

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS:

INCIDENCIA DEL REEMPLAZO PARCIAL DE AGREGADO GRUESO DE CERRO
POR ARCILLA COCIDA EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO $F'c = 280 \text{ Kg/Cm}^2$,
CAJAMARCA, 2023

PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

AUTOR:

BACH. PAREDES PAUCAR, LUIS BRYAN

ASESOR:

DR. ING. MOSQUEIRA MORENO, MIGUEL ANGEL

CAJAMARCA - PERÚ

2025

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. Investigador: LUIS BRYAN PAREDES PAUCAR

DNI: 72492341

Escuela Profesional: INGENIERÍA CIVIL

2. Asesor: Dr. Ing. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO

Facultad: DE INGENIERÍA

3. Grado académico o título profesional

Bachiller

Título profesional

Segunda especialidad

Maestro

Doctor

4. Tipo de Investigación:

Tesis

Trabajo de investigación

Trabajo de suficiencia profesional

Trabajo académico

5. Título de Trabajo de Investigación:

INCIDENCIA DEL REEMPLAZO PARCIAL DE AGREGADO GRUESO DE CERRO POR ARCILLA COCIDA EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO $F'c=280 \text{ Kg/Cm}^2$, CAJAMARCA, 2023

6. Fecha de evaluación: 20/10/2025

7. Software antiplagio: TURNITIN URKUND (OURIGINAL) (*)

8. Porcentaje de Informe de Similitud: 19%

9. Código Documento: Oid: 3117:515471830

10. Resultado de la Evaluación de Similitud:

APROBADO PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 20/10/2025



FIRMA DEL ASESOR

Dr. Ing. MIGUEL ANGEL MOSQUEIRA MORENO

DNI: 26733060



Firmado digitalmente por:
BAZAN DIAZ Laura Sofia
FAU 20148258801 soft
Motivo: En señal de
conformidad
Fecha: 20/10/2025 12:54:14-0500

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN FI



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TITULO : *INCIDENCIA DEL REEMPLAZO PARCIAL DE AGREGADO GRUESO DE CERRO POR ARCILLA COCIDA EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, CAJAMARCA, 2023.*

ASESOR : *Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno.*

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0705-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 27 de octubre de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **tres días del mes de noviembre de 2025**, siendo las once horas (11:00 a.m.) en la Sala de Audiovisuales (Edificio 1A – Segundo Piso), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Vocal : Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo.
Secretario : M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada *INCIDENCIA DEL REEMPLAZO PARCIAL DE AGREGADO GRUESO DE CERRO POR ARCILLA COCIDA EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO $f'_c = 280 \text{ kg/cm}^2$, CAJAMARCA, 2023*, presentado por el Bachiller en Ingeniería Civil **LUIS BRYAN PAREDES PAUCAR**, asesorado por el Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA : 6 PTS.

EVALUACIÓN PÚBLICA : 11 PTS.

EVALUACIÓN FINAL : 12 PTS DICEISIETE (En letras)

En consecuencia, se lo declara APPROBADO con el calificativo de **17 (DIECISIETE)** acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las 12:22 horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Mauro Augusto Centurión Vargas.
Presidente

M.Cs. Ing. Manuel Lincoln Minchán Pajares.
Secretario

Ing. Marco Wilder Hoyos Saucedo.
Vocal

Dr. Ing. Miguel Angel Mosqueira Moreno
Asesor

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento a mis padres, cuyo apoyo incondicional fue fundamental para alcanzar esta meta. Su amor y sacrificio fueron mi mayor motivación.

Asimismo, agradezco profundamente a mi asesor de tesis por su valiosa guía, predisposición y apoyo constante durante todo el proceso de investigación.

DEDICATORIA

A mis amados padres, quienes con su esfuerzo y dedicación me brindaron la oportunidad de alcanzar esta meta. Su amor y apoyo son el regalo más grande que he recibido. Esta tesis es un humilde reflejo de su grandeza.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO	ii
DEDICATORIA	iii
CONTENIDO	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT.....	xi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Formulación del problema	2
1.3. Hipótesis.....	2
1.4. Justificación de la investigación.....	2
1.5. Alcances y delimitaciones de la investigación.....	3
1.6. Limitaciones de la investigación.....	4
1.7. Objetivos	5
1.7.1. Objetivo general.....	5
1.7.2. Objetivos específicos	5
1.8. Descripción de los contenidos de los capítulos	6
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Antecedentes.....	7
2.1.1. Antecedentes internacionales	7
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	8
2.1.3. Antecedentes locales.....	10
2.2. Bases teóricas	12
2.2.1. Arcilla cocida.....	12
2.2.2. Propiedades mecánicas del concreto	12
2.2.3. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado fino	16

2.2.4. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado grueso.....	24
2.2.5. Diseño de mezclas patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	31
2.3. Definiciones básicas	38
CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODO	40
3.1. Ubicación geográfica	40
3.1.1. De la investigación.....	40
3.1.2. De la cantera de los agregados fino y grueso	40
3.1.3. De la arcilla cocida.....	41
3.1.4. De los ensayos de laboratorio.....	43
3.2. Época de la investigación	43
3.3. Materiales y Equipos	43
3.3.1. Materiales	43
3.3.2. Equipos.....	44
3.3.3. Equipos para ensayos de concreto endurecido.....	44
3.4. Metodología.....	45
3.4.1. Tipo de investigación	45
3.4.2. Nivel de investigación	45
3.4.3. Diseño de investigación	45
3.4.4. Método de investigación	45
3.5. Población de estudio	45
3.6. Muestra	45
3.7. Unidad de análisis	47
3.8. Etapas de investigación.....	47
3.8.1. Etapa de gabinete.....	47
3.8.2. Etapa de laboratorio.....	48
3.9. Procedimiento.....	49
3.9.1. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado fino	49
3.9.2. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado grueso.....	49
3.9.3. Diseño de mezclas patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	50

3.9.4. Sustitución del agregado grueso por arcilla cocida	50
3.9.5. Elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas de concreto	51
3.9.6. Ensayos de resistencia a la compresión y flexión	52
3.10. Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados.....	53
3.10.1. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado fino y agregado grueso.....	53
3.10.2. Diseño de mezcla patrón $f'c = 280\text{Kg/cm}^2$ y elaboración de probetas convencionales	54
3.10.3. Probetas de concreto con reemplazo del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de arcilla cocida	56
3.10.4. Resistencia a la compresión	57
3.10.5. Resistencia a la flexión	64
3.11. Comparación de resultados de ensayos del concreto en estado endurecido.....	68
3.11.1. Resistencia a la compresión	68
3.11.2. Resistencia a la flexión	70
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	72
4.1. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto	72
4.2. Determinación de la resistencia a la flexión por el módulo de rotura del concreto ...	75
4.3. Contrastación de la hipótesis	78
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	79
5.1. Conclusiones	79
5.2. Recomendaciones	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXOS.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cantidad de muestra mínima para ensayo de granulometría del agregado grueso	25
Tabla 2: Cantidad de muestra mínima para ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso	28
Tabla 3: Cantidad de muestra mínima para ensayo de contenido de humedad del agregado grueso.....	29
Tabla 4: Consistencia y asentamiento del concreto fresco	32
Tabla 5: Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles	33
Tabla 6: Asentamiento recomendados para diversos tipos de estructuras	34
Tabla 7: Volumen de agua por m ³	35
Tabla 8: Contenido de aire atrapado	35
Tabla 9: Relación agua/cemento por resistencia	36
Tabla 10: Propiedades del agregado fino.....	53
Tabla 11: Propiedades del agregado grueso.....	54
Tabla 12: Proporción en peso para la elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas	55
Tabla 13: Cantidad de materiales para probetas prismáticas convencionales (tanda de 0.057 m ³ para 9 probetas cilíndricas)	55
Tabla 14: Cantidad de materiales para probetas prismáticas convencionales (tanda de 0.038 m ³ para 3 probetas prismáticas).....	55
Tabla 15: Cantidad de material para probetas cilíndricas con diferentes porcentajes de reemplazo (tanda de 0.057 m ³ para 9 probetas)	56
Tabla 16: Cantidad de material para probetas prismáticas con diferentes porcentajes de reemplazo (tanda de 0.038 m ³ para 3 probetas)	57
Tabla 17: Resistencia a la compresión para un concreto convencional f'c=280 kg/cm ²	58
Tabla 18: Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso por arcilla cocida f'c=280 Kg/cm ²	59
Tabla 19: Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso por arcilla cocida f'c=280 Kg/cm ²	60
Tabla 20: Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 20% del agregado grueso por arcilla cocida f'c=280 Kg/cm ²	61
Tabla 21: Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 25% del agregado grueso por arcilla cocida f'c=280 Kg/cm ²	62
Tabla 22: Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 30% del agregado grueso por arcilla cocida f'c=280 Kg/cm ²	63

Tabla 23: Resistencia a la flexión para un concreto convencional $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$	64
Tabla 24: Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	65
Tabla 25: Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	65
Tabla 26: Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 20% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	66
Tabla 27: Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 25% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	66
Tabla 28: Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 30% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$	67
Tabla 29: Granulometría de agregado fino	83
Tabla 30: Cálculo del peso específico del agua	85
Tabla 31: Cálculo del factor “f”	85
Tabla 32: Peso unitario suelto del agregado fino	86
Tabla 33: Peso unitario compactado del agregado fino	86
Tabla 34: Peso específico y absorción del agregado fino	87
Tabla 35: Contenido de humedad del agregado fino	88
Tabla 36: Material que pasa el tamiz N° 200	88
Tabla 37: Granulometría del agregado grueso	89
Tabla 38: Cálculo del peso específico del agua	91
Tabla 39: Cálculo del factor “f”	91
Tabla 40: Peso unitario suelto del agregado grueso	92
Tabla 41: Peso unitario compactado del agregado grueso	92
Tabla 42: Peso específico y absorción del agregado grueso	93
Tabla 43: Contenido de humedad del agregado grueso	94
Tabla 44: Resistencia a la abrasión	95
Tabla 45: Características de los Agregados	96
Tabla 46: Módulo de combinación	99
Tabla 47: Método de Volúmenes Absolutos	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01: Ubicación del laboratorio de ensayo de materiales en donde se realizaron los ensayos de la presente investigación.....	40
Figura 02: Ubicación de la cantera de agregados	41
Figura 03:Ubicación de ladrillera CECAJ	42
Figura 04: Ubicación de cantera Aguilar (trituración).....	42
Figura 05: Comparación de resistencia a la compresión promedio $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$ a 28 días con reemplazos parciales de agregado grueso	68
Figura 06: Porcentaje de cumplimiento de la resistencia a la compresión promedio $f'c=280\text{kg/cm}^2$ a 28 días con reemplazos parciales de agregado grueso	69
Figura 07: Comparación de resistencia a la flexión promedio con $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$ a 28 días con reemplazos parciales de agregado grueso	70
Figura 08: Curva de distribución granulométrica del agregado fino	84
Figura 09: Curva granulométrica del agregado grueso.....	90
Figura 10: Agregado grueso – cantera ESGA.....	102
Figura 11: Agregado fino – cantera ESGA	102
Figura 12: Ladrillera CECAJ.....	103
Figura 13: Chancadora operativa en Cantera Aguilar.....	103
Figura 14: Muestreo agregado	104
Figura 15: Ensayo de agregados	104
Figura 16: Probetas cilíndricas elaboradas el día anterior a 24 horas de aireado.....	105
Figura 17: Vaciado de probetas prismáticas	105
Figura 18: Ensayo de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	106
Figura 19: Ensayo de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	106
Figura 20: Probetas prismáticas a someter en ensayo de resistencia a la flexión	107
Figura 21: Ensayo de resistencia a la flexión	107

