.84	2.32	16785	7613.55	23.51		

Tabla 110

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%

		f'c (kgf/cm2):		Biochar (BC) (%):											
		210		3											
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)	
1	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.10	20.10	80.07	3830.13	1609.16	2.38	7130	3234.11	10.15		
2	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.13	20.06	80.61	3800.04	1616.68	2.35	6626	3005.50	9.42	9.94	
3	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.12	20.10	80.47	3783.92	1617.24	2.34	7235	3281.74	10.27		
4	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.13	20.12	80.57	3778.09	1621.04	2.33	16682	7566.83	23.64		
5	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.11	20.13	80.32	3811.84	1617.21	2.36	16219	7356.81	23.00	23.98	
6	Sust-Cm-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.12	20.15	80.48	3833.99	1621.37	2.36	17876	8108.42	25.31		

Tabla 111

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										1	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)	
1	Adi-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.27	80.75	3876.25	1636.62	2.37	7568	3432.79	10.63	11.16	
2	Adi-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.32	80.81	3896.78	1642.01	2.37	8346	3785.68	11.69		
3	Adi-BC_1%	15-07-25	22-07-25	7	10.16	20.37	81.08	3910.19	1651.95	2.37	7996	3626.92	11.15		
4	Adi-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.29	80.98	3916.41	1643.03	2.38	18497	8390.10	25.93	25.48	
5	Adi-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	20.25	81.01	3906.83	1640.28	2.38	18680	8473.11	26.23		
6	Adi-BC_1%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.25	80.86	3892.33	1637.32	2.38	17288	7841.70	24.30		

Tabla 112

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										3	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kgf/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kgf/cm2)	
1	Adi-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.20	80.69	3866.45	1630.11	2.37	8075	3662.76	11.39	11.58	
2	Adi-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.29	80.81	3825.99	1639.96	2.33	8722	3956.23	12.24		
3	Adi-BC_3%	15-07-25	22-07-25	7	10.17	20.33	81.17	3858.83	1650.44	2.34	7966	3613.32	11.13		
4	Adi-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.22	80.94	3844.90	1636.88	2.35	17023	7721.50	23.94	22.80	
5	Adi-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.17	20.32	81.28	3830.29	1651.52	2.32	16235	7364.07	22.68		
6	Adi-BC_3%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	20.22	81.03	3870.72	1638.60	2.36	15492	7027.05	21.78		

Tabla 113

Resistencia a la tracción indirecta de briquetas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):										5	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Dp (cm)	Lp (cm)	Área (cm2)	Peso (g)	Volumen (cm3)	Densidad (g/cm3)	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Resistencia a tracción (Kg/cm2)	Resistencia a tracción promedio (Kg/cm2)	
1	Adi-BC_5%	15-07-25	22-07-25	7	10.15	20.35	80.99	3835.69	1648.11	2.33	8046	3649.60	11.24	11.68	
2	Adi-BC_5%	15-07-25	22-07-25	7	10.16	20.32	81.03	3870.14	1646.54	2.35	8379	3800.65	11.72		
3	Adi-BC_5%	15-07-25	22-07-25	7	10.14	20.34	80.83	3900.05	1644.32	2.37	8629	3914.05	12.07		
4	Adi-BC_5%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	20.41	81.06	3841.16	1654.76	2.32	16948	7687.48	23.60	22.74	
5	Adi-BC_5%	15-07-25	12-08-25	28	10.16	20.38	81.04	3932.65	1651.24	2.38	16515	7491.08	23.04		
6	Adi-BC_5%	15-07-25	12-08-25	28	10.15	20.36	80.88	3850.87	1646.91	2.34	15440	7003.47	21.58		

Figura 128

Comparación de los resultados de las resistencias a tracción indirecta en testigos cilíndricos - 7 días.

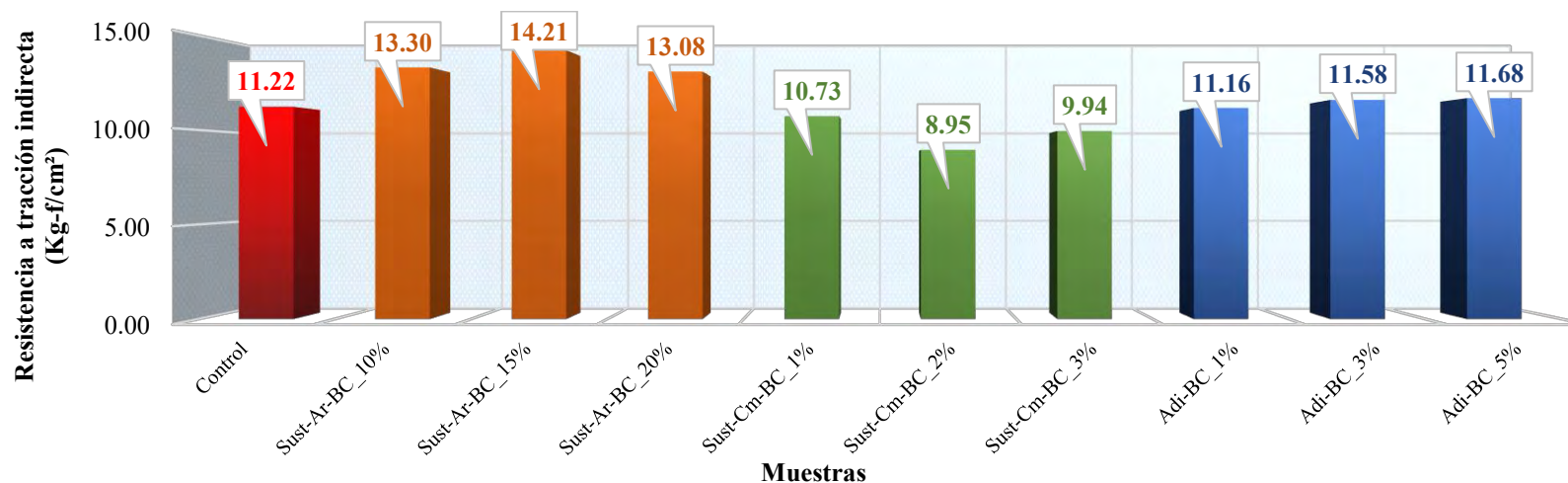
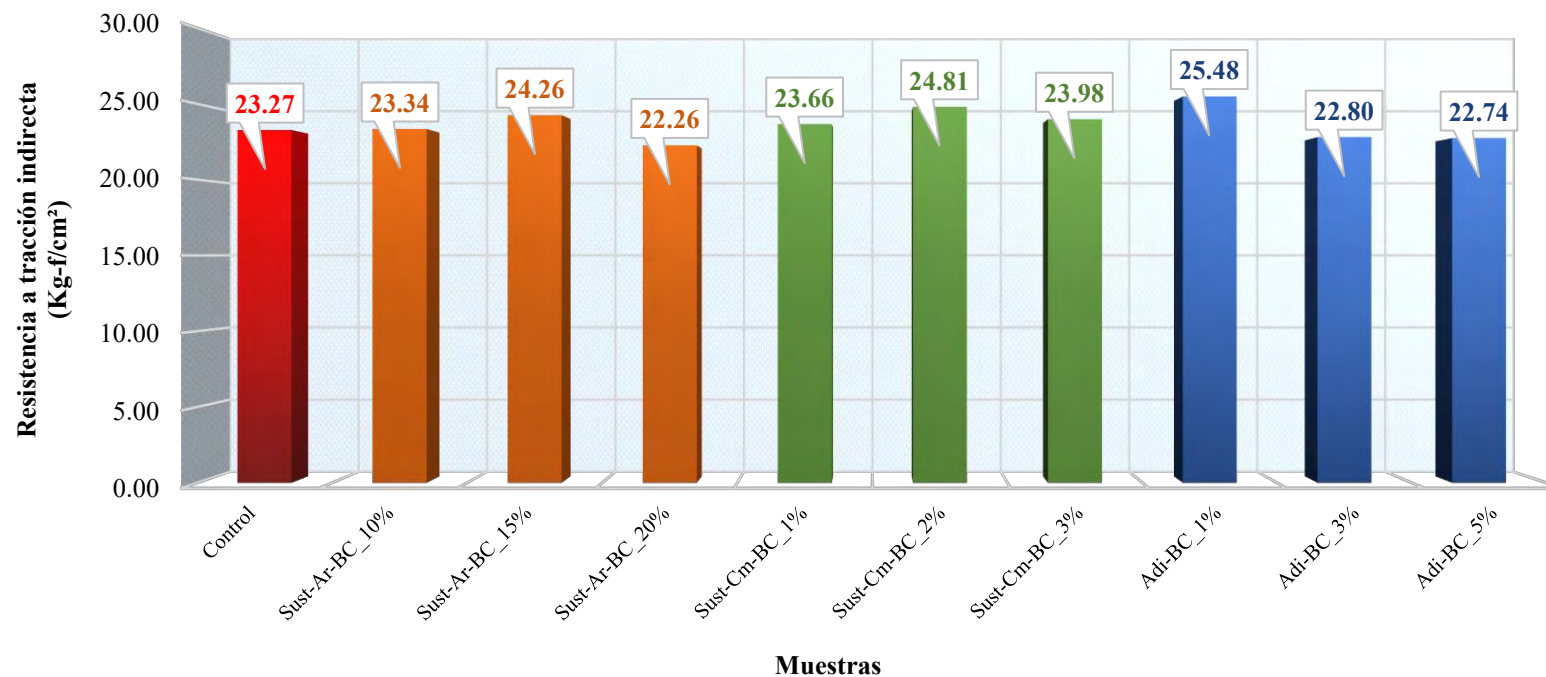


Figura 129

Comparación de los resultados de las resistencias a tracción indirecta en testigos cilíndricos - 28 días.



4.4.5. Dimensionamiento de vigas para flexión

En las Tablas del 114 al 123 se presentan los dimensionamientos de los testigos prismáticos (vigas) correspondientes al concreto control, concreto con sustitución parcial de arena, concreto con sustitución parcial de cemento y concreto con adición de biochar, elaborados para el ensayo de resistencia a la flexión. En cada dosificación se elaboraron 03 muestras para ensayarlas a los 28 días de curado.

Tabla 114

Dimensionamiento de vigas del concreto control

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):												0	
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)			Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)	
					B1 B1'	B2 B2'	B3 B3'	B Prom.	H1 H1'	H2 H2'	H3 H3'	H Prom.	L1	L2	L3		L Prom.
1	Control	10-07-25	07-08-25	28	15.00	15.02	15.02	15.01	15.40	15.42	15.26	15.11	59.65	59.80	59.90	59.78	33.100
					15.00	15.00	15.00		14.20	15.40	15.00						
2	Control	10-07-25	07-08-25	28	15.50	15.50	15.35	15.35	15.37	15.53	15.87	15.35	59.75	59.80	59.80	59.78	33.800
					15.20	15.25	15.30		14.35	15.45	15.50						
3	Control	10-07-25	07-08-25	28	14.90	15.00	14.90	14.99	15.53	15.55	15.59	15.45	59.80	59.80	59.72	59.77	32.700
					15.10	15.20	14.85		15.25	15.50	15.30						

Tabla 115

Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):												10	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)
					B1 B1'	B2 B2'	B3 B3'	B Prom.	H1 H1'	H2 H2'	H3 H3'	H Prom.	L1	L2	L3	L Prom.	
1	Sust-Ar-BC_10%	11-07-25	08-08-25	28	15.08	15.05	15.10	15.07	15.54	15.52	15.41	15.38	59.80	59.90	60.00	59.90	32.300
					15.00	15.00	15.20		15.40	15.45	14.98						
2	Sust-Ar-BC_10%	11-07-25	08-08-25	28	15.10	15.32	15.05	15.14	15.88	15.57	15.49	15.39	59.75	59.80	59.75	59.77	32.200
					15.00	15.25	15.10		15.18	15.24	15.00						
3	Sust-Ar-BC_10%	11-07-25	08-08-25	28	15.00	15.05	14.98	15.03	15.58	15.52	15.49	15.33	60.20	60.22	60.25	60.22	32.400
					14.95	15.20	15.00		15.33	15.05	15.00						

Tabla 116

Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%): 15													
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2	L3	L	
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.				Prom.	
1	Sust-Ar-BC_15%	11-07-25	08-08-25	28	15.00	15.10	15.10	15.12	15.61	15.54	15.42	15.50	59.80	59.78	59.78	59.79	31.800
					15.00	15.20	15.31		15.56	15.50	15.35						
2	Sust-Ar-BC_15%	11-07-25	08-08-25	28	15.21	15.20	15.21	15.15	15.70	15.51	15.71	15.51	59.90	59.80	59.70	59.80	32.000
					15.16	15.00	15.11		15.50	15.21	15.40						
3	Sust-Ar-BC_15%	11-07-25	08-08-25	28	15.23	15.22	15.20	15.21	15.35	15.54	15.94	15.44	60.05	59.91	59.78	59.91	32.600
					15.25	15.00	15.35		15.22	15.34	15.26						

Tabla 117

Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%): 20													
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2	L3	L	
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.				Prom.	
1	Sust-Ar-BC_20%	10-07-25	07-08-25	28	15.30	15.20	15.18	15.16	15.53	15.32	15.14	15.23	59.70	59.80	59.90	59.80	31.800
					15.00	15.06	15.24		15.08	15.14	15.18						
2	Sust-Ar-BC_20%	10-07-25	07-08-25	28	15.11	15.15	15.00	15.04	15.21	15.44	15.58	15.32	59.70	59.76	59.80	59.75	31.700
					15.00	15.00	14.98		15.18	15.29	15.24						
3	Sust-Ar-BC_20%	10-07-25	07-08-25	28	15.15	15.85	15.20	15.35	15.59	15.54	15.41	15.36	59.80	59.75	59.76	59.77	31.900
					15.48	15.16	15.26		15.60	15.02	15.00						

Tabla 118

Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1% para flexión

f'c (kgf/cm2):		Biochar (BC) (%):															
		210		1													
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2	L3	L	
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.				Prom.	
1	Sust-Cm-BC_1%	22-07-25	19-08-25	28	15.10	15.30	15.40	15.14	15.42	15.91	15.71	15.51	59.90	59.90	59.80	59.87	33.500
					15.00	15.00	15.06		15.36	15.12	15.52						
2	Sust-Cm-BC_1%	22-07-25	19-08-25	28	15.10	15.20	15.20	15.14	15.21	15.52	15.18	15.19	59.88	59.79	59.85	59.84	32.500
					15.05	15.12	15.16		15.00	15.00	15.22						
3	Sust-Cm-BC_1%	22-07-25	19-08-25	28	15.30	15.20	14.95	15.07	14.82	14.63	14.60	14.79	60.00	60.00	60.00	60.00	31.900
					15.00	15.00	14.99		15.00	14.95	14.75						

Tabla 119

Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2% para flexión

f'c (kgf/cm2):		Biochar (BC) (%):															
		210		2													
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2	L3	L	
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.				Prom.	
1	Sust-Cm-BC_2%	22-07-25	19-08-25	28	15.00	15.20	15.00	15.08	15.31	15.60	15.30	15.37	59.85	59.80	59.90	59.85	32.500
					15.10	15.00	15.20		15.30	15.40	15.28						
2	Sust-Cm-BC_2%	22-07-25	19-08-25	28	15.18	15.28	15.30	15.22	15.75	15.05	15.00	15.27	60.00	59.90	59.90	59.93	32.500
					15.15	15.25	15.16		15.65	15.00	15.15						
3	Sust-Cm-BC_2%	22-07-25	19-08-25	28	15.00	15.05	15.00	15.02	15.05	15.60	15.40	15.30	60.30	60.30	60.20	60.27	32.700
					15.04	15.00	15.00		15.00	15.40	15.35						

Tabla 120

Dimensionamiento de vigas de concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):														3	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)		
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2	L3	L			
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.				Prom.			
1	Sust-Cm-BC_3%	22-07-25	19-08-25	28	15.00	15.01	15.30	15.07	15.40	15.10	15.15	15.19	59.90	59.85	59.90	59.88	32.600		
					15.02	15.00	15.10		15.20	15.00	15.30								
2	Sust-Cm-BC_3%	22-07-25	19-08-25	28	15.20	15.00	15.00	15.06	15.20	15.51	15.20	15.28	59.90	59.90	59.85	59.88	32.700		
					15.10	15.05	15.00		15.30	15.25	15.20								
3	Sust-Cm-BC_3%	22-07-25	19-08-25	28	15.10	15.20	15.30	15.16	14.90	14.80	15.07	14.95	59.90	60.05	60.05	60.00	32.400		
					15.15	15.01	15.20		15.00	14.90	15.00								

Tabla 121

Dimensionamiento de vigas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):														1	
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)		
					B1 B1'	B2 B2'	B3 B3'	B Prom.	H1 H1'	H2 H2'	H3 H3'	H Prom.	L1	L2	L3	L Prom.			
1	Adi-BC_1%	23-07-25	20-08-25	28	15.35	15.35	15.20	15.22	15.70	16.00	15.60	15.68	59.90	60.00	59.70	59.87	33.500		
					15.20	15.20	15.00		15.55	15.60	15.60								
2	Adi-BC_1%	23-07-25	20-08-25	28	15.00	15.20	15.20	15.11	15.10	15.60	15.40	15.34	59.85	60.40	60.20	60.15	33.000		
					15.15	15.00	15.10		15.20	15.50	15.25								
3	Adi-BC_1%	23-07-25	20-08-25	28	15.15	15.23	15.30	15.21	14.85	15.00	14.85	14.93	59.80	60.00	59.95	59.92	32.400		
					15.20	15.25	15.10		14.90	14.95	15.01								

Tabla 122

Dimensionamiento de vigas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):		3											
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)				Altura(H) (cm)				Longitud (L) (cm)				Peso (kg)
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2	L3	L	
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.				Prom.	
1	Adi-BC_3%	23-07-25	20-08-25	28	15.10	15.30	15.00	15.12	15.40	16.00	15.40	15.50	59.90	59.90	59.80	59.87	33.000
					15.00	15.20	15.10		15.30	15.40	15.50						
2	Adi-BC_3%	23-07-25	20-08-25	28	15.30	15.40	15.40	15.25	15.20	15.10	15.20	15.08	60.00	59.90	59.90	59.93	32.700
					15.00	15.20	15.20		15.00	15.00	15.00						
3	Adi-BC_3%	23-07-25	20-08-25	28	15.20	15.20	15.35	15.19	15.40	15.90	15.70	15.52	59.80	60.00	59.80	59.87	33.300
					15.10	15.10	15.20		15.20	15.40	15.50						

Tabla 123

Dimensionamiento de vigas de concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5% para flexión

f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):		5											
N°	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de dimensión	Edad	Ancho (B) (cm)			Altura(H) (cm)			Longitud (L) (cm)				Peso (kg)		
					B1	B2	B3	B	H1	H2	H3	H	L1	L2		L3	L
					B1'	B2'	B3'	Prom.	H1'	H2'	H3'	Prom.					Prom.
1	Adi-BC_5%	23-07-25	20-08-25	28	15.35	15.40	15.35	15.30	15.10	14.90	14.90	14.98	60.00	59.90	60.10	60.00	32.500
					15.25	15.25	15.20		15.00	15.00	15.00						
2	Adi-BC_5%	23-07-25	20-08-25	28	15.35	15.25	15.00	15.13	15.15	15.60	15.35	15.27	60.10	59.80	59.80	59.90	32.500
					15.00	15.00	15.20		15.20	15.10	15.20						
3	Adi-BC_5%	23-07-25	20-08-25	28	15.00	15.10	15.05	15.05	15.40	15.70	15.30	15.42	60.00	59.80	59.80	59.87	32.700
					15.10	15.02	15.00		15.20	15.50	15.40						

4.4.6. Resistencia a la flexión

En las Tablas del 124 al 133 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a la flexión en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo correspondientes al concreto control, al concreto con sustitución parcial de arena, al concreto con sustitución parcial de cemento y al concreto con adición de biochar. Cada dosificación fue evaluada mediante 03 muestras ensayadas a los 28 días de curado, cuyos valores individuales permitieron obtener un promedio, el cual se consideró como el resultado final del análisis. Esta información facilita la comparación del desempeño mecánico entre las diferentes mezclas y permite identificar cómo influyen las modificaciones realizadas en la resistencia a la flexión de la muestra prismática.

Tabla 124

Resistencia a la flexión de vigas del concreto control

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 0						Fecha de vaciado: 10/07/2025				Fecha de rotura: 07/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kg/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Control	15.01	15.11	59.78	33.10	13558.91	2.44	45.00	15.10	15.25	15.15	15.17	15.50	15.40	15.24	15.38	0.00	6310	2862.17	35.90		1/3 Central
2	Control	15.35	15.35	59.78	33.80	14081.71	2.40	45.00	15.58	15.55	15.30	15.48	15.35	15.55	15.90	15.60	0.00	6906	3132.51	37.43	36.27	1/3 Central
3	Control	14.99	15.45	59.77	32.70	13847.76	2.36	45.00	15.02	15.10	14.97	15.03	15.51	15.56	15.58	15.55	0.00	6320	2866.70	35.50		1/3 Central

Tabla 125

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 10						Fecha de vaciado: 11/07/2025				Fecha de rotura: 08/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kgf/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kgf/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Sust-Ar-BC_10%	15.07	15.38	59.90	32.30	13887.96	2.33	45.00	15.10	15.10	15.18	15.13	15.55	15.51	15.40	15.49	0.00	6188	2806.83	34.82		1/3 Central
2	Sust-Ar-BC_10%	15.14	15.39	59.77	32.20	13925.86	2.31	45.00	15.39	15.18	15.12	15.23	15.90	15.58	15.48	15.65	0.00	6456	2928.39	35.31	36.13	1/3 Central
3	Sust-Ar-BC 10%	15.03	15.33	60.22	32.40	13874.54	2.34	45.00	15.25	15.28	15.15	15.23	15.60	15.50	15.49	15.53	0.00	6884	3122.53	38.26		1/3 Central

Tabla 126

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 15						Fecha de vaciado: 11/07/2025				Fecha de rotura: 08/08/2025				Edad (días): 28						
N°	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kgf/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kgf/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Sust-Ar-BC_15%	15.12	15.50	59.79	31.80	14007.05	2.27	45.00	15.17	15.21	15.18	15.19	15.60	15.53	15.41	15.51	0.00	6177	2801.84	34.50		1/3 Central
2	Sust-Ar-BC_15%	15.15	15.51	59.80	32.00	14045.52	2.28	45.00	15.02	15.10	15.20	15.11	15.72	15.50	15.70	15.64	14.50	6239	2829.96	33.31	34.66	1/3 Lateral
3	Sust-Ar-BC 15%	15.21	15.44	59.91	32.60	14070.17	2.32	45.00	15.40	15.24	15.22	15.29	15.40	15.55	15.95	15.63	0.00	6620	3002.78	36.17		1/3 Central

Tabla 127

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 20						Fecha de vaciado: 10/07/2025				Fecha de rotura: 07/08/2025				Edad (días): 28						
N°	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kgf/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kgf/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Sust-Ar-BC_20%	15.16	15.23	59.80	31.80	13811.58	2.30	45.00	15.45	15.41	15.40	15.42	15.55	15.30	15.15	15.33	0.00	6076	2756.03	34.21		1/3 Central
2	Sust-Ar-BC_20%	15.04	15.32	59.75	31.70	13770.93	2.30	45.00	15.31	15.40	15.25	15.32	15.22	15.46	15.60	15.43	0.00	6157	2792.77	34.47	34.31	1/3 Central
3	Sust-Ar-BC 20%	15.35	15.36	59.77	31.90	14092.33	2.26	45.00	15.50	15.62	15.58	15.57	15.60	15.55	15.40	15.52	0.00	6289	2852.64	34.25		1/3 Central

Tabla 128

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 1						Fecha de vaciado: 22/07/2025				Fecha de rotura: 19/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kg/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Sust-Cm-BC_1%	15.14	15.51	59.87	33.50	14058.05	2.38	45.00	15.42	15.48	15.42	15.44	15.40	15.60	15.80	15.60	0.00	5747	2606.80	31.22		1/3 Central
2	Sust-Cm-BC_1%	15.14	15.19	59.84	32.50	13758.77	2.36	45.00	15.10	15.22	15.30	15.21	15.40	15.40	15.40	15.40	0.00	5831	2644.90	33.00	32.96	1/3 Central
3	Sust-Cm-BC 1%	15.07	14.79	60.00	31.90	13377.58	2.38	45.00	15.05	15.00	15.10	15.05	15.15	14.90	14.80	14.95	0.00	5710	2590.01	34.65		1/3 Central

Tabla 129

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 2						Fecha de vaciado: 22/07/2025				Fecha de rotura: 19/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kgf/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kgf/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Sust-Cm-BC_2%	15.08	15.37	59.85	32.50	13870.56	2.34	45.00	15.40	15.20	15.20	15.27	15.15	15.35	15.45	15.32	0.00	5678	2575.50	32.36		1/3 Central
2	Sust-Cm-BC_2%	15.22	15.27	59.93	32.50	13926.03	2.33	45.00	15.20	15.20	15.20	15.20	15.10	15.05	15.00	15.05	0.00	5346	2424.90	31.69	31.35	1/3 Central
3	Sust-Cm-BC 2%	15.02	15.30	60.27	32.70	13845.03	2.36	45.00	15.11	15.12	15.12	15.12	15.70	15.59	15.58	15.62	0.00	5423	2459.83	30.00		1/3 Central

Tabla 130

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 3						Fecha de vaciado: 22/07/2025				Fecha de rotura: 19/08/2025				Edad (días): 28						
N°	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kgf/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kgf/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Sust-Cm-BC_3%	15.07	15.19	59.88	32.60	13711.11	2.38	45.00	15.20	15.20	15.20	15.20	15.40	15.51	15.72	15.54	0.00	5460	2476.61	30.35		1/3 Central
2	Sust-Cm-BC_3%	15.06	15.28	59.88	32.70	13775.63	2.37	45.00	15.20	15.30	15.21	15.24	15.60	15.50	15.35	15.48	0.00	5584	2532.86	31.20	30.64	1/3 Central
3	Sust-Cm-BC 3%	15.16	14.95	60.00	32.40	13593.97	2.38	45.00	15.21	15.32	15.49	15.34	15.10	15.05	15.00	15.05	0.00	5169	2344.62	30.37		1/3 Central

Tabla 131

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 1						Fecha de vaciado: 23/07/2025				Fecha de rotura: 20/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kg/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Adi-BC_1%	15.22	15.68	59.87	33.50	14279.47	2.35	45.00	15.25	15.28	15.20	15.24	15.35	15.60	15.70	15.55	0.00	5971	2708.40	33.07		1/3 Central
2	Adi-BC_1%	15.11	15.34	60.15	33.00	13941.99	2.37	45.00	15.10	15.25	15.30	15.22	15.45	15.60	15.60	15.55	0.00	6062	2749.68	33.63	33.86	1/3 Central
3	Adi-BC_1%	15.21	14.93	59.92	32.40	13598.68	2.38	45.00	15.21	15.28	15.28	15.26	15.00	15.03	14.99	15.01	0.00	5873	2663.95	34.89		1/3 Central

Tabla 132

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 3						Fecha de vaciado: 23/07/2025				Fecha de rotura: 20/08/2025				Edad (días): 28						
N°	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kg/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Adi-BC_3%	15.12	15.50	59.87	33.00	14027.26	2.35	45.00	15.50	15.40	15.40	15.43	15.80	15.52	15.35	15.56	0.00	5905	2678.46	32.27		1/3 Central
2	Adi-BC_3%	15.25	15.08	59.93	32.70	13785.92	2.37	45.00	15.40	15.61	15.50	15.50	15.10	15.00	14.90	15.00	0.00	5730	2599.08	33.53	32.95	1/3 Central
3	Adi-BC_3%	15.19	15.52	59.87	33.30	14112.01	2.36	45.00	15.40	15.45	15.45	15.43	15.60	15.50	15.50	15.53	0.00	6031	2735.62	33.06		1/3 Central

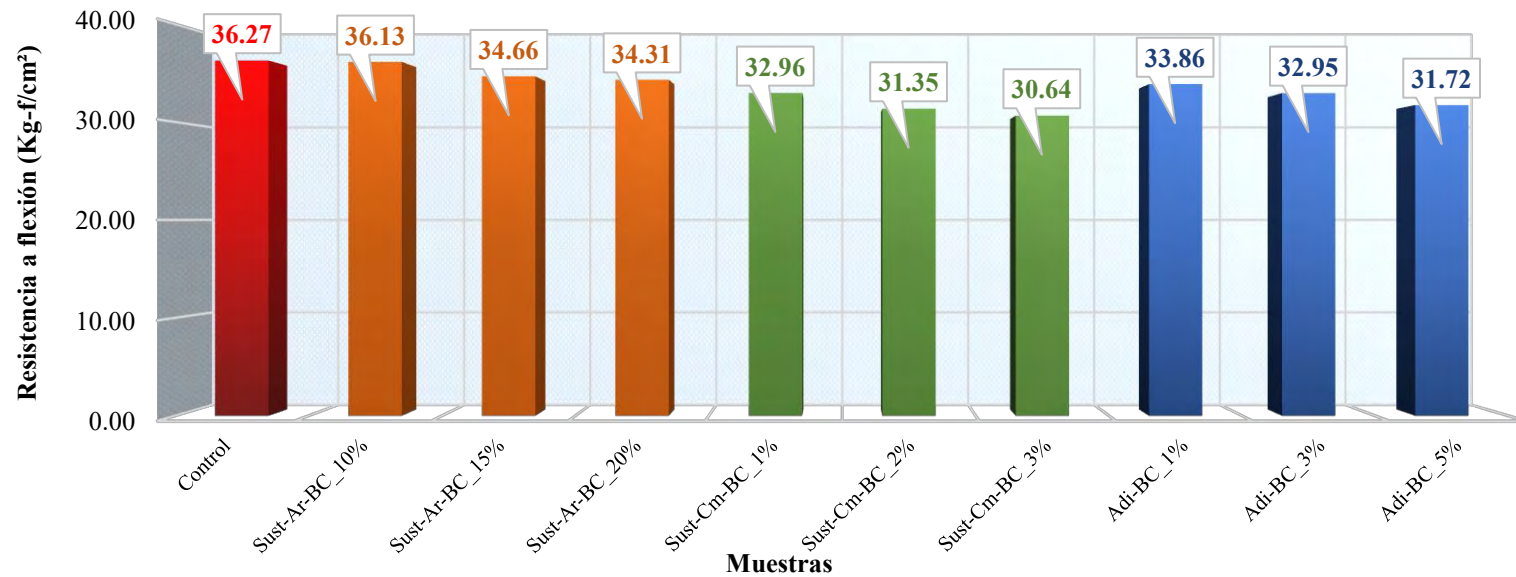
Tabla 133

Resistencia a la flexión de vigas del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 5				Fecha de vaciado: 23/07/2025				Fecha de rotura: 20/08/2025				Edad (días): 28								
N°	Descripción	Bp (cm)	Hp (cm)	Lp (cm)	Peso (kg)	Volumen (cm³)	Dens. (g/cm³)	Luz libre (cm)	Ancho en la sección de falla (cm)				Altura en la sección de falla (cm)				a	Carga (lbf)	Carga (kgf)	Módulo de rotura (Kg/cm²)	Módulo de rotura promedio (Kg/cm²)	Tipo de falla
									B1	B2	B3	Bp	H1	H2	H3	Hp						
1	Adi-BC_5%	15.30	14.98	60.00	32.50	13754.70	2.36	45.00	15.50	15.48	15.40	15.46	14.80	14.90	15.05	14.92	0.00	5625	2551.46	33.38		1/3 Central
2	Adi-BC_5%	15.13	15.27	59.90	32.50	13839.03	2.35	45.00	15.28	15.32	15.12	15.24	15.48	15.50	15.52	15.50	0.00	5350	2426.72	29.83	31.72	1/3 Central
3	Adi-BC_5%	15.05	15.42	59.87	32.70	13885.70	2.35	45.00	15.20	15.20	15.12	15.17	15.70	15.55	15.50	15.58	0.00	5770	2617.23	31.96		1/3 Central

Figura 130

Comparación de los resultados de las resistencias a flexión en vigas – 28 días



4.4.7. Densidad, absorción y porcentaje de vacíos

En las Tablas del 134 al 143 se presentan los resultados del ensayo de densidad, absorción y porcentaje de vacíos de los testigos cilíndricos correspondientes al concreto control, al concreto con sustitución parcial de arena, al concreto con sustitución parcial de cemento y al concreto con adición de biochar. Cada dosificación fue evaluada mediante 03 muestras ensayadas a los 28 días de curado, cuyos valores individuales permitieron obtener un promedio, el cual se consideró como el resultado final del análisis. Esta información permite comparar el comportamiento físico de las diferentes mezclas y evaluar cómo las modificaciones en los materiales influyen en la densidad, la absorción y el porcentaje de vacíos del concreto endurecido.

Tabla 134

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto control

f'c (kgf/cm2): 210			Biochar (BC) (%): 0			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla (g)	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
1	Control	1793.75	1872.50	1874.28	1942.70	1067.10	4.39		4.49		2.22		2.32		2.32		2.47		9.98	
2	Control	1823.40	1895.54	1898.84	1978.20	1102.60	3.96	4.23	4.14	4.37	2.29	2.25	2.38	2.34	2.38	2.35	2.53	2.49	9.47	9.83
3	Control	1805.62	1884.21	1886.65	1954.50	1078.90	4.35		4.49		2.24		2.33		2.34		2.48		10.03	

Tabla 135

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 10%

f'c (kgf/cm2): 210			Biochar (BC) (%): 10			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla (g)	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
1	Sust-Ar-BC_10%	1764.05	1837.31	1839.08	1918.20	1042.60	4.15		4.25		2.21		2.31		2.31		2.45		9.42	
2	Sust-Ar-BC_10%	1735.86	1803.13	1809.32	1881.30	1005.70	3.88	4.11	4.23	4.34	2.16	2.19	2.24	2.28	2.25	2.28	2.38	2.41	9.14	9.48
3	Sust-Ar-BC_10%	1745.22	1820.15	1824.18	1900.10	1024.50	4.29		4.52		2.18		2.28		2.28		2.42		9.87	

Tabla 136

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 15%

f'c (kgf/cm2): 210			Biochar (BC) (%): 15			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
					(g)															
1	Sust-Ar-BC_15%	1802.26	1876.38	1886.47	1943.80	1068.20	4.11		4.67		2.20		2.29		2.31		2.46		10.29	
2	Sust-Ar-BC_15%	1729.98	1802.36	1810.75	1879.50	1003.90	4.18	4.23	4.67	4.69	2.14	2.16	2.23	2.25	2.24	2.26	2.38	2.41	10.01	10.14
3	Sust-Ar-BC_15%	1764.82	1842.61	1848.29	1898.30	1022.70	4.41		4.73		2.14		2.23		2.24		2.38		10.11	

Tabla 137

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del agregado fino en vol. por biochar en 20%

f'c (kgf/cm2): 210				Biochar (BC) (%): 20				Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28				
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla (g)	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
1	Sust-Ar-BC 20%	1738.05	1814.74	1821.27	1890.10	1014.50	4.41		4.79		2.15		2.25		2.26		2.40		10.32	
2	Sust-Ar-BC 20%	1736.07	1816.66	1821.74	1865.60	990.00	4.64	4.51	4.93	4.83	2.09	2.13	2.18	2.22	2.19	2.23	2.33	2.37	10.30	10.27
3	Sust-Ar-BC 20%	1737.52	1815.22	1820.59	1881.90	1006.30	4.47		4.78		2.13		2.23		2.24		2.38		10.20	

Tabla 138

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 1%

f'c (kgf/cm2): 210			Biochar (BC) (%): 1			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
					(g)															
1	Sust-Cm-BC_1%	1831.67	1902.17	1904.45	1973.10	1097.50	3.85		3.97		2.27		2.36		2.36		2.49		9.02	
2	Sust-Cm-BC_1%	1769.64	1843.76	1847.15	1922.20	1046.60	4.19	4.01	4.38	4.18	2.21	2.23	2.30	2.32	2.31	2.32	2.45	2.46	9.68	9.33
3	Sust-Cm-BC_1%	1812.49	1884.66	1888.59	1945.60	1070.00	3.98		4.20		2.21		2.30		2.31		2.44		9.30	

Tabla 139

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 2%

f'c (kgf/cm2): 210			Biochar (BC) (%): 2			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28						
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
					(g)															
1	Sust-Cm-BC_2%	1836.47	1910.79	1916.71	1983.10	1107.50	4.05		4.37		2.27		2.36		2.37		2.52		9.92	
2	Sust-Cm-BC_2%	1725.69	1801.28	1805.44	1894.30	1018.70	4.38	4.21	4.62	4.47	2.19	2.23	2.29	2.33	2.29	2.33	2.44	2.48	10.14	9.98
3	Sust-Cm-BC_2%	1785.37	1860.52	1864.15	1942.70	1067.10	4.21		4.41		2.24		2.33		2.34		2.49		9.88	

Tabla 140

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con sustitución parcial del cemento en peso con biochar en 3%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 3			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28							
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla (g)	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
1	Sust-Cm-BC 3%	1748.04	1831.42	1834.78	1901.80	1026.20	4.77		4.96		2.16		2.26		2.27		2.42		10.73	
2	Sust-Cm-BC 3%	1830.33	1908.26	1911.46	1979.30	1103.70	4.26	4.43	4.43	4.62	2.27	2.21	2.36	2.31	2.37	2.32	2.52	2.47	10.04	10.22
3	Sust-Cm-BC 3%	1792.54	1868.88	1872.58	1938.40	1062.80	4.26		4.47		2.21		2.31		2.31		2.46		9.88	

Tabla 141

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 1			Fecha de vaciado: 28/07/2025				Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28							
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
					(g)															
1	Adi-BC_1%	1815.50	1879.86	1882.50	1947.40	1071.80	3.55		3.69		2.24		2.32		2.32		2.44		8.26	
2	Adi-BC_1%	1828.96	1895.76	1898.90	1967.10	1091.50	3.65	3.64	3.82	3.78	2.27	2.25	2.35	2.33	2.35	2.34	2.48	2.46	8.66	8.51
3	Adi-BC_1%	1821.34	1888.92	1891.04	1956.80	1081.20	3.71		3.83		2.25		2.33		2.34		2.46		8.61	

Tabla 142

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 3			Fecha de vaciado: 28/07/2025					Fecha de ensayo: 25/08/2025					Edad (días): 28					
Nº	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
					(g)															
1	Adi-BC 3%	1801.73	1868.72	1871.42	1949.40	1073.80	3.72		3.87		2.26		2.34		2.35		2.48		8.74	
2	Adi-BC 3%	1816.40	1887.65	1890.82	1948.20	1072.60	3.92	3.83	4.10	4.00	2.22	2.24	2.31	2.32	2.31	2.33	2.44	2.46	9.10	8.95
3	Adi-BC 3%	1809.55	1879.18	1882.49	1949.00	1073.40	3.85		4.03		2.24		2.32		2.33		2.46		9.02	

Tabla 143

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%

f'c (kgf/cm2): 210		Biochar (BC) (%): 5			Fecha de vaciado: 28/07/2025					Fecha de ensayo: 25/08/2025				Edad (días): 28						
N°	Descripción	Peso seco (A) (g)	Peso saturado - inmersión (B) (g)	Peso saturado - hervido (C) (g)	Peso aparente (D)		Absorción después de la inmersión		Absorción después de la inmersión y hervido		Densidad seca (g1)		Densidad después de la inmersión		Densidad después de la inmersión y hervido		Densidad aparente (g2)		Volumen de poros permeables	
					Peso + canastilla (g)	Peso (g)	%	Prom.	%	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	(g/cm³)	Prom.	%	Prom.
1	Adi-BC_5%	1794.38	1863.68	1866.44	1945.60	1070.00	3.86		4.02		2.25		2.34		2.34		2.48		9.05	
2	Adi-BC_5%	1783.97	1850.87	1854.22	1928.00	1052.40	3.75	3.83	3.94	3.99	2.22	2.24	2.31	2.32	2.31	2.33	2.44	2.46	8.76	8.93
3	Adi-BC_5%	1788.27	1857.63	1860.01	1936.70	1061.10	3.88		4.01		2.24		2.33		2.33		2.46		8.98	

Figura 131

Comparación de resultados del ensayo de densidad del concreto endurecido

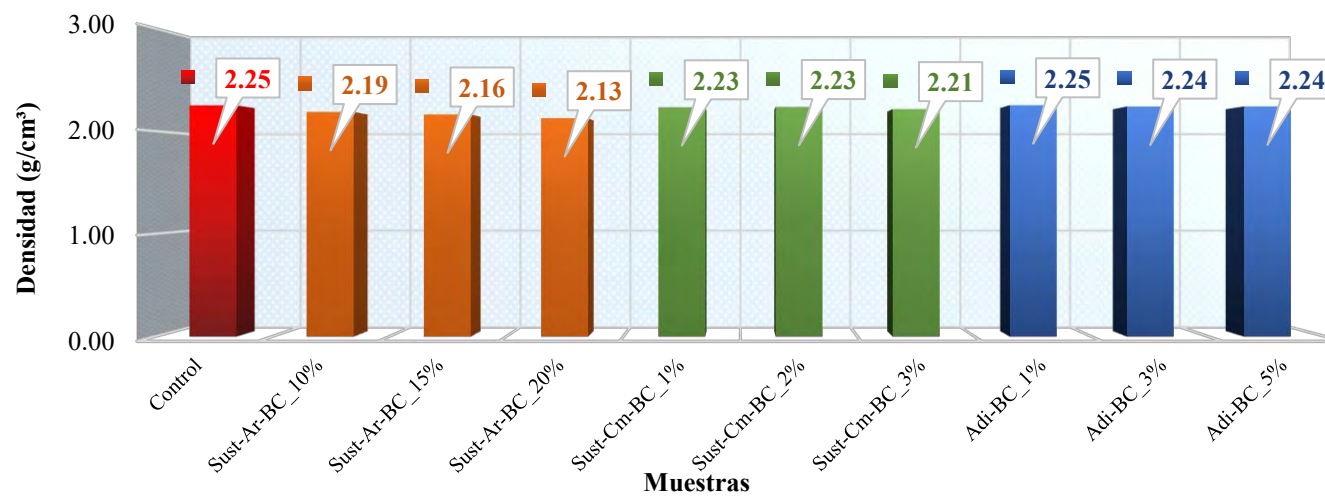


Figura 132

Comparación de resultados del ensayo de porcentaje de absorción del concreto endurecido

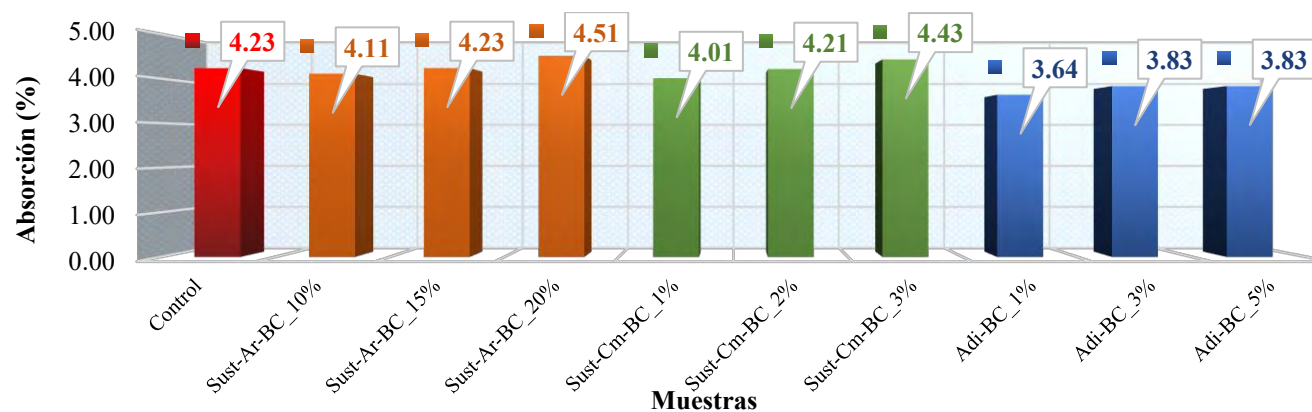
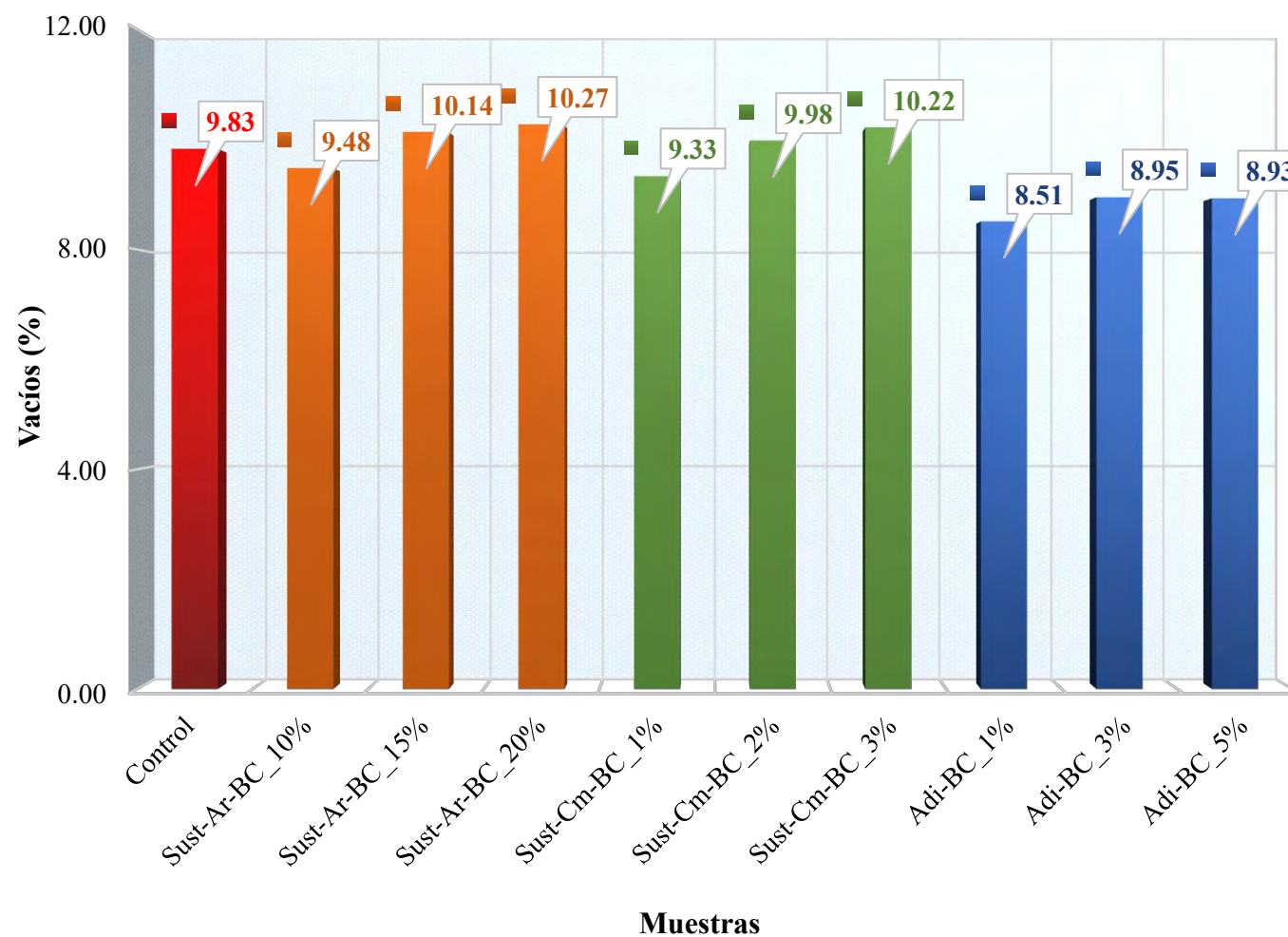


Figura 133

Comparación de resultados del ensayo de porcentaje de vacíos del concreto endurecido



4.5. Análisis de costos unitarios

En las Tablas del 144 al 153 se logra apreciar el análisis de costos unitarios para 1m³ del concreto control, sustitución parcial de la arena por biochar este reemplazo realizado en volumen de la arena (10%, 15% y 20%), sustitución parcial del cemento por biochar finamente molido este reemplazo realizado en peso del cemento (1%, 2% y 3%) y adición de biochar con respecto al peso del cemento (1%, 3% y 5%) con una resistencia de diseño $f'c=210\text{Kg/cm}^2$.

Tabla 144

Análisis de costos unitarios del concreto control

Partida: 1.1 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm²			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³		382.45	
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						337.18
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 145

Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del agregad. fino en vol. en 10%

Partida: 1.2 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ SUSTITUCIÓN AR-BC_10%			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³	421.24		
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						375.97
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.35	120	42
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
	ADIT. SUPERPLASTIFICANTE	kg	-	0.22	10.17	2.24
	BIOCHAR como arena	kg	-	20.99	1.97	41.35
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 146

Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del agregad. fino en vol. en 15%

Partida: 1.3 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ SUSTITUCIÓN AR-BC_15%			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³	440.2		
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						394.93
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.33	120	39.6
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
	ADIT. SUPERPLASTIFICANTE	kg	-	0.29	10.17	2.95
	BIOCHAR como arena	kg	-	31.47	1.97	62
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 147

Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del agregad. fino en vol. en 20%

Partida: 1.4 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ SUSTITUCIÓN AR-BC_20%			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³	459.25		
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						413.98
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.31	120	37.2
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
	ADIT. SUPERPLASTIFICANTE	kg	-	0.37	10.17	3.76
	BIOCHAR como arena	kg	-	41.95	1.97	82.64
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 148

Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del cemento en peso en 1%

Partida: 1.5 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ SUSTITUCIÓN CM-BC_1%			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³	386.27		
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						341.27
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.53	28.6	243.96
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
	BIOCHAR FINAMENTE MOLIDO	kg	-	3.66	1.67	6.11
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 149

Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del cemento en peso en 2%

Partida: 1.6 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ SUSTITUCIÓN CM-BC_2%			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³		389.8	
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						344.53
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.44	28.6	241.38
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
	BIOCHAR FINAMENTE MOLIDO	kg	-	7.32	1.67	12.22
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 150

Análisis de costos unitarios del concreto con sustitución parcial del cemento en peso en 3%

Partida: 1.7 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ SUSTITUCIÓN CM-BC_3%			Rendimiento:15 m³/Día			
			Costo unitario por m³	393.64		
Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						348.37
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.36	28.6	239.1
	AGREGADO GRUESO	m³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m³	-	0.205	4.53	0.93
	BIOCHAR FINAMENTE MOLIDO	kg	-	10.98	1.67	18.34
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 151*Análisis de costos unitarios del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 1%*Partida: 1.8 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ ADICIÓN - BC_1%Rendimiento: 15 m³/DíaCosto unitario por m³ **388.56**

Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						343.29
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m ³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m ³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m ³	-	0.205	4.53	0.93
	BIOCHAR FINAMENTE MOLIDO	kg	-	3.66	1.67	6.11
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 152*Análisis de costos unitarios del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 3%*Partida: 1.9 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ ADICIÓN - BC_3%Rendimiento: 15 m³/DíaCosto unitario por m³ **400.79**

Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						355.52
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m ³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m ³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m ³	-	0.205	4.53	0.93
	BIOCHAR FINAMENTE MOLIDO	kg	-	10.98	1.67	18.34
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Tabla 153

Análisis de costos unitarios del concreto con adición de biochar en peso del cemento en 5%

Partida: 1.1 CONCRETO F'c = 210 Kg/cm² _ ADICIÓN - BC_5%

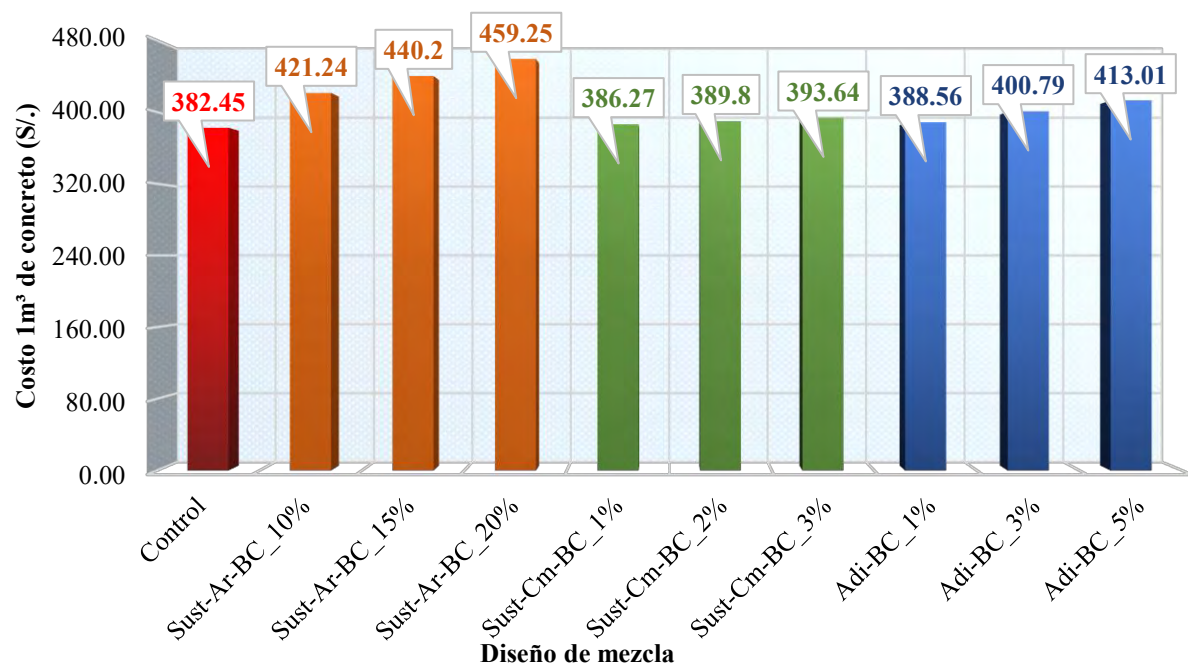
Rendimiento: 15 m³/Día

Costo unitario por m³ **413.01**

Ind	Descripción	Unid.	Recursos	Cantidad	Precio	Parcial
MANO DE OBRA						39.81
	OPERARIO	hh	1	0.5333	16.06	8.56
	OFICIAL	hh	1	0.5333	12.64	6.74
	PEON	hh	4	2.1333	11.49	24.51
MATERIALES						367.74
	CEMENTO PORTLAND TIPO HS	bol	-	8.61	28.6	246.25
	AGREGADO GRUESO	m ³	-	0.72	60	43.2
	AGREGADO FINO	m ³	-	0.39	120	46.8
	AGUA	m ³	-	0.205	4.53	0.93
	BIOCHAR FINAMENTE MOLIDO	kg	-	18.3	1.67	30.56
EQUIPO						5.46
	MEZCLADORA DE CONCRETO DE 9-11 p3	hm	0.4	0.2133	12.52	2.67
	VIBRADOR DE CONCRETO 4 HP 1.25"	hm	0.4	0.2133	7.5	1.6
	HERRAMIENTAS MANUALES	%mo	-	3	39.81	1.19

Figura 134

Comparación de los resultados del análisis de costos unitarios del concreto para 1m³



Capítulo V

5. Análisis y discusión de los resultados

5.1. Análisis y discusión de resultados de la consistencia del concreto

De acuerdo con la Figura 123, presentada en el Capítulo IV correspondiente a los resultados de la investigación, se desarrolla a continuación el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en el ensayo de asentamiento.

5.1.1. *Concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar*

En el presente estudio, la sustitución parcial de la arena por biochar en proporciones de 10%, 15% y 20% no generó variaciones significativas en la trabajabilidad del concreto fresco. Los valores de slump obtenidos fueron de 101 mm para la mezcla control, 98.7 mm para el 10%, 101.7 mm para el 15% y 99 mm para el 20% de sustitución, evidenciándose que la consistencia se mantuvo prácticamente constante entre todas las mezclas.

En el trabajo realizado por Li et al. (2023), quienes diseñaron un concreto de 40 MPa, se reportó una disminución considerable del asentamiento: el slump pasó de 240 mm en la mezcla control a 170 mm y 130 mm para sustituciones del 20% y 25%, respectivamente. De acuerdo con estos autores, dicha reducción se asocia a la alta área superficial específica y a la morfología compleja del biochar, características que incrementan la demanda de pasta para recubrir las partículas y reducen la fluidez cuando no se implementan estrategias adicionales para preservar la trabajabilidad.

La diferencia principal radica en que, en el estudio de Li et al. (2023), el superplastificante se utilizó en una misma dosis para todas las mezclas, incluido el concreto control. En cambio, en la presente investigación se ajustó la cantidad de superplastificante conforme aumentaba el porcentaje de biochar, adicionado en 0.06%, 0.08% y 0.10% del peso de cemento para cada nivel

de sustitución, lo que permitió compensar la absorción de agua propia del biochar y mantener una consistencia similar a la del concreto control.

Los resultados indican que, si bien el biochar tiende naturalmente a reducir la trabajabilidad debido a su estructura porosa y alta capacidad de absorción, este efecto puede ser mitigado eficazmente mediante el empleo adecuado de aditivos. De esta manera, es posible mantener la manejabilidad del concreto dentro de rangos aceptables, incluso con niveles de sustitución relativamente altos del agregado fino.

5.1.2. Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

En la presente investigación, la sustitución parcial del cemento por biochar en porcentajes de 1%, 2% y 3% en peso produjo una disminución progresiva del asentamiento, pasando de 101 mm en el concreto control a 87.7 mm, 85.3 mm y 84 mm, respectivamente. Como se puede observar la trabajabilidad disminuye conforme se aumenta el porcentaje de sustitución de cemento por biochar en la mezcla.

Estos resultados coinciden con lo reportado por Salvador (2023), quien también observó una caída continua del asentamiento al incrementar el porcentaje de reemplazo de cemento por biochar, reduciendo el slump desde 3.90" en la mezcla control a 3.45", 3" y 2.98" con 1%, 2% y 2.5% de reemplazo respectivamente. La tendencia descendente reportada por dicho autor sugiere que la incorporación de biochar en el contenido cementante afecta directamente la trabajabilidad, debido a su elevada superficie específica y capacidad de absorción.

Los hallazgos también guardan relación con lo reportado por Li et al. (2023). Aunque en su estudio los valores de slump fueron mayores respecto al patrón (240 mm) al sustituir el cemento en porcentajes de 1% (241 mm) y 2% (249 mm), se observó reducciones en la trabajabilidad a partir del 3% (231 mm), registrándose una caída notable en el 5% (190 mm) de reemplazo. De

manera coherente, los autores señalan que, el biochar tiende a reducir el asentamiento conforme aumenta la dosis debido a su gran absorción de agua y a su efecto espesante en la pasta.

Por otro lado, los resultados de Turovaara (2022) presentan una disminución aún más pronunciada del slump, pasando de un concreto fluido (650 mm - diámetro) a solo 69.5 mm, 29.5 mm y 25.5 mm con reemplazos de 5%, 8% y 10% de biochar, respectivamente. Aunque los porcentajes empleados por este autor son mayores a los utilizados en la presente investigación, la tendencia es totalmente consistente: mayor contenido de biochar implica menor trabajabilidad. Las diferencias en magnitud pueden atribuirse a variaciones en la granulometría, densidad y características superficiales del biochar empleado, así como al diseño de mezcla original.

Los resultados de la presente investigación y de los antecedentes coinciden en que el biochar utilizado como sustituto del cemento tiende a aumentar la absorción y la viscosidad de la mezcla, lo que puede influir en la trabajabilidad. Por este motivo, su uso suele acompañarse de ajustes en el contenido de agua o de la aplicación de aditivos para mantener la consistencia adecuada.

5.1.3. Concreto con adición de biochar

En la presente investigación, la adición de biochar en proporciones de 1%, 3% y 5% en peso del cemento generó una reducción progresiva en la trabajabilidad del concreto, disminuyendo el asentamiento de 101 mm en la mezcla control a 82 mm, 78.7 mm y 71.7 mm, respectivamente.

Los resultados concuerdan con lo reportado por Li et al. (2023) quienes observaron una tendencia descendente del slump en el Set A (biochar como material de relleno), disminuyendo de 240 mm en la mezcla control a 210 mm con la adición de 5%. Los autores atribuyen esta reducción a la morfología compleja del biochar y su elevada área específica, factores que demandan mayor

cantidad de pasta para recubrir las partículas y mantener la trabajabilidad, mecanismo que coincide plenamente con lo observado en esta investigación.

De manera similar, los hallazgos de Diaz (2019), muestran una caída significativa del asentamiento desde 3" (control) hasta 1.87", 1.69" y 1.57" al añadir 5%, 7.5% y 10% de biochar, respectivamente. A pesar de que sus porcentajes de adición son mayores a los empleados en el presente estudio, se confirma el comportamiento típico del biochar: la trabajabilidad disminuye conforme aumenta su contenido.

En el estudio de Zalamea (2022) se observó que, con adiciones bajas de biochar (1.5%, 3% y 4.5%) y empleando una relación a/c de 0.59, la trabajabilidad se mantuvo similar a la del concreto control. No obstante, cuando la adición aumentó hasta el 25%, fue necesario incrementar la relación a/c a 0.809 para conservar el asentamiento. Estos resultados muestran que, aunque dosis reducidas de biochar pueden no generar variaciones apreciables en la consistencia, el aumento de su contenido conduce de forma progresiva a una reducción de la trabajabilidad.

Finalmente, los resultados de Gupta et al. (2020) mostraron una disminución leve del slump al añadir 0.5%, 1% y 2% de biochar, pasando de 95 mm (control) a 95 mm, 93 mm y 91 mm respectivamente. Estos valores confirman que a bajas dosificaciones la caída del slump puede ser moderada. No obstante, sus resultados siguen la misma tendencia observada en esta tesis, reafirmando que incluso pequeñas cantidades de biochar generan una reducción en la fluidez del concreto, aunque en magnitud menor debido al porcentaje limitado de adición.

En conjunto, la comparación con los antecedentes muestra que la reducción de la trabajabilidad registrada en esta investigación sigue la misma tendencia que la descrita en otros estudios sobre el uso de biochar. La pérdida de slump es un fenómeno esperado y podría estar directamente asociado a la absorción de agua y al incremento de finos reactivos en la mezcla,

evidenciando que la adición de biochar sin empleo de aditivos reductores de agua conduce inevitablemente a mezclas menos trabajables.

5.2. Análisis y discusión de resultados de la resistencia a la compresión

Según la NTP 339.034 (2015) la relación de la longitud del espécimen al diámetro es mayor a 1.75, por lo que no se corrigieron los resultados de resistencia a la compresión de las probetas ensayadas individualmente.

En cuanto al modo de falla, todas las muestras cilíndricas presentaron patrones de fractura correspondientes a los tipos 1 al 4 establecidos en la NTP 339.034 (2015), los cuales se consideran modos de falla aceptables. Esto indica que los especímenes fueron ensayados adecuadamente, sin presencia de fallas atípicas que pudieran invalidar los resultados de resistencia a la compresión.