RESUMEN

La creciente demanda de agregados en el sector de la construcción en Cajamarca, sumada a la preocupación por el agotamiento de recursos naturales y el impacto ambiental derivado de su extracción, evidencia la necesidad de explorar materiales alternativos, no obstante, la aplicación de arcilla cocida como reemplazo parcial del agregado grueso en concreto $f'c=280\text{kg/cm}^2$ carece de investigación concluyente en el contexto local. Por ello, esta investigación tuvo como objetivo determinar la incidencia del reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida en la resistencia del concreto $f'c=280\text{kg/cm}^2$ en Cajamarca, 2023. Para lograrlo, se procedió a la determinación de las propiedades físicas de los agregados, el diseño de mezclas, la sustitución del agregado grueso de cerro por arcilla cocida en porcentajes del 10%, 15%, 20%, 25% y 30%, la elaboración de probetas, y finalmente, la realización de ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión (módulo de rotura). Los resultados obtenidos a los 28 días revelaron que la resistencia a la compresión del concreto patrón fue de 265.63kg/cm^2 (94.87% del $f'c$ de diseño), mientras que las mezclas con 10% y 30% de reemplazo alcanzaron 247.29kg/cm^2 (88.32%) y 240.43kg/cm^2 (85.87%) respectivamente, superando el 85% exigido por la Norma E.060; sin embargo, los porcentajes intermedios (15%, 20%, 25%) no alcanzaron este umbral, con una reducción máxima del 23.9% para el 20% de reemplazo. Respecto a la resistencia a la flexión, el concreto patrón obtuvo 36.58 kg/cm^2 , superando la resistencia de diseño (33.04 kg/cm^2); no obstante, la mezcla con 30% de reemplazo de arcilla cocida mostró el comportamiento más destacado, alcanzando 37.78 kg/cm^2 . De manera general, se concluye que el reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida no logró incidir en un incremento de más del 10% en la resistencia del concreto $f'c=280\text{ kg/cm}^2$.

Palabras claves: agregado grueso, arcilla cocida, concreto, resistencia.

ABSTRACT

The growing demand for aggregates in Cajamarca's construction sector, coupled with concerns about natural resource depletion and the environmental impact of extraction, highlights the need to explore alternative materials. Nevertheless, the application of fired clay as a partial replacement for coarse aggregate in $f'c=280\text{kg/cm}^2$ concrete lacks conclusive research in the local context. Therefore, this research aimed to determine the incidence of partial replacement of hill coarse aggregate with fired clay on the strength of $f'c=280\text{kg/cm}^2$ concrete in Cajamarca, 2023. To achieve this, the physical properties of the aggregates were determined, mix designs were developed, hill coarse aggregate was partially replaced with fired clay at 10%, 15%, 20%, 25%, and 30% percentages, specimens were prepared, and finally, compression and flexural (modulus of rupture) strength tests were conducted. The results obtained at 28 days revealed that the compressive strength of the control concrete was 265.63kg/cm^2 (94.87% of the design $f'c$), while mixtures with 10% and 30% replacement achieved 247.29kg/cm^2 (88.32%) and 240.43kg/cm^2 (85.87%) respectively, both exceeding the 85% required by Norma E.060. However, intermediate percentages (15%, 20%, 25%) did not reach this threshold, with a maximum reduction of 23.9% for the 20% replacement. Regarding the flexural strength, the control concrete obtained 36.58 kg/cm^2 , exceeding the design strength (33.04 kg/cm^2); however, the mixture with 30% clay brick replacement showed the most outstanding performance, reaching 37.78 kg/cm^2 . Generally, it is concluded that the partial replacement of coarse hillside aggregate with clay brick did not manage to result in an increase of more than 10% in the concrete strength of $f'c=280\text{ kg/cm}^2$.

Keywords: coarse aggregate, fired clay, concrete, resistance.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema

El concreto es el material de construcción por excelencia a nivel global (Est. del Dr. Rendon, 2018). Su composición, una mezcla proporcionada de agregados (finos y gruesos) aglutinados por una pasta de cemento Portland y agua, le confiere propiedades mecánicas superiores en estado fresco y endurecido (ACI Committee 201, 2021). Esta cualidad, sumada a su mínima necesidad de mantenimiento, lo convierte en el pilar fundamental para el desarrollo de infraestructuras y proyectos de construcción en todo el mundo (Perú Construye, ED69).

En el Perú, el sector de la construcción ha evidenciado un crecimiento acelerado y constante, reflejado en la ejecución de proyectos de diversa envergadura. Un indicador de este dinamismo es el crecimiento del 14.32% alcanzado en febrero de 2021 (De La Vega, 2021). Este auge constructivo, si bien positivo, ha generado una creciente demanda de materiales, especialmente agregados, cuya principal fuente son los recursos naturales.

A pesar de que el abastecimiento actual de agregados no presenta problemas críticos, esta fuerte dependencia de los recursos naturales genera una preocupación inminente. La extracción continua de agregados incide directamente en el agotamiento de las reservas disponibles y conlleva impactos ambientales significativos, como la alteración de ecosistemas, la degradación paisajística de canteras, y el incremento de la huella de carbono por transporte.

Frente a este panorama, la ingeniería civil a nivel mundial ha volcado sus esfuerzos en la búsqueda y evaluación de alternativas más sostenibles para los componentes tradicionales del concreto. Numerosas investigaciones han demostrado la viabilidad de explorar el reemplazo parcial de ciertos agregados por materiales alternativos o subproductos. Estas líneas de investigación buscan un aprovechamiento más eficiente de otros recursos y la posibilidad de optimizar las propiedades del concreto sin comprometer su resistencia y durabilidad. Dentro de este campo, la arcilla cocida ha sido identificada como una opción con potencial para la sustitución parcial del agregado grueso convencional.

No obstante, y aquí radica el núcleo del problema de esta investigación, en la región de Cajamarca se presenta una marcada paradoja. Si bien existe una notoria presencia y disponibilidad de materiales derivados de la arcilla cocida, como subproductos de la fabricación de ladrillos (Diario El Comercio, 2020), y que teóricamente podrían servir como agregado alternativo, su aplicación específica como reemplazo parcial del agregado grueso en la elaboración de concreto de alta resistencia ($f'_c=280\text{kg/cm}^2$) no es una práctica extendida ni ha sido objeto de una investigación concluyente dentro del contexto local.

Esta ausencia de estudios empíricos y la falta de información verificada sobre la incidencia de la arcilla cocida de origen regional en las propiedades mecánicas de un concreto de resistencia específica ($f'_c=280\text{kg/cm}^2$), representa una significativa brecha de conocimiento. Dicha laguna impide determinar con certeza si la sustitución parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida puede mantener, optimizar, o incluso comprometer la resistencia del concreto.

1.2. Formulación del problema

¿En cuánto incide el reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida en la resistencia del concreto $f'_c= 280 \text{ kg/cm}^2$, Cajamarca, 2023?

1.3. Hipótesis

El reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida incide en un incremento de más del 10% en la resistencia del concreto $f'_c=280 \text{ kg/cm}^2$.

1.4. Justificación de la investigación

Esta investigación evaluó la incidencia del reemplazo parcial de agregado grueso de cerro por arcilla cocida dentro de la mezcla de concreto $f'_c=280\text{kg/cm}^2$ con el fin de verificar su incidencia en la resistencia diseñada.

Mediante este estudio, se buscó determinar no solo si la incidencia era beneficiosa, sino en qué magnitud. Se consideró una incidencia beneficiosa si

el reemplazo parcial con arcilla cocida lograba mantener o incrementar la resistencia a la compresión y/o a la flexión del concreto patrón ($f'c=280\text{kg/cm}^2$). En caso de una disminución, esta no debe comprometer la funcionalidad o el cumplimiento normativo, pudiendo ser compensada por ventajas como la sostenibilidad o el costo.

Estudios anteriores sugieren que la implementación de materiales alternativos puede ofrecer ahorro en costos, reducción del impacto ambiental por extracción de agregados, y un potencial mejor comportamiento general del concreto, sin comprometer su resistencia. Por lo tanto, los resultados obtenidos en esta investigación proporcionan al profesional de ingeniería civil en Cajamarca una base de datos y conocimiento empírico sólido sobre la viabilidad y el desempeño de la arcilla cocida como agregado. Esto le permitirá evaluar de manera informada la implementación del reemplazo parcial de agregado grueso por este material alternativo, contribuyendo a la promoción de prácticas constructivas más sostenibles en la región.

1.5. Alcances y delimitaciones de la investigación

Esta investigación, enmarcada en el campo de la Ingeniería Civil y, específicamente, en la Tecnología del Concreto, se desarrolló en la ciudad de Cajamarca. El estudio se centró en la incidencia del reemplazo parcial de agregado grueso de cerro por arcilla cocida en la resistencia de concreto simple con un diseño de $f'c=280\text{kg/cm}^2$.

Los agregados (tanto finos como gruesos de cerro) fueron extraídos de la cantera ESGA – El Gavilán, en las afueras de Cajamarca. La selección del agregado grueso de cerro se basó en la búsqueda de una compatibilidad de origen espacial con la arcilla cocida. Se consideró metodológicamente pertinente realizar el reemplazo entre materiales con características de procedencia similar en el ámbito terrestre.

La arcilla cocida utilizada se obtuvo mediante la trituración de ladrillos de construcción *King Kong* tipo IV provenientes de la Ladrillera CECAJ, ubicada en el Centro Poblado Shudal del distrito de Cajamarca. Se emplearon ladrillos como

fuente de arcilla cocida debido a su composición principal basada en este material y a su disponibilidad y uso común en la construcción local. Los agregados (tanto finos como gruesos de cerro) fueron extraídos de la cantera ESGA – El Gavilán, en las afueras de Cajamarca, y el cemento empleado fue Portland Tipo I.

Los porcentajes de reemplazo de agregado grueso por arcilla cocida que se analizaron fueron del 0% (como concreto patrón), así como porcentajes específicos entre el 10% y el 30%, definidos en incrementos del 5%. Este criterio de selección se basó en investigaciones previas que sugieren rangos de sustitución óptimos para materiales similares, además de consideraciones prácticas y limitaciones inherentes a la investigación que impidieron abarcar un mayor número de variaciones.

Los ensayos realizados para determinar la resistencia del concreto fueron de compresión y flexión por el módulo de rotura, siguiendo como guía las normativas NTP 339.034 para muestras cilíndricas de compresión y NTP 339.079 para muestras prismáticas de flexión. La investigación se limitó a comparar el comportamiento de las muestras con reemplazo de arcilla cocida frente a especímenes base sin reemplazo del agregado grueso. El desarrollo de este estudio abarcó un periodo de dos años, y la recolección y procesamiento de datos se realizó mediante información *in situ* y el uso de programas computacionales.

1.6. Limitaciones de la investigación

La presente investigación estuvo sujeta a ciertas limitaciones que deben considerarse al interpretar los resultados y delimitar el alcance de las conclusiones. En primer lugar, el estudio se centró en la evaluación de las propiedades mecánicas a corto plazo, específicamente a los 28 días. Por ello, no se realizaron ensayos de durabilidad a largo plazo, como la resistencia a la carbonatación o la permeabilidad, lo que impide determinar el comportamiento del concreto con arcilla cocida frente a fenómenos de deterioro en el tiempo.

Adicionalmente, no se contemplaron análisis de caracterización química y mineralógica del agregado de cerro utilizado. Esto limita la capacidad de determinar si la composición del material o la presencia de impurezas locales

influyeron en la resistencia del concreto patrón y, consecuentemente, en los resultados de las mezclas con reemplazo. Finalmente, la investigación se restringió a una evaluación macroscópica de las propiedades mecánicas. La ausencia de análisis microestructurales, como la microscopía electrónica de barrido (MEB), impide explicar los mecanismos subyacentes del comportamiento no lineal de la resistencia a la flexión que se observó con la incorporación de la arcilla cocida.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo general

Determinar la incidencia del reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida en la resistencia del concreto $f'c= 280 \text{ kg/cm}^2$, Cajamarca, 2023.

1.7.2. Objetivos específicos

- Determinar la resistencia a la compresión y a la flexión por el módulo de rotura de los especímenes de concreto convencional.
- Determinar la resistencia a la compresión y a la flexión por el módulo de rotura de los especímenes de concreto con reemplazo parcial del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% del agregado grueso de cerro por arcilla cocida.
- Comparar la resistencia a la compresión y a la flexión por el módulo de rotura de los especímenes de concreto convencional con los especímenes de concreto con reemplazo parcial del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% del agregado grueso de cerro por arcilla cocida.

1.8. Descripción de los contenidos de los capítulos

El presente estudio se organiza de la siguiente manera:

Capítulo I: Establece el marco general de la investigación, detallando el contexto y la problemática, la formulación de la pregunta principal y la hipótesis, la justificación del estudio, sus alcances y los objetivos trazados.

Capítulo II: Se dedica al marco teórico, presentando los antecedentes de investigación relevantes, las bases teóricas que sustentan el estudio y la definición de los términos básicos empleados.

Capítulo III: Expone la metodología empleada, describiendo los materiales utilizados y los procedimientos para el desarrollo del estudio.

Capítulo IV: Presenta el análisis y la discusión de los resultados obtenidos en laboratorio tras la realización de los ensayos.

Capítulo V: Contiene las conclusiones y recomendaciones derivadas de la investigación.

Referencias Bibliográficas: Contiene la lista detallada de todas las fuentes de consulta utilizadas en la investigación.

Anexos: Complementan la información, incluyendo los cálculos de las propiedades físicas de los materiales, los diseños de mezcla efectuados y fotografías que documentan el desarrollo de la investigación.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Cordero Estévez, G. D. y Camargo Sanabria, A. F. (2017), en su tesis de investigación titulada *Diseño de mezclas de concreto elaboradas con chamota de arcilla cocida como parte del agregado grueso* (Tesis de pregrado, Universidad Francisco de Paula Santander) presentada en Cúcuta, Colombia, se centraron en evaluar la viabilidad de incorporar arcilla cocida triturada, obtenida de materiales de desecho de la industria arcillera, como reemplazo parcial del agregado grueso en mezclas de concreto. Su estudio abarcó la evaluación de propiedades físicas básicas de la arcilla cocida triturada y la realización de mezclas experimentales con porcentajes de sustitución que variaron del 0% al 100% de agregado natural, en incrementos del 10%. Se analizó la resistencia a la compresión en cilindros de concreto con relaciones agua/cemento de 0.45, 0.55 y 0.65, a edades de curado de 3, 7, 14, 21 y 28 días.

Los resultados de su investigación indicaron que, aunque la resistencia a la compresión del concreto generalmente tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de arcilla cocida triturada, fue posible obtener una mezcla óptima de diseño con un comportamiento mecánico similar al concreto tradicional. Este hallazgo sugiere que, con una adecuada proporción de arcilla cocida triturada, se pueden producir concretos con resistencias aceptables para diversas aplicaciones en ingeniería, incluyendo concreto estructural, estructural simple o concreto arquitectónico.

Moreno, L.M., Ospina, E., & Rodríguez, A. L. (2019), en su investigación titulada *Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso* (Tesis de pregrado, Universidad Nueva Granada) presentada en Bogotá, Colombia, realizaron una revisión del estado del arte sobre la resistencia de concretos que utilizan bloque de arcilla cocida triturada como sustitución

total del agregado grueso. Su análisis exploró los efectos de este material en diversas propiedades del concreto, incluyendo la resistencia a la compresión, tanto en estado fresco como endurecido. Adicionalmente, presentaron un caso de estudio sobre el análisis de resistencia a la compresión de una columna en un establecimiento penitenciario.

La revisión y el caso de estudio concluyeron que los resultados publicados sobre el efecto neto del uso de este material como agregado grueso son aún insuficientes, destacando la necesidad de mayor investigación. Sin embargo, su análisis sí reafirmó que los concretos con agregados de bloque de arcilla triturado generalmente presentan menor resistencia a la compresión que las mezclas tradicionales. Cuantitativamente, se estimó una reducción promedio del 30% en la resistencia a la compresión al reemplazar el 100% del agregado grueso con bloque de arcilla triturado, en un rango de relaciones agua/cemento entre 0.46 y 0.74. Por ello, sugirieron que establecer límites claros de reemplazo es necesario para ciertas aplicaciones estructurales y recomendaron ampliar la investigación en mezclas con mayor cantidad de cemento y menores relaciones agua/cemento.

2.1.2. Antecedentes nacionales

López, H. A. (2022), en su investigación titulada *Influencia del ladrillo Lark triturado como agregado grueso para mejorar la resistencia a la compresión del concreto* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas), presentada en Chachapoyas, Perú, tuvo como propósito determinar la influencia del ladrillo Lark triturado como parte del agregado grueso en el diseño de mezcla del concreto para la resistencia a la compresión. En este estudio, se empleó una metodología de sustitución parcial del agregado grueso pétreo por ladrillo Lark triturado en porcentajes de 25%, 30% y 50% en volumen, siguiendo las directrices del método ACI 211.1-91. La trituración del ladrillo Lark se realizó tanto de forma manual como con una trituradora, obteniendo tamaños de partículas entre 3/4 y 1/2 pulgadas.

Los resultados obtenidos arrojaron que el reemplazo de parte del agregado grueso pétreo por ladrillo Lark triturado no es recomendable para mejorar la resistencia a la compresión del concreto, ya que resultó en una disminución. Cuantitativamente, con sustituciones de hasta un 30% en volumen, se observó una disminución aproximada del 10% respecto a la resistencia de diseño de 210kg/cm^2 . Cuando los reemplazos superaron el 30% en volumen, la resistencia a la compresión disminuyó considerablemente, cayendo por debajo del 10% requerido por el concreto estándar.

López (2022) concluyó que no es aconsejable usar este reemplazo con el fin de alcanzar o mejorar ligeramente la resistencia a la compresión requerida.

Mimbela Orderique, L. F. (2021), en su investigación titulada Caracterización mecánica del concreto con el uso de ladrillos triturados como reemplazo del agregado grueso (Tesis de pregrado, Universidad Señor de Sipán), presentada en Pimentel, Perú, planteó como objetivo principal evaluar cómo la inclusión de ladrillos triturados como reemplazo del agregado grueso natural afectaba las propiedades mecánicas del concreto. Para ello, llevó a cabo ensayos de resistencia a la compresión, tracción por flexión y módulo de elasticidad en mezclas de concreto con diferentes porcentajes de sustitución.

Los resultados de Mimbela Orderique (2021) demostraron que el concreto elaborado con ladrillos triturados como reemplazo del agregado grueso puede alcanzar resistencias a la compresión comparables e incluso superiores a las del concreto convencional. Este efecto fue particularmente notable con porcentajes de sustitución moderados (10% y 20%). Dicho comportamiento se atribuyó a una mejor interacción entre la pasta de cemento y la superficie rugosa y porosa del ladrillo triturado, lo que pudo haber generado una zona de transición interfacial más densa.

Rosas Moreto, H. A. (2018), en su investigación titulada *Uso de ladrillo de arcilla con exceso de cocción como agregado grueso en concretos hidráulicos* (Tesis de pregrado, Universidad de Piura), llevada a cabo en

Piura, Perú, tuvo como objetivo establecer la factibilidad del uso del ladrillo con exceso de cocción (ladrillo recocho) como agregado grueso en la elaboración de concretos hidráulicos. Después de caracterizar el ladrillo como agregado, se elaboraron cinco mezclas de concreto: una mezcla patrón sin ladrillo y cuatro mezclas con reemplazo del 20%, 30%, 40% y 50% de agregado por ladrillo triturado, sin modificar la granulometría de la grava natural. Todas las mezclas fueron diseñadas con una relación agua/cemento (a/c) de 0.52. Es importante destacar que el ladrillo triturado se usó en dos condiciones distintas de humedad: seco al aire y saturado con superficie seca, para observar el efecto de la humedad del ladrillo en las propiedades del concreto fresco (trabajabilidad, peso unitario y contenido de aire) y endurecido (resistencia a la compresión).

Los resultados de Rosas (2018) indican que la humedad del ladrillo triturado tiene una incidencia significativa en la trabajabilidad y la resistencia a la compresión del concreto. Con base en esto, se concluyó que el ladrillo recocho puede ser usado como agregado grueso, siempre y cuando el porcentaje de reemplazo no sea mayor al 30% y la condición de humedad sea saturado con superficie seca.

2.1.3. Antecedentes locales

López Mego, J. (2017), en su investigación titulada *Estudio experimental del curado interno de un concreto con adiciones de arcilla coccionada en reemplazo del agregado grueso* (Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Cajamarca), llevada a cabo en Cajamarca, Perú, tuvo como objetivo determinar la efectividad del curado interno al reemplazar parcialmente el agregado grueso por fragmentos de ladrillo saturado, evaluando la resistencia a la compresión y flexión a comparación del curado por inmersión y el curado usando aditivo. Para ello, planteó porcentajes de reemplazo de 5%, 10% y 20% del volumen de agregado grueso con fragmentos de ladrillo King Kong triturado y saturado, un material comúnmente usado en la construcción de viviendas en la ciudad de Cajamarca, para un diseño de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$. Asimismo, se estudió el

porcentaje de humedad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión.

Los resultados de López Mego (2017) concluyeron que el curado interno mediante el reemplazo del agregado grueso por fragmentos de ladrillo triturado y saturado es efectivo, mostrando que a mayor porcentaje de reemplazo, los resultados son mejores en referencia a la retención de humedad y al aumento de la resistencia a compresión y flexión del concreto. Específicamente, se obtuvieron valores de 5.21% de retención de humedad, 259.69 kg/cm² de resistencia a la compresión y 54.247kg/cm² de resistencia a la flexión a los 28 días de edad con esta metodología. Estos resultados fueron superiores a los del tratamiento utilizando aditivo (3.62% y 165.07 kg/cm² respectivamente en humedad y compresión), y aunque la retención de humedad y resistencia a compresión fueron ligeramente inferiores al curado por inmersión (7.18% y 276.01 kg/cm²), la resistencia a flexión fue superior (54.247 kg/cm² vs 45.780kg/cm²). Cabe mencionar que la propuesta empleó exclusivamente el curado interno, exponiendo los especímenes a la intemperie, una situación que se asemeja a lo que acontece al pie de obra.

Chavarría-Reyes et al. (2021), en su artículo *Arcilla cocida como agregado fino para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón estructural*, publicado en la revista *Aporte Santiaguino* de la Universidad Nacional de Cajamarca, investigaron la viabilidad de utilizar ladrillo reciclado triturado como sustituto del agregado fino en el diseño de hormigón (concreto) con un f'c de 21 MPa (equivalente a 210kg/cm²).