Según la Tabla de Precisión de la NTP 339.034 (2015), el coeficiente de variación permitido para cilindros de 100 mm × 200 mm ensayados en condiciones de laboratorio es de 3.2%. Asimismo, el rango aceptable de resistencia entre cilindros individuales, para un conjunto de tres especímenes, es de 10.6%. En el presente estudio, todas las series evaluadas se encontraron dentro del rango aceptable, por lo que los resultados de resistencia a la compresión se consideran válidos y consistentes según los criterios de la norma.

Según la Norma E.060 (2020) en el Capítulo V en el ítem 5.6, la resistencia de una clase determinada de concreto a los 28 días se considera satisfactoria cuando se cumplen los siguientes requisitos: (a) cada promedio aritmético de tres ensayos consecutivos es igual o superior a f'_c ; y (b) ningún resultado individual (promedio de 3 cilindros de 4"×8") es menor que f'_c en más de 3.5 MPa ($\approx 35 \text{ kgf/cm}^2$). En la presente investigación, todas las series evaluadas cumplen con el requisito establecido en el inciso (b). Respecto al requisito señalado en el inciso (a), los casos que no cumplen con dicho criterio se detallan posteriormente.

La Tabla 154 muestra el resumen de las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado.

Tabla 154

Cuadro resumen – resultados de resistencia a la compresión

Resistencia de diseño: 210 Kg/cm ²							
Nº	Descripción	3 Días		7 Días		28 Días	
		Resistencia (Kg/cm ²)	Evolución (%)	Resistencia (Kg/cm ²)	Evolución (%)	Resistencia (Kg/cm ²)	Evolución (%)
1	Control	104.03	49.54	160.23	76.30	220.30	104.91
2	Sust-Ar-BC_10%	106.18	50.56	160.81	76.58	221.04	105.26
3	Sust-Ar-BC_15%	98.67	46.98	158.53	75.49	211.76	100.84
4	Sust-Ar-BC_20%	92.89	44.23	145.73	69.40	203.48	96.90
5	Sust-Cm-BC_1%	116.09	55.28	167.12	79.58	220.53	105.01
6	Sust-Cm-BC_2%	115.51	55.01	163.85	78.03	218.81	104.19
7	Sust-Cm-BC_3%	109.82	52.30	155.52	74.06	217.59	103.61
8	Adi-BC_1%	120.53	57.40	167.70	79.86	225.37	107.32
9	Adi-BC_3%	125.10	59.57	177.89	84.71	235.97	112.37
10	Adi-BC_5%	120.98	57.61	169.91	80.91	230.43	109.73

5.2.1. Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar

La Figura 135 muestra la curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto y la Figura 136 muestra el resumen de las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial de la arena (agr. fino) por biochar.

Figura 135

Curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena

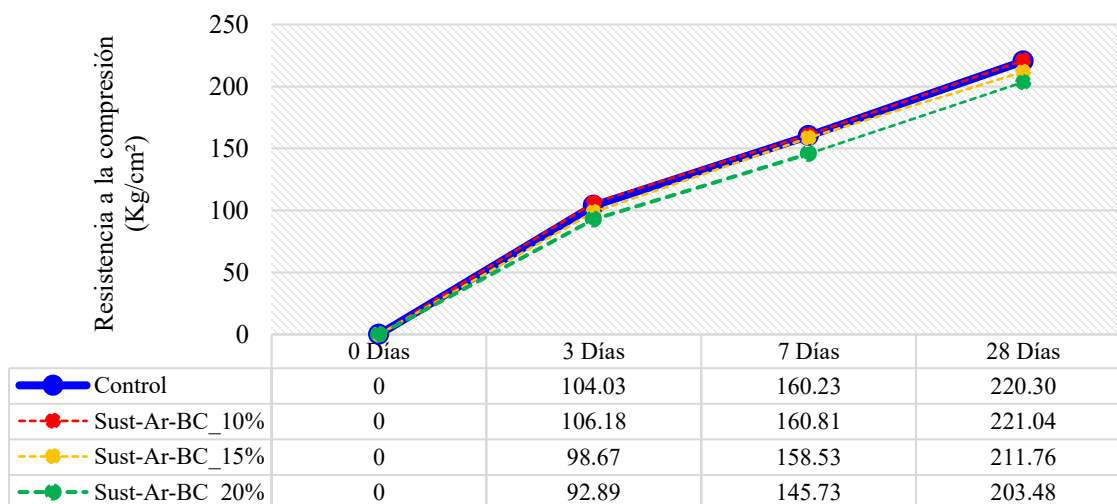
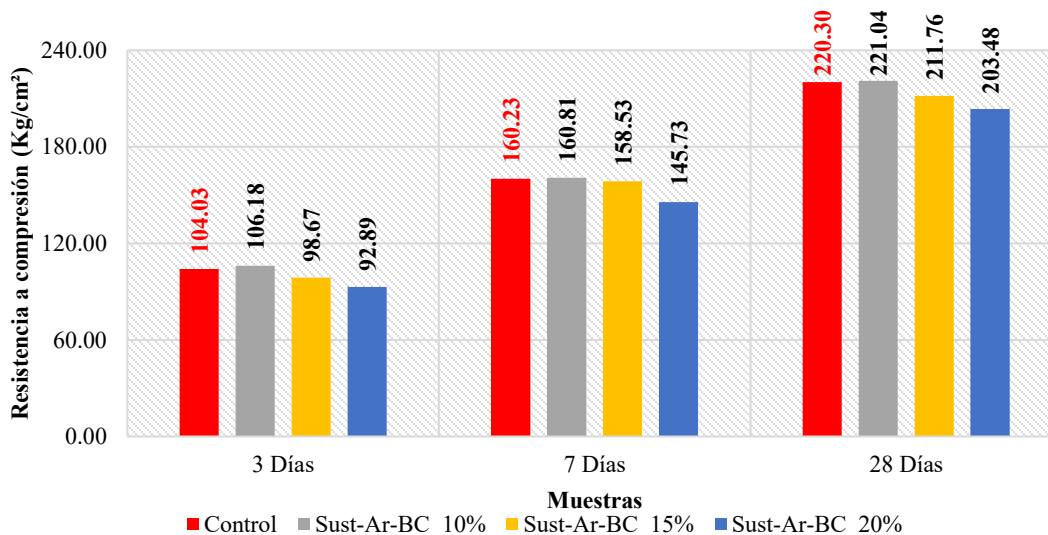


Figura 136

Gráfico – resistencia a la compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena por biochar



A los 3 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 104.03 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de arena por biochar en 10%, 15% y 20%, las resistencias obtenidas fueron de 106.18, 98.67 y 92.89 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 10% presentó un incremento del 2.06%, mientras que las mezclas con 15% y 20% mostraron una disminución del 5.16% y 10.71%, respectivamente.

A los 7 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 160.23 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de arena por biochar en 10%, 15% y 20%, las resistencias obtenidas fueron de 160.81, 158.53 y 145.73 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 10% presentó un incremento del 0.36%, mientras que las mezclas con 15% y 20% mostraron una disminución del 1.06% y 9.05%, respectivamente.

A los 28 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 220.30 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de arena por biochar en 10%, 15% y 20%, las resistencias obtenidas fueron de 221.04, 211.76 y 203.48 kgf/cm², respectivamente. Se observa

que, respecto al concreto control, la mezcla con 10% presentó un incremento del 0.33%, mientras que las mezclas con 15% y 20% mostraron una disminución del 3.88% y 7.64%, respectivamente.

Estos resultados muestran que el reemplazo del 10% de arena por biochar no afecta negativamente la resistencia e incluso puede generar ligeras mejoras, mientras que porcentajes superiores (15% y 20%) conducen a una pérdida progresiva de resistencia.

De acuerdo con el ítem 5.6 inciso (a) de la Norma E.060 (2020), los concretos con 10% y 15% de reemplazo cumplieron la resistencia especificada al presentar promedios superiores a 210 kgf/cm², mientras que el concreto con 20% no alcanzó el valor requerido. En consecuencia, solo los porcentajes de sustitución del 10% y 15% satisfacen los criterios de aceptación de resistencia establecidos por la norma.

Lo observado en la presente investigación es coherente con los hallazgos de Li et al. (2023), quienes evaluaron el reemplazo de arena por biochar en porcentajes más amplios (5%–25%). En su Set C, la resistencia a la compresión a los 28 días aumentó de 48.03 MPa (control) a 56.03 MPa con 5% de biochar, lo que representa un incremento del 16.7%, mientras que porcentajes altos ($\geq 10\%$) generaron disminuciones graduales. Este comportamiento, similar al de la presente investigación, indica que existe un rango óptimo de reemplazo, dentro del cual el biochar puede mejorar la resistencia a la compresión.

Li et al. (2023) señalan que, al reemplazar parcialmente la arena con biochar, la cantidad total de arena en la mezcla se mantiene igual que en el concreto control, pero los poros propios del biochar generan una acción capilar que disminuye la relación agua/cemento efectiva durante el mezclado. Además, el agua retenida en estos poros actúa como una fuente interna de humedad que favorece una hidratación más prolongada, lo que contribuye a formar una microestructura más densa y aumentar la resistencia a la compresión. No obstante, indica que cuando el biochar supera

aproximadamente el 10% de reemplazo, su elevada porosidad introduce una red más conectada de poros capilares que afecta negativamente la matriz del concreto, rompiendo el equilibrio entre beneficios y contenido de biochar, y generando reducciones en la resistencia a mayores porcentajes de adición.

El estudio de Amancha (2024) presenta un comportamiento distinto al observado en la presente investigación. En su caso, la resistencia a la compresión a los 28 días mostró incrementos progresivos en todas las dosificaciones evaluadas (Control: 254.72 kg/cm²; 5%: 264.61 kg/cm²; 10%: 292.45 kg/cm²; 20%: 311.74 kg/cm²), evidenciando una tendencia de mejora continua incluso a porcentajes elevados de reemplazo. Esta diferencia podría deberse a las características particulares del biochar de café empleado en dicho estudio, el cual presenta propiedades físicas y químicas distintas al biochar utilizado en la presente investigación.

En la presente investigación se observó una tendencia similar a la descrita por Li et al. (2023), donde porcentajes moderados de biochar presentan valores relativamente mayores de resistencia, mientras que dosificaciones superiores muestran reducciones. Sin embargo, al compararlo con el estudio de Amancha (2024), se aprecia un comportamiento distinto, ya que dicho autor reporta incrementos continuos incluso en reemplazos elevados. Estas diferencias indican que el desempeño del biochar en el concreto varía según sus características propias, como el tipo de biomasa, granulometría y porosidad, por lo que los efectos observados no son necesariamente generalizables y dependen de las condiciones específicas de cada estudio.

5.2.2. Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

La Figura 137 muestra la curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto y la Figura 138 muestra el resumen de las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.

Figura 137

Curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento

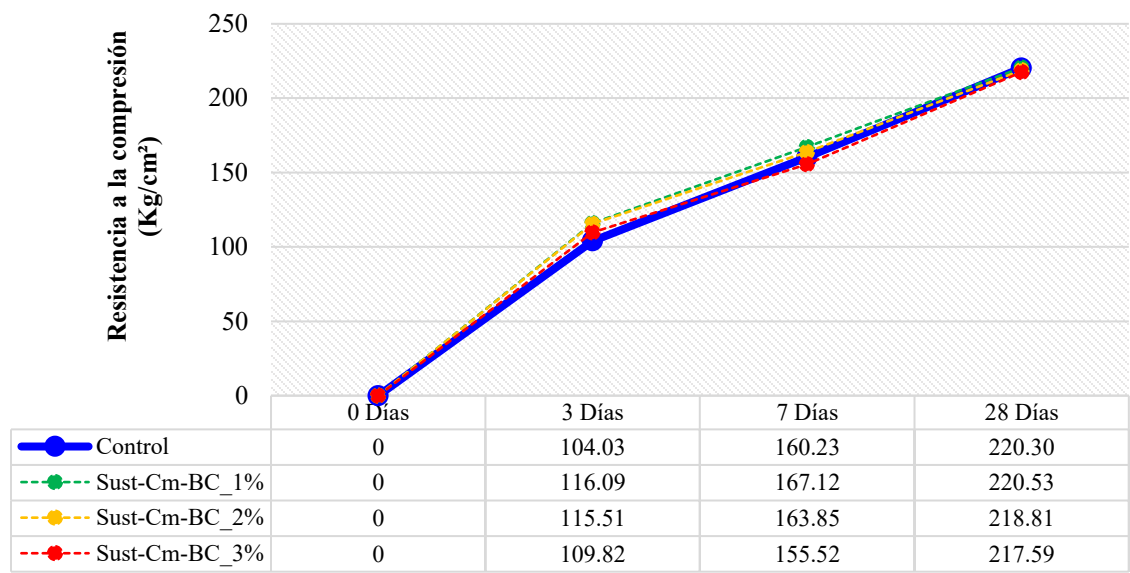
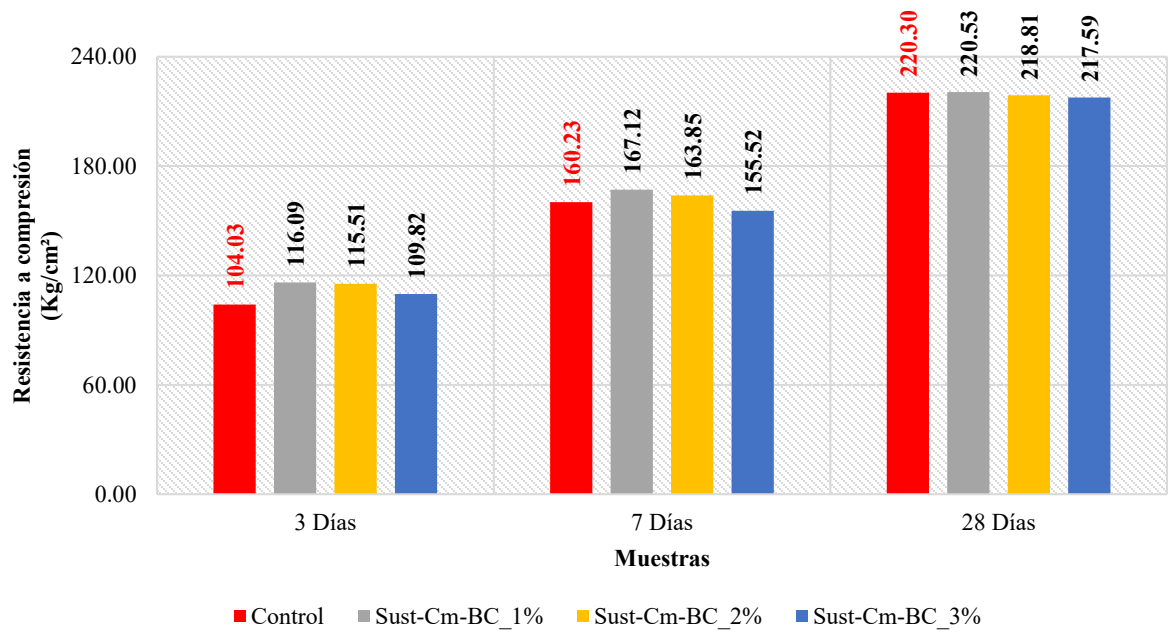


Figura 138

Gráfico – resistencia a la compresión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar



A los 3 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 104.03 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las resistencias obtenidas fueron de 116.09, 115.51 y 109.82 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, todas las mezclas presentaron un aumento de 11.59%, 11.04% y 5.56%, respectivamente.

A los 7 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 160.23 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las resistencias obtenidas fueron de 167.12, 163.85 y 155.52 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 1% y 2% mostraron un incremento de 4.30% y 2.26% respectivamente; mientras que con 3% de sustitución mostró una disminución de 2.94%.

A los 28 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 220.30 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las resistencias obtenidas fueron de 220.53, 218.81 y 217.59 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 1% presentó un incremento del 0.10%, mientras que las mezclas con 2% y 3% mostraron una disminución del 0.68% y 1.23%, respectivamente.

Los resultados obtenidos en esta investigación son coherentes con lo reportado por Li et al. (2023), quienes evaluaron el uso de biochar de *Carya cathayensis* como sustituto de cemento (Set B). Los autores encontraron reducciones sistemáticas de la resistencia a la compresión desde el 1% hasta el 5% de reemplazo, siendo la disminución más severa del 26.7% con 5%. Incluso en porcentajes bajos, como 1% y 2%, sus resistencias (43.50 y 45.03 MPa) fueron inferiores al control (48.03 MPa).

Los autores señalan que la incorporación de biochar en mezclas de concreto como sustituto parcial del cemento genera un efecto negativo sobre la resistencia a la compresión, debido a que

el biochar producido a partir de cáscaras de *Carya cathayensis* contiene una cantidad muy limitada de componentes reactivos o con capacidad cementante, lo que restringe su participación en el proceso de hidratación. Bajo estas condiciones, el biochar actúa principalmente como un material de relleno inerte, más que como un material con actividad cementante o puzolánica. Al reemplazar parcialmente el cemento por este material altamente carbonizado, como en el Conjunto B, se reduce el contenido de cemento disponible, lo que incrementa la relación agua/cemento efectiva y disminuye el volumen total de la matriz cementante, afectando el desarrollo de la hidratación. Como resultado, la microestructura interna del concreto y la zona de transición interfacial (ITZ) se ven deterioradas, lo que finalmente conduce a una reducción de la resistencia a la compresión, observándose que a mayor contenido de biochar utilizado como reemplazo del cemento, mayor es la disminución de dicha resistencia. En consecuencia, los datos de Li et al. (2023) confirman por qué, en esta investigación, los porcentajes del 2% y 3% no generan incrementos de resistencia a los 28 días y, más bien, producen ligeras reducciones respecto al concreto control.

Salvador (2023) reportó un comportamiento diferenciado en la resistencia a la compresión, evidenciando incrementos significativos a los 28 días para contenidos de biochar del 1% y 2% (230.69 kg/cm² y 248.18 kg/cm², respectivamente), así como una disminución de la resistencia para un porcentaje mayor de 2.5% (202.47 kg/cm²), en comparación con un concreto control de 213.53 kg/cm². La presente investigación coincide con la tendencia general observada por Terrones, en la que los porcentajes más bajos de incorporación de biochar muestran un mejor desempeño mecánico, mientras que contenidos más elevados generan una reducción de la resistencia. No obstante, no se registraron los incrementos sustanciales de resistencia reportados por dicho autor, lo cual podría atribuirse a diferencias en el tipo de biomasa empleada y en las propiedades físicas y químicas del biochar obtenido.

Turovaara (2022) evaluó reemplazos más altos (5%–10%) y encontró reducciones marcadas de resistencia a los 28 días, pasando de 71.9 MPa (control) a 51.6 MPa con 10%, lo que evidencia el efecto negativo del exceso de biochar como sustituto del cemento. Los resultados de esta tesis se alinean con la tendencia descrita donde se menciona que a mayor porcentaje de reemplazo se obtiene una menor resistencia, especialmente cuando el biochar no posee actividad puzolánica o cementante.

5.2.3. Concreto con adición de biochar

La Figura 139 muestra la curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto y la Figura 140 muestra el resumen de las resistencias a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado del concreto control versus el concreto con adición de biochar.

Figura 139

Curva de madurez de la resistencia a compresión del concreto control vs concreto con adición de biochar

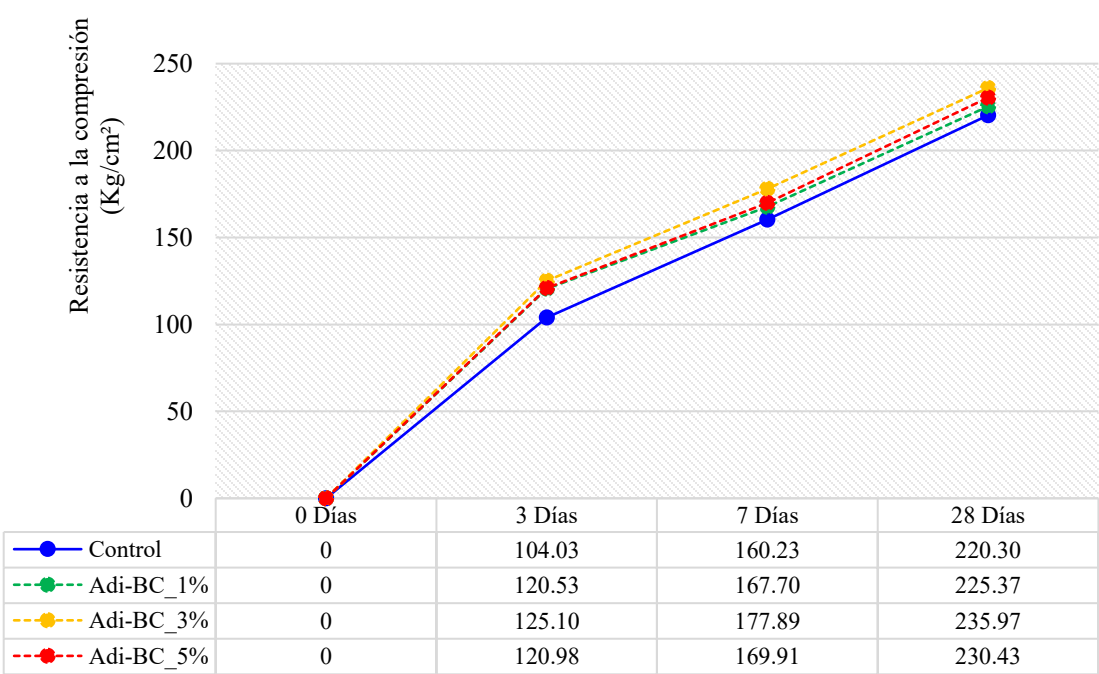
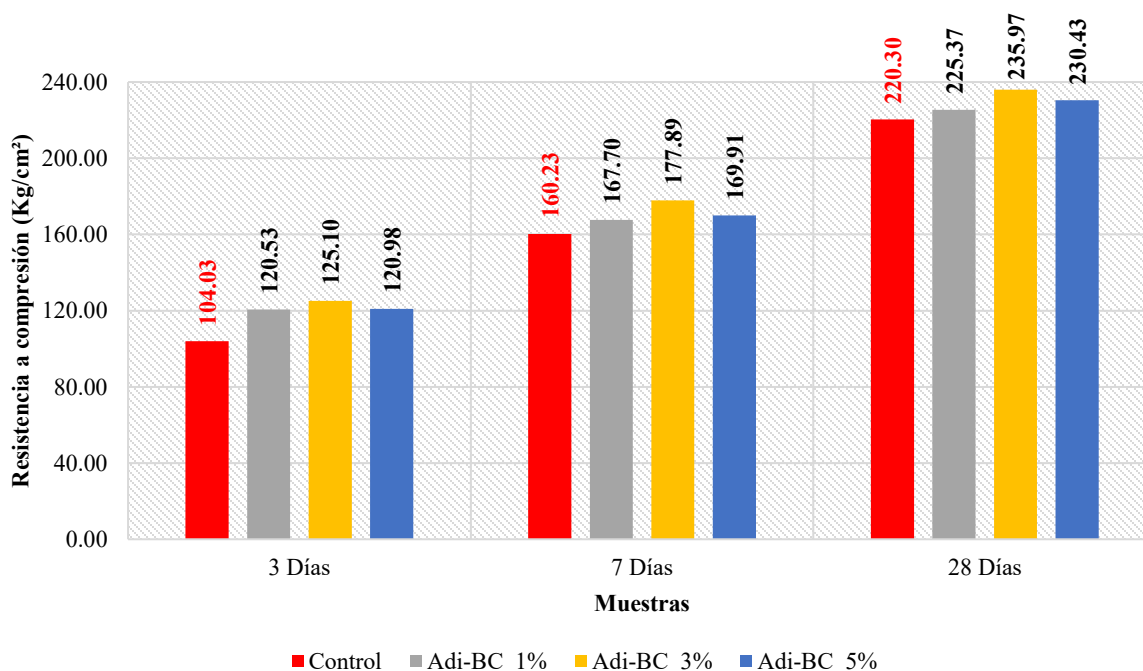


Figura 140

Gráfico – resistencia a la compresión del concreto control vs concreto con adición de biochar



A los 3 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 104.03 kgf/cm². Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las resistencias obtenidas fueron de 120.53, 125.10 y 120.98 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 3% y 5% mostraron un incremento de 15.86%, 20.25% y 16.29%, respectivamente.

A los 7 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 160.23 kgf/cm². Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las resistencias obtenidas fueron de 167.70, 177.89 y 169.91 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 3% y 5% mostraron un incremento de 4.66% y 11.02% y 6.04% respectivamente.

A los 28 días de curado: La resistencia a la compresión del concreto control fue de 220.30 kgf/cm². Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las resistencias obtenidas

fueron de 225.37, 235.97 y 230.43 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 3% y 5% mostraron un incremento de 2.30% y 7.11% y 4.60% respectivamente.

Los resultados son consistentes con Zalamea (2022), quien encontró que el biochar como adición incrementa la resistencia hasta un porcentaje óptimo. En su estudio, la mejor dosificación fue el 1.5%, con incrementos del 19% respecto al control. Para contenidos superiores (4.5% o más), la resistencia comenzó a disminuir, e incluso con 25% cayó drásticamente a 46.2 kgf/cm² por exceso de porosidad y mala cohesión. La tendencia coincide en que existe un rango "óptimo" y, a partir de cierto límite, la resistencia deja de aumentar.

Li et al. (2023) empleó biochar como adición en las mezclas de concreto (Set A), cuyos resultados evidencian un comportamiento óptimo con un contenido cercano al 2% de biochar, alcanzando una resistencia de 49.73 MPa frente a 48.03 MPa del concreto patrón; sin embargo, al incrementar la dosificación entre 3% y 5%, la resistencia disminuyó progresivamente hasta valores comprendidos entre 42.90 y 35.67 MPa. Los autores explican que, en bajas dosificaciones, el biochar actúa como un reservorio de agua, reduciendo la relación agua/cemento efectiva y favoreciendo el desarrollo de la resistencia, mientras que en contenidos más elevados incrementa la viscosidad de la mezcla y reduce el volumen de mortero disponible para envolver adecuadamente los agregados, lo que se traduce en una disminución de la resistencia a la compresión. En la presente investigación se observa una tendencia similar; sin embargo, a diferencia del estudio de Li et al. (2023), todos los resultados correspondientes a los porcentajes de adición evaluados (1%–5%) se mantienen por encima de los valores del concreto control.

Díaz (2019) también reportó incrementos cuando utilizó biochar de aserrín como adición en 5% y 7.5% (227.7 y 220.4 kg/cm², respectivamente) frente al patrón (213.1 kg/cm²),

confirmando nuevamente que el biochar puede mejorar la resistencia hasta cierto porcentaje de dosificación.

Gupta et al. (2020) reportó incrementos similares: a los 28 días, todas las dosificaciones (0.5%–2%) aumentaron la resistencia respecto al control, siendo el porcentaje óptimo la adición de 0.5% con el cual obtuvo una resistencia igual a 68.93 MPa frente a un patrón de 59.51. Los autores explican que la capacidad de absorción de agua del biocarbón contribuyó a la redistribución de la humedad, lo que llevó a una reducción de la proporción agua-cemento en la etapa inicial y a la densificación de la pasta alrededor de las partículas de biocarbón debido a la liberación de humedad en la etapa de endurecimiento.

5.3. Análisis y discusión de resultados de resistencia a tracción indirecta

La Tabla 155 muestra el resumen de las resistencias a la tracción indirecta a los 7 y 28 días de curado.

Tabla 155

Cuadro resumen – resultados de resistencia a la tracción indirecta

N°	Descripción	7 Días	28 Días
		Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)
1	Control	11.22	23.27
2	Sust-Ar-BC_10%	13.30	23.34
3	Sust-Ar-BC_15%	14.21	24.26
4	Sust-Ar-BC_20%	13.08	22.26
5	Sust-Cm-BC_1%	10.73	23.66
6	Sust-Cm-BC_2%	8.95	24.81
7	Sust-Cm-BC_3%	9.94	23.98
8	Adi-BC_1%	11.16	25.48
9	Adi-BC_3%	11.58	22.80
10	Adi-BC_5%	11.68	22.74

Según la expresión propuesta por el ACI 318 (2022) se tiene que:

$$\text{Resistencia a la tracción indirecta} = 0.56 * \sqrt{f'c} \quad \dots (\text{Ec.41})$$

Donde f'_c se encuentra en MPa. Según esto la resistencia a tracción indirecta sería aproximadamente de 2.56 MPa lo que equivale a 26.10 kg/cm². De ello se concluye que la resistencia a la tracción indirecta del concreto control se encuentra cercano a lo teórico.

5.3.1. Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar

La Figura 141 muestra la curva de madurez de la resistencia a tracción indirecta del concreto y la Figura 142 muestra el resumen de las resistencias a la tracción indirecta a los 7 y 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial de la arena (agregado fino) por biochar.

Figura 141

Curva de madurez de la resistencia a tracción del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena

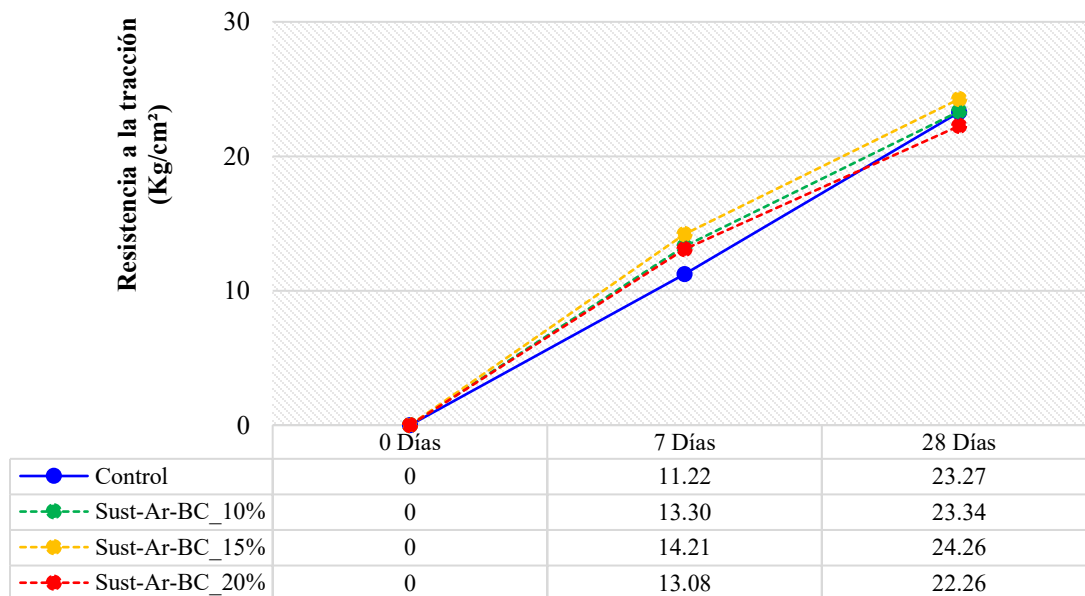
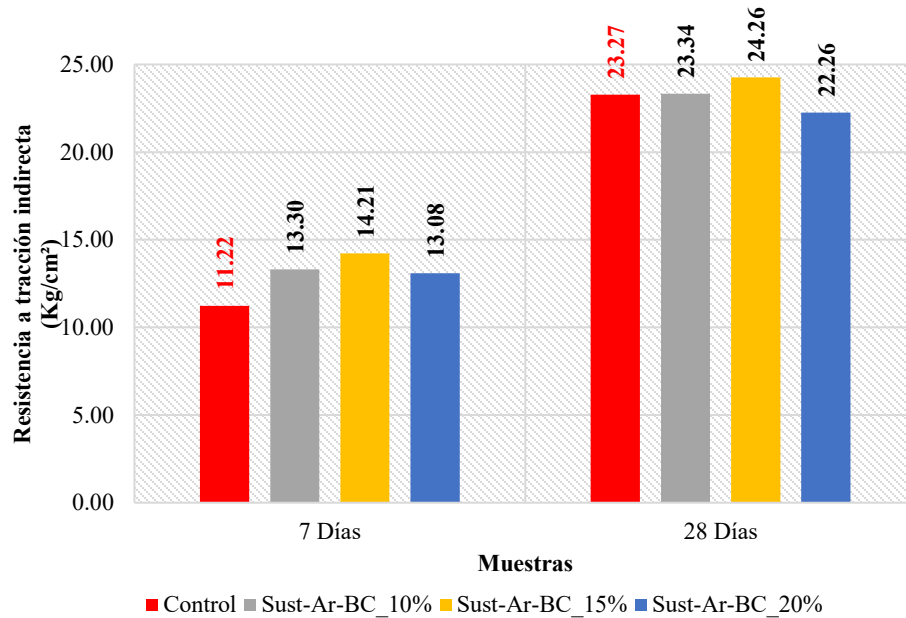


Figura 142

Gráfico – resistencia a la tracción indirecta del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena por biochar



A los 7 días de curado: La resistencia a la tracción indirecta del concreto control fue de 11.22 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de arena por biochar en 10%, 15% y 20%, las resistencias obtenidas fueron de 13.30, 14.21 y 13.08 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 10%, 15% y 20% mostraron un incremento de 18.53% y 26.65% y 16.58% respectivamente.