Los autores evaluaron porcentajes de sustitución del ladrillo reciclado triturado en 15%, 20%, 25% y 30%. Sus hallazgos principales indicaron que, aunque el reemplazo del agregado fino con ladrillo triturado podía afectar la trabajabilidad, las mezclas con hasta un 25% de sustitución lograron satisfacer los requisitos de resistencia a la compresión, e incluso las sustituciones mayores mostraron resistencias superiores al diseño estándar en algunos casos. Este estudio demuestra la factibilidad de

incorporar ladrillo reciclado triturado en mezclas de concreto en un contexto local, resaltando su potencial como material alternativo y sostenible.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Arcilla cocida

ELDeeb, I. S., Bakry, A., et al. (2024), señalan que la arcilla cocida es uno de los materiales de construcción más antiguos y duraderos, utilizado ampliamente para la elaboración de elementos estructurales y de revestimiento como ladrillos, baldosas y tejas. Estos productos se distinguen por ser cuerpos conformados a partir de pastas de arcillas (frecuentemente de color rojizo debido al óxido férrico) que, al ser sometidas a altas temperaturas durante la cocción, desarrollan una fase vítreo que les confiere sus características propiedades cerámicas, incluyendo resistencia mecánica y durabilidad.

ELDeeb, Bakry et al. (2024) destacan que, según su uso arquitectónico, las piezas de arcilla cocida se clasifican principalmente en aquellas destinadas a revestimientos y elementos estructurales, y las de tipo cara vista u obra limpia, que buscan un acabado estético particular.

2.2.2. Propiedades mecánicas del concreto

a) Concreto

El **concreto** u hormigón se define como una mezcla de agregados y una pasta, la cual se compone de cemento Portland y agua. Esta pasta aglutina los agregados, generalmente arena y grava, y mediante la reacción química del cemento con el agua, se endurece formando una masa similar a la roca (ACI Committee 201, 2021).

b) Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es la propiedad mecánica fundamental para el diseño y control de calidad del concreto, definiéndose como la

capacidad máxima de un espécimen para soportar una carga axial por unidad de área (ACI Committee 318, 2019; NTP 339.034, 2021). Esta propiedad se expresa comúnmente en unidades como kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), libras por pulgada cuadrada (psi) o megapascales (MPa) (NTP 339.034, 2021). Un megapascal equivale a la fuerza de un newton por milímetro cuadrado (N/mm^2) o aproximadamente $10.2 \text{ kgf}/\text{cm}^2$. Si bien la evaluación estándar es a 28 días, es posible realizar pruebas a otras edades, siempre considerando la correlación entre estas y la resistencia a los 28 días. (Mindess et al., 2017).

Para el cálculo de la resistencia simple a la compresión se utilizará la siguiente fórmula:

$$F = \frac{P}{A}$$

Donde:

- F: Fuerza por unidad de área que el material puede soportar antes de fallar bajo una carga compresiva, expresada en Kg/cm^2 .
- P: Carga máxima, fuerza aplicada al material durante el ensayo de compresión, medida en Kg.
- A: Área de la sección transversal. Es el área de la superficie del material que está siendo sometida a la carga, medida en cm^2 .

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión son esenciales para verificar que la mezcla de concreto suministrada cumpla con los requerimientos de la resistencia especificada (f'_c) para una estructura determinada (ACI Committee 318, 2019). Para lograr este cumplimiento y minimizar el riesgo de no alcanzar la resistencia exigida en obra, la mezcla de concreto se diseña para producir una resistencia promedio a la compresión (f'_{cr}) que es intrínsecamente superior a la resistencia especificada (f'_c) (Instituto Nacional de Calidad, 2019). La Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado del RNE (2020) establece los criterios de aceptación para la resistencia del concreto en obra:

- El promedio de tres ensayos consecutivos de resistencia debe ser igual o superior a la resistencia especificada (f'_c).
- Ningún ensayo individual de resistencia deberá arrojar un resultado inferior a f'_c en más de 3.45MPa (o 500psi).

En este contexto, es importante destacar que, en la práctica, la resistencia promedio obtenida en laboratorio o campo a menudo supera el umbral del 85% de la resistencia de diseño (Norma E.060 Concreto Armado del RNE, 2020). Este comportamiento es típico y generalmente indica un control de calidad aceptable, ya que las normas consideran variaciones esperadas, permitiendo que ensayos individuales no alcancen el 100% de la resistencia nominal, siempre que no caigan por debajo del 75% de la resistencia especificada y que el promedio cumpla con lo exigido (Norma E.060 Concreto Armado del RNE, 2020). Esto minimiza el riesgo de que una prueba individual por debajo de f'_c se considere un incumplimiento, siempre que el promedio de las pruebas de resistencia del trabajo cumpla con la resistencia promedio exigida (f'_{cr}) (Instituto Nacional de Calidad, 2019).

La elaboración y el curado de las probetas cilíndricas para los ensayos de aceptación y control de calidad se realizan siguiendo procedimientos estandarizados, como los descritos en la NTP 339.033 "Hormigón (Concreto). Práctica normalizada para la elaboración y curado de probetas en obra" (2014) y la NTP 339.034 "Hormigón (Concreto). Método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas" (2015), que a su vez se basan en normas internacionales como la ASTM C31 y ASTM C39 (Instituto Nacional de Calidad, 2019).

c) Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión del concreto se considera una medida indirecta de su resistencia a la tracción y representa la capacidad de una viga o losa de concreto sin refuerzo para resistir la falla por

momento. En Perú, esta propiedad se evalúa de acuerdo con la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.079 (2023) "Hormigón (Concreto). Método de ensayo normalizado para determinar la resistencia a la flexión del concreto usando una viga simple con carga en los tercios".

La determinación de la resistencia a la flexión se lleva a cabo mediante la aplicación de cargas a probetas en forma de vigas, típicamente de 150×150mm (6×6pulgadas) de sección transversal, con una luz de ensayo que debe ser al menos tres veces su espesor (NTP 339.079, 2023). La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (MR) en megapascales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (psi). Este valor se determina mediante métodos de ensayo que aplican la carga en los puntos tercios (ASTM C78 / NTP 339.079) o en el punto medio (ASTM C293). Es relevante notar que el Módulo de Rotura determinado con carga en los tercios suele ser ligeramente inferior (en ocasiones hasta un 15% menos) que el obtenido con carga en el punto medio (Mindess et al., 2017).

Para el cálculo de la resistencia a la flexión por el módulo de rotura, cuando la falla ocurre dentro de tercio medio de la luz, es decir entre los puntos de carga, se utilizará la siguiente fórmula:

$$M_r = \frac{PL}{bh^2}$$

Donde:

- Mr: Módulo de rotura (resistencia a la flexión), expresado comúnmente en kg/cm² o MPa.
- P: Carga máxima aplicada en la línea de fractura, en kg o N.
- L: Longitud de la luz entre apoyos, en cm o mm.
- b: Ancho promedio del espécimen en la sección de falla, en cm o mm. - h: Peralte (altura) promedio del espécimen en la sección de falla, en cm o mm.

La resistencia a la flexión (módulo de rotura) del concreto es una propiedad intrínseca que se correlaciona con la resistencia a la compresión, aunque con una mayor variabilidad inherente en los resultados de ensayo debido a la naturaleza frágil del concreto a tensión y a la sensibilidad del procedimiento de prueba (Kosmatka et al., 2021). Según el American Concrete Institute (ACI 318-19), el módulo de rotura (M_r) para concreto de peso normal puede estimarse empíricamente mediante la expresión:

$$M_r = 0.62\sqrt{f'_c} \text{ (en MPa)}$$

Este valor estimado, para un f'_c de 280 kg/cm² (≈ 27.46 MPa), sería de aproximadamente 3.24 MPa o ≈ 33.04 kg/cm². Típicamente, el módulo de rotura del concreto se encuentra en un rango que oscila entre el 8% y el 15% de su resistencia a la compresión, dependiendo de diversos factores como el tipo de agregado y las condiciones de curado (Mehta & Monteiro, 2020). No obstante, para obtener la correlación más precisa en el contexto de materiales y diseños de mezcla específicos, es fundamental realizar ensayos de laboratorio directos sobre los materiales en cuestión (Mindess et al., 2017).

A pesar de su utilidad para propósitos de diseño en elementos como pavimentos y losas, la resistencia a la compresión sigue siendo el método preferido y más estandarizado para el control de calidad y la aceptación del concreto en la industria de la construcción (NTP 339.034, 2015). Sin embargo, durante las fases de diseño y pruebas de mezcla, es recomendable llevar a cabo tanto los ensayos de flexión como de compresión para establecer una correlación fiable que pueda ser utilizada posteriormente en el control de campo (ACI Committee 318, 2019).

2.2.3. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado fino

Las propiedades físicas mecánicas del agregado fino se determinaron según el siguiente procedimiento:

a. Granulometría

La granulometría es el proceso de determinar la distribución de tamaños de partículas que componen un agregado, lo cual es fundamental para su caracterización y para el diseño de mezclas de concreto. Este análisis se realiza comúnmente mediante tamizado para partículas de mayor tamaño, mientras que, para las partículas más finas, se pueden emplear métodos basados en la sedimentación (NTP 339.040, 2014).

El procedimiento general para determinar la granulometría de un agregado mediante tamizado se realizó según la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.040 (2014), "Agregados. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos". Los pasos ejecutados fueron los siguientes:

- Se cuarteó el material hasta obtener la cantidad de muestra requerida para el ensayo.
- Posteriormente, la muestra se secó en un horno a una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. Aunque la norma establece una cantidad mínima de 300g para el agregado fino, para esta investigación se tomó 1000g por cada muestra.
- Se seleccionaron y colocaron los tamices en orden de abertura decreciente, desde la tapa hasta el fondo. Luego, la muestra seca se colocó sobre el tamiz superior. Acto seguido, los tamices se agitaron de manera manual o con un aparato mecánico por un periodo de tiempo adecuado y suficiente para asegurar el paso de las partículas.
- Finalmente, se separó y pesó la cantidad de muestra retenida en cada tamiz y en la bandeja del fondo.

A partir de los pesos retenidos, se calcularon los porcentajes retenidos y acumulados, así como el porcentaje que pasa por cada tamiz. Estos cálculos se realizan utilizando las siguientes fórmulas (NTP 339.040, 2014):

- Porcentaje Retenido:

$$\% \text{ Retenido} = \left(\frac{\text{Masa retenida en el tamiz}}{\text{Masa total}} \right) * 100$$

- Porcentaje Retenido Acumulado: Se obtiene sumando el porcentaje retenido en un tamiz dado al porcentaje retenido acumulado en el tamiz inmediatamente superior.
- Porcentaje que Pasa:

$$\% \text{ Pasa} = 100\% - \% \text{ retenido acumulado}$$

b. Módulo de Fineza

El Módulo de Fineza (MF) es un índice granulométrico que se utiliza para cuantificar la finura de un agregado, siendo un parámetro importante para el diseño de mezclas de concreto. Este valor se calcula sumando los porcentajes acumulados retenidos en una serie específica de tamices y dividiendo el resultado entre 100.

Según la Norma Técnica Peruana (NTP) 339.040 (2014), el Módulo de Fineza se determina mediante la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\sum (\% \text{Acumulados retenidos en tamices específicos})}{100}$$

Donde los "tamices específicos" corresponden a las siguientes aberturas: 1 ½", ¾", ⅜", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50 y N°100.

La determinación del peso unitario del agregado fino, tanto en estado suelto como compactado, se basó en la NTP 400.017 (2014) "Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar el peso unitario (masa unitaria) y los vacíos en los agregados". Esta norma fue aplicable para agregados con un tamaño máximo nominal de hasta 150 mm.

c. Peso unitario suelto

El procedimiento para determinar el peso unitario suelto del agregado, de acuerdo con la NTP 400.017 (2014), se realizó de la siguiente manera:

- Se obtuvo una cantidad representativa de la muestra de agregado mediante cuarteo, suficiente para llenar el recipiente de medida.
- El recipiente de medida se llenó cuidadosamente con la muestra de agregado utilizando un cucharón o una pala, manteniendo una altura de caída no mayor a 50 mm por encima del borde superior del recipiente. El exceso de material se enrasó cuidadosamente con una regla para asegurar que la superficie del agregado estuviera nivelada con el borde del recipiente.
- Después, se pesó el recipiente de medida con su contenido, registrando la masa con una aproximación de 0.05kg (0.1lb).
- El peso unitario suelto se calculó utilizando la siguiente fórmula:

$$PuS = \frac{(Ps - Pr)}{Vr}$$

Donde:

- PuS: Peso Unitario suelto (g/cm³)
- Ps: Peso del recipiente con la muestra en estado suelto (g)
- Pr: Peso del recipiente vacío (g)
- Vr: Volumen del recipiente de medida (cm³)

d. Peso unitario compactado:

Para determinar el peso unitario compactado, la NTP 400.017 (2014) estableció el siguiente procedimiento:

- Similar al método suelto, se obtuvo una muestra representativa y suficiente para el ensayo.
- El recipiente de medida se llenó con el agregado en tres capas aproximadamente iguales. Cada capa se compactó mediante 25

golpes uniformemente distribuidos con una barra compactadora.

Se procuró que la barra no penetrara la capa anterior.

- Una vez llena la última capa y compactada, el exceso de material se enrasó cuidadosamente con la propia barra compactadora, asegurando que la superficie del agregado estuviera nivelada con el borde del recipiente.
- Se pesó el recipiente de medida más su contenido compactado, registrando la masa con una aproximación de 0.05kg (0.1lb).
- El peso unitario compactado se determinó mediante la siguiente fórmula:

$$PuC = \frac{(Pc - Pr)}{Vr}$$

Donde:

- PuC: Peso unitario compactado (g/cm³)
- Pc: Peso del recipiente más muestra en estado compacto (g)
- Pr: Peso del recipiente vacío (g)
- Vr: Volumen del recipiente de medida (cm³)

e. Peso específico y absorción

Este ensayo se realizó conforme a la NTP 400.022 (2021) "Agregados. Determinación de la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado fino", con el objetivo de determinar el peso específico de masa, el peso específico de masa saturado superficialmente seco (SSS), el peso específico aparente y la absorción del agregado fino.

El procedimiento ejecutado fue el siguiente:

- Se cuarteó el material hasta obtener la cantidad de muestra de agregado fino requerida para el ensayo.
- La muestra se secó en una estufa a una temperatura constante de 110°C±5°C. Una vez enfriada, se cubrió con agua (por inmersión o adición) y se dejó reposar por 24h±4h para su saturación.

- Se eliminó el exceso de agua con cuidado para evitar la pérdida de finos, extendiendo la muestra sobre una superficie plana no absorbente expuesta a una corriente suave de aire caliente. Se movió la muestra con frecuencia hasta lograr el estado saturado superficialmente seco.
- Para determinar que se había alcanzado el estado SSS, se realizó la prueba de humedad superficial. Se colocó el molde cónico con el diámetro mayor hacia abajo y se llenó con una porción del agregado fino parcialmente seco. Luego, con el apoyo de una barra compactadora, se apisonó ligeramente con 25 golpes, permitiendo que la barra cayera libremente desde una altura de 5 mm por encima de la superficie de la muestra. Finalmente, se levantó el molde verticalmente. Si la muestra moldeada presentaba una ligera caída, se confirmaba que se había alcanzado el estado de superficie seca.
- Se llenó parcialmente el picnómetro con agua y se introdujeron $500g \pm 10g$ de agregado fino en estado SSS. Se añadió agua adicional hasta aproximadamente el 90% de la capacidad del picnómetro y se agitó manualmente hasta eliminar las burbujas de aire visibles.
- Se determinó el peso total del picnómetro, la muestra y el agua.
- Posteriormente, se retiró el agregado fino del picnómetro, se secó en el horno a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, se dejó enfriar a temperatura ambiente y se determinó su peso.

Los cálculos se realizaron utilizando las siguientes fórmulas, según la NTP 400.022 (2021):

- Peso específico de masa del agregado fino:

$$PeM = \frac{A}{B+S-C}$$

- Peso específico SSS del agregado fino:

$$PeSS = \frac{S}{B+S-C}$$

- Peso específico aparente del agregado fino:

$$PeA = \frac{A}{B+A-C}$$

- Porcentaje de absorción del agregado fino:

$$\%Abs = 100 * \frac{S-A}{A}$$

Donde:

- A: peso de la muestra seca al horno (g).
- B: peso del picnómetro lleno de agua (g).
- C: peso del picnómetro lleno de la muestra y agua (g).
- S: peso de la muestra en estado saturado superficialmente seco (g).

f. Contenido de humedad

Este ensayo se llevó a cabo según la NTP 339.185 (2021) "AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo", para determinar el porcentaje total de humedad evaporable de una muestra de agregado fino.

El procedimiento realizado fue el siguiente:

- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad requerida de agregado fino para el ensayo (mínimo de 0.5kg).
- Se determinó el peso inicial de la muestra obtenida.
- La muestra se secó completamente en un recipiente utilizando una fuente de calor a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr un peso constante.
- Una vez que la muestra seca pudo ser manipulada, se determinó su peso con una precisión de 0.1%.

El porcentaje de contenido de humedad se calculó utilizando la siguiente fórmula, de acuerdo con la NTP 339.185 (2021):

$$\%W=100*\frac{(P_i - P_f)}{P_f}$$

Donde:

- %W: Porcentaje del contenido de humedad.
- Pi: Peso inicial de la muestra (g).
- Pf: Peso de la muestra luego del secado (g).

g. Partículas que pasan el tamiz N° 200 por lavado

Este ensayo se realizó según la NTP 400.018 (2013) "Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar el material que pasa por el tamiz N° 0.075 mm (N° 200) por lavado de los agregados", para determinar el porcentaje de material fino que pasa por el tamiz N° 200 por lavado.

La norma indicó el siguiente procedimiento, el cual fue ejecutado:

- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad de agregado fino requerida para el ensayo (mínimo de 0.5kg). Se determinó el peso inicial de la muestra obtenida.
- La muestra se secó completamente en un recipiente utilizando una fuente de calor a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr un peso constante.
- Se colocó la muestra seca en un recipiente y se agregó suficiente agua para cubrirla. Se agitó vigorosamente para desprender las partículas finas. El agua turbia se vertió inmediatamente a través de un tamiz N° 200, asegurándose de no perder material grueso.
- El lavado con agua limpia se repitió hasta que el agua que pasaba por el tamiz estuviera más clara.
- El material retenido en el tamiz N° 200 se secó en un horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr un peso constante.
- Una vez enfriado, se pesó el material retenido en el tamiz N° 200 con una precisión de 0.1g.

La fórmula utilizada para el cálculo fue la siguiente, según la NTP 400.018 (2013):

$$\% \text{ Pasa N}^{\circ} 200 = 100 * \frac{(P_i - P_f)}{P_i}$$

Donde:

- P_i : Peso de la muestra original (g)
- P_f : Peso seco del material retenido en el tamiz N° 200 después del lavado (g)

2.2.4. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado grueso

a. Granulometría

El análisis granulométrico del agregado grueso se llevó a cabo para determinar la distribución de tamaños de sus partículas mediante el tamizado de las muestras, conforme a la NTP 339.040 (2014) "Agregados. Análisis granulométrico de agregados finos y gruesos".

El procedimiento general ejecutado incluyó los siguientes pasos:

- Se cuarteó el material hasta obtener la cantidad de muestra requerida para el ensayo. Posteriormente, la muestra se secó en un horno a una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta alcanzar una masa constante. La cantidad mínima de muestra seca requerida para el agregado grueso se determinó según el tamaño máximo nominal del agregado, tal como lo especifica la NTP 339.040 (2014) en su Tabla 1, que se presenta a continuación:

Tabla 1:

Cantidad de muestra mínima para ensayo de granulometría del agregado grueso

Tamaño Máximo Nominal Aberturas Cuadradas mm (in)	Cantidad de la Muestra de Ensayo Mínimo kg (lb)
9.5 (3/8)	1 (2)
12.5 (1/2)	2 (4)
19.0 (3/4)	5 (11)
25.0 (1)	10 (22)
37.5 (1 ½)	12 (33)

Fuente: NTP 339.040 (2014)

- Se seleccionaron y colocaron los tamices en orden de abertura decreciente, desde la tapa hasta el fondo. Luego, la cantidad de muestra seca se colocó sobre el tamiz superior.
- Acto seguido, los tamices se agitaron de manera manual o mediante un aparato mecánico por un período de tiempo adecuado y suficiente para asegurar el paso de las partículas.
- Finalmente, se separó y se pesó la cantidad de muestra retenida en cada tamiz y en la bandeja del fondo.

Los cálculos para el Porcentaje Retenido, el Porcentaje Retenido Acumulado, el Porcentaje que Pasa, y el Módulo de Fineza (MF) se realizaron utilizando las mismas fórmulas que se detallaron previamente en la Sección 3.9.1, correspondiente al análisis granulométrico del agregado fino (NTP 339.040, 2014).

Adicionalmente, la NTP 339.040 (2014) definió el Tamaño Máximo como el menor tamiz por el que pasaba toda la muestra de agregado, y el Tamaño Nominal Máximo como el menor tamiz en el cual se producía la primera retención significativa.

La determinación del peso unitario del agregado grueso, tanto en estado suelto como compactado, se basó en la NTP 400.017 (2014) "Agregados. Método de ensayo normalizado para determinar el peso unitario (masa unitaria) y los vacíos en los agregados". Esta norma fue aplicable para agregados con un tamaño máximo nominal de hasta 150 mm.

b. Peso unitario suelto:

El procedimiento para determinar el peso unitario suelto del agregado grueso, según la NTP 400.017 (2014), se ejecutó de la siguiente manera:

- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad requerida de agregado grueso para el ensayo.
- El recipiente de medida se llenó con un cucharón o una pala desde una altura que no excedía los 50 mm por encima de su parte superior. El material sobrante se eliminó cuidadosamente con una regla para enrasar la superficie.
- Se pesó el recipiente de medida más su contenido, con una aproximación de 0.05kg (0.1lb).
- El peso unitario suelto se calculó mediante la misma fórmula presentada en la Sección 3.5.2.1 para el agregado fino (NTP 400.017, 2014).

c. Peso unitario compactado:

Para el peso unitario compactado, el procedimiento, de acuerdo con la NTP 400.017 (2014), fue el siguiente:

- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad requerida de agregado grueso para el ensayo.
- El recipiente de medida se llenó hasta aproximadamente 1/3 de su capacidad. La superficie se niveló y se apisonó con 25 golpes uniformemente distribuidos mediante una barra compactadora, procurando que la barra no atravesara completamente la capa y golpeara el fondo del recipiente. Este procedimiento se repitió

para las dos capas restantes, asegurándose de aplicar suficiente fuerza sin penetrar la capa ya compactada.