A los 28 días de curado: La resistencia a la tracción indirecta del concreto control fue de 23.27 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de arena por biochar en 10%, 15% y 20%, las resistencias obtenidas fueron de 23.34, 24.26 y 22.26 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 10% y 15% mostraron un incremento del 0.30% y 4.24% respectivamente; mientras que la mezcla con 20% presentó una disminución de 4.36%.

En el estudio de Li et al. (2023), el valor de referencia del concreto control (P0) a los 28 días fue de 2.96 MPa ($\approx 30.2 \text{ kgf/cm}^2$), a partir del cual todas las mezclas con reemplazo de biochar mostraron incrementos de resistencia, registrándose valores de 3.77 MPa (+27.36%) para C5%, 3.81 MPa (+28.72%) para C10%, 3.66 MPa (+23.64%) para C15%, 3.42 MPa (+15.54%) para C20% y 3.03 MPa (+2.36%) para C25%. Los autores señalan que, aunque todos los porcentajes de sustitución superaron al concreto control, existe un contenido óptimo de biochar en el rango de 5% a 10%, a partir del cual la resistencia disminuye progresivamente conforme aumenta su proporción. Además, explican desde un enfoque microestructural indicando que la interfaz biochar–pasta cementicia presenta una estructura más firme, continua y uniforme en comparación con la interfaz arena–pasta, con menor presencia de vacíos y mayor adherencia, lo que dificulta la propagación de microfisuras, evita que estas atraviesen las partículas de biochar y mejora la resistencia a tracción al generar un plano de falla más homogéneo. En la presente investigación se evidencia un comportamiento similar, observándose incrementos de resistencia para los porcentajes de sustitución del 10% y 15%, y una disminución cuando el reemplazo alcanza el 20%.

5.3.2. Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

La Figura 143 muestra la curva de madurez de la resistencia a tracción indirecta del concreto y la Figura 144 muestra el resumen de las resistencias a la tracción indirecta a los 7 y 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.

Figura 143

Curva de madurez de la resistencia a tracción del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento

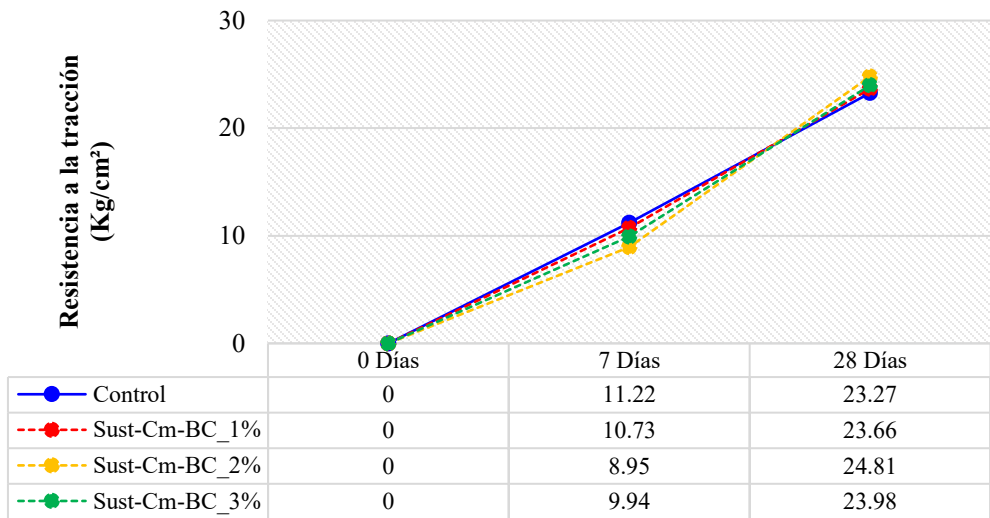
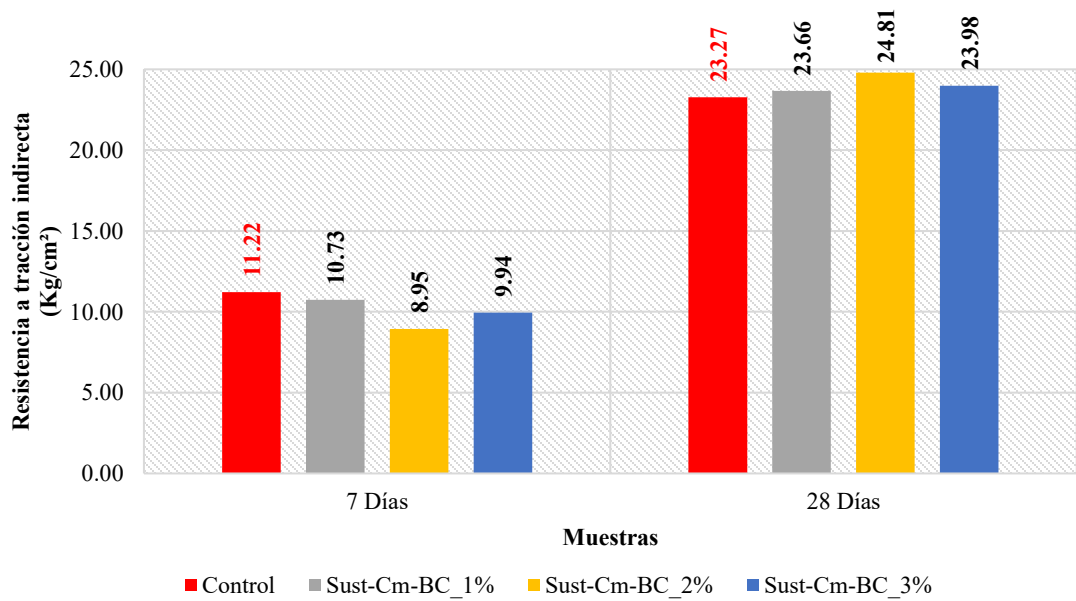


Figura 144

Gráfico – resistencia a la tracción indirecta del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar



A los 7 días de curado: La resistencia a la tracción indirecta del concreto control fue de 11.22 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las resistencias obtenidas fueron de 10.73, 8.95 y 9.94 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 2% y 3% mostraron una disminución de 4.38% y 20.27% y 11.39% respectivamente.

A los 28 días de curado: La resistencia a la tracción indirecta del concreto control fue de 23.27 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial de cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las resistencias obtenidas fueron de 23.66, 24.81 y 23.98 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 2% y 3% mostraron un incremento del 1.69%, 6.60% y 3.07%, respectivamente.

En el estudio de Li et al. (2023), el concreto patrón del grupo B (reemplazo de cemento) presentó una resistencia a la tracción indirecta de 2.96 MPa a los 28 días. Sobre este valor de referencia, los especímenes con biochar alcanzaron: B1%: 3.04 MPa (+2.70%), B2%: 3.21 MPa (+8.44%), B3%: 2.98 MPa (+0.67%), B4%: 2.91 MPa (-1.69%) y B5%: 2.59 MPa (-12.50%). Los autores concluyen que, en este método de incorporación, la resistencia a tracción del concreto con biochar se mantiene cercana al valor del control, con ligeros incrementos para bajos porcentajes de sustitución.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en el presente estudio, se observa un comportamiento coherente. En ambos casos, los porcentajes del 1% al 3% generan resistencias similares o ligeramente superiores al concreto control. Asimismo, tanto en el estudio de Li et al. (2023) como en esta investigación, se aprecia que el beneficio no es progresivo: aumentos mayores en el contenido de biochar dejan de mejorar la resistencia e incluso podrían reducirla.

5.3.3. Concreto con adición de biochar

La Figura 145 muestra la curva de madurez de la resistencia a tracción indirecta del concreto y la Figura 146 muestra el resumen de las resistencias a la tracción indirecta a los 7 y 28 días de curado del concreto control versus el concreto con adición de biochar.

Figura 145

Curva de madurez de la resistencia a tracción del concreto control vs concreto con adición de biochar

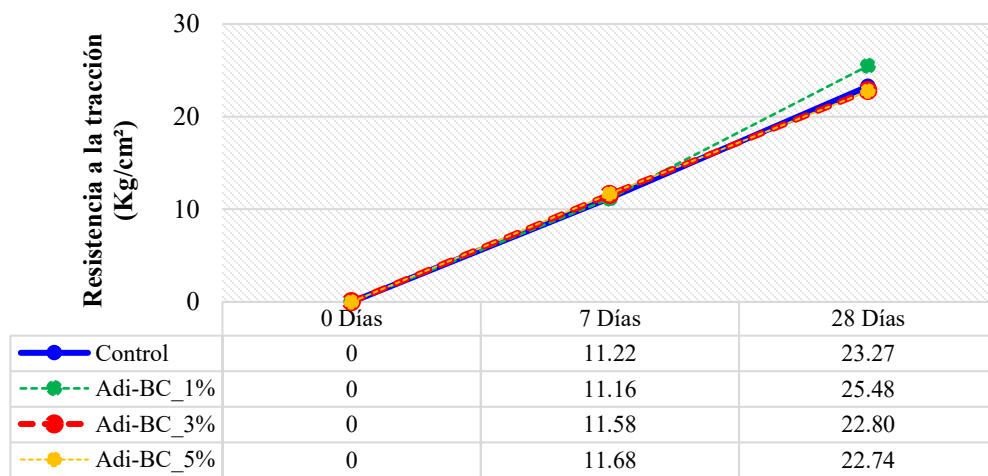
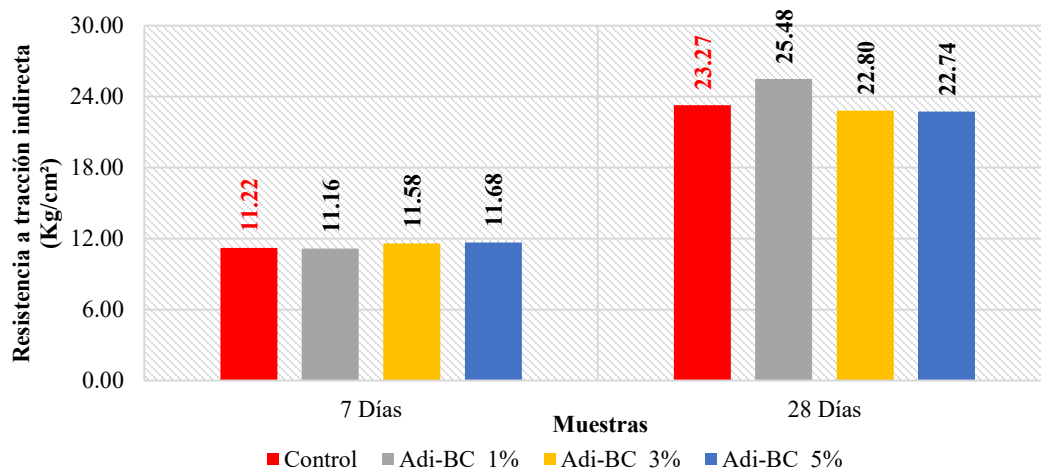


Figura 146

Gráfico – resistencia a la tracción indirecta del concreto control vs concreto con adición de biochar



A los 7 días de curado: La resistencia a la tracción indirecta del concreto control fue de 11.22 kgf/cm². Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las resistencias obtenidas fueron de 11.16, 11.58 y 11.68 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 1% presentó una disminución de 0.56%, mientras que las mezclas con 3% y 5% mostraron un aumento de 3.21% y 4.07%, respectivamente.

A los 28 días de curado: La resistencia a la tracción indirecta del concreto control fue de 23.27 kgf/cm². Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las resistencias obtenidas fueron de 25.48, 22.80 y 22.74 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 1% mostró un incremento del 9.52%, mientras que las mezclas con 3% y 5% mostraron una disminución del 2.01% y 2.28%, respectivamente.

En el estudio de Li et al. (2023), se reportó que la resistencia a la tracción indirecta del grupo A, correspondiente a la adición de biochar, alcanzó su valor máximo con una dosificación del 2%, superando en aproximadamente 30% al concreto control. Para porcentajes superiores, la resistencia disminuyó de manera progresiva, aunque los valores se mantuvieron por encima del concreto patrón. En la presente investigación se observa una tendencia similar en cuanto al comportamiento general; no obstante, en términos de resultados, únicamente la dosificación del 1% mostró un incremento de la resistencia, mientras que los porcentajes del 3% y 5% presentaron valores inferiores a los del concreto control.

Gupta et al. (2020) reportó que la incorporación de biocarbón proveniente de aserrín en porcentajes comprendidos entre 0.5% y 2% generó incrementos de resistencia únicamente para la dosificación del 0.5%, mientras que los contenidos del 1% y 2% ocasionaron una disminución de la resistencia a la tracción indirecta. La presente investigación evidencia una tendencia similar en

cuanto al comportamiento general, observándose mejoras en el concreto con una adición del 1% y reducciones de resistencia para los porcentajes del 3% y 5%.

5.4. Análisis y discusión de resultados de la resistencia a la flexión

La Tabla 156 muestra el resumen de las resistencias a flexión a los 28 días de curado.

Tabla 156

Cuadro resumen – resultados resistencia a la flexión en vigas

N°	Descripción	Días
		Resistencia (Kg/cm ²)
1	Control	36.27
2	Sust-Ar-BC_10%	36.13
3	Sust-Ar-BC_15%	34.66
4	Sust-Ar-BC_20%	34.31
5	Sust-Cm-BC_1%	32.96
6	Sust-Cm-BC_2%	31.35
7	Sust-Cm-BC_3%	30.64
8	Adi-BC_1%	33.86
9	Adi-BC_3%	32.95
10	Adi-BC_5%	31.72

Según la Norma E.060 (2020) se tiene que el módulo de rotura teórico para concretos de peso normal o liviano es:

$$\text{Módulo de rotura} = 0.62 * \lambda * \sqrt{f'c} \quad \dots (\text{Ec. 42})$$

Donde: $\lambda = 1$ para concretos de peso normal y $f'c$ está en MPa.

Según esto el módulo de rotura teórico sería de 2.84 MPa lo que equivale a 28.96 kg/cm². De ello se concluye que el módulo de rotura del concreto control y de todas las dosificaciones estudiadas superaron el módulo de rotura teórico.

5.4.1. Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar

La Figura 147 muestra la curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto y la Figura 148 muestran el resumen de las resistencias a flexión a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial de la arena (agregado fino) por biochar.

Figura 147

Curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena

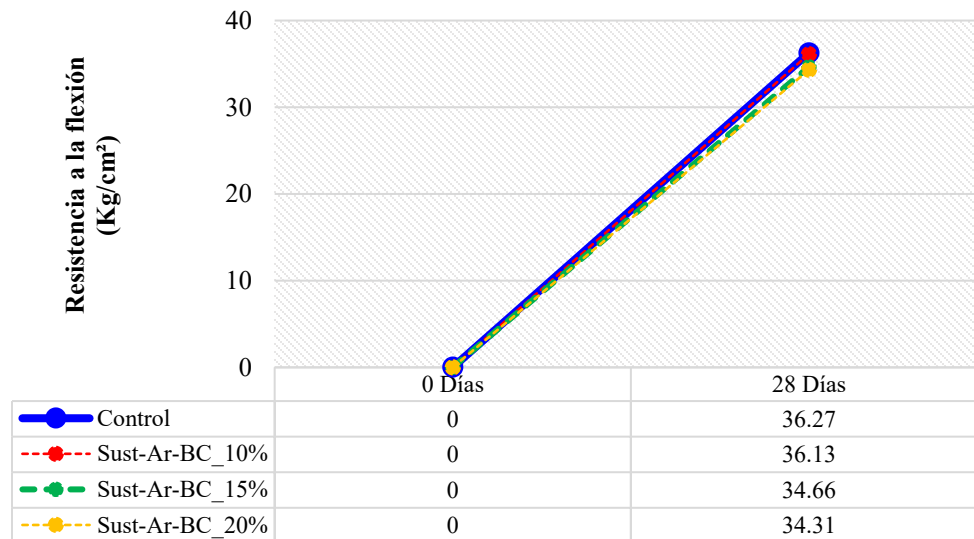
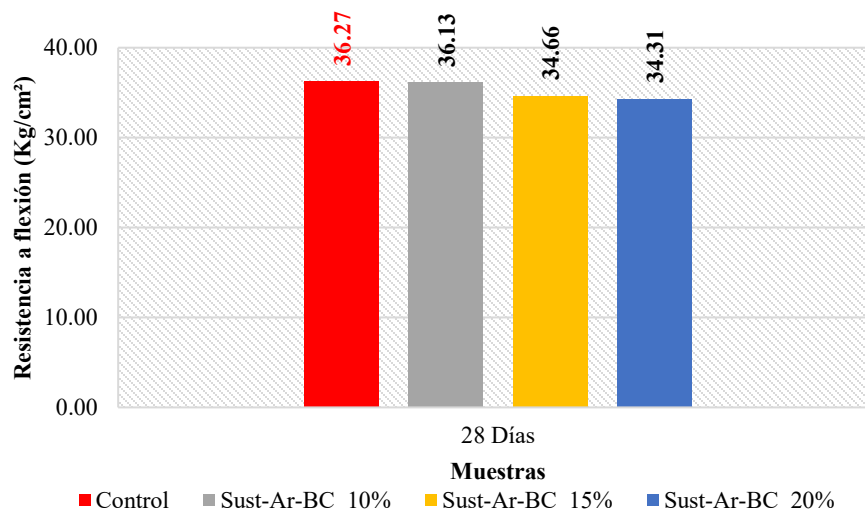


Figura 148

Gráfico – resistencia a la flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena por biochar



A los 28 días de curado: El módulo de rotura del concreto control fue de 36.27 kgf/cm².

Para los concretos con sustitución parcial de la arena de biochar en 10%, 15% y 20%, las

resistencias obtenidas fueron de 36.13, 34.66 y 34.31 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 10%, 15% y 20% mostraron una disminución del 0.40%, 4.45% y 5.42%, respectivamente.

En la revisión bibliográfica no se identificaron estudios que evalúen directamente el módulo de rotura en concretos con sustitución de arena por biochar, lo que evidencia un vacío científico en esta propiedad mecánica específica.

En conclusión, de acuerdo a lo observado el uso de biochar como sustitución parcial del agregado fino es viable hasta un 10% sin afectar significativamente el desempeño a flexión; sin embargo, porcentajes mayores tienden a comprometer esta propiedad mecánica y deben ser evaluados con cautela.

5.4.2. Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

La Figura 149 muestra la curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto y la Figura 150 muestra el resumen de las resistencias a flexión a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.

Figura 149

Curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento

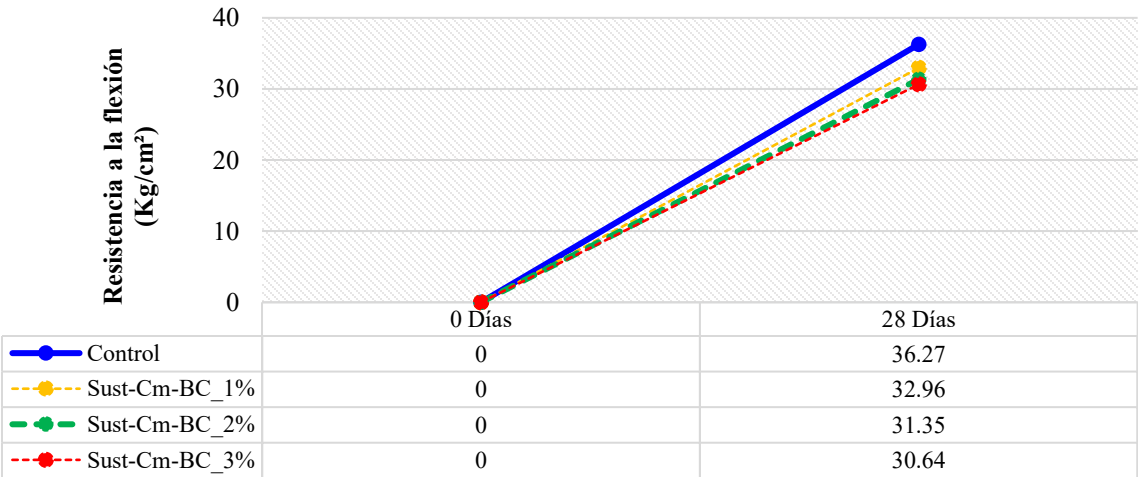
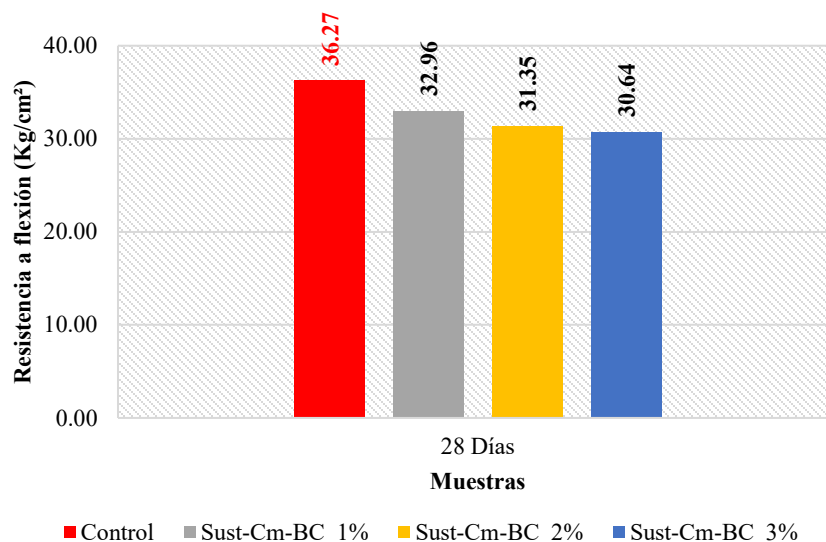


Figura 150

Gráfico – resistencia a la flexión del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar



A los 28 días de curado: El módulo de rotura del concreto control fue de 36.27 kgf/cm². Para los concretos con sustitución parcial del cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las resistencias obtenidas fueron de 32.96, 31.35 y 30.64 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 2% y 3% mostraron una disminución del 9.15%, 13.57% y 15.53%, respectivamente.

Al comparar estos resultados con el antecedente de Salvador (2023), quien evaluó reemplazos de cemento por biochar entre 1% y 2.5%, se observa un comportamiento similar: en su estudio, el módulo de rotura también disminuyó respecto al patrón (39.95 kg/cm²), registrándose valores de 35.07 kg/cm² para 1%, 37.02 kg/cm² para 2% y 35.33 kg/cm² para 2.5%, lo que confirma que el biochar no actúa como un material capaz de mejorar la resistencia a flexión cuando sustituye al cemento. De hecho, en ambos estudios, el patrón supera claramente a todas las mezclas con biochar, reforzando la conclusión de que esta modalidad de incorporación tiende a debilitar la matriz cementicia.

5.4.3. Concreto con adición de biochar

La Figura 151 muestra la curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto y la Figura 152 muestra el resumen de las resistencias a flexión a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con adición de biochar.

Figura 151

Curva de madurez de la resistencia a flexión del concreto control vs concreto con adición de biochar

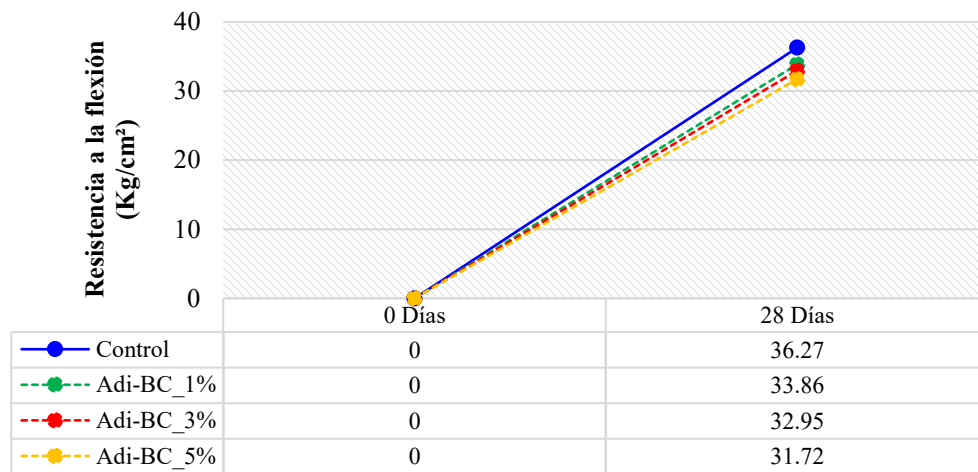
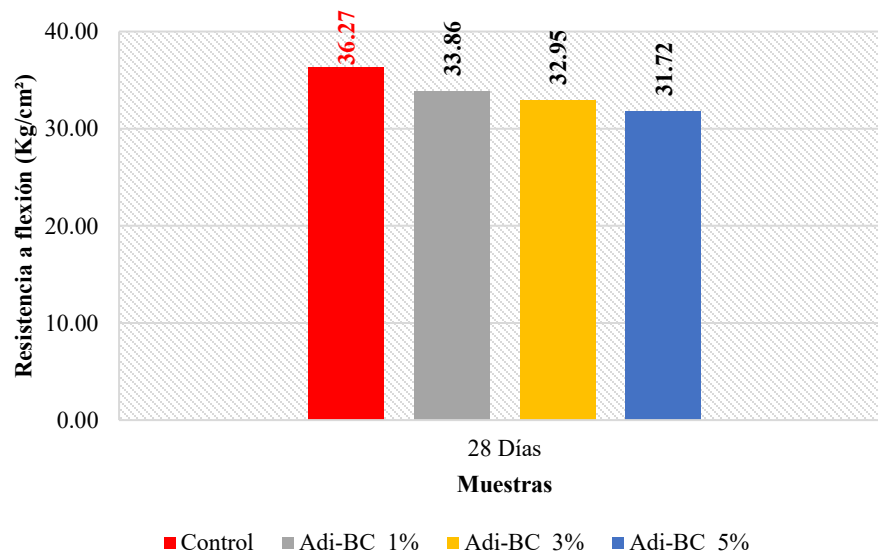


Figura 152

Gráfico – resistencia a la flexión del concreto control vs concreto con adición de biochar



A los 28 días de curado: El módulo de rotura del concreto control fue de 36.27 kgf/cm². Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las resistencias obtenidas fueron de 33.86, 32.95 y 31.72 kgf/cm², respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 3% y 5% mostraron una disminución del 6.65%, 9.16% y 12.55%, respectivamente.

Al comparar estos resultados con el antecedente de Gupta et al. (2020), se observa un comportamiento distinto. En su estudio, la adición de biocarbón de aserrín en 0.5%, 1% y 2% produjo ligeros incrementos en la resistencia a flexión respecto a su patrón (7.89 MPa), alcanzando 8.24 MPa y 8.12 MPa para 0.5% y 1% de biochar, antes de descender ligeramente a 7.99 MPa con 2%. Es decir, su patrón fue superado por las mezclas con biochar en los tres niveles de adición.

La diferencia entre ambos estudios podría atribuirse a factores como el tipo de biomasa utilizada, la granulometría, el grado de carbonización y la interacción del biochar con la pasta cementicia. En síntesis, los resultados indican que la adición de biochar entre 1% y 5% no es favorable para la resistencia a flexión del concreto bajo las condiciones evaluadas.

5.5. Análisis y discusión de resultados de la densidad, absorción y %vacíos

La Tabla 157 muestra el resumen de la densidad, absorción y porcentaje de vacíos del concreto a los 28 días de curado.

Tabla 157

Cuadro resumen – resultados a la densidad, absorción y porcentaje de vacíos

Resistencia de diseño:		210	Kg/cm²	
		28 Días		
Nº	Descripción	Densidad seca (g/cm³)	Porcentaje de absorción (%)	Porcentaje de vacíos (%)
1	Control	2.25	4.23	9.83
2	Sust-Ar-BC_10%	2.19	4.11	9.48
3	Sust-Ar-BC_15%	2.16	4.23	10.14
4	Sust-Ar-BC_20%	2.13	4.51	10.27
5	Sust-Cm-BC_1%	2.23	4.01	9.33
6	Sust-Cm-BC_2%	2.23	4.21	9.98
7	Sust-Cm-BC_3%	2.21	4.43	10.22
8	Adi-BC_1%	2.25	3.64	8.51
9	Adi-BC_3%	2.24	3.83	8.95
10	Adi-BC_5%	2.24	3.83	8.93

Según la Norma E.060 (2020), define al concreto de peso normal, aquel que tiene una densidad aproximada de 2.3 g/cm³. En la presente investigación se obtuvo una densidad seca del concreto de 2.25 g/cm³, cuyo valor es cercano al teórico.

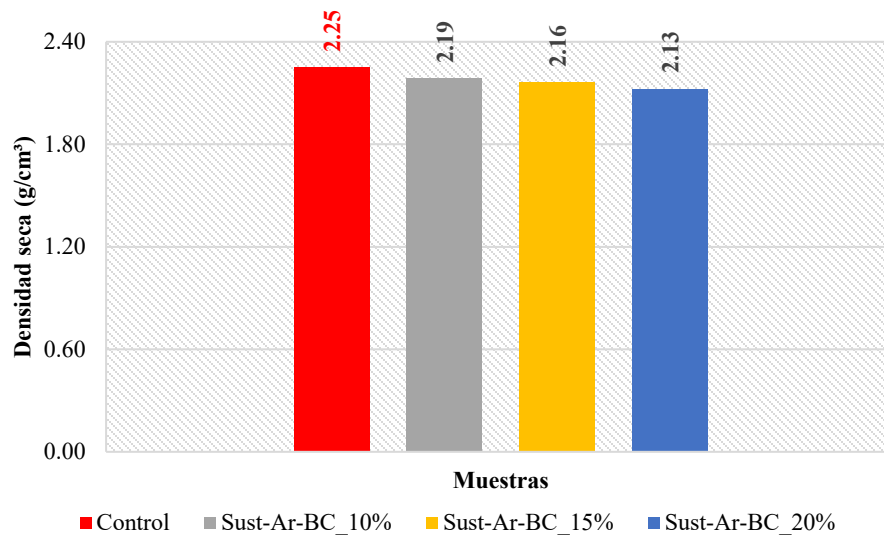
5.5.1. Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar

El peso específico de la arena utilizada en la presente investigación fue de 2585.32 kg/m³, mientras que el peso específico del biochar empleado como agregado fino fue de 855.08 kg/m³. Estos datos son importantes para interpretar los resultados de densidad seca obtenidos en el concreto endurecido con sustitución parcial de arena por biochar.