- El material sobrante se enrasó con la misma barra compactadora.
- Se pesó el recipiente de medida más su contenido, con una aproximación de 0.05kg (0.1lb).
- El peso unitario compactado se calculó usando la misma fórmula presentada en la Sección 3.5.2.2 para el agregado fino (NTP 400.017, 2014).

d. Peso específico y absorción

Este ensayo se realizó para determinar el peso específico de masa, el peso específico de masa saturado superficialmente seco (SSS), el peso específico aparente y la absorción del agregado grueso, según la NTP 400.021 (2021) "Agregados. Densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso. Método de ensayo".

- El procedimiento ejecutado fue el siguiente:
- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad de agregado grueso requerida para el ensayo. La cantidad mínima de muestra necesaria se basó en el tamaño máximo nominal del agregado, tal como se detalla en la Tabla 02, conforme a la NTP 400.021 (2021):

Tabla 2:

Cantidad de muestra mínima para ensayo de peso específico y absorción del agregado grueso

Tamaño máximo nominal mm (pulg)	Masa mínima de muestra de ensayo kg (lb)
12,5 (½) o menor	2 (4.4)
19,0 (¾)	3 (6.6)
25,0 (1)	4 (8.8)
37,5 (1 ½)	5 (11)
50,0 (2)	8 (18)
63,0 (2 ½)	12 (26)
75,0 (3)	18 (40)
90,0 (3 ½)	25 (55)
100 (4)	40 (88)
125 (5)	75 (165)

Fuente: NTP 400.021 (2021)

- La muestra obtenida se secó a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, se ventiló y se dejó enfriar hasta que fue manipulable. Luego, se sumergió en agua a temperatura ambiente por $24\text{h} \pm 4\text{h}$.
- Se retiró la muestra saturada del agua y se hizo rodar sobre un paño absorbente hasta que el agua visible en la superficie del agregado desapareció. Se tuvo especial cuidado para evitar la pérdida de humedad por evaporación. Posteriormente, se determinó el peso de la muestra bajo la condición de saturación con superficie seca (S).
- La muestra en estado SSS se colocó en una cesta de alambre y se determinó su peso sumergido en agua a temperatura ambiente (C).
- Finalmente, la muestra se secó a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta obtener peso constante. Se dejó enfriar y se determinó su peso (A).

Los cálculos para el Peso Específico de Masa, el Peso Específico Saturado Superficialmente Seco (SSS), el Peso Específico Aparente, y el Porcentaje de Absorción se realizaron utilizando las mismas fórmulas que se detallaron en la Sección 3.9.1 para el agregado fino (NTP 400.022, 2021).

e. Contenido de humedad

Este ensayo se realizó según la NTP 339.185 (2021) "AGREGADOS. Determinación del contenido de humedad total evaporable de agregados por secado. Método de ensayo.", para determinar el porcentaje total de humedad evaporable de una muestra de agregado grueso.

El procedimiento ejecutado fue el siguiente:

- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad de agregado grueso requerida para el ensayo. La cantidad mínima de muestra se determinó según el tamaño máximo nominal, conforme a la NTP 339.185 (2021), tal como se muestra en la Tabla 03:

Tabla 3:

Cantidad de muestra mínima para ensayo de contenido de humedad del agregado grueso

Tamaño máximo nominal de agregado mm (pulg)	Masa mínima de la muestra de agregado de peso normal en kg
4,75 (0.187) (N°4)	0,5
9,5 (3/8)	1,5
12,5 (1/2)	2
19,0 (3/4)	3
25,0 (1)	4
37,5 (1 1/2)	6
50 (2)	8

Fuente: NTP 339.185 (2021)

- La muestra se secó completamente en un recipiente utilizando una fuente de calor a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ hasta lograr un peso constante.
- Una vez que la muestra seca pudo ser manipulada, se determinó su peso con una precisión de 0.1%.

El porcentaje de contenido de humedad se calculó utilizando la misma fórmula que se detalló en la Sección 3.9.1. para el agregado fino (NTP 339.185, 2021).

f. Resistencia a la Abrasión

Este ensayo se realizó según la NTP 400.019 (2020) "Agregados. Determinación de la resistencia al desgaste en agregados gruesos de tamaños menores por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles para determinar la resistencia a la abrasión del agregado grueso.

El procedimiento ejecutado fue el siguiente:

- Se cuarteó la muestra hasta obtener la cantidad requerida de agregado grueso para el ensayo.
- La muestra y las cargas abrasivas se introdujeron en la máquina de Los Ángeles. La máquina se rotó a una velocidad entre 30rpm a 33rpm (revoluciones por minuto), completando un total de 500 revoluciones.
- Una vez finalizada la rotación, se tamizó la muestra a través de la malla normalizada N°12 y se separaron las partículas retenidas. El material obtenido se lavó y se secó a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.
- Los cálculos se realizaron con la siguiente fórmula, conforme a la NTP 400.019 (2020):

$$\%A = 100 * \frac{(P_i - Pf)}{P_i}$$

Donde:

- %A: Porcentaje de desgaste

- P_i : Peso inicial de la muestra (g)
- P_f : Peso seco de la muestra retenida en la malla N°12 después del ensayo (g)

2.2.5. Diseño de mezclas patrón $f'c=280 \text{ Kg/cm}^2$

El diseño de la mezcla patrón de concreto se realizó con el objetivo de alcanzar una resistencia a la compresión de $f'_c=280\text{kg/cm}^2$ a los 28 días. Se siguió una metodología estandarizada para la dosificación de los componentes.

a) Especificaciones

Las especificaciones para el diseño de la mezcla patrón fueron las siguientes:

- La resistencia a la compresión objetivo fue de 280kg/cm^2 a los 28 días.
- Las condiciones de colocación exigieron el empleo de mezclas de consistencia plástica.

La consistencia del concreto fresco se define como la facilidad con la que este se deformaba y se adaptaba a un molde, siendo crucial para su correcta colocación y compactación (NTP 339.035, 2015). Esta propiedad está influenciada principalmente por el contenido de agua de amasado, el tamaño máximo y la granulometría de los agregados, así como por la forma de estos. Los rangos de asentamiento para diversas consistencias se basaron en los principios del ensayo de asentamiento, conforme a la NTP 339.035 (2015) "Concreto. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de Cemento Portland", tal como se presenta en la Tabla 4.

Tabla 4:
Consistencia y asentamiento del concreto fresco

Consistencia	Asiento (cm)
Seca	0-2.5
Plástica	2.5-7.5
Fluida	7.5-12.5
Muy fluida	12.5-20

Fuente: NTP 339.035 (2015)

b) Materiales

Los materiales utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto fueron:

- Cemento: Se utilizó Cemento Tipo I, clasificado bajo la NTP 334.009 (2020) "Cemento. Cemento Portland. Requisitos". Este tipo de cemento fue seleccionado para usos generales donde no se requería propiedades especiales. Se consideró un peso específico de 3.110g/cm³.
- Agua: El agua empleada fue potable, proveniente de la red pública de Cajamarca, cumpliendo con los requisitos de la NTP 339.088 (2021) "Hormigón (Concreto). Agua de mezcla para concreto de cemento Portland. Requisitos".
- Agregados: Las características de los agregados fino y grueso se obtuvieron a partir de los resultados de los ensayos de caracterización desarrollados en las Secciones 3.9.1. y 3.9.2., respectivamente.

c) Procedimiento

El procedimiento para el diseño de la mezcla patrón se basó en el método del American Concrete Institute 211.1 (2022), que establece una metodología para la dosificación de mezclas de concreto.

i. Determinación de la resistencia promedio (f'_{cr})

Según la Norma E.060 Concreto Armado (2020), cuando no se tienen registros de resistencia de probetas correspondientes a

obras y proyectos anteriores, la resistencia promedio del concreto se determina tal como se muestra en la Tala 5.

Tabla 5:

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'c < 21$	$f'cr = f'c + 7,0$
$21 \leq f'c \leq 35$	$f'cr = f'c + 8,5$
$f'c > 35$	$f'cr = 1,1 f'c + 5,0$

Fuente: Norma E.060 Concreto Armado.

ii. Selección del Tamaño Máximo Nominal

Para la selección del Tamaño Máximo Nominal (TMN) del agregado grueso, es fundamental adherirse a las especificaciones de la normativa vigente para asegurar la trabajabilidad, la compactación adecuada del concreto y la correcta distribución de los esfuerzos. En este sentido, la Norma E.060 Concreto Armado del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2009), establece que el TMN del agregado grueso no debe exceder ninguna de las siguientes condiciones:

- 1/5 de la menor dimensión entre las caras interiores de encofrados.
- 3/4 del espaciamiento libre mínimo entre barras o alambres individuales de refuerzo, paquetes de barras o tendones.
- 1/3 del peralte de las losas.

iii. Selección del Asentamiento

Cuando el asentamiento del concreto no se encuentra especificado en los planos o documentos del proyecto, es crucial adherirse a los rangos recomendados por la normativa técnica vigente para asegurar la trabajabilidad y propiedades deseadas

del concreto. Al respecto, la Norma E.060 Concreto Armado del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2009), proporciona los valores de asentamiento apropiados, que pueden variar según el tipo de elemento estructural y el método de colocación, tal como se ilustra en la Tabla 6.

Tabla 6:

Asentamientos recomendados para diversos tipos de estructuras

TIPO DE ESTRUCTURA	Slump máximo	Slump mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	3"	1"
Cimentaciones simples y calzaduras	3"	1"
Vigas y muros armados	4"	1"
Columnas	4"	2"
Muros y pavimentos	3"	1"
Concreto ciclópeo	2"	1"

Fuente: Norma E.060 RNE (2009)

iv. Volumen Unitario de Agua

La cantidad de agua requerida por volumen unitario de concreto para producir un asentamiento determinado es una propiedad fundamental de la mezcla, influenciada por características esenciales de los materiales. Según el American Concrete Institute 211.1 (2022), esta demanda de agua depende directamente del tamaño máximo del agregado, la forma de las partículas, la gradación de los agregados y la cantidad de aire incluido, tal como se muestra en la Tabla 07.

Tabla 7:
Volumen de agua por m³

Asentamiento	Agua en l/m ³ , para TNM agregados y consistencias indicadas							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/1"	2"	3"	6"
Concreto sin aire incorporado								
1" a 2"	207	199	190	179	166	154	130	113
3" a 4"	228	216	205	193	181	169	145	124
6" a 7"	243	228	216	202	190	178	160	--
Concreto con aire incorporado								
1" a 2"	181	175	168	160	150	142	122	107
3" a 4"	202	193	184	175	165	157	133	119
6" a 7"	216	205	187	184	174	166	154	--

Fuente: ACI 211.1 (2022)

v. Contenido de aire

El porcentaje de contenido de aire en una mezcla de concreto es un parámetro crucial para su desempeño, afectando tanto la trabajabilidad como la durabilidad, especialmente en condiciones de exposición severa. Conforme a las directrices del American Concrete Institute 211.1 (2022), esta práctica estándar adjunta tablas que proporcionan de manera aproximada el contenido de aire recomendado en función del tamaño máximo nominal del agregado grueso, tal como se muestra en la Tabla 08.

Tabla 8:
Contenido de aire atrapado

TNM del agregado grueso	Aire atrapado (%)
1/2"	2.5
3/4"	2.0
1"	1.5
1 1/2"	1.0
2"	0.5

Fuente: ACI 211.1 (2022)

vi. Relación agua/cemento

Para las condiciones de diseño, se consideró la relación agua/cemento (a/c) en función de la resistencia requerida. La Norma E.060 Concreto Armado del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) (2009) estableció límites máximos específicos para la relación a/c y requisitos mínimos de resistencia. Los valores utilizados se obtuvieron de la Tabla 09.