La Figura 153 muestra el resumen de la densidad a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial de la arena (agregado fino) por biochar.

Figura 153

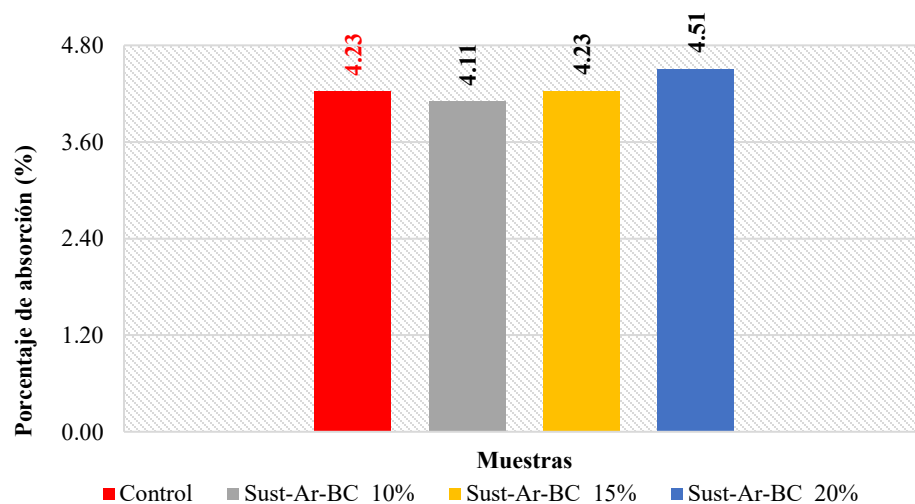
Gráfico – densidad seca del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena biochar



La Figura 154 muestra el resumen de la absorción a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial de la arena (agregado fino) por biochar.

Figura 154

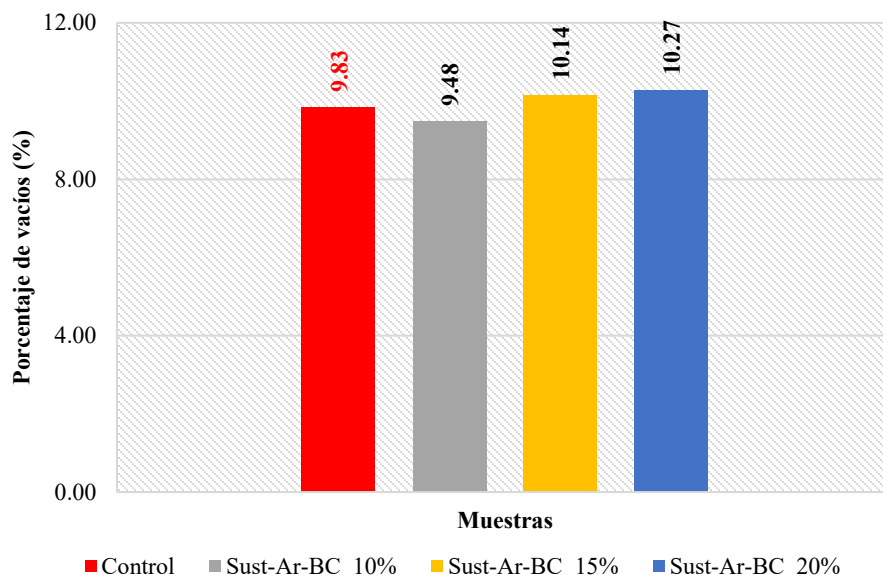
Gráfico – absorción del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena biochar



La Figura 155 muestra el resumen del porcentaje de vacíos a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial de la arena (agregado fino) por biochar.

Figura 155

Gráfico – porcentaje de vacíos del concreto control vs concreto con sustitución parcial de la arena biochar



A los 28 días de curado se tuvo:

Densidad seca: La densidad seca del concreto control fue de 2.25 g/cm³. Para los concretos con sustitución parcial de la arena por biochar en 10%,15% y 20%, las densidades obtenidas fueron de 2.19, 2.16 y 2.13 g/cm³, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 10%, 15% y 20% mostraron una disminución del 2.82%, 3.90% y 5.52%, respectivamente.

Absorción: La absorción del concreto control fue de 4.23%. Para los concretos con sustitución parcial de la arena por biochar en 10%,15% y 20%, las absorciones fueron de 4.11, 4.23 y 4.51 %, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 10% mostró una disminución de 2.97%, mientras que las muestras con 15% y 20% mostraron un

aumento de 0.04% y 6.51%. La absorción disminuyó ligeramente con 10%, se mantuvo casi igual con 15% y aumentó con 20%.

Porcentaje de vacíos o volumen de poros permeables: El porcentaje de vacíos del concreto control fue de 9.83%. Para los concretos con sustitución parcial de la arena por biochar en 10%, 15% y 20%, los porcentajes de vacíos fueron de 9.48, 10.14 y 10.27%, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 10% mostró una disminución de 3.55%, mientras que las muestras con 15% y 20% mostraron un aumento de 3.15% y 4.52%.

Amancha (2024), reportó variaciones en la densidad seca de concretos con biochar de café, obteniendo valores de 2439.904 kg/m³ para una dosificación del 5% y de 2448.707 kg/m³ para el 10%, ambos superiores a la densidad seca del concreto patrón (2373.57 kg/m³); sin embargo, para una sustitución del 20% se observó una disminución hasta 2338.674 kg/m³. Este comportamiento difiere de los resultados obtenidos en la presente investigación, en la cual se evidencia una disminución progresiva de la densidad a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo parcial del agregado fino, lo que podría atribuirse a la naturaleza más liviana del biochar empleado en este estudio.

Respecto a la absorción, los resultados evidencian un comportamiento mixto: una ligera disminución con 10%, estabilidad con 15% y un incremento claro con 20%. Esto sugiere que pequeñas cantidades de biochar pueden mejorar la compactación interna del concreto y reducir la entrada de agua; sin embargo, a mayor contenido, su estructura altamente porosa podría empezar a influir de forma más marcada, provocando una mayor absorción. Aunque no se encontraron antecedentes directos que evalúen absorción bajo sustitución de agregado fino por biochar, este comportamiento guarda coherencia con lo observado en la porosidad, donde sí existen estudios comparables.

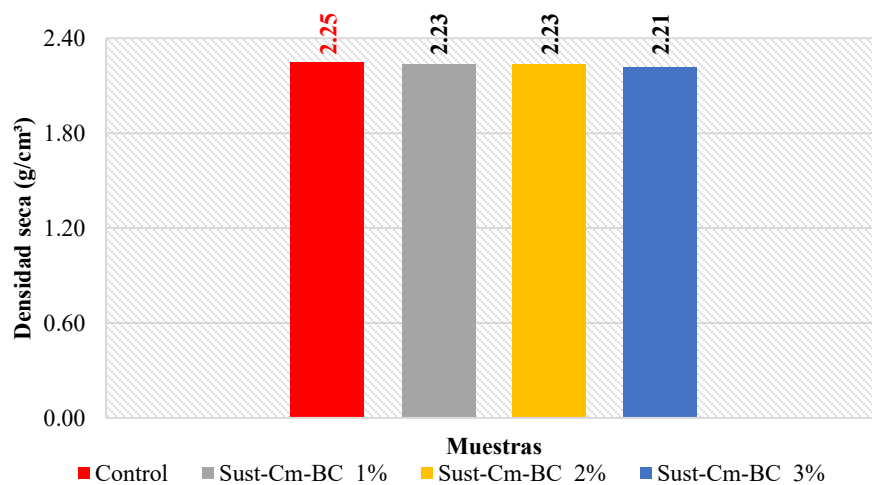
En cuanto al porcentaje de vacíos (porosidad), se identificó una reducción para el 10% de biochar, seguida de incrementos para el 15% y 20%. Esto sugiere que a bajos porcentajes el biochar puede actuar como microrelleno, disminuyendo los vacíos presentes en la matriz cementicia. No obstante, al aumentar la sustitución, la porosidad propia del biochar podría generar mayor volumen de vacíos conectados. Este comportamiento es consistente con los resultados obtenidos por Li et al. (2023), quienes evaluaron porosidad mediante inyección de mercurio y reportaron que la sustitución de arena por biochar en niveles moderados (5–10%) redujo la porosidad, pero porcentajes mayores (15–25%) produjeron incrementos significativos. Esta tendencia coincide con lo observado en el presente estudio y respalda la idea de que la porosidad interna del biochar se vuelve dominante a mayores niveles de reemplazo.

5.5.2. Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

La Figura 156 muestra el resumen de la densidad a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.

Figura 156

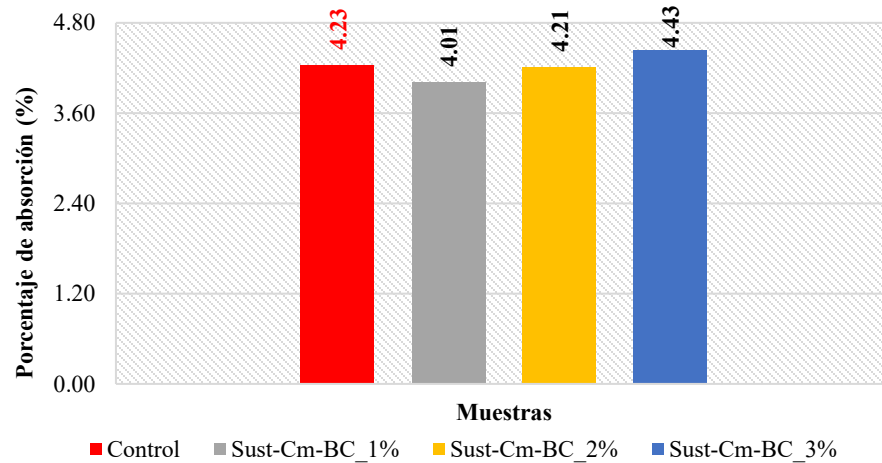
Gráfico – densidad seca del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar



La Figura 157 muestra el resumen de la absorción a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.

Figura 157

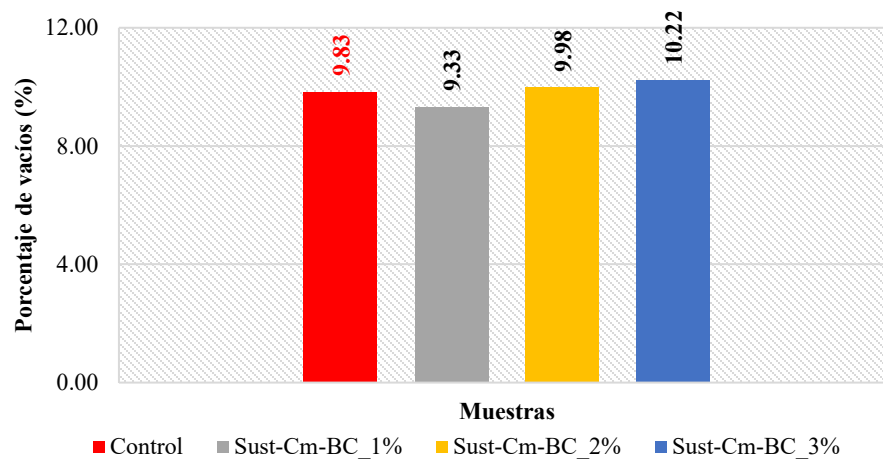
Gráfico – absorción del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar



La Figura 158 muestra el resumen del porcentaje de vacíos a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con sustitución parcial del cemento por biochar.

Figura 158

Gráfico – porcentaje de vacíos del concreto control vs concreto con sustitución parcial del cemento por biochar



A los 28 días de curado se tuvo:

Densidad seca: La densidad seca del concreto control fue de 2.25 g/cm^3 . Para los concretos con sustitución parcial del cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las densidades obtenidas fueron de 2.23, 2.23 y 2.21 g/cm^3 , respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1%, 2% y 3% mostraron una disminución del 0.79%, 0.66% y 1.57%, respectivamente.

Absorción: La absorción del concreto control fue de 4.23%. Para los concretos con sustitución parcial del cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, las absorciones fueron de 4.01, 4.21 y 4.43 %, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1% y 2% mostraron una disminución de 5.35 y 0.49 % respectivamente, mientras que la muestra con 3% mostró un aumento de 4.62%.

Porcentaje de vacíos o volumen de poros permeables: El porcentaje de vacíos del concreto control fue de 9.83%. Para los concretos con sustitución parcial del cemento por biochar en 1%, 2% y 3%, los porcentajes de vacíos fueron de 9.33, 9.98 y 10.22%, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 1% mostró una disminución de 5.04%, mientras que las muestras con 2% y 3% mostraron un aumento de 1.54% y 3.98%.

Según lo observado en la presente investigación la densidad seca disminuye ligeramente en todos los porcentajes evaluados. Este comportamiento era de esperarse debido a que el biochar presenta una densidad mucho menor que el cemento, por lo que su incorporación reduce la masa del concreto sin generar cambios bruscos en su estructura. Esta tendencia coincide con lo reportado por Turovaara (2022), quien también registró disminuciones progresivas de densidad al reemplazar el cemento por biochar en porcentajes del 5 al 10%, lo que confirma que este efecto es consistente aun cuando se emplean diferentes tipos de biochar.

En cuanto a la absorción, se observa un comportamiento dependiente del porcentaje reemplazado. Las mezclas con 1% y 2% presentan una ligera reducción de absorción respecto al patrón, lo que sugiere que pequeñas cantidades de biochar pueden favorecer una mejor compactación o actuar como microrelleno en la matriz. Sin embargo, con 3% la absorción aumenta en 4.62%, reflejando que mayores contenidos de biochar podrían elevar la porosidad efectiva y permitir una mayor retención de agua, debido a la estructura altamente porosa del material. Aunque no se encontraron antecedentes directos que evalúen absorción bajo sustitución de cemento por biochar, este comportamiento guarda coherencia con lo observado en la porosidad, donde sí existen estudios comparables.

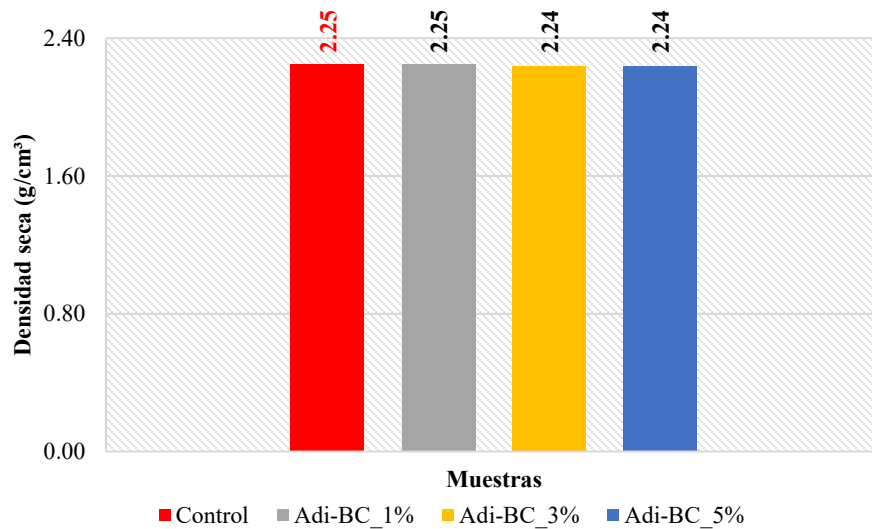
En relación con el porcentaje de vacíos (porosidad), los resultados de la presente investigación evidencian una tendencia inicial de disminución seguida de un incremento conforme aumenta el contenido de biochar. Con una adición del 1% se registró una reducción del 5.04%, lo que indica una mezcla ligeramente más densa y compacta. No obstante, al incrementar la dosificación al 2% y 3%, aumentaron en 1.54% y 3.98%, respectivamente, reflejando una matriz menos compacta y con mayor conectividad de poros. Este comportamiento coincide parcialmente con lo reportado por Li et al. (2023), quienes observaron incrementos progresivos de la porosidad a medida que se eleva el contenido de biochar cuando este reemplaza al cemento; en su estudio, la porosidad del concreto aumentó respecto al patrón (10.2%), pasando de 10.3% hasta 11.7% conforme la dosificación de biochar se incrementó del 1% al 5%.

5.5.3. Concreto con adición de biochar

La Figura 159 muestra el resumen de la densidad a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con adición de biochar.

Figura 159

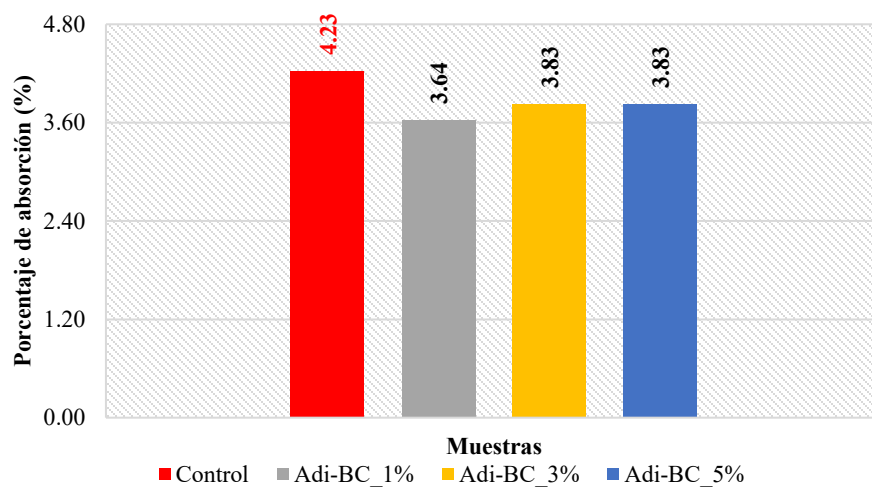
Gráfico – densidad seca del concreto control vs concreto con adición de biochar



La Figura 160 muestra el resumen de la absorción a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con adición de biochar.

Figura 160

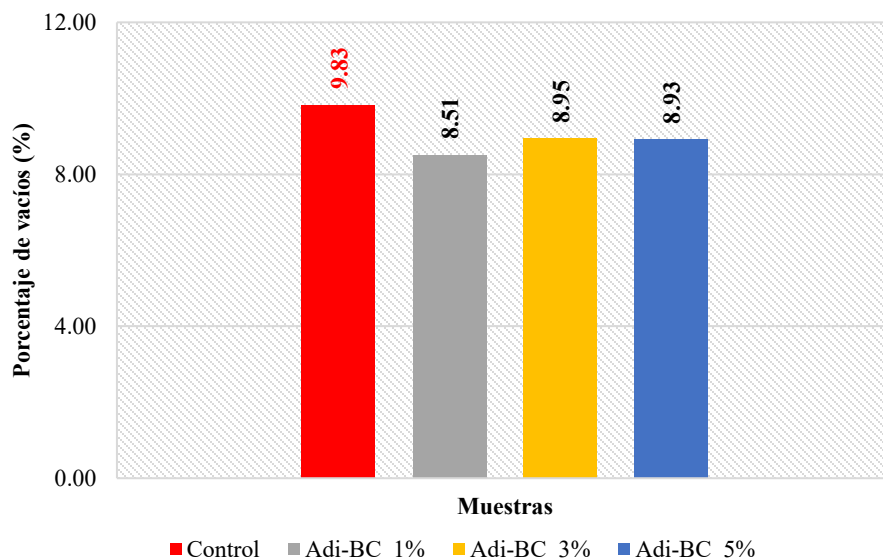
Gráfico – absorción del concreto control vs concreto con adición de biochar



La Figura 161 muestra el resumen del porcentaje de vacíos a los 28 días de curado del concreto control versus el concreto con adición de biochar.

Figura 161

Gráfico – porcentaje de vacíos del concreto control vs concreto con adición de biochar



A los 28 días de curado se tuvo:

Densidad seca: La densidad seca del concreto control fue de 2.25 g/cm^3 . Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las densidades obtenidas fueron de 2.25, 2.24 y 2.24 g/cm^3 , respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, la mezcla con 1% mostró un incremento de 0.09%, mientras que las mezclas con 3% y 5% mostraron una disminución del 0.48% y 0.46%, respectivamente.

Absorción: La absorción del concreto control fue de 4.23%. Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, las absorciones fueron de 3.64, 3.83 y 3.83 %, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto control, las mezclas con 1% 3% y 5% mostraron una disminución de 14.11, 9.53 y 9.52 % respectivamente.

Porcentaje de vacíos o volumen de poros permeables: El porcentaje de vacíos del concreto control fue de 9.83%. Para los concretos con adición de biochar en 1%, 3% y 5%, los porcentajes de vacíos fueron de 8.51, 8.95 y 8.93%, respectivamente. Se observa que, respecto al concreto

control, las mezclas con 1% 3% y 5% mostraron una disminución de 13.40, 8.94 y 9.14 % respectivamente.

La densidad del concreto prácticamente no varió respecto al concreto patrón. La mezcla con 1% de biochar registró un incremento mínimo de 0.09%, mientras que las mezclas con 3% y 5% mostraron reducciones muy ligeras de 0.48% y 0.46%, respectivamente. Estas variaciones mínimas podrían deberse a que los porcentajes de adición son bajos y la masa total del concreto no se ve significativamente afectada, incluso considerando que el biochar es un material más liviano.

Este comportamiento coincide parcialmente con Zalamea (2022), quien reportó variaciones poco significativas en la densidad para adiciones de 1.5% y 3%. Sin embargo, observó disminuciones más marcadas cuando el contenido de biochar aumentó considerablemente (25%), lo que confirma que solo adiciones elevadas generan reducciones notables en la densidad final.

La absorción mostró mejoras en los porcentajes 1%, 3% y 5% en comparación con el concreto control. Esta reducción sostenida indica que pequeñas cantidades de biochar finamente molido actúan como material de relleno, contribuyendo a una mejor compactación de la matriz cementicia y reduciendo los espacios donde el agua puede penetrar. Aunque no se encontraron antecedentes directos que evalúen absorción bajo adición de biochar, este comportamiento guarda coherencia con lo observado en la porosidad, donde sí existen estudios comparables.

El porcentaje de vacíos (porosidad) en la presente investigación disminuyó en todos los porcentajes de adición. Esto evidencia que la adición de biochar mejora la densidad interna del concreto al actuar como relleno (filler), especialmente cuando se emplean en bajos porcentajes.

El porcentaje de vacíos (porosidad) en la presente investigación mostró una disminución para todos los porcentajes de adición evaluados, lo que evidencia que el biochar podría actuar

como material de relleno (filler), particularmente cuando se emplea en bajas dosificaciones. Estos resultados difieren de lo reportado por Li et al. (2023) para el conjunto A, en el que el biochar fue utilizado como material de relleno, ya que los autores observaron incrementos en la porosidad para contenidos de adición del 1%, 3%, 4% y 5%, con valores de 11.6%, 10.9%, 14.4% y 15.4%, respectivamente, en comparación con el concreto patrón (10.2%). No obstante, se registró una reducción significativa únicamente para la dosificación del 2%, alcanzándose una porosidad de 7.9%.

5.6. Análisis y discusión de resultados del análisis de costos

La Tabla 158 muestra el resumen del análisis de costos del concreto patrón y de los diferentes diseños de mezcla con biochar.

Tabla 158

Cuadro resumen – análisis de costos por m³ de concreto

Nº	Descripción	Costo por m ³
1	Control	S/ 382.45
2	Sust-Ar-BC_10%	S/ 421.24
3	Sust-Ar-BC_15%	S/ 440.20
4	Sust-Ar-BC_20%	S/ 459.25
5	Sust-Cm-BC_1%	S/ 386.27
6	Sust-Cm-BC_2%	S/ 389.80
7	Sust-Cm-BC_3%	S/ 393.64
8	Adi-BC_1%	S/ 388.56
9	Adi-BC_3%	S/ 400.79
10	Adi-BC_5%	S/ 413.01

5.6.1. Concreto con sustitución parcial de la arena por biochar

El concreto con sustitución parcial de arena por biochar en 10%, 15% y 20% presenta incrementos de 38.79, 57.75 y 76.80 soles por m³, respectivamente, en comparación con el concreto convencional. Se observa un aumento progresivo del costo conforme se incrementa el porcentaje de biochar, lo cual se atribuye a que este material requiere un procesamiento previo que

incluye selección, secado, molienda y control granulométrico, generando un costo adicional mayor al del agregado fino convencional. A medida que la proporción de biochar aumenta, dicho costo adquiere mayor representatividad dentro del volumen total de la mezcla, impactando de forma más significativa en el costo final del concreto.

5.6.2. Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar

El concreto con sustitución parcial de cemento por biochar en 1%, 2% y 3% presenta incrementos de 3.82, 7.35 y 11.19 soles por m³ en comparación con el concreto convencional. Estos aumentos son relativamente moderados y se explican porque la cantidad de cemento sustituida en la mezcla es reducida, de modo que los pequeños porcentajes de biochar reemplazan volúmenes limitados del material cementante, restringiendo su impacto económico directo. Asimismo, el biochar se dosifica en proporciones pequeñas debido a su elevada finura y baja densidad, lo que atenúa su influencia en el costo global del concreto.

Este resultado difiere de lo reportado por Salvador (2023), quien concluyó que la sustitución parcial del cemento por biocarbón produjo ligeras reducciones en el costo del concreto, con ahorros de 0.11, 0.20 y 0.28 soles por m³ para dosificaciones de 1%, 2% y 2.5%, respectivamente. La discrepancia entre ambos estudios se debe a las diferencias en el origen del biochar, los costos asociados a su obtención y procesamiento, así como a las condiciones locales de precios de los materiales.

5.6.3. Concreto con adición de biochar

El concreto con adición de biochar en 1%, 3% y 5% presenta incrementos de 6.11, 18.34 y 30.56 soles por m³, respectivamente, en comparación con el concreto control. Se observa que el costo aumenta de manera progresiva conforme se incrementa el porcentaje de biochar añadido, debido a que la adición implica la incorporación de material adicional a la mezcla, lo que eleva los

consumos por metro cúbico. A medida que la dosificación de biochar se incrementa, el impacto económico se vuelve más significativo, siendo este mayor que en el caso de la sustitución parcial del cemento, pero menor que el observado en la sustitución del agregado fino.

Capítulo VI

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

6.1.1. Conclusión general

Con respecto al concreto control:

La incorporación del biochar como sustituto parcial del agregado fino mejora la resistencia a la compresión con el porcentaje de 10% únicamente; mejora la resistencia a la tracción indirecta con el porcentaje de 10% y 15%; reduce la resistencia a la flexión en todos los porcentajes estudiados (10%, 15% y 20%); reduce la densidad seca del concreto en todos los porcentajes estudiados (10%, 15% y 20%); reduce la absorción únicamente con 10% y reduce el porcentaje de vacíos únicamente con 10%.

La incorporación del biochar como sustituto parcial del cemento mantiene la resistencia a la compresión con el porcentaje de 1%; mejora la resistencia a la tracción indirecta en todos los porcentajes estudiados (1%, 2% y 3%); reduce la resistencia a la flexión en todos los porcentajes estudiados (1%, 2% y 3%); reduce la densidad seca del concreto en todos los porcentajes estudiados (1%, 2% y 3%); reduce la absorción con 1%, 2% y disminuye el porcentaje de vacíos únicamente con 1%.

La incorporación del biochar como adición mejora la resistencia a la compresión en todos los porcentajes estudiados (1%, 3% y 5%); mejora la tracción indirecta con el porcentaje de 1%; reduce la resistencia a la flexión en todos los porcentajes estudiados (1%, 3% y 5%); mantiene la densidad seca del concreto en todos los porcentajes estudiados (1%, 3% y 5%); disminuye la absorción en todos los porcentajes estudiados (1%, 3% y 5%) y disminuye el porcentaje de vacíos en todos los porcentaje estudiados (1%, 3% y 5%).

En todos los casos no se reduce el costo por m³ del concreto.

6.1.2. Conclusiones específicas

CE1: La incorporación de biochar como sustituto parcial del agregado fino, en comparación con el concreto control, evidenció un comportamiento diferenciado según el porcentaje de reemplazo.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se observó una mejora únicamente con el 10% de biochar, registrándose un incremento del 0.33% a los 28 días; sin embargo, con reemplazos del 15% y 20%, la resistencia se redujo en 3.88% y 7.64%, respectivamente.

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta, los concretos con 10% y 15% de biochar presentaron incrementos del 0.30% y 4.24% a los 28 días, respectivamente, mientras que con un 20% de reemplazo se evidenció una disminución del 4.36%.

Por otro lado, la resistencia a la flexión no mostró mejoras para ninguno de los porcentajes evaluados, registrándose reducciones del 0.40%, 4.45% y 5.42% para los contenidos de 10%, 15% y 20%, respectivamente.

En relación con las propiedades físicas, la densidad seca del concreto disminuyó en todos los casos, con reducciones del 2.82%, 3.90% y 5.52% para los reemplazos de 10%, 15% y 20%, respectivamente. Asimismo, el porcentaje de absorción se redujo en 2.97% únicamente con el 10% de biochar, se mantuvo prácticamente constante con el 15% y aumentó en 6.51% con el 20%. Finalmente, el porcentaje de vacíos disminuyó en 3.55% con el 10% de reemplazo, mientras que se incrementó en 3.15% y 4.52% para los contenidos de 15% y 20%, respectivamente.

CE2: La incorporación de biochar como sustituto parcial del cemento, en comparación con el concreto control, evidenció un comportamiento diferenciado según el porcentaje de reemplazo.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se observó una mejora únicamente con el 1% de biochar, registrándose un incremento del 0.10% a los 28 días; sin embargo, con reemplazos del 2% y 3%, la resistencia se redujo en 0.68% y 1.23%, respectivamente.

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta, los concretos con 1%, 2% y 3% de biochar presentaron incrementos del 1.69%, 6.60% y 3.07% a los 28 días, respectivamente.

Por otro lado, la resistencia a la flexión no mostró mejoras para ninguno de los porcentajes evaluados, registrándose reducciones del 9.15%, 13.57% y 15.53% para los contenidos de 1%, 2% y 3%, respectivamente.

En relación con las propiedades físicas, la densidad seca del concreto disminuyó en todos los casos, con reducciones del 0.79%, 0.66% y 1.57% para los reemplazos de 1%, 2% y 3%, respectivamente. Asimismo, el porcentaje de absorción disminuyó en 5.35% y 0.49% con 1% y 2% respectivamente y aumentó en 4.62% con 3%. Finalmente, el porcentaje de vacíos disminuyó en 5.04% con el 1% de reemplazo, mientras que se incrementó en 1.54% y 3.98% para los contenidos de 2% y 3%, respectivamente.

CE3: La incorporación de biochar como adición, en comparación con el concreto control, evidenció un comportamiento diferenciado en función del porcentaje incorporado.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se registró una mejora en todos los porcentajes evaluados, con incrementos del 2.30%, 7.11% y 4.60% para adiciones de 1%, 3% y 5%, respectivamente.

Respecto a la resistencia a la tracción indirecta, únicamente el concreto con 1% de biochar presentó un incremento significativo del 9.52%, mientras que las adiciones de 3% y 5% mostraron reducciones del 2.01% y 2.28%, respectivamente.

Por otro lado, la resistencia a la flexión no evidenció mejoras para ninguno de los porcentajes estudiados, observándose reducciones del 6.65%, 9.16% y 12.55% para las adiciones de 1%, 3% y 5%, respectivamente.

En relación con las propiedades físicas, la densidad seca del concreto presentó un ligero incremento del 0.09% con 1% de biochar, mientras que se redujo en 0.48% y 0.46% con adiciones de 3% y 5%, respectivamente. Asimismo, el porcentaje de absorción disminuyó en 14.11%, 9.53% y 9.52% para los contenidos de 1%, 3% y 5%, respectivamente. Finalmente, el porcentaje de vacíos también se redujo en 13.40%, 8.94% y 9.14% con adiciones de 1%, 3% y 5%, respectivamente.

CE4: El uso de biochar resulta económicamente viable cuando se emplea como adición, ya que su costo por m³ (entre 388.56 y 413.01 soles) se mantiene cercano al del concreto patrón y, además, esta modalidad fue la que mostró los mejores resultados físico-mecánicos. La sustitución parcial del cemento también presenta incrementos mínimos de costo y puede considerarse aceptable, mientras que la sustitución del agregado fino genera los mayores aumentos de precio, reduciendo su conveniencia. Por ello, la adición de biochar es la opción más favorable desde el punto de vista económico y técnico.

6.2. Recomendaciones

- a) Aplicar biochar producido bajo condiciones controladas de pirólisis, ya que variaciones en temperatura o materia prima pueden modificar sus propiedades físicas y químicas y generar diferencias en los resultados obtenidos.
- b) Utilizar el biochar en bajas dosificaciones, priorizando porcentajes que demostraron un desempeño favorable. En sustitución del agregado fino se recomienda emplear entre 10% y 15%, en sustitución del cemento entre 1% y 2%, y como adición un porcentaje óptimo

cercano al 3%, donde se observó el mejor equilibrio entre resistencia, absorción y porcentaje de vacíos.

- c) Evitar porcentajes elevados, como 20% en la sustitución de arena y 3% en la sustitución del cemento, ya que incrementan significativamente la absorción y los vacíos, reduciendo la resistencia mecánica y afectando la calidad del concreto.
- d) Considerar el uso del biochar principalmente como adición, ya que esta alternativa mostró la mejor relación entre desempeño mecánico, absorción reducida y menor incremento de costos por m³, siendo la opción más viable técnica y económicamente.
- e) Controlar rigurosamente la granulometría del biochar, especialmente cuando se emplea como reemplazo del agregado fino, para garantizar una distribución uniforme en la mezcla y evitar variaciones de trabajabilidad.

6.2.1. Líneas de Investigación Futuras

- a) Evaluación de la durabilidad del concreto con biochar, considerando ensayos de permeabilidad, carbonatación, ataque de sulfatos, ciclos de congelamiento–deshielo y cloruros, para determinar su comportamiento a largo plazo.
- b) Análisis microestructural mediante SEM, EDS o DRX, para estudiar la interfaz pasta-biochar y comprender cómo su porosidad y textura superficial influyen en la formación de productos de hidratación.
- c) Desarrollo de concretos livianos o eco-eficientes utilizando biochar como material parcial de reemplazo en diferentes proporciones y granulometrías, evaluando su potencial para reducir el peso propio y mejorar el aislamiento térmico.

- d) Evaluación económica y ambiental avanzada, incluyendo análisis de ciclo de vida (LCA) y huella de carbono, para cuantificar el impacto real del uso de biochar en la construcción y su contribución al secuestro de carbono.
- e) Estudios con biochar procedente de otras biomasas, comparando su desempeño con el biochar de coco y castaña, con el fin de identificar nuevas fuentes viables para la región de Cusco y el sur del Perú.

Referencias bibliográficas

- Advancing Standards Transforming Markets International. (1998). *ASTM D5142 Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2008). *ASTM C1157 Standard Performance Specification for Hydraulic Cement*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2013). *ASTM D3172 Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2022). *ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2023). *ASTM C470 Standard Specification for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2024). *ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2024). *ASTM C294 Standard Descriptive Nomenclature for Constituents of Concrete Aggregates*.
- Advancing Standards Transforming Markets International. (2025). *Subcommittee C09.28 on Biochar for Use in Concrete*. Obtenido de ASTM: https://www.astm.org/membership-participation/technical-committees/committee-c09/subcommittee-c09/jurisdiction-c0928?utm_source=chatgpt.com
- AGROPERÚ. (11 de Junio de 2025). *Inauguraron en Piura la Primera Planta de Producción de Biochar del Perú*. Obtenido de <https://www.agroperu.pe/inauguraron-en-piura-la-primera-planta-de-produccion-de-biochar-del-peru/>

- Amancha Zamora, A. N. (2024). *Elaboración de Concreto con Adición de Bagazo de Café para Incrementar su Resistencia*. Ambato: Universidad Técnica de Ambato. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/server/api/core/bitstreams/d909b4f0-ac2f-426c-b016-5fa55f025a13/content>
- American Concrete Institute. (2004). *ACI 211.1- 91 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight and mass concrete*.
- American Concrete Institute. (2022). *ACI 318 Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.
- ASOCRETO. (2010). *Tecnología del Concreto - Tomo I*. Bogotá, Colombia: Nomos Impresores.
- Avanto Castillo, F. (2009). *Tecnología del Concreto (Teoría y Problemas)*. Lima, Perú: Editorial San Marcos E.I.R.L.
- Becerra Seclen , J. A., & Carrasco Torres, A. R. (2024). *Aplicación del Mortero con Biocarbón y Malla de Fibra de Vidrio para Reparación de Grietas en Muros de Albañilería - Chiclayo*. Lima: Universidad de San Martín de Porres. Obtenido de <https://repositorio.usmp.edu.pe/handle/20.500.12727/15197>
- Cabeza Loayza, C. M. (2018). *Estimación del Potencial Energético de los Residuos de la Cadena de Valor del Fruto de la Castaña (Bertholletia Excelsa) en la Región de Madre de Dios*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina. Obtenido de <https://repositorio.lamolina.edu.pe/server/api/core/bitstreams/a13479f5-8f68-4bd5-9005-85ed857c9587/content>
- Centro de Innovación Científica Amazónica. (Agosto de 2018). *Nota Técnica: Producción y Utilización de Biocarbón*. Obtenido de CINCIA: <https://cincia.org/produccion-y-utilizacion-de-biocarbon/>

- Centro de Investigación de Economía y Negocios Globales. (13 de Agosto de 2024). *Evolución del Mercado Internacional y Nacional de Castaña Amazónica*. Obtenido de CIEN: <https://cien.adexperu.org.pe/evolucion-del-mercado-internacional-y-nacional-de-castana-amazonica/>
- Cordero E., G. D., Cárdenas G. , J. A., & Rojas Suárez, J. P. (2019). *Diseño de Mezclas de Concreto Aplicando el Método ACI*. Bogotá: Universidad Francisco de Paula Santander.
- Degerman, E. (14 de Noviembre de 2022). *Great Northwest Wine*. Obtenido de <https://greatnorthwestwine.com/2022/11/14/a-force-for-good-dundee-hills-dynamo-remy-drabkin-wont-be-denied/>
- depositphotos. (2025). *Imágenes de Nuez brasileña*. Obtenido de <https://depositphotos.com/es/serie/360209868.html>
- Diaz Garcia, J. A. (2019). *Propiedades del concreto $f'c = 210\text{kg/cm}^2$ en estado fresco al adicionarle biocarbon de aserrín en 5%, 7.5% y 10%, Chimbote – 2019*. Chimbote: Universidad César Vallejo. Obtenido de <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/51731>
- Gatkal, N., Nalawade, S., Sahni, R., Walunj, A., Kadam, P., Bhanage, G., & Datta, R. (2024). Present trends, sustainable strategies and energy potentials of crop residue management in India: A review. *Heliyon*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39815>
- Global Cement and Concrete Association. (2025). *Cement Industry Net Zero Progress Report 2024/25*. Obtenido de GCCA: <https://gccassociation.org/cement-industry-net-zero-progress-report-2024-25/>
- Gupta, S., Kua, H. W., & Low, C. Y. (2018). Use of biochar as carbon sequestering additive in cement mortar. *ScienceDirect*, 110-129.

- Gupta, S., Wei, K. H., & Dai, P. S. (2020). Effect of biochar on mechanical and permeability properties of concrete exposed to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 1-16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117338>
- Instituto Nacional de Calidad . (2018). *NTP 334.005 CEMENTOS. Método de ensayo normalizado para determinar la densidad del cemento Pórtland.*
- Instituto Nacional de Calidad . (2020). *NTP 334.082 CEMENTOS. Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño.*
- Instituto Nacional de Calidad . (2021). *NTP 339.184 CONCRETO. Determinación de la temperatura del concreto de cemento hidráulico recién mezclado.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2007). *NTP 339.216 CONCRETO. Método para la utilización de cabezales con almohadillas de neopreno en el ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de concreto endurecido.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2012). *NTP 339.078 CONCRETO. Método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2015). *NTP 339.034 CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2015). *NTP 400.043 AGREGADOS. Práctica normalizada para reducir las muestras de agregado a tamaño de ensayo.*
- Instituto Nacional de Calidad. (2016). *NTP 400.010 AGREGADOS. Extracción y preparación de las muestras.*

Instituto Nacional de Calidad. (2018). *NTP 339.187 CONCRETO. Método de ensayo para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacíos en concreto endurecido.*

Instituto Nacional de Calidad. (2018). *NTP 400.037 AGREGADOS. Agregados para concreto. Requisitos.*

Instituto Nacional de Calidad. (2019). *NTP 339.088 CONCRETO. Agua de Mezcla Utilizada en la Producción de Concreto de Cemento Portland. Requisitos. Normativa.*

Instituto Nacional de Calidad. (2020). *NTP 339.183 CONCRETO. Práctica normalizada para elaboración y curado de especímenes de concreto en el laboratorio.*

Instituto Nacional de Calidad. (2020). *NTP 400.017 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados.*

Instituto Nacional de Calidad. (2020). *NTP 400.018 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado 75 μm (N°200) por lavado en agregados.*

Instituto Nacional de Calidad. (2020). *NTP 400.019 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles.*

Instituto Nacional de Calidad. (2020). *NTP 400.021 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso.*

Instituto Nacional de Calidad. (2021). *NTP 339.185 AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.*

Instituto Nacional de Calidad. (2021). *NTP 400.012 AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.*

Instituto Nacional de Calidad. (2022). *NTP 334.084 CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a tracción indirecta del concreto, por compresión diametral de una probeta cilíndrica.*

Instituto Nacional de Calidad. (2022). *NTP 339.035 CONCRETO. Medición del asentamiento del concreto de cemento hidráulico. Método de ensayo.*

Instituto Nacional de Calidad. (2024). *NTP 400.022 AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino.*

Instituto Tecnológico de la Producción. (28 de Mayo de 2025). *Gobierno del Perú.* Obtenido de Economía Circular: El desafío de la agroindustria peruana hacia la sostenibilidad: <https://www.gob.pe/institucion/itp/noticias/1176200-economia-circular-el-desafio-de-la-agroindustria-peruana-hacia-la-sostenibilidad>

Internacional Biochar Initiative. (March de 2024). *About Biochar: Introduction to Biochar.* Obtenido de IBI: <https://biochar-international.org/resources/ibi-publications/>

International Biochar Initiative. (2025). *How to Make Biochar.* Obtenido de International Biochar Initiative, IBI: <https://biochar-international.org/about-biochar/how-to-make-biochar/biochar-technology/>

International Biochar Initiative. (2025). *Normas y Certificaciones: Estándares de Biocarbón.* Obtenido de IBI: <https://biochar-international.org/biochar-standards/>

- International Organization for Standardization. (2013). *ISO 13196 Soil quality — Screening soils for selected elements by energy-dispersive X-ray fluorescence spectrometry using a handheld or portable instrument*.
- Koul, B., Yakoob, M., & Shah, M. (2022). Agricultural waste management strategies for environmental sustainability. *ScienceDirect*, 206. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>
- Li, Z., Xue, W., & Zhou, W. (2023). Mechanical Properties of Concrete with Different Carya Cathayensis Peel Biochar Additions. *Sustainability*, 2-12. doi:<https://doi.org/10.3390/su15064874>
- Liu, J., Wang, X., Fan, Z., Liu, Z., Xu, P., Sawant, T., . . . Zhou, M. (2025). Valorization of Agricultural Residues: Challenges and Opportunities in the Production of Bio-Based Materials. *BioResources*, 4798-4820. doi:10.15376/biores.20.2.Liu
- Los Santos Ortega, J., Fraile Garcia, E., & Ferreira Cabello, J. (2024). Environmental and Economic Viability of Using Concrete Block Wastes from a Concrete Production Plant as Recycled Coarse Aggregates. *Materials*.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2020). *Norma E.060 Concreto Armado*.
- Organización de las Naciones Unidas. (2025). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Pasquel Carbajal, E. (1998). *Tópicos de Tecnología del Concreto*. Lima, Perú.
- Perú Ecológico. (Enero de 2009). *Castaña (Bertholletia excelsa): El Gigante de la Amazonía*. Obtenido de https://www.peruecologico.com.pe/flo_castana_1.htm
- Ramírez López, R. P., Cabañas Vargas, D., Aguilera-Cauich, E. A., & Sacramento Rivero, J. (2024). Life Cycle Assessment of Biochar from Residual Lignocellulosic Biomass Using

- Kon-Tiki Kilns: Applications in Soil Amendment and Wastewater Filtration. *Recycling*, 1-18. doi:<https://doi.org/10.3390/recycling9060125>
- Salvador Terrones, J. G. (2023). *Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas del concreto $f'c$ 210 kg/cm², sustituyendo parcialmente el cemento por biocarbón de restos de madera, en la ciudad de Chiclayo*. Chiclayo: Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. Obtenido de <https://repositorio.usat.edu.pe/items/e95edf3c-51f8-4b11-8201-6b87c1337487>
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Santa Fé de Bogotá, Colombia: Bhandar Editores LTDA.
- Torres, F., Gonzales, K., Troncoso, O., Chávez, J., & De la Torre, G. (2021). Sustainable applications of lignocellulosic residues from the production of Brazil nut in the Peruvian Amazon. *Environmental Quality Management*, 291-300. doi:<https://doi.org/10.1002/tqem.21812>
- Turovaara, M. (2022). *The effect of high-ratio biochar replacement in concrete on performance properties*. Luleå University of Technology - Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering, Luleå - Suecia.
- Un Mondo Ecosostenibile. (26 de diciembre de 2022). *Bertholletia excelsa*. Obtenido de Un Mondo Ecosostenibile dentro i codici della natura: <https://antropocene.it/es/2022/12/26/bertholletia-excelsa-3/>
- United Nations Environment Programme & GlobalABC. (17 de Marzo de 2025). *Global Status Report for Buildings and Construction 2024/2025*. Obtenido de UNEP: <https://www.unep.org/resources/report/global-status-report-buildings-and-construction-20242025>

- YURA S.A. (2024). *Ficha técnica cemento Yura Max 2024/V.3*. Obtenido de <https://www.yura.com.pe/wp-content/uploads/FICHA-TECNICA-YURA-MAX-2024.pdf>
- Zalamea Suárez, A. S. (2022). *Diseño de Hormigón Hidráulico con Biocarbón*. Cuenca: Universidad Católica de Cuenca. Obtenido de <https://dspace.ucacue.edu.ec/items/a301cbe5-b236-492b-9fd0-d17cc996d1e7>
- Zapata-Londoño, X., Rosero-Romo, J. J., & Estupiñán-Durán, H. A. (2022). Comparación de tratamientos por mercerización y decarga intensa de plasma sobre residuos de la cáscara de castaña amazónica (*Bertholletia Excelsa*). *Ingeniería e Investigación*, 1-8.
- Zuidema, P. (2003). *Ecología y manejo del árbol de castaña (Bertholletia excelsa)*. Programa Manejo de Bosques de la Amazonía Boliviana, PROMAB.

Anexos

Anexo A

Matriz de consistencia

Tesis: “Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del Cusco, 2024”

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General		
¿Qué efecto tiene el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), incorporado como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento y como adición, en las propiedades físico-mecánicas y en la viabilidad económica del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024?	Determinar el efecto del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), incorporado como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento y como adición, en las propiedades físico-mecánicas y la viabilidad económica del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	La incorporación del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), como sustituto parcial del agregado fino, sustituto parcial del cemento y como adición, mejora las propiedades físico-mecánicas y reduce el costo del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco-2024.	X: % de biochar de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>) (Variable Independiente)	Nivel de Investigación Explicativo
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas		
PE-01: ¿Cómo influye el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), incorporado como sustituto parcial del agregado fino, en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024?	OE-01: Determinar la influencia del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), como sustituto parcial del agregado fino en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	HE-01: La sustitución parcial en volumen del agregado fino por biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), en porcentajes menores o iguales al 15% mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.		Tipo de Investigación Aplicada
PE-02: ¿Cómo influye el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), incorporado como sustituto parcial del cemento, en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024?	OE-02: Determinar la influencia del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), como sustituto parcial del cemento en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	HE-02: La sustitución parcial en peso del cemento por biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), en porcentajes menores o iguales al 3% mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f_c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	Y1: Propiedades físico-mecánicas del concreto (Variable Dependiente)	Enfoque de la Investigación Cuantitativo

Tesis: “Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del Cusco, 2024”

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables	Metodología
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas		
PE-03: ¿Cómo influye el biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), incorporado como adición, en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024?	OE-03: Determinar la influencia del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), como adición en las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	HE-03: La adición del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), en porcentajes menores o iguales al 5% mejora las propiedades físico-mecánicas del concreto con una resistencia de diseño $f'c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	Y1: Propiedades físico-mecánicas del concreto (Variable Dependiente)	Diseño de la Investigación Cuasi-experimental con grupos de control y experimentales
PE-04: ¿Cuál es la viabilidad económica del biochar como material sustituto o aditivo, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), del concreto con una resistencia de diseño $f'c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024?	OE-04: Realizar el análisis de costos unitarios del biochar como material sustituto o aditivo, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), en el concreto con una resistencia de diseño $f'c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	HE-04: El uso del biochar, producido a partir de biomasa residual de coco y cáscara de castaña (<i>Bertholletia excelsa</i>), es económicamente viable, principalmente en forma de adición, en el concreto con una resistencia de diseño $f'c=210$ kgf/cm ² en la ciudad del Cusco, 2024.	Y2: Viabilidad económica (Variable Dependiente Secundaria)	

Anexo B

Certificado de uso de laboratorio de mecánica de suelos y materiales



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES
Av. de la cultura Nro. 733 – Escuela Profesional de Ingeniería Civil



CERTIFICADO DE USO DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES PARA TESIS DE INVESTIGACIÓN

EL QUE SUSCRIBE JEFE DE LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y MATERIALES DE LA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

HACE CONSTAR:

Que los tesisistas; conducentes a la obtención del título profesional de Ingeniero Civil: Bach. **LUZ VANESSA COYA CABALLERO** y Bach. **KEVIN FELIPE SUTTA MELO**, hizo uso del laboratorio para ejecución de la tesis de investigación: **"ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2024"**

Los ensayos que realizaron son los siguientes:

Nro	ENSAYO	NORMA	CANT.
01	Determinación de materiales más finos que pasan por el tamiz de 75µm (N°200) por lavado en agregados.	NTP 400.018	06
02	Análisis Granulométrico del agregado fino, grueso y global	NTP 400.012	09
03	Determinación de la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados	NTP 400.017	09
04	Contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.	NTP 339.185	06
05	Determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por Abrasión e Impacto en la Máquina de Los Ángeles.	NTP 400.019	03
06	Peso específico y absorción del agregado grueso	NTP 400.021	03
07	Peso específico y absorción del agregado fino	NTP 400.022	06
08	Método de ensayo para determinar la densidad del cemento Portland	NTP 334.005	03
09	Determinar la temperatura de mezclas de hormigón (concreto).	NTP 339.184	03
10	Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento portland.	NTP 339.035	03
11	Determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas.	NTP 339.034	120
12	Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la tracción simple del hormigón, por compresión diametral de una probeta cilíndrica.	NTP 339.084	60
13	Determinar la resistencia a la flexión del hormigón en vigas simplemente apoyadas con cargas a los tercios del tramo	NTP 339.078	30
14	Método de ensayo para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacíos en el concreto endurecido	NTP 339.187	30

Se le expide la presente constancia a solicitud escrita por los interesados; con fines académicos para la tesis de investigación

Cusco, 17 de diciembre del 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil
Laboratorio de Mecánica de Suelos y Materiales

Ing. Luz Marlene Nieto Palomino
Jefe de Laboratorio

Anexo C

Autorización de uso de laboratorio de Ingeniería Química - UNSAAC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**SOLICITO: AUTORIZACIÓN PARA USO DE LOS
LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA - UNSAAC**

Mgtr. ALCIDES CASTILLO PEÑA

Director del Departamento Académico de Ingeniería Química – UNSAAC

Nosotros, **Luz Vanessa Coya Caballero**, identificado con DNI N° 76614979, con domicilio ubicado en Calle Camino Real L-13 4to Paradero, distrito de San Sebastián, Provincia de Cusco y Región Cusco; y **Kevin Felipe Sutta Melo**, identificado con DNI N° 72759937, con domicilio ubicado en Calle Pizarro Mz-Z Lote N° 12, distrito de Quiquijana, Provincia de Quispicanchi y Región Cusco; pertenecientes a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, con el debido respeto nos presentamos y exponemos:

Que mediante este presente nos dirigimos a usted con el propósito de solicitarle las facilidades para realizar ensayos de caracterización del BIOCHAR en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Química para desarrollar la tesis intitulada: **"ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2024"** con temario de tesis aprobado mediante Resolución N° 1983-2024-D-FIC-UNSAAC/ con:

ASESOR: Ph. D. Ing. AIDA ZAPATA MAR.

REVISOR: Ing. JOSE SIXTO DIAZ FARFAN.

ENSAYOS A REALIZAR:

- Producción de biochar en horno mufla, determinando la temperatura óptima de pirólisis y el tiempo de residencia, en el Laboratorio de Materiales de Ingeniería.
- Análisis de la composición química mediante fluorescencia de rayos X (FRX) del biochar en el Laboratorio de Hidrocarburos, bajo la supervisión del Ingeniero Antonio Bueno Lazo (responsable del laboratorio).

Por lo expuesto:

Rogamos a usted acceder a nuestra petición y autorizar el uso del laboratorio de Materiales de Ingeniería.

Cusco, 27 de febrero del 2025


BACH. LUZ VANESSA COYA CABALLERO

DNI: 76614979


BACH. KEVIN FELIPE SUTTA MELO

DNI: 72759937



Anexo D

Informe de análisis de contenido de carbono fijo del biochar



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIÓN DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0089-25-LAQ

SOLICITANTE : LUZ VANESSA COYA CABALLERO
KEVIN FELIPE SUTTA MELO

MUESTRA : BIOCHAR

FECHA : C/10/04/2025

ENSAYO QUÍMICO:

	Carbono %
03 Shihuahuaco TLUD	95,54
04 Melina – Kontiki	94,75
05 Quinilla – Kontiki	91,36
06 Coco	91,17

Métodos: Calcinación.

Cusco, 23 de Abril 2025



Anexo E

Informe de análisis del pH por el método potenciométrico del biochar



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACION DE SERVICIOS DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0090-25-LAQ

SOLICITANTE : LUZ VANESSA COYA CABALLERO
KEVIN FELIPE SUTTA MELO

MUESTRA : BIOCHAR

FECHA : C/10/04/2025

ENSAYO QUIMICO:

	pH
03 Shihuahuaco TLUD	9,23
04 Melina – Kontiki	9,05
05 Quinilla – Kontiki	9,65
06 Coco	9,40

Métodos: Potenciométrico

Cusco, 23 de Abril 2025



Anexo F

Constancia de capacitación otorgada por el CINCIA para la producción de biochar en las metodologías TLUD y KONTIKI



CONSTANCIA DE CAPACITACIÓN

El que suscribe en representación de la **ASOCIACIÓN CENTRO DE INNOVACIÓN CIENTÍFICA AMAZÓNICA (CINCIA)** con RUC N° 20601202680, con domicilio fiscal en la Av. Ucayali Mz 4-Z Lote 9-A, Puerto Maldonado- Madre de Dios- Perú.

CERTIFICA:


Que, **LUZ VANESSA COYA CABALLERO**, identificado con DNI N°76614979, tesis de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco de la facultad de Ingeniería Civil, ha sido capacitado en la Asociación Centro de Innovación Científica Amazónica-CINCIA, con el tema de: **"PRODUCCIÓN DE BIOCHAR EN LAS METODOLOGÍAS TLUD Y KONTIKI"**; el desarrollo de la capacitación fue la producción de biochar a partir de residuos de madera dura y suave, cocos y cáscara de castaña mediante un proceso controlado de pirólisis.

La capacitación se ha desarrollado el día 20 de marzo de 2025, en la planta de biocarbón ubicada en el INIA km 28 San Bernardo, a solicitud del tesista para el desarrollo de sus tesis Titulado: **"ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FISICO-MECANICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2024"**.

Asimismo, en su aprendizaje ha demostrado eficiencia, puntualidad, responsabilidad y buena formación académica.

Se expide el presente documento para los fines que el/la interesado/a considere conveniente.

Puerto Maldonado, 26 de marzo de 2025.

ASOCIACIÓN CENTRO DE INNOVACIÓN
CIENTÍFICA AMAZÓNICA

Cesar Felipe Ascorra Guanira
VICEPRESIDENTE



CONSTANCIA DE CAPACITACIÓN

El que suscribe en representación de la **ASOCIACIÓN CENTRO DE INNOVACIÓN CIENTÍFICA AMAZÓNICA (CINCIA)** con RUC N° 20601202680, con domicilio fiscal en la Av. Ucayali Mz 4-Z Lote 9-A, Puerto Maldonado- Madre de Dios- Perú.

CERTIFICA:

Que, **KEVIN FELIPE SUTTA MELO**, identificado con DNI N°72759937, tesis de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco de la facultad de Ingeniería Civil, ha sido capacitado en la Asociación Centro de Innovación Científica Amazónica-CINCIA, con el tema de: **"PRODUCCIÓN DE BIOCHAR EN LAS METODOLOGÍAS TLUD Y KONTIKI"**; el desarrollo de la capacitación fue la producción de biochar a partir de residuos de madera dura y suave, cocos y cáscara de castaña mediante un proceso controlado de pirólisis.

La capacitación se ha desarrollado el día 20 de marzo de 2025, en la planta de biocarbón ubicada en el INIA km 28 San Bernardo, a solicitud del tesista para el desarrollo de sus tesis Titulado: **"ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECANICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2024"**.

Asimismo, en su aprendizaje ha demostrado eficiencia, puntualidad, responsabilidad y buena formación académica.

Se expide el presente documento para los fines que el/la interesado/a considere conveniente.

Puerto Maldonado, 26 de marzo de 2025.

ASOCIACION CENTRO DE INNOVACION
CIENTIFICA AMAZONICA

Cesar Felipe Ascorra Guantira
VICEPRESIDENTE

Anexo G

Certificado de calibración de la máquina de ensayo universal

		METROLAB Y CALIDAD S.A.C. Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN		Nº 855- LF -2024
Laboratorio de Fuerza		Página 1 de 3
Expediente	: 054-MYC-2024	La incertidumbre reportada en el presente informe es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura $k=2$. La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición". Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95%. Este certificado de calibración documenta la trazabilidad a los patrones nacionales y/o internacionales, que realizan las unidades de la medición de acuerdo con el Sistema Internacional de Unidades (SI). Los resultados son válidos en el periodo de la calibración. Al solicitante le corresponde disponer en su momento la ejecución de una recalibración. Este certificado de calibración no podrá ser reproducido parcialmente sin la aprobación por escrito del laboratorio emisor. La periodicidad de la calibración depende del uso mantenimiento y conservación del instrumento de medición.
Solicitante	: UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD	
Dirección	: DEL CUSCO Av. De la Cultura 773 Cusco - Cusco	
Instrumento de Medición	Maquinas para Ensayos Uniaxiales Estaticos Maquinas de Ensayos de Tension/Compresion	
Equipo Calibrado	: MAQUINA DE ENSAYO UNIVERSAL	
Marca	: INSTRON	
Modelo	: 600DX-B1-C3A-G1F	
Número de Serie	: 600DXR4565	
Rango de medición	: 61,182 kgf	
Identificación	: NO INDICA	
Procedencia	: CHINA	
Indicador de Lectura	: DIGITAL	
Marca	: HP TOWER PC	
Modelo	: HP COMPAC DC 7900 / HPL1710	
Numero de Serie	: 2UA0130YMT / 3CQ9385LWN	
Identificación	: NO INDICA	
Alcance de Indicación	: 0 kgf A 1 kgf	
Procedencia	: USA	
Resolución	: 1 Kgf	
Trasductor de Fuerza	: TRASDUCTOR	
Alcance de Indicación	: N/I	
Marca	: NO INDICA	
Modelo	: NO INDICA	
Numero de Serie	: NO INDICA	
Lugar de calibración	: Laboratorio de Suelos y Materiales de la UNSAAC	
Fecha de Calibración	: 2024-10-23	
Fecha de Emisión	Jefe de Laboratorio de Metrología	
2024-10-23	 Miguel Angel Ruiz Sulca JEFE LABORATORIO	
		
METROLAB Y CALIDAD SAC - LABORATORIO DE METROLOGIA		
Direccion: PASAJE SANTIAGO MZA. E. LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU Teléfono: (084) 206172 Cel: 976 648 580		
www.metrolabycalidad.com • metrolab@metrolabycalidad.com • ventas@metrolabycalidad.com • metrolabycalidad@gmail.com		



METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Nº 855- LF -2024

Laboratorio de Fuerza

Página 2 de 3

Método de Calibración

La calibración se realizó por comparación directa utilizando como referencia la Norma Tec. ASTM E74-13a ASTM C39 y de acuerdo con el cliente se procedió a aplicar los valores de carga indicados en el cuadro.

Resultados de medición

Lectura de la máquina (Fi)		Lectura del patrón			Promedio	Cálculo de errores		Incertidumbre
		Primera	Segunda	Tercera		Exactitud	Repetibilidad	
%	kgf	kN	kN	kN	kN	q(%)	b(%)	U(%)
10	5000	4945.5	4904.8	4925.2	4925.2	-99.0	0.0	0.5
20	10000	9870.7	9880.9	9875.8	9875.8	-99.0	0.0	0.2
30	15000	14744.9	14755.1	14750.0	14750.0	-99.0	0.0	0.2
40	20000	19608.8	19496.7	19552.7	19552.7	-99.0	0.0	0.4
50	25000	24472.8	24472.8	24472.8	24472.8	-99.0	0.0	0.2
60	30000	29479.5	29336.8	29408.1	29408.1	-99.0	0.0	0.4
70	35000	34221.1	34190.5	34205.8	34205.8	-99.0	0.0	0.2
80	40000	39105.5	39044.3	39074.9	39074.9	-99.0	0.0	0.3
90	45000	43989.9	44071.4	44030.6	44030.6	-99.0	0.0	0.3
100	50000	48823.2	48833.4	48828.3	48828.3	-99.0	0.0	0.2
Lectura máquina en cero		0	0	0	----	0	0	Error máx. de cero(0)=0,00

Indicación del Equipo F (kgf)	Errores Encontrados en el Sistema de Medición				Incertidumbre U (k=2)
	Exactitud	Repetibilidad	Reversibilidad	Resolución Relativa	
	q (%)	b (%)	v = (%)	a (%)	
5000	-99.00	0.0	----	0.00	0.53
10000	-99.01	0.0	----	0.00	0.25
15000	-99.00	0.0	----	0.00	0.24
20000	-99.00	0.0	----	0.00	0.41
25000	-99.00	0.0	----	0.00	0.24
30000	-99.00	0.0	----	0.00	0.37
35000	-99.00	0.0	----	0.00	0.25
40000	-99.00	0.0	----	0.00	0.26
45000	-99.00	0.0	----	0.00	0.26
50000	-99.00	0.0	----	0.00	0.24
Error de cero fo (%)	0	0	No aplica	0	Error máx. de cero(0)=0,00

METROLAB Y CALIDAD SAC - LABORATORIO DE METROLOGIA

Dirección: PASAJE SANTIAGO MZA. E, LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU Teléfono: (084) 206172 Cel: 976 648 580

www.metrolabycalidad.com

metrolab@metrolabycalidad.com

ventas@metrolabycalidad.com

metrolabycalidad@gmail.com



METROLAB Y CALIDAD S.A.C.