Tabla 9:

Relación agua/cemento por resistencia

f'c Kg/cm²	Relación a/c en peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
250	0.62	0.53
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	
450	0.38	

Fuente: Norma E.060 RNE (2009)

vii. Factor cemento

El factor cemento se obtuvo dividiendo la cantidad de agua por metro cúbico de concreto entre la relación agua/cemento seleccionada. Este cálculo se realizó con la siguiente fórmula:

$$\text{Factor cemento} = \frac{\text{Volumen unitario de agua}}{\text{Relación agua/cemento}}$$

viii. Cálculo de volúmenes absolutos

Para determinar el volumen absoluto de los materiales por metro cúbico de concreto, se empleó la siguiente fórmula de Volumen Absoluto:

$$Volumen\ Absoluto = \frac{Peso\ seco}{Peso\ Específico\ x\ 1000}$$

ix. Contenido de agregados

Se determinó el peso de los agregados en su estado seco. Los resultados se expresaron en unidades de kg/m³.

x. Valores de diseño de mezcla

Se resumieron las cantidades de materiales a ser empleados como valores de diseño.

xi. Corrección por humedad del agregado

Se realizó una corrección por humedad de los agregados. Era necesario considerar la humedad presente en los agregados al momento de pesarlos, ya que estos comúnmente se encontraban húmedos. El peso medido incluía tanto el agua superficial como la absorbida. Por lo tanto, para obtener el peso seco real del agregado, se restó el peso de esta humedad. Además, la cantidad de agua a utilizarse en la mezcla de prueba se ajustó, incrementándose o reduciéndose en una cantidad equivalente a la humedad libre que contenía el agregado. Este ajuste fue fundamental para calcular el agua efectiva en la mezcla y asegurar que se alcanzara la trabajabilidad y la resistencia objetivo, de acuerdo con el ACI 211.1 (2022).

El cálculo del agua efectiva se obtiene restando el aporte de humedad de los agregados al agua de diseño.

xii. Proporción en peso

Se determinó la proporción en peso de los materiales.

xiii. Proporción en Volumen

Se determinó la proporción en volumen de los materiales.

xiv. Cantidad de material para dos probetas cilíndricas

Se determinó la cantidad de materiales necesarios para la elaboración de dos probetas cilíndricas de concreto, tomando como referencia las siguientes dimensiones y volumen:

- Altura: $h = 0.30\text{m}$
- Diámetro: $D = 0.15\text{m}^3$
- Volumen = $0.0053 \text{ m}^3 \times 2 \text{ cilindros} = 0.013 \text{ m}^3$

2.3. Definiciones básicas

- **Arcilla:** Material natural de origen mineral compuesto por silicatos de aluminio hidratados, con partículas muy finas (inferiores a $2 \mu\text{m}$). Se caracteriza por su plasticidad al mezclarse con agua y por endurecerse al cocerse, siendo la materia prima de productos cerámicos (Grimán et al., 2015; Velásquez, 2019).
- **Arcilla cocida:** Material cerámico inorgánico obtenido al cocer arcillas naturales a altas temperaturas. Este proceso térmico le confiere dureza, resistencia mecánica y durabilidad superiores a las de la arcilla natural, lo que lo hace clave en la fabricación de ladrillos y tejas (ELDeeb, Bakry et al., 2024).
- **Agregados de cerro:** Materiales pétreos (arena, grava) extraídos de formaciones geológicas naturales como cerros o canteras. Sus propiedades deben cumplir con las especificaciones técnicas para su uso en concreto y morteros (NTP 400.037, 2018).
- **Cemento:** Aglomerante hidráulico en polvo que, al mezclarse con agua, forma una pasta que endurece y adquiere resistencia mecánica. El cemento Portland, el tipo más común, actúa como el agente aglutinante principal en el concreto (ASTM C150, 2024).
- **Concreto:** Mezcla endurecida de agregados (generalmente arena y grava) y una pasta de cemento Portland con agua. Mediante una reacción química, se endurece formando una masa con alta resistencia a la compresión (Mindess et al., 2017; ACI Committee 201, 2021).

- **Resistencia a la compresión:** Capacidad máxima de un espécimen de concreto para soportar una carga axial por unidad de área antes de fallar. Es la característica mecánica más importante del concreto y se evalúa comúnmente a los 28 días (ACI Committee 318, 2019).
- **Resistencia a la flexión:** Medida indirecta de la resistencia a la tracción del concreto, que cuantifica la capacidad de una viga de concreto sin refuerzo para resistir la falla por momento. Se evalúa como el Módulo de Rotura (MR) bajo métodos estandarizados (NTP 339.079, 2015; Mindess et al., 2017).

CAPÍTULO III: MATERIALES Y MÉTODO

3.1. Ubicación geográfica

3.1.1. De la investigación

La investigación se llevó a cabo en la ciudad de Cajamarca, Perú, ubicada en las coordenadas UTM Zona 17 Sur: E 776600 m y N 9207000 m, a una altitud de aproximadamente 2,750 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.).

Figura 01:

Ubicación del laboratorio de ensayo de materiales en donde se realizaron los ensayos de la presente investigación



Fuente: Google Maps (s.f.).

3.1.2. De la cantera de los agregados fino y grueso

Los agregados fino y grueso utilizados en este estudio fueron obtenidos de la cantera ESGA, localizada en el distrito, provincia y departamento de Cajamarca. Las coordenadas UTM (WGS 84) de la cantera son E: 779460.00 y N: 9198258.46.

Figura 02:
Ubicación de la cantera de agregados



Fuente: Google Maps (s.f.).

3.1.3. De la arcilla cocida

La arcilla cocida empleada en la investigación provino de la trituración de ladrillos de construcción tipo King Kong IV fabricados en la Ladrillera CECAJ, ubicada en Prolongación Alfonso Ugarte S/N, Carretera a Shudal, Km 1.5, distrito de Cajamarca.

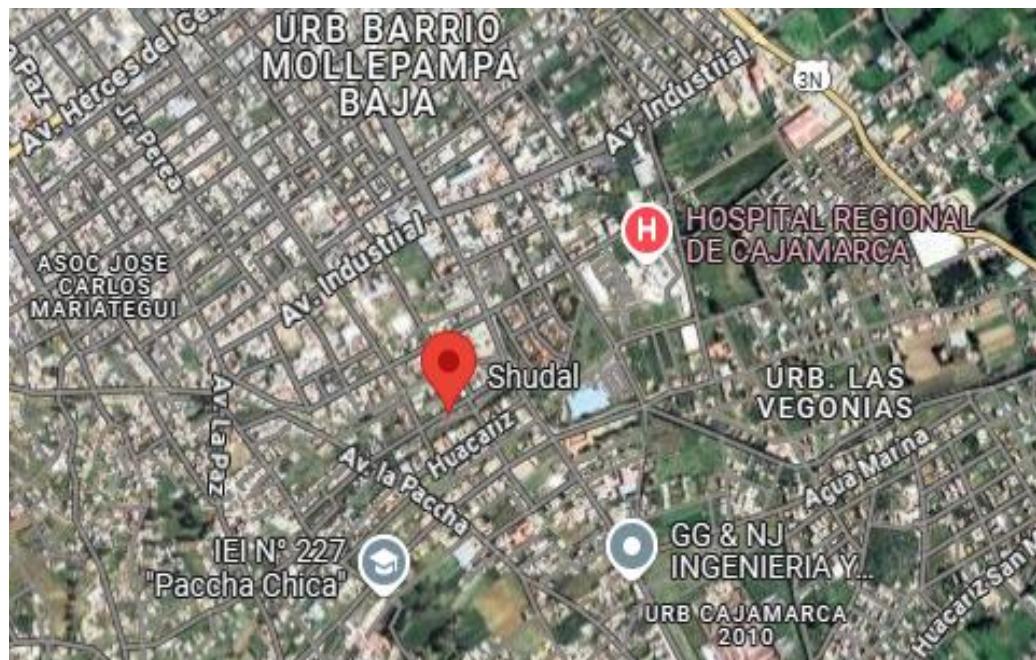
La trituración de estos ladrillos se realizó en la Cantera Aguilar, situada en el Centro Poblado de Tartar Chico, distrito de Baños del Inca, provincia y departamento de Cajamarca.

Para garantizar la calidad y homogeneidad del agregado, el material triturado se tamizó con un tamiz de 3/4" para controlar el contenido de finos y gruesos. La fracción retenida se utilizó en la elaboración de las

probetas, considerando que el agregado grueso tenía un tamaño nominal de $\frac{3}{4}$ ", según los ensayos de caracterización previos.

Figura 03:

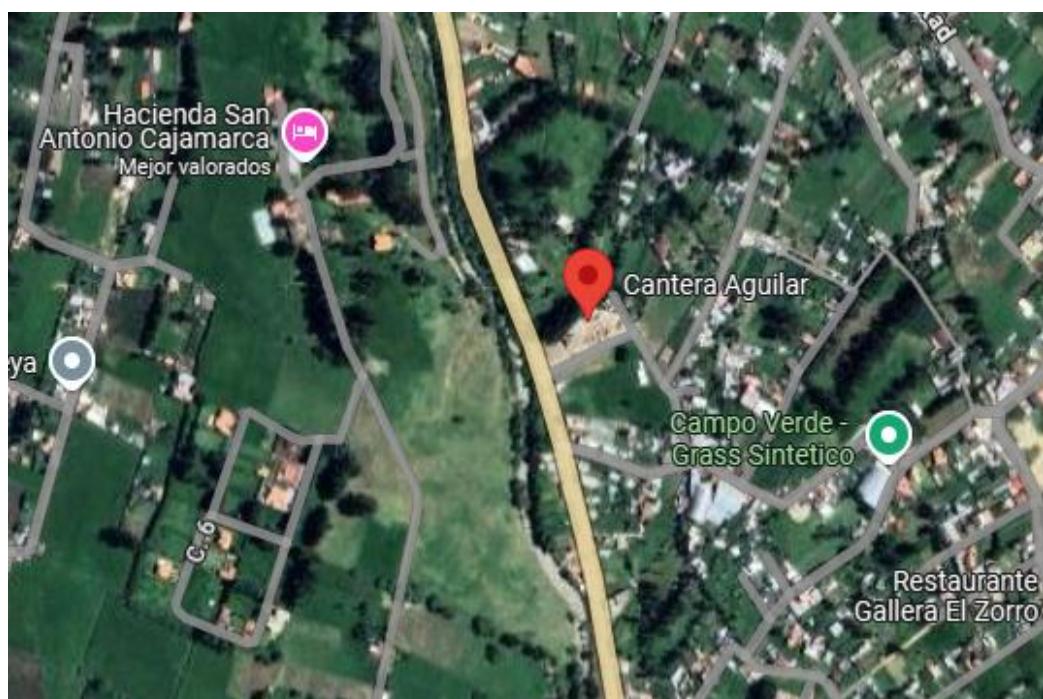
Ubicación de ladrillera CECAJ



Fuente: Google Maps (s.f.).

Figura 04:

Ubicación de cantera Aguilar (trituración)



Fuente: Google Maps (s.f.).

3.1.4. De los ensayos de laboratorio

Todos los ensayos de materiales y probetas de concreto se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca. Las coordenadas UTM de este laboratorio son E: 776616 m y N: 9207008 m y su altitud aproximada de 2,682 m.s.n.m.

3.2. Época de la investigación

La presente investigación se llevó a cabo entre julio de 2023 y junio de 2025.