Laboratorio de Metrología - Servicio con Tecnología y Calidad

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN Nº 855- LF-2024

Laboratorio de Fuerza

Página 3 de 3

Incertidumbre

La incertidumbre expandida de medición se ha obtenido multiplicando la incertidumbre Estándar de Medición por el factor de cobertura $k=2$, el cual corresponde a una probabilidad de cobertura de error de aproximadamente 95%.

La incertidumbre expandida de medición fue calculada a partir de los componentes de incertidumbre de los factores de influencia en la calibración. La incertidumbre indicada no incluye una estimación de variaciones a largo plazo.

Trazabilidad

Trazabilidad	Patron Utilizado	Certificado de Calibración
Load Cell - Serial N° 3500/2C Capacidad 3500 kN Certificate N° 2018040060-1	Load Cell for Plate Bearing Capacidad : 2000 kN Marca : Impact Test Equipment Ltd.	PUCP - Laboratorio de estructura Antisísmico Exp. INF-LE 018-2024
Patrones de referencia del SNM - INACAL	Termohigrometro Patron de Resolución 0.1 °C / 1 %HR	METROIL - INACAL 1AT-2530-2024 Exp. 1A24229

Condiciones Ambientales

	Inicial	Final
Temperatura (°C)	18.1	18.8
Humedad Relativa (% HR)	48.8	62.7

Evaluación de los resultados

De los resultados obtenidos durante la calibración se ha obtenido la siguiente ecuación cuadrática:

$$Y = A \cdot X^2 + B \cdot X + C$$

Donde:

Y = Indicación del Equipo en kgf.

X = Lectura directa del equipo / valores del dial

Los coeficientes obtenidos son:

A= -0.00000004

B= 0.977900000

C= 63.81600000

Observaciones

- Se colocó una etiqueta autoadhesiva con la indicación de fecha y CALIBRADO.



Fin del documento

METROLAB Y CALIDAD SAC - LABORATORIO DE METROLOGIA

Dirección: PASAJE SANTIAGO MZA. E, LOTE N° 2, SANTIAGO CUSCO - PERU Teléfono: (084) 206172 Cel: 976 648 580

www.metrolabycalidad.com

metrolab@metrolabycalidad.com

ventas@metrolabycalidad.com

metrolabycalidad@gmail.com

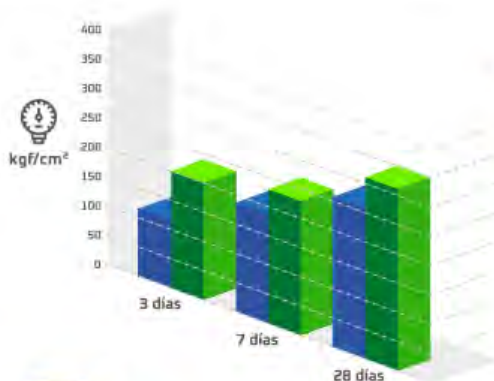
Anexo H

Ficha técnica del cemento portland Yura MAX Tipo HS



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

REQUISITOS		Requisitos Norma Técnica Peruana 334.082:2020 Norma Americana ASTM C 1157/C 1157M-20 CEMENTO TIPO HS		CEMENTO YURA MAX TIPO HS
REQUISITOS FÍSICOS		UNIDAD		
Densidad	g/cm³	-		2,70 a 2,8
Expansión en Autoclave	%	máximo 0,80		-0,09 a 0,03
Tiempo de fraguado inicial Vicat	minutos	45 a 420		170 a 280
Contenido de aire	%	máximo 12		3 a 8
Expansión de la barra de mortero a 14 días	%	máximo 0,020		<0,020
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
3 días	kgf/cm²	mínimo 112		150 a 200
7 días	kgf/cm²	mínimo 184		190 a 230
28 días	kgf/cm²	mínimo 255		270 a 310
RESISTENCIA A LOS SULFATOS				
Expansión a 6 meses	%	máximo 0,05		0,03 a 0,05
Expansión a 12 meses	%	máximo 0,10		0,04 a 0,05
Expansión a 18 meses	%	-		0,04 a 0,05



COMPARACIÓN RESISTENCIAS A LA COMPRESIÓN

CEMENTO YURA MAX TIPO HS VS
REQUISITOS NORMAS TÉCNICAS NTP 334.082

- Cemento Tipo HS
Norma técnica
NTP 334.082 (ASTM C1157)
- Cemento Yura MAX
Tipo HS



FACTOR R

El Factor R, contrarresta las reacciones nocivas de los agregados de mala calidad, contribuyendo junto a la resistencia a los sulfatos y su mayor impermeabilidad, a alcanzar una máxima durabilidad.

OTRAS PROPIEDADES



Gracias a su contenido de puzolana natural de origen volcánico, el cemento YURA MAX desarrolla con el tiempo resistencias a la compresión superiores a otros tipos de cemento. Los silicatos presentes en la puzolana reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando silicatos cálcicos que son compuestos hidráulicos. Estos proporcionan al cemento una resistencia adicional, superando a otros tipos que no contienen puzolana.

Anexo I

Ficha técnica aditivo superplastificante R-2027



R-2027

REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO PARA CONCRETOS ESPECIALES

Fecha de Emisión: May 31, 23
Revisión: 0
Fecha de Revisión: Set 07, 23
Página: 1 de 1

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

El **R-2027** es un nanoaditivo en estado líquido de alta actividad por las nano materias de última generación que lo componen.

Pertenece a la línea Gaia Nanosilice, donde las reacciones químicas en la mezcla permiten que las nanopartículas de sílice se convierten en nanopartículas de cemento.

Según las normas **ASTM C494** y **NTP 334.088**, cumple con la clasificación **TIPO F – Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango**.

CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS

- Permite reducir el agua de diseño en 15% a 48%, según dosis de uso.
- Debido a su composición en base a solución de nanosilice, incrementa las resistencias mecánicas y durabilidad del concreto.
- Brinda una pérdida lenta de la consistencia sin retardar el proceso de fraguado, pues genera elevadas resistencias iniciales.
- Permite obtener una mezcla con elevada consistencia sin alterar o disminuyendo la relación A/C.
- Está libre de cloruros, por ello no promoverá la corrosión.
- Modifica la reología de la mezcla, brindando una alta fluidez y adecuada trabajabilidad para construcciones modulares.
- Modifica la viscosidad, incrementando la resistencia a la segregación en concreto altamente fluidos.

CAMPOS DE APLICACIÓN

El **R-2027** es ideal para concretos con baja relación agua – cementante. Se puede aplicar en concretos de altas exigencias, ya que brinda una mantención prolongada, altas resistencias iniciales y mejora la durabilidad ante agentes químicos nocivos. Por las propiedades reológicas que brinda al concreto se puede aplicar en concretos autonivelantes y rheoplásticos en general. Debido a su robustez nos permite trabajar con cualquier tipo de cemento.

DOSIFICACIÓN

El **R-2027** puede ser utilizado en dosis desde **0.3% a 2%** con respecto al peso del cemento. Se recomienda realizar pruebas previas para validar la dosis óptima. El producto debe de ser diluido en el agua efectiva y adicionado a la mezcla durante el proceso de mezclado.

Estas recomendaciones pueden sufrir variaciones debido a materiales de mala calidad, condiciones de obra y/o incorrecta metodología de uso, por ello se recomienda contactar a nuestros asesores técnicos **ULMEN**.

PROPIEDADES FÍSICAS

Apariencia	Líquida
Color	Café
Densidad	1,11 ± 0,02 g/mL

PRESENTACIÓN

Se suministra en:

- IBC de 1200 Kg
- Cilindro de 220 Kg
- Garrafas de 60 Kg
- Baldes de 20 Kg

DURACIÓN Y ALMACENAMIENTO

6 meses almacenado en un lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO9001.

INSTRUCCIONES DE SEGURIDAD

Para información y consejo sobre seguridad en la manipulación y disposición de productos químicos, los usuarios deben referirse a la Hoja de Datos de Seguridad vigente, la cual contiene datos físicos, ecológicos toxicológicos y otros datos relativos a la seguridad.

Cooperativa las Vertientes, Calle 4, Mz C-1 Sub Lt 2-F Villa El Salvador – Lima

Teléfonos (01) 719-4126 / 719-4127


www.cognoscibletechnologies.com

www.ulmen.cl

atencionalcliente@ulmen.cl


Anexo J

Formato de informe - fluorescencia de Rayos X

	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO				Código	BC-AG-01			
	FORMATO DE INFORME				Versión	1			
	FLUORESCENCIA DE RAYOS X (XRF) - BIOCHAR				Fecha	06/01/2025			
I. INFORMACIÓN GENERAL									
Tesis:	"ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2024"								
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo								
Departamento:	CUSCO	Provincia:	CUSCO	Distrito:	CUSCO				
Localidad:	PERAYOC	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733						
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°	Altitud (msnm):	3357				
Fecha:	10/04/2025								
II. NTP 400.021/2013 - Fluorescencia de Rayos X (XRF)									
A. FLUORESCENCIA DE RAYOS X - COCO Y CÁSCARA DE CASTAÑA (Bertholletia excelsa)									
Fluorescencia de Rayos X - coco y cáscara de castaña (Bertholletia excelsa)									
Elemento	Ensayo 01			Ensayo 02			Ensayo 03		
	ppm	+/- 3σ	Descarte	ppm	+/- 3σ	Descarte	ppm	+/- 3σ	Descarte
Mg	5100	3300	✗ Descartar	1E-12	100	✗ Descartar	4500	3600	✗ Descartar
Al	4290	760	✗ Descartar	4800	910	✗ Descartar	4100	760	✗ Descartar
Si	9210	270	✓ Confiable	8150	300	✓ Confiable	8220	260	✓ Confiable
P	0.08	100	✗ Descartar	2580	110	✓ Confiable	2683	99	✓ Confiable
S	3285	73	✓ Confiable	2911	84	✓ Confiable	2832	71	✓ Confiable
K	43300	0.055	✓ Confiable	38160	0.056	✓ Confiable	36100	0.048	✓ Confiable
Ca	10880	0.016	✓ Confiable	9490	170	✓ Confiable	9120	140	✓ Confiable
Ti	1420	210	✗ Descartar	1180	230	✗ Descartar	1140	200	✗ Descartar
V	123	33	✗ Descartar	113	38	✗ Descartar	123	33	✗ Descartar
Mn	256	40	✗ Descartar	214	44	✗ Descartar	256	40	✗ Descartar
Fe	2841	91	✓ Confiable	2710	100	✓ Confiable	2825	92	✓ Confiable
Cu	121	12	✓ Confiable	122	14	✗ Descartar	116	12	✗ Descartar
Zn	96	8	✓ Confiable	96	10	✗ Descartar	101	9	✓ Confiable
Rb	87	4	✓ Confiable	88	4	✓ Confiable	93	4	✓ Confiable
Sr	174	5	✓ Confiable	178	6	✓ Confiable	186	5	✓ Confiable
Y	6	2	✗ Descartar	7	3	✗ Descartar	6	2	✗ Descartar
Zr	23	3	✗ Descartar	21	4	✗ Descartar	25	3	✗ Descartar
Nb	10	3	✗ Descartar	12	4	✗ Descartar	9	3	✗ Descartar
Mo	10	4	✗ Descartar	16	5	✗ Descartar	12	4	✗ Descartar
Ag	45	14	✗ Descartar	38	17	✗ Descartar	40	14	✗ Descartar
Cd	26	15	✗ Descartar	1E-12	100	✗ Descartar	1E-12	100	✗ Descartar
Pb	5	3	✗ Descartar	6	4	✗ Descartar	5	3	✗ Descartar
Th	32	9	✗ Descartar	42	11	✗ Descartar	30	9	✗ Descartar
U	9	4	✗ Descartar	10	5	✗ Descartar	7	4	✗ Descartar
LE	915600	0.33	✓ Confiable	929100	0.14	✓ Confiable	927500	0.35	✓ Confiable
Total	996949.08			1000044.00			1000029.00		
Fluorescencia de Rayos X - coco y cáscara de castaña (Bertholletia excelsa)									
Elemento	Muestra 01			Muestra 02			Muestra 03		
	ppm	+/- 3σ	Descarte	ppm	+/- 3σ	Descarte	ppm	+/- 3σ	Descarte
Si	9210	270	✓ Confiable	8150	300	✓ Confiable	8220	260	✓ Confiable
S	3285	73	✓ Confiable	2911	84	✓ Confiable	2832	71	✓ Confiable
K	43300	0.055	✓ Confiable	38160	0.056	✓ Confiable	36100	0.048	✓ Confiable
Ca	10880	0.016	✓ Confiable	9490	170	✓ Confiable	9120	140	✓ Confiable
Fe	2841	91	✓ Confiable	2710	100	✓ Confiable	2825	92	✓ Confiable
Rb	87	4	✓ Confiable	88	4	✓ Confiable	93	4	✓ Confiable
Sr	174	5	✓ Confiable	178	6	✓ Confiable	186	5	✓ Confiable
LE	915600	0.33	✓ Confiable	929100	0.14	✓ Confiable	927500	0.35	✓ Confiable
Elemento	Muestra 01	Muestra 02	Muestra 03	Promedio (ppm)	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Aceptabilidad	Promedio (%)	
	ppm	ppm	ppm						
Si	9210	8150	8220	8526.67	592.82	6.95	✓ Ok	0.85	
S	3285	2911	2832	3009.33	241.98	8.04	✓ Ok	0.30	
K	43300	38160	36100	39186.67	3708.17	9.46	✓ Ok	3.92	
Ca	10880	9490	9120	9830.00	927.95	9.44	✓ Ok	0.98	
Fe	2841	2710	2825	2792.00	71.46	2.56	✓ Ok	0.28	
Rb	87	88	93	89.33	3.21	3.60	✓ Ok	0.01	
Sr	174	178	186	179.33	6.11	3.41	✓ Ok	0.02	
EL(C ₂ H ₃ O ₂ N)	930223	938313	940624	936386.67	5461.53	0.58	✓ Ok	93.64	
TOTAL	100.00	100.00	100.00	100.00				100.00	

Anexo K

Análisis estadístico de la resistencia a compresión del concreto








	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO						Código	BC-AG-01							
	FORMATO DE INFORME RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN NTP 339.034/2015						Versión	1							
							Fecha	06/01/2025							
							I. INFORMACIÓN GENERAL								
Tesis:	"ESTUDIO DEL BIOCHAR Y SUS EFECTOS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL CONCRETO EN LA CIUDAD DEL CUSCO, 2024"														
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo														
Departamento:	CUSCO	Provincia:	CUSCO	Distrito:	CUSCO										
Localidad:	PERAYOC	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733												
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357									
Fecha:	19/06/2025														
II. NTP 339.034/2015- CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión															
A. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN															
A.1 Diseño de mezcla 01 - concreto control - 3, 7 y 28 días Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "Concreto control"															
F _c (kgf/cm ²):		210		Biochar (BC) (%):		0									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión F _c (Kg/cm ²)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm ²)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Control	07-07-25	10-07-25	3	8709.88	107.27		51.08	2.04						
2	Control	07-07-25	10-07-25	3	8430.01	104.21	104.03	49.62	2.00	3.33	3.20	✓ Cumple	6.65	11.03	✓ Cumple
3	Control	07-07-25	10-07-25	3	8046.73	100.62		47.91	1.98						
4	Control	07-07-25	14-07-25	7	13187.29	163.88		78.04	1.98						
5	Control	07-07-25	14-07-25	7	13198.18	162.44	160.23	77.35	2.04	5.12	3.20	✓ Cumple	9.51	16.98	✓ Cumple
6	Control	07-07-25	14-07-25	7	12671.56	154.38		73.51	2.04						
7	Control	07-07-25	04-08-25	28	17502.77	217.96		103.79	1.99						
8	Control	07-07-25	04-08-25	28	17539.06	218.89		104.23	1.98						
9	Control	07-07-25	04-08-25	28	18434.45	229.29	220.30	109.18	1.98	6.61	3.00	✓ Cumple	17.75	23.35	✓ Cumple
10	Control	07-07-25	04-08-25	28	18428.10	226.93		108.06	2.04						
11	Control	07-07-25	04-08-25	28	17187.52	211.54		100.73	2.04						
12	Control	07-07-25	04-08-25	28	17696.91	217.21		103.43	2.04						
A.2 Diseño de mezcla 02 - concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en un 10% en volumen - 3, 7 y 28 días Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "Concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en 10% en volumen"															
F _c (kgf/cm ²):		210		Biochar (BC) (%):		10									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión F _c (Kg/cm ²)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm ²)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	8536.61	105.98		50.46	2.00						
2	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	8644.56	107.02	106.18	50.96	2.00	0.76	0.71	✓ Cumple	1.48	11.26	✓ Cumple
3	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	10-07-25	3	8537.06	105.54		50.26	1.99						
4	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	13116.53	162.27		77.27	1.99						
5	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	13165.52	162.68	160.81	77.47	1.99	2.88	1.79	✓ Cumple	5.18	17.05	✓ Cumple
6	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	14-07-25	7	12757.74	157.50		75.00	2.00						
7	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	17983.58	220.80		105.14	1.99						
8	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	18528.34	228.22		108.68	1.99						
9	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	17603.47	217.42	221.04	103.53	2.01	7.03	3.18	✓ Cumple	14.87	23.43	✓ Cumple
10	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	17285.95	213.35		101.60	2.00						
11	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	17417.04	215.68		102.70	2.00						
12	Sust-Ar-BC_10%	07-07-25	04-08-25	28	18635.39	230.75		109.88	2.00						
A.3 Diseño de mezcla 03 - concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en un 15% en volumen - 3, 7 y 28 días Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "Concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en 15% en volumen"															
F _c (kgf/cm ²):		210		Biochar (BC) (%):		15									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión F _c (Kg/cm ²)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm ²)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	7789.54	95.93		45.68	2.00						
2	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	7886.61	97.96	98.67	46.65	2.00	3.15	3.20	✓ Cumple	6.19	10.46	✓ Cumple
3	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	10-07-25	3	8226.35	102.12		48.63	1.99						
4	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	12468.35	154.25		73.45	1.99						
5	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	12746.40	157.21	158.53	74.86	1.99	5.07	3.20	✓ Cumple	9.88	16.80	✓ Cumple
6	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	14-07-25	7	13284.81	164.13		78.16	2.05						
7	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	17865.19	221.77		105.60	1.99						
8	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	16915.37	209.63		99.82	2.00						
9	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	17187.52	212.15	211.76	101.03	2.00	6.67	3.15	✓ Cumple	20.31	22.45	✓ Cumple
10	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	17308.18	214.97		102.37	1.99						
11	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	16337.04	201.46		95.93	2.00						
12	Sust-Ar-BC_15%	07-07-25	04-08-25	28	17012.44	210.59		100.28	2.00						

A.4	Diseño de mezcla 04 - concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en un 20% en volumen - 3, 7 y 28 días														
	Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto														
	"Concreto con sustitución parcial del agregado fino por biochar en 20% en volumen"														
f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		20							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	7710.16	94.88		45.18	1.99						
2	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	7573.18	93.62	92.89	44.58	2.00	2.44	2.62	☑ Cumple	4.70	9.85	☑ Cumple
3	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	10-07-25	3	7300.12	90.17		42.94	2.00						
4	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	11939.00	147.68		70.32	2.00						
5	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	11624.21	143.69	145.73	68.42	2.01	2.00	1.37	☑ Cumple	3.99	15.45	☑ Cumple
6	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	14-07-25	7	11720.83	145.82		69.44	2.00						
7	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	16752.07	206.48		98.32	2.00						
8	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	15794.09	195.09		92.90	2.01						
9	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	16973.43	209.50	203.48	99.76	2.00	5.03	2.47	☑ Cumple	14.40	21.57	☑ Cumple
10	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	16212.75	200.85		95.64	2.00						
11	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	16611.46	205.49		97.85	2.00						
12	Sust-Ar-BC_20%	07-07-25	04-08-25	28	16452.25	203.48		96.89	2.00						
A.5	Diseño de mezcla 05 - concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en 1% en peso - 3, 7 y 28 días														
	Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto														
	"Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en 1% en peso"														
f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		1							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	9391.63	117.48		55.94	1.98						
2	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	9224.25	114.37	116.09	54.46	1.98	1.58	1.36	☑ Cumple	3.11	12.31	☑ Cumple
3	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	9439.71	116.41		55.43	1.98						
4	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	13199.54	161.84		77.07	2.04						
5	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	13728.88	168.33	167.12	80.16	2.03	4.79	2.87	☑ Cumple	9.35	17.71	☑ Cumple
6	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	14052.29	171.19		81.52	2.03						
7	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	17415.23	215.73		102.73	1.99						
8	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	17637.94	218.33		103.97	1.99						
9	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18105.59	223.88	220.53	106.61	1.99	3.13	1.42	☑ Cumple	8.15	23.38	☑ Cumple
10	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	17933.23	221.87		105.65	1.99						
11	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	17760.86	220.01		104.77	1.99						
12	Sust-Cm-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18042.09	223.35		106.36	1.99						
A.6	Diseño de mezcla 06 - concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en 2% en peso - 3, 7 y 28 días														
	Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto														
	"Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en 2% en peso"														
f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		2							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	9243.31	115.07		54.79	1.99						
2	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	9441.07	116.82	115.51	55.63	1.99	1.15	0.99	☑ Cumple	2.16	12.24	☑ Cumple
3	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	17-07-25	3	9254.65	114.66		54.60	1.98						
4	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	13598.70	167.80		79.90	2.04						
5	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	13225.39	162.41	163.85	77.34	2.04	3.46	2.11	☑ Cumple	6.46	17.37	☑ Cumple
6	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	21-07-25	7	13096.12	161.34		76.83	2.05						
7	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	17540.42	218.82		104.20	1.99						
8	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	17429.74	216.49		103.09	1.99						
9	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	17767.67	221.11	218.81	105.29	2.00	1.56	0.71	☑ Cumple	4.62	23.19	☑ Cumple
10	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	17658.35	219.66		104.60	2.00						
11	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	17598.93	218.79		104.19	1.99						
12	Sust-Cm-BC_2%	14-07-25	11-08-25	28	17514.56	217.96		103.79	2.00						
A.7	Diseño de mezcla 07 - concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en 3% en peso - 3, 7 y 28 días														
	Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto														
	"Concreto con sustitución parcial del cemento por biochar en 3% en peso"														
f'c (kgf/cm2):		210				Biochar (BC) (%):		3							
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kg/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	8633.22	107.39		51.14	1.99						
2	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	8794.25	109.25	109.82	52.02	1.99	2.76	2.51	☑ Cumple	5.43	11.64	☑ Cumple
3	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	9065.04	112.83		53.73	1.98						
4	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	12288.27	150.72		71.77	2.03						
5	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	12605.33	155.18	155.52	73.89	2.04	4.98	3.20	☑ Cumple	9.94	16.48	☑ Cumple
6	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	13058.92	160.65		76.50	2.03						
7	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	17192.06	213.45		101.64	2.00						
8	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	17504.58	217.55		103.59	1.98						
9	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	17733.65	221.77	217.59	105.60	2.00	2.76	1.27	☑ Cumple	8.31	23.06	☑ Cumple
10	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	17540.87	218.69		104.14	2.00						
11	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	17462.40	217.96		103.79	2.00						
12	Sust-Cm-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	17326.77	216.12		102.92	2.00						

A.8 Diseño de mezcla 08 - concreto con adición de biochar en 1% - 3, 7 y 28 días Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "Concreto con adición de biochar en 1%"															
f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):		1									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	9577.15	118.35		56.36	1.97						
2	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	10021.22	123.13	120.53	58.63	1.98	2.41	2.00	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	4.78	12.78	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
3	Adi-BC_1%	14-07-25	17-07-25	3	9740.44	120.12		57.20	1.98						
4	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	13605.96	167.07		79.56	2.04						
5	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	13269.39	162.68	167.70	77.47	2.04	5.37	3.20	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	10.67	17.78	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
6	Adi-BC_1%	14-07-25	21-07-25	7	14048.66	173.35		82.55	1.99						
7	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18211.28	225.65		107.45	2.00						
8	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18369.58	227.61		108.39	2.00						
9	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	17975.87	222.85	225.37	106.12	2.00	1.60	0.71	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	4.76	23.89	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
10	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18228.06	226.27		107.75	2.00						
11	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18172.72	225.11		107.20	2.00						
12	Adi-BC_1%	14-07-25	11-08-25	28	18074.30	224.72		107.01	2.00						
A.9 Diseño de mezcla 09 - concreto con adición de biochar en 3% - 3, 7 y 28 días Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "Concreto con adición de biochar en 3%"															
f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):		3									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	9995.82	124.23		59.16	1.99						
2	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	9881.51	122.28	125.10	58.23	1.99	3.34	2.67	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	6.51	13.26	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
3	Adi-BC_3%	14-07-25	17-07-25	3	10367.31	128.80		61.33	1.99						
4	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	14612.93	179.01		85.24	2.03						
5	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	14691.40	180.08	177.89	85.75	2.04	2.91	1.64	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	5.50	18.86	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
6	Adi-BC_3%	14-07-25	21-07-25	7	14141.65	174.58		83.13	1.99						
7	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	18798.23	232.86		110.89	1.99						
8	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	19368.39	241.03		114.78	1.99						
9	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	18986.92	234.01	235.97	111.43	1.99	2.91	1.23	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	8.17	25.01	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
10	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	19177.89	236.95		112.84	1.99						
11	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	19083.54	236.41		112.58	1.99						
12	Adi-BC_3%	14-07-25	11-08-25	28	18941.11	234.54		111.68	1.99						
A.10 Diseño de mezcla 10 - concreto con adición de biochar en 5% - 3, 7 y 28 días Resistencia a la compresión de muestras cilíndricas de concreto "Concreto con adición de biochar en 5%"															
f'c (kgf/cm2):		210		Biochar (BC) (%):		5									
Nº	Descripción	Fecha de vaciado	Fecha de rotura	Edad	Carga (kgf)	Resistencia a compresión f'c (Kgf/cm2)	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm2)	Evolución (%)	Relación H/D	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Coefficiente de variación (%)	Rango	Rango límite	Rango aceptable
1	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	9711.41	119.85		57.07	2.00						
2	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	9543.58	117.80	120.98	56.10	1.99	3.87	3.20	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	7.49	12.82	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
3	Adi-BC_5%	14-07-25	17-07-25	3	10051.15	125.29		59.66	1.99						
4	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	13386.87	164.30		78.24	2.04						
5	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	13812.79	170.28	169.91	81.09	2.04	5.44	3.20	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	10.85	18.01	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
6	Adi-BC_5%	14-07-25	21-07-25	7	14210.60	175.15		83.41	1.98						
7	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	18372.31	227.15		108.17	1.99						
8	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	19002.35	235.36		112.07	2.00						
9	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	18450.32	228.79	230.43	108.95	1.99	2.88	1.25	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple	8.21	24.43	<input checked="" type="checkbox"/> Cumple
10	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	18598.65	230.22		109.63	1.99						
11	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	18687.55	231.87		110.41	2.00						
12	Adi-BC_5%	14-07-25	11-08-25	28	18530.16	229.21		109.15	1.99						

Anexo L

Composición química del biochar

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-01
	Panel fotográfico				Versión	1
	Composición química del biochar				Fecha	06/01/2025
	ISO 13196					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	10/04/2025					
						
Figura 1	Determinación de elementos químicos por fluorescencia de rayos X de la muestra 01.					
						
Figura 2	Colocación del analizador XRD portátil sobre la muestra 01.					
						
Figura 3	Determinación de elementos químicos por fluorescencia de rayos X de la muestra 02.					
						
Figura 4	Colocación del analizador XRD portátil sobre la muestra 02.					
						
Figura 5	Determinación de elementos químicos por fluorescencia de rayos X de la muestra 03.					
						
Figura 6	Colocación del analizador XRD portátil sobre la muestra 03.					

Anexo M

Análisis granulométrico del biochar

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)		Código	BC-FR-02	
	Panel fotográfico		Versión	1	
	Análisis granulométrico del biochar como arena Adaptado de NTP 400.012		Fecha	06/01/2025	
I. Información general					
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"				
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo				
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733		
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°	Altitud (msnm):	3357
Fecha:	12/05/2025				
					
Figura 1 Biochar de coco y cáscaras de castaña.		Figura 2 Molino eléctrico de granos.			
					
Figura 3 Peso del biochar inicial.		Figura 4 Biochar dentro del molino eléctrico.			
					
Figura 5 Molienda del biochar.		Figura 6 Tamizado manual y almacenamiento del material retenido en cada tamiz etiquetados del tamiz N°4 al N°200.			

Anexo N

Peso específico y absorción del biochar como agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-03
	Panel fotográfico				Versión	1
	Peso específico y absorción del biochar como arena				Fecha	06/01/2025
	Adaptado de NTP 400.022					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	03/06/2025					
Figura 1	Sumergimiento de las muestras de biochar en agua. Determinación de la masa de biochar SSD de la muestra 01.					
Figura 2	Determinación de la masa de biochar SSD de la muestra 02.					
Figura 3	Determinación de la masa de biochar SSD de la muestra 03.					
Figura 4	Luego de dejar reposar la muestra de biochar en el picnómetro por 24h se determina el peso del picnómetro más agua y biochar.					
Figura 5	Peso específico y absorción de la muestra 01, 02 y 03.					
Figura 6	Luego de retirar el biochar del picnómetro se seca en el horno a 110°C hasta masa constante.					

Anexo O

Peso unitario y vacíos del biochar como agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-04
	Panel fotográfico				Versión	1
	Peso unitario y vacíos del biochar como arena				Fecha	06/01/2025
	Adaptado de NTP 400.017					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	28/05/2025					



Figura 1Determinación del peso del molde cilíndrico.



Figura 2Peso del molde cilíndrico.



Figura 3Llenado del recipiente con biochar hasta el reboso desde una altura de 50 mm para determinación del peso unitario suelto.



Figura 4Determinación del peso unitario suelto y vacíos del biochar como arena de la muestra 01.



Figura 5Llenado y apisonado del biochar en el molde cilíndrico.



Figura 6Determinación del peso unitario compactado y vacíos del biochar como arena de la muestra 03.








Anexo P

Densidad del biochar finamente molido

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)					Código	BC-FR-05
	Panel fotográfico					Versión	1
	Densidad del biochar como cemento y aditivo					Fecha	06/01/2025
	Adaptado de NTP 334.005						
I. Información general							
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733				
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	04/04/2025						
Figura 1		Muestra para el ensayo de densidad del biochar finamente molido.					
Figura 2		Llenado del picnómetro con biochar finamente molido de la muestra 01.					
Figura 3		Llenado del picnómetro con biochar finamente molido de la muestra 02.					
Figura 4		Peso del picnómetro más biochar y más agua.					
Figura 5		Biochar finamente molido.					
Figura 6		Biochar finamente molido.					

Anexo Q

Material fino que pasa por el tamiz N° 200 del agregado grueso

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-06
	Panel fotográfico				Versión	1
	Materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado grueso				Fecha	06/01/2025
	NTP 400.018					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	28/01/2025					
						
Figura 1	Muestra de agregado grueso					
						
Figura 2	Lavado-agitación y decantación del agregado grueso					
						
Figura 3	Agregado grueso lavado hasta que el agua salga clara					
						
Figura 4	Muestra 01 - agregado grueso					
						
Figura 5	Muestra 03 - agredo grueso					
						
Figura 6	Secado en el horno hasta peso constante y pesado					

Anexo R

Análisis granulométrico del agregado grueso

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-07
	Panel fotográfico				Versión	1
	Análisis granulométrico del agregado grueso				Fecha	06/01/2025
	NTP 400.012					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	20/01/2025					

Figura 1

Proceso de cuarteo del agregado grueso

Figura 2

Proceso de tamizado mecánico del agregado grueso

Figura 3

Tamizado del agregado grueso

Figura 4

Granulometría del agregado grueso

Figura 5

Pesado del material retenido en cada malla

Figura 6

Pesado del material retenido en cada malla

Anexo S

Contenido de humedad del agregado grueso

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)					Código	BC-FR-08
	Panel fotográfico					Versión	1
	Contenido de humedad del agregado grueso					Fecha	06/01/2025
	NTP 339.185						
I. Información general							
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733				
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	20/01/2025						
Figura 1	Agregado grueso con humedad natural						
Figura 2	Muestras del agregado grueso con humedad natural						
Figura 3	Muestras para contenido de humedad puestas en el horno						
Figura 4	Muestra 01, 02 y 03 para contenido de humedad en el horno						
Figura 5	Muestras para contenido de humedad en el horno						
Figura 6	Muestras de agregado grueso secadas en el horno por 24h						

Anexo T

Peso específico y absorción del agregado grueso

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-09
	Panel fotográfico				Versión	1
	Peso específico y absorción del agregado grueso				Fecha	06/01/2025
	NTP 400.021					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	30/01/2025					
Figura 1	Secado de la superficie del agregado con un paño absorbente					
Figura 2	Obtención de la masa SSD (superficie saturada seca)					
Figura 3	Medición de la masa SSD de la muestra 01					
Figura 4	Medición de la masa SSD de la muestra 03					
Figura 5	Sumergir la muestra en agua					
Figura 6	Medición de la masa aparente en agua y secado en el horno					







Anexo U

Peso unitario y vacíos del agregado grueso

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-10
	Panel fotográfico				Versión	1
	Peso unitario y vacíos del agregado grueso				Fecha	06/01/2025
	NTP 400.017					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	21/01/2025					
<p>Laboratorio FIC-UNSAAC 21 de enero de 2025</p>						
Figura 1	Peso unitario suelto del agregado grueso					
<p>Laboratorio FIC-UNSAAC 21 de enero de 2025</p>						
Figura 2	Peso unitario suelto del agregado grueso					
<p>Laboratorio FIC-UNSAAC 21 de enero de 2025</p>						
Figura 3	Peso del molde cilíndrico para peso unitario suelto y compactado					
<p>14 de febrero de 2025 10:32 a. m.</p>						
Figura 4	Dimensiones de molde cilíndrico para peso unitario sueto y compactado					
<p>Laboratorio FIC-UNSAAC 21 de enero de 2025</p>						
Figura 5	Proceso de apisonado para peso unitario compactado del agregado grueso					
<p>Laboratorio FIC-UNSAAC 21 de enero de 2025</p>						
Figura 6	Peso unitario compactado del agregado grueso					

Anexo V

Resistencia a abrasión del agregado grueso

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-11
	Panel fotográfico				Versión	1
	Resistencia a la abrasión del agregado grueso				Fecha	06/01/2025
	NTP 400.019					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	31/01/2025					
						
Figura 1	Separación de fracciones y recombinación según la gradación.					
						
Figura 2	Registro de la masa inicial.					
						
Figura 3	Descarga del material en la máquina de abrasión.					
						
Figura 4	Obtención del material luego de la abrasión.					
						
Figura 5	Peso del material obtenido luego de la abrasión.					
						
Figura 6	Tamizado por el tamiz 12 y lavado del material retenido. Secado del material en el horno hasta masa constante.					

Anexo W

Material más fino que pasa por el tamiz N° 200 del agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)			Código	BC-FR-12
	Panel fotográfico			Versión	1
	Materiales más finos que pasan por el tamiz N° 200 del agregado fino NTP 400.018			Fecha	06/01/2025
I. Información general					
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"				
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo				
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733		
Longitud (°WGS84):	-71.959270°	Latitud (°WGS84):	-13.520306°	Altitud (msnm):	3357
Fecha:	29/01/2025				
					
Figura 1		Muestra 01, 02 y 03 del agregado fino.			
					
Figura 2		Las muestras proceden a agitarse vigorosamente con agua para desprender finos.			
					
Figura 3		Muestras de agregado fino hasta que el agua salga clara.			
					
Figura 4		Secado de las muestras hasta peso constante.			
					
Figura 5		Muestras en el horno a 110°C.			
					
Figura 6		Determinación de la masa final.			



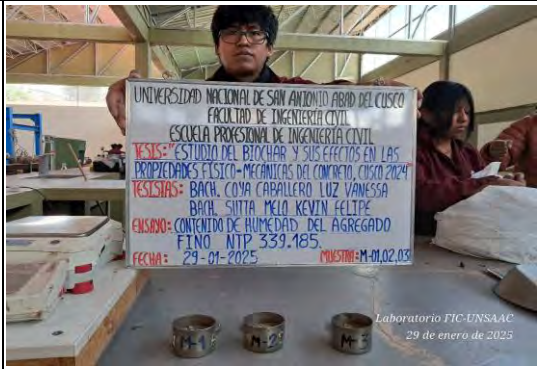

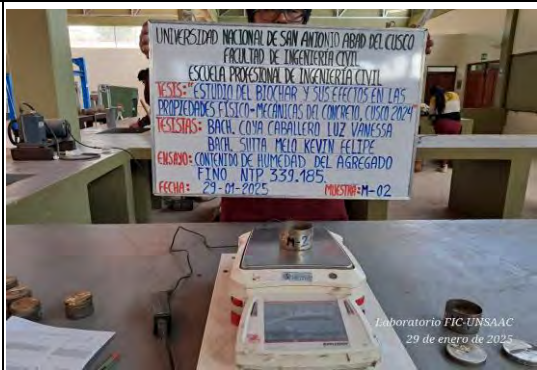
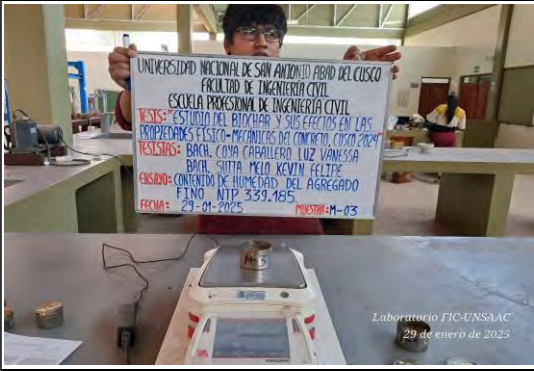

Anexo X

Análisis granulométrico del agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-13
	Panel fotográfico				Versión	1
	Análisis granulométrico del agregado fino				Fecha	06/01/2025
	NTP 400.012					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	23/01/2025					
Figura 1	Proceso de cuarteo del agregado fino (Vicho)					
Figura 2	Tamizado del agregado fino (Vicho)					
Figura 3	Proceso de cuarteo del agregado fino (Cunyac)					
Figura 4	Cuarteo del agregado fino (Cunyac)					
Figura 5	Determinación del peso retenido en cada tamiz y fondo (Cunyac).					
Figura 6	Granulometría del agregado fino (Cunyac)					

Anexo Y

Contenido de humedad del agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-14
	Panel fotográfico				Versión	1
	Contenido de humedad del agregado fino				Fecha	06/01/2025
	NTP 339.185					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°	Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	29/01/2025					
						
Figura 1	Muestra 01, 02 y 03 para contenido de humedad del agregado fino (Cunyac)					
						
Figura 2	Muestras para contenido de humedad.					
						
Figura 3	Peso de la muestra 01, con humedad natural.					
						
Figura 4	Peso de la muestra 02, con humedad natural.					
						
Figura 5	Peso de la muestra 03, con humedad natural.					
						
Figura 6	Secado de las muestras en el horno a 110°C.					

Anexo Z

Peso específico y absorción del agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)					Código	BC-FR-15
	Panel fotográfico					Versión	1
	Peso específico y absorción del agregado fino					Fecha	06/01/2025
	NTP 400.022						
I. Información general							
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733				
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	04/02/2025						
Figura 1	Sumergido del agregado fino (Cunyac) en agua.						
Figura 2	Exposición del agregado fino sobre una superficie no absorbente hasta condición SSD.						
Figura 3	Prueba en molde truncado para obtención de la condición SSD. Se evidencia ligera caída.						
Figura 4	Eliminación de burbujas de aire.						
Figura 5	Muestras del agregado fino retirados del picnómetro.						
Figura 6	Secado de las muestras en el horno.						

Anexo AA

Peso unitario y vacíos del agregado fino

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)					Código	BC-FR-16
	Panel fotográfico					Versión	1
	Peso unitario y vacíos del agregado fino					Fecha	06/01/2025
	NTP 400.017						
I. Información general							
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733				
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	30/01/2025						
Figura 1	Determinación del peso del molde cilíndrico.						
Figura 2	Peso unitario suelto de la muestra 01.						
Figura 3	Peso unitario suelto de la muestra 02.						
Figura 4	Peso unitario suelto de la muestra 03.						
Figura 5	Proceso de apisonado para la obtención del peso unitario compactado.						
Figura 6	Peso unitario compactado de la muestra 03.						

Anexo BB

Elaboración y curado de especímenes de concreto

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-17
	Panel fotográfico				Versión	1
	Elaboración y curado de especímenes de concreto				Fecha	06/01/2025
NTP 339.183						
I. Información general						
Tesis: "Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas: - Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:		Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	Cusco
Localidad:		Perayoc	Dirección: Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):		-71.959270°	Latitud ° (WGS84):		-13.520306°	Altitud (msnm): 3357
Fecha:		04/02/2025				
Figura 1	Agregado grueso (Vicho) y Agregado fino (Cunyac).					
Figura 2	Lavado del agregado grueso para eliminar exceso de material fino.					
Figura 3	Tamizado del material grueso con la malla 3/4". Almacenamiento de agregado grueso pasando la malla 3/4" en tachos.					
Figura 4	Pesado de biochar y aditivo según diseño de mezcla.					



Figura 7 Compactación de la mezcla en los moldes. Ubicación de los moldes sobre una superficie rígida y sin vibraciones.



Figura 8 Especímenes de concreto cilíndricos de 4" x 8".



Figura 9 Enrase y acabado superficial de vigas de concreto.



Figura 10 Vigas de concreto de 15x15x60 cm.



Figura 11 Acondicionamiento de la poza de curado con tecnopor y plástico para la presente investigación.



Figura 12 Poza de curado con vigas y muestras cilíndricas.

Anexo CC

Temperatura del concreto fresco

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)					Código	BC-FR-18
	Panel fotográfico					Versión	1
	Temperatura del concreto fresco					Fecha	06/01/2025
	NTP 339.184						
I. Información general							
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733				
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	09/07/2025						
Figura 1	Medición de la temperatura ambiente.						
Figura 2	Medición de la temperatura ambiente durante el proceso de mezclado.						
Figura 3	Medición de la temperatura del concreto fresco.						
Figura 4	Medición de la temperatura dentro de la carretilla.						
Figura 5	Medición de la temperatura del concreto patrón.						
Figura 6	Medición de la temperatura del concreto con sustitución parcial de la arena (10%).						



Figura 7 Medición de la temperatura del concreto con sustitución parcial de la arena (15%).



Figura 8 Medición de la temperatura del concreto con sustitución parcial de la arena (20%).



Figura 9 Medición de la temperatura del concreto con sustitución parcial del cemento (1%).



Figura 10 Medición de la temperatura del concreto con sustitución parcial del cemento (2%).



Figura 11 Medición de la temperatura del concreto con sustitución parcial del cemento (3%).



Figura 12 Medición de la temperatura del concreto con adición (1%).



Figura 13 Medición de la temperatura del concreto con adición (3%).



Figura 14 Medición de la temperatura del concreto con adición (5%).

Anexo DD

Asentamiento del concreto

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-19
	Panel fotográfico				Versión	1
	Asentamiento del concreto				Fecha	06/01/2025
	NTP 339.035					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	28/03/2025					
						
Figura 1	Medición del slump del concreto patrón.					
						
Figura 2	Medición del slump del concreto patrón.					
						
Figura 3	Medición del slump del concreto con sustitución parcial de arena (20%).					
						
Figura 4	Medición del slump del concreto con sustitución parcial de arena (20%).					
						
Figura 5	Medición del slump del concreto con sustitución parcial del cemento (1%).					
						
Figura 6	Medición del slump del concreto con sustitución parcial del cemento (2%).					



Figura 7 Medición del slump del concreto con sustitución parcial del cemento (3%).



Figura 8 Medición del slump del concreto con adición (1%).



Figura 9 Medición del slump del concreto con adición (3%).



Figura 10 Medición del slump del concreto con adición (5%).

Anexo EE

pH del concreto fresco



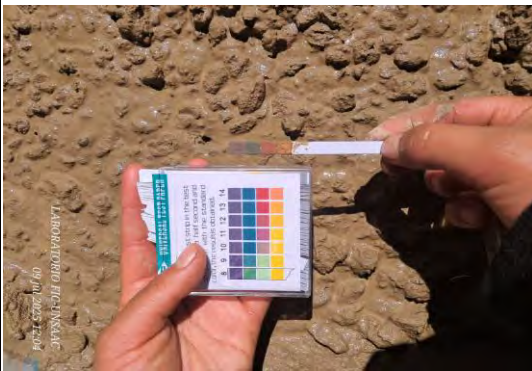
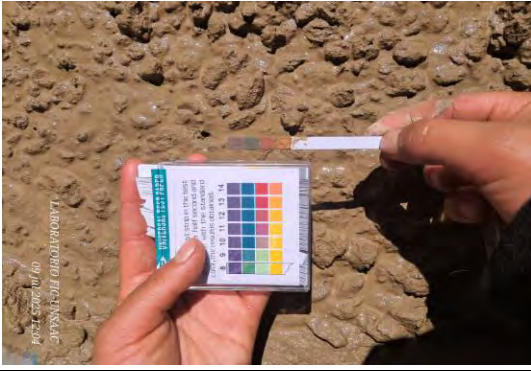



	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)		Código	BC-FR-20	
	Panel fotográfico		Versión	1	
	pH del concreto fresco		Fecha	06/01/2025	
I. Información general					
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"				
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo				
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco	Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733		
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°	Altitud (msnm):	3357
Fecha:	09/07/2025				
					
Figura 1	Inserción del papel pH-métrico dentro de la mezcla de concreto.				
					
Figura 2	Comparación con la escala pH-métrica.				
					
Figura 3	Medición del pH del concreto patrón.				
					
Figura 4	Medición del pH del concreto con sustitución parcial de la arena (10%).				
					
Figura 5	Medición del pH del concreto con sustitución parcial de la arena (15%).				
					
Figura 6	Medición del pH del concreto con sustitución parcial de la arena (20%).				



Figura 7 Medición del pH del concreto con sustitución parcial del cemento (1%).



Figura 8 Medición del pH del concreto con sustitución parcial del cemento (2%).



Figura 9 Medición del pH del concreto con sustitución parcial del cemento (3%).



Figura 10 Medición del pH del concreto con adición (1%).



Figura 11 Medición del pH del concreto con adición (3%).



Figura 12 Medición del pH del concreto con adición (5%).

Anexo FF

Resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de 10cmx20cm

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-21
	Panel fotográfico				Versión	1
	Resistencia a la compresión				Fecha	06/01/2025
NTP 339.034						
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	10/07/2025					
						
Figura 1	Almohadillas de neopreno. Pulido de la superficie inferior y superior de las briquetas de concreto hasta que esté nivelado.					
						
Figura 2	Medición del diámetro de las briquetas con vernier.					
						
Figura 3	Medición de la altura del espécimen con cinta métrica.					
						
Figura 4	Resultados de la máquina universal.					
						
Figura 5	Visualización del tipo de falla.					
						
Figura 6	Resistencia a la compresión del concreto patrón.					

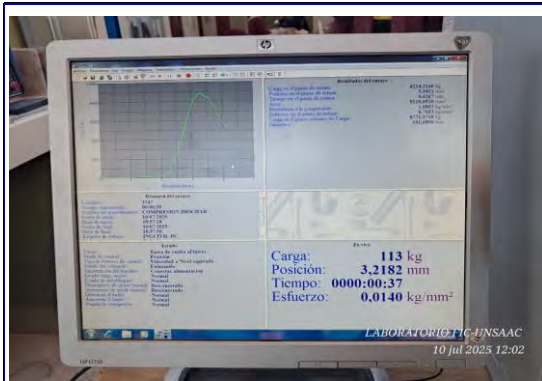


Figura 7 Control (3 días)



Figura 8 Control (7 días)



Figura 9 Control (28 días)

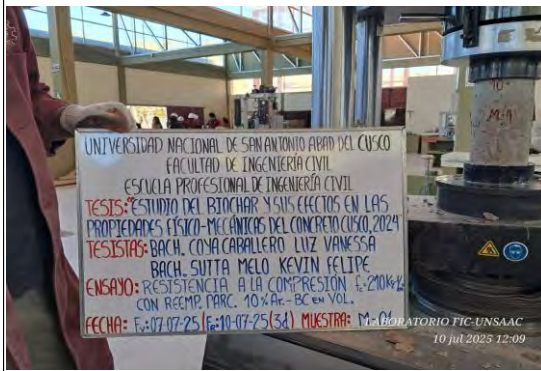


Figura 10 Sust-Ar-BC_10% (3 días)



Figura 11 Sust-Ar-BC_10% (7 días)



Figura 12 Sust-Ar-BC_10% (28 días)



Figura 13 Sust-Ar-BC_15% (3 días)



Figura 14 Sust-Ar-BC_15% (7 días)



Figura 15 Sust-Ar-BC_15% (28 días)



Figura 16 Sust-Ar-BC_20% (3 días)



Figura 17 Sust-Ar-BC_20% (7 días)



Figura 18 Sust-Ar-BC_20% (28 días)

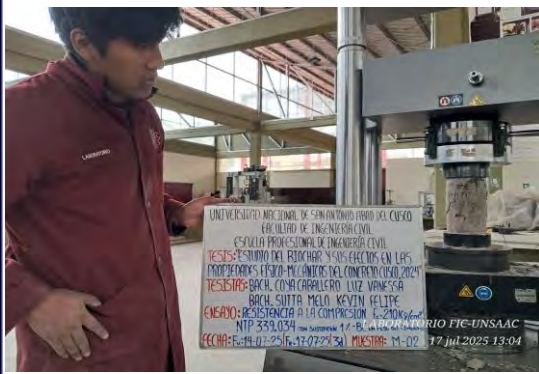


Figura 19 Sust-Cm-BC_1% (3 días)



Figura 20 Sust-Cm-BC_1% (7 días)



Figura 21 Sust-Cm-BC_1% (28 días)



Figura 22 Sust-Cm-BC_2% (3 días)



Figura 23 Sust-Cm-BC_2% (7 días)



Figura 24 Sust-Cm-BC_2% (28 días)



Figura 25 Sust-Cm-BC_3% (3 días)



Figura 26 Sust-Cm-BC_3% (7 días)



Figura 27 Sust-Cm-BC_3% (28 días)



Figura 28 Adi-BC_1% (3 días)



Figura 29 Adi-BC_1% (7 días)



Figura 30 Adi-BC_1% (28 días)



Figura 31

Adi-BC_3% (3 días)



Figura 32

Adi-BC_3% (7 días)



Figura 33

Adi-BC_3% (28 días)



Figura 34

Adi-BC_5% (3 días)



Figura 35

Adi-BC_5% (7 días)



Figura 36

Adi-BC_5% (28 días)

Anexo GG

Resistencia a la tracción indirecta en especímenes cilíndricos de 10cmx20cm

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)					Código	BC-FR-22
	Panel fotográfico					Versión	1
	Resistencia a la tracción indirecta					Fecha	06/01/2025
	NTP 339.084						
I. Información general							
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"						
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo						
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco	
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733				
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357	
Fecha:	05/08/2025						
Figura 1	Medición del ancho listón de madera.						
Figura 2	Medición del espesor del listón de madera.						
Figura 3	Posicionamiento de la briqueta para compresión diametral.						
Figura 4	Muestra cilíndrica en la máquina universal para ensayo de tracción indirecta por compresión diametral.						
Figura 5	Muestra cilíndrica luego del ensayo de tracción indirecta.						
Figura 6	Muestras ensayadas a tracción indirecta.						

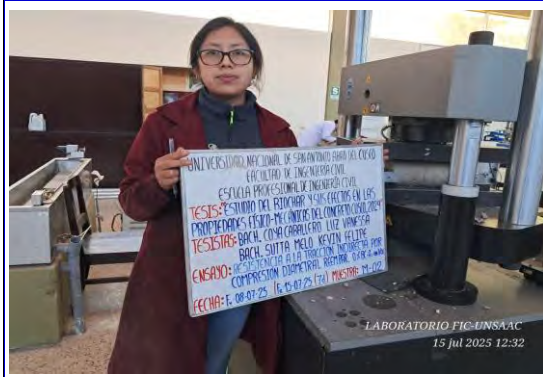


Figura 7 Control (7 días)



Figura 8 Control (28 días)



Figura 9 Sust-Ar-BC_10% (7 días)

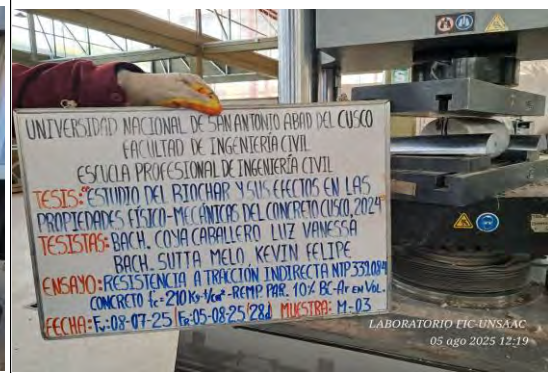


Figura 10 Sust-Ar-BC_10% (28 días)

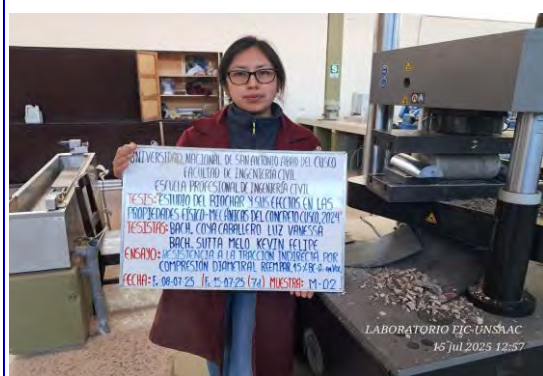


Figura 11 Sust-Ar-BC_15% (7 días)

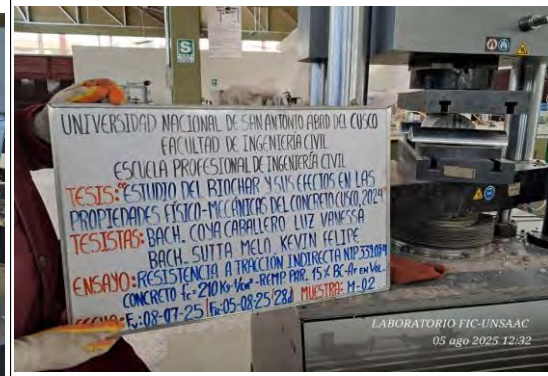


Figura 12 Sust-Ar-BC_15% (28 días)



Figura 13 Sust-Ar-BC_20% (7 días)

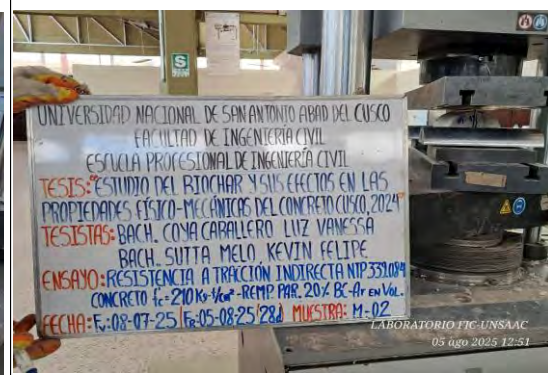


Figura 14 Sust-Ar-BC_20% (28 días)

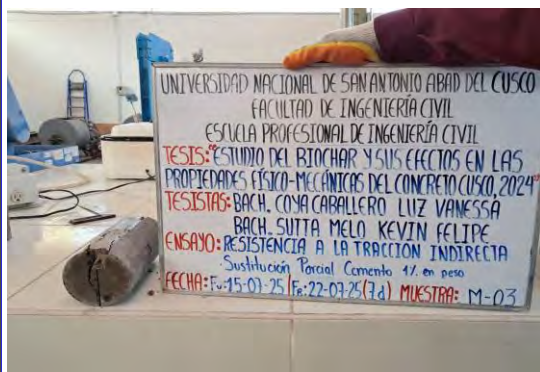


Figura 15 Sust-Cm-BC_1% (7 días)

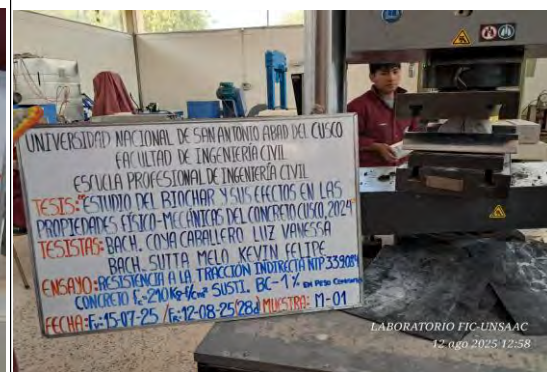


Figura 16 Sust-Cm-BC_1% (28 días)



Figura 17 Sust-Cm_2% (7 días)



Figura 18 Sust-Cm-BC_2% (28 días)



Figura 19 Sust-Cm-BC_3% (7 días)



Figura 20 Sust-Cm-BC_3% (28 días)



Figura 21 Adi-BC_1% (7 días)



Figura 22 Adi-BC_1% (28 días)



Figura 23

Adi-BC_3% (7 días)



Figura 24

Adi-BC_3% (28 días)



Figura 25

Adi-BC_5% (7 días)



Figura 26

Adi-BC_5% (28 días)

Anexo HH

Resistencia a la flexión en vigas de 15cmx15cmx60cm

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-23
	Panel fotográfico				Versión	1
	Resistencia a la flexión				Fecha	06/01/2025
	NTP 339.078					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	07/08/2025					
						
Figura 1	Peso del espécimen en condición SSD.					
						
Figura 2	Marcado de los tercios del tramo.					
						
Figura 3	Dimensionamiento de las vigas.					
						
Figura 4	Visualización de la falla en la viga. Falla se encuentra dentro del tercio central.					
						
Figura 5	Visualización del esfuerzo en el punto de rotura.					
						
Figura 6	Ensayo a flexión de vigas en la máquina universal.					



Figura 7 Control (28 días)



Figura 8 Sust-Ar-BC_10% (28 días)



Figura 9 Sust-Ar-BC_15% (28 días)



Figura 10 Sust-Ar-BC_20% (28 días)



Figura 11 Sust-Cm-BC_1% (28 días)



Figura 12 Sust-Cm-BC_2% (28 días)

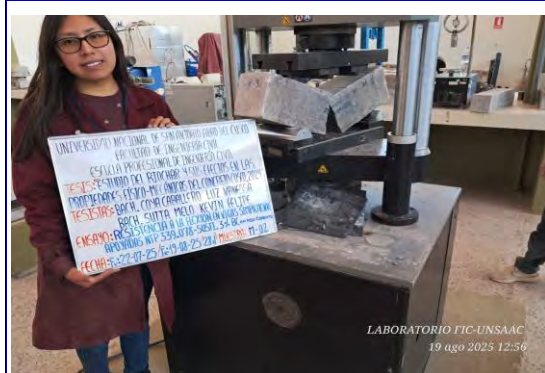


Figura 13 Sust-Cm-BC_3% (28 días)

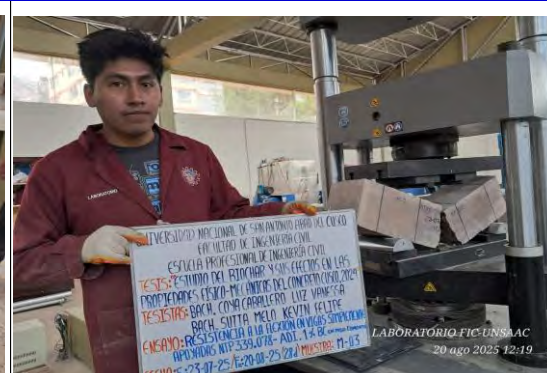


Figura 14 Adi-BC_1% (28 días)



Figura 15

Adi-BC_3% (28 días)

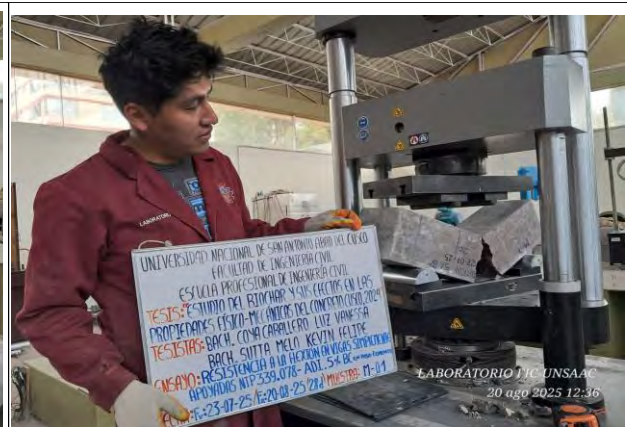


Figura 16

Adi-BC_5% (28 días)

Anexo II

Densidad, absorción y porcentaje de vacíos en especímenes cilíndricos de 10cmx20cm

	Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC)				Código	BC-FR-24
	Panel fotográfico				Versión	1
	Densidad, absorción y porcentaje de vacíos				Fecha	06/01/2025
	NTP 339.187					
I. Información general						
Tesis:	"Estudio del biochar y sus efectos en las propiedades físico-mecánicas del concreto en la ciudad del cusco, 2024"					
Tesistas:	- Bach. Luz Vanessa Coya Caballero - Bach. Kevin Felipe Sutta Melo					
Departamento:	Cusco	Provincia:	Cusco		Distrito:	Cusco
Localidad:	Perayoc	Dirección:	Av. De la Cultura, Nro. 733			
Longitud ° (WGS84):	-71.959270°	Latitud ° (WGS84):	-13.520306°		Altitud (msnm):	3357
Fecha:	25/08/2025					
Figura 1	Cortado de los especímenes con la cortadora de concreto.					
Figura 2	Especímenes para ensayo de densidad, absorción y porcentaje de vacíos.					
Figura 3	Secado de las muestras el horno hasta encontrar masa constante.					
Figura 4	Sumergimiento de los especímenes en agua por 48h.					
Figura 5	Hervido de las muestras por 5h. Posteriormente se dejó enfriar naturalmente por 14h hasta la temperatura de 21°C.					
Figura 6	Determinación de la masa aparente de los especímenes.					