3.3. Materiales y Equipos

3.3.1. Materiales

- a) Cemento:** Cemento Portland Tipo I, que cumple con los requisitos y parámetros de la NTP 334.082.
- b) Agregado Grueso:** Gravilla o piedra chancada proveniente de la cantera ESGA, cumpliendo con la NTP 400.037.
- c) Agregado Fino:** Arena proveniente de la cantera ESGA, cumpliendo con la NTP 400.037.
- d) Arcilla Cocida:** Obtenida de ladrillos de construcción King Kong tipo IV proveniente de la Ladrillera CECAJ. Este material fue triturado en la Cantera Aguilar y tamizado para obtener la granulometría deseada.
- e) Agua:** Agua potable, libre de sustancias nocivas que puedan afectar la hidratación del cemento o las propiedades del concreto, de acuerdo con la NTP 339.088.

3.3.2. Equipos

a) Equipos para Caracterización de Agregados:

- Balanzas de precisión (sensibilidad de $\pm 0.1\text{g}$ y $\pm 0.5\text{g}$).
- Juego de tamices (NTP 339.040).
- Horno de secado con control de temperatura.
- Picnómetros o equipos para determinar densidad y absorción (NTP 339.052, 339.051).
- Máquina de Los Ángeles para ensayo de abrasión (NTP 400.019).

b) Equipos para Elaboración de Concreto:

- Mezcladora de concreto (tipo de laboratorio).
- Recipientes de mezclado y herramientas manuales.
- Moldes cilíndricos ($150 \times 300\text{mm}$ o $6 \times 12\text{pulgadas}$) para probetas de compresión (NTP 339.033 o ASTM C31).
- Moldes prismáticos ($150 \times 150 \times 500\text{mm}$ o $6 \times 6 \times 20\text{pulgadas}$) para probetas de flexión (NTP 339.079).
- Varillas compactadoras.
- Cono de Abrams (NTP 339.035) para control de asentamiento.

3.3.3. Equipos para ensayos de concreto endurecido

- a)** Máquina de ensayo de compresión universal (NTP 339.034) con capacidad adecuada.
- b)** Máquina de ensayo de flexión (NTP 339.079) con accesorios de carga en los tercios.
- c)** Calibradores y reglas de precisión.
- d)** Cámara de curado (NTP 339.033 o ASTM C31).

3.4. Metodología

3.4.1. Tipo de investigación

Por su propósito y finalidad, la investigación es de tipo aplicada.

3.4.2. Nivel de investigación

El estudio posee un nivel explicativo.

3.4.3. Diseño de investigación

El diseño de esta investigación es experimental.

3.4.4. Método de investigación

Consistente con su diseño experimental, el método de investigación es experimental.

3.5. Población de estudio

La población del presente estudio se constituyó por el conjunto de todas las posibles probetas de concreto simple con una resistencia de diseño $f'c = 280\text{kg/cm}^2$. Esta población abarca tanto aquellas elaboradas con agregado grueso de cerro como material convencional, como las que incorporan un reemplazo parcial de este agregado por arcilla cocida triturada en porcentajes de 10%, 15%, 20%, 25% y 30%.

3.6. Muestra

Para determinar el tamaño de la muestra de probetas, se consideró un enfoque que combinó un cálculo inicial con los requisitos específicos de la investigación experimental. Se buscó optimizar la cantidad de especímenes para garantizar la robustez de los resultados en función de las diferentes condiciones de mezcla evaluadas.

Inicialmente, se aplicó una fórmula estadística general para el cálculo del tamaño de la muestra, con el objetivo de establecer una referencia mínima:

$$n = \frac{Z_a^2 * p * q}{e^2}$$

Donde:

- n = Tamaño de muestra objetivo
- Za: Parámetro estadístico asociado al nivel de confianza
- p: Probabilidad de que el evento estudiado ocurra
- q: Probabilidad de que el evento estudiado no ocurra
- e: Margen de error máximo aceptado en la estimación

Se adoptaron los siguientes valores para los parámetros:

- Za = 0.67 (correspondiente a un nivel de confianza del 90%)
- p=50%
- q=50%
- e=5%

Reemplazando estos valores en la ecuación:

$$n = \frac{0.67^2 * 0.5 * 0.5}{0.05^2}$$

$$n = 45.494$$

La aplicación de estos valores en la ecuación arrojó un tamaño de muestra mínimo de 45 probetas. Sin embargo, considerando los requerimientos específicos del estudio y la necesidad de abarcar una mayor diversidad de ensayos, la muestra se redefinió y distribuyó de la siguiente manera: 54 probetas cilíndricas destinadas a ensayos de compresión y 18 probetas prismáticas para ensayos de flexión. El volumen de cada probeta prismática fue aproximadamente el doble del volumen de una probeta cilíndrica.

La elaboración de estas probetas se basó en los resultados obtenidos del diseño de mezcla y se compuso de la siguiente manera:

- 12 probetas convencionales que no incluyeron reemplazo del agregado grueso por arcilla cocida.

- 60 probetas adicionales que se prepararon en grupos de 12 probetas por cada porcentaje de reemplazo del agregado grueso por arcilla cocida (10%, 15%, 20%, 25%, y 30%).

De cada uno de estos grupos (convencionales y con reemplazo), 9 probetas fueron cilíndricas para ensayos de compresión, y 3 probetas fueron prismáticas para ensayos de flexión, en coherencia con la normativa vigente. La cantidad de probetas por cada condición experimental se seleccionó para asegurar la fiabilidad estadística y la capacidad de comparar las resistencias a la edad de 28 días, en coherencia con las directrices de las normas de ensayo vigentes (NTP 339.034 para compresión y NTP 339.079 para flexión).

3.7. Unidad de análisis

La unidad de análisis de este estudio es la máxima resistencia a la compresión y a la flexión alcanzada por cada espécimen individual de concreto ensayado en laboratorio.

3.8. Etapas de investigación

La investigación se estructuró en dos etapas principales: gabinete (planificación) y campo (ejecución experimental).

3.8.1. Etapa de gabinete

Esta etapa abarcó la planificación inicial, la revisión bibliográfica y el procesamiento de datos. Las actividades clave incluyeron:

a) Revisión bibliográfica: Se examinó la investigación existente relacionada con el tema de estudio, enfocándose en las propiedades del concreto, el uso de agregados alternativos y los procedimientos de ensayo relevantes.

- b) Desarrollo de procedimientos:** Se definieron los métodos específicos para el diseño de las mezclas de concreto, la elaboración de los especímenes y los ensayos de laboratorio, asegurando el cumplimiento con los estándares establecidos.
- c) Planificación y logística:** Esto incluyó la elaboración de un cronograma detallado de actividades y la asignación del presupuesto necesario para cada fase de la investigación.
- d) Procesamiento de datos:** Se analizaron los datos obtenidos de los ensayos de laboratorio realizados en la etapa de campo.

3.8.2. Etapa de laboratorio

Esta etapa se centró en la ejecución práctica del trabajo experimental. Los pasos principales fueron:

- a) Determinación de parámetros:** Se identificaron y cuantificaron los parámetros esenciales requeridos para los diseños de mezcla de concreto.
- b) Elaboración de diseños de mezcla:** Se formularon las diversas mezclas de concreto, incluyendo la mezcla patrón y aquellas con diferentes porcentajes de reemplazo de arcilla cocida triturada.
- c) Preparación de especímenes:** Se moldearon y curaron meticulosamente los especímenes de concreto (cilíndros para compresión y prismáticos para flexión) de acuerdo con los diseños de mezcla definidos y las normas pertinentes,
- d) Ensayos de laboratorio:** Se llevaron a cabo las pruebas experimentales en los especímenes preparados, adhiriéndose estrictamente a las Normas Técnicas Peruanas (NTP) aplicables para medir sus resistencias a la compresión y a la flexión.

3.9. Procedimiento

La presente investigación se llevó a cabo siguiendo una metodología estandarizada para la caracterización de los materiales y el diseño de mezclas de concreto. Los fundamentos teóricos, fórmulas y valores de referencia para cada ensayo se encuentran detallados en el Capítulo II (Marco Teórico).

3.9.1. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado fino

Se realizaron los ensayos de caracterización del agregado fino, incluyendo granulometría, módulo de fineza, peso unitario (suelto y compactado), peso específico y absorción, contenido de humedad y material que pasa el tamiz N° 200 por lavado. Los procedimientos se basaron en las siguientes Normas Técnicas Peruanas (NTP):

- Granulometría y Módulo de Fineza: NTP 339.040 (2014).
- Peso unitario: NTP 400.017 (2014).
- Peso específico y absorción: NTP 400.022 (2021).
- Contenido de humedad: NTP 339.185 (2021).
- Partículas que pasan el tamiz N° 200 por lavado: NTP 400.018 (2013).

3.9.2. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado grueso

Para caracterizar el agregado grueso, se ejecutaron los siguientes ensayos de laboratorio: granulometría, peso unitario (suelto y compactado), peso específico y absorción, contenido de humedad y resistencia a la abrasión. Para ello, se aplicaron las siguientes normas peruanas:

- Granulometría: NTP 339.040 (2014).
- Peso unitario: NTP 400.017 (2014).
- Peso específico y absorción: NTP 400.021 (2021).
- Contenido de humedad: NTP 339.185 (2021).
- Resistencia a la abrasión: NTP 400.019 (2020).

3.9.3. Diseño de mezclas patrón $f'c=280$ Kg/cm²

El diseño de la mezcla patrón se realizó con el objetivo de alcanzar una resistencia a la compresión de 280 kg/cm² a los 28 días. La dosificación de los componentes se fundamentó en la metodología del American Concrete Institute 211.1 (2022).

Los materiales utilizados fueron cemento Portland Tipo I (NTP 334.009), agua potable (NTP 339.088) y agregados fino y grueso cuyas propiedades se determinaron en los ensayos previos. El procedimiento de diseño incluyó los siguientes pasos de cálculo:

- Determinación de la resistencia promedio ($f'cr$).
- Selección del tamaño máximo nominal (TMN).
- Selección del asentamiento.
- Determinación del volumen unitario de agua.
- Determinación del contenido de aire.
- Selección de la relación agua/cemento.
- Cálculo del factor cemento.
- Cálculo de los volúmenes absolutos de los materiales.
- Determinación del peso seco de los agregados.
- Corrección por humedad de los agregados.
- Determinación de la proporción en peso y volumen.
- Cálculo de la cantidad de materiales para la elaboración de dos probetas cilíndricas.

3.9.4. Sustitución del agregado grueso por arcilla cocida

Para la elaboración de las diferentes mezclas de concreto, el proceso de dosificación se fundamentó en el diseño de mezcla patrón previamente establecido en la Sección 3.9.3. Se realizaron sustituciones directas del agregado grueso por arcilla cocida (obtenida de ladrillo triturado) en los porcentajes definidos para esta investigación.

El método de sustitución consistió en reemplazar, por el mismo peso, una porción del agregado grueso seco por la cantidad correspondiente de arcilla cocida triturada. Es decir, para cada porcentaje de reemplazo, se descontó del peso total del agregado grueso seco la cantidad equivalente al porcentaje de sustitución deseado, y esa misma cantidad en peso fue añadida como arcilla cocida.

Este enfoque permitió evaluar el impacto de la arcilla cocida en las propiedades del concreto sin alterar el resto de los componentes de la mezcla base, asegurando que la única variable en estudio fuera la inclusión del material de reemplazo.

3.9.5. Elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas de concreto

A partir de los cálculos obtenidos en la Sección 3.9.3. (Diseño de Mezclas Patrón) y de las consideraciones establecidas en la Sección 3.9.4. (Sustitución de Agregado grueso por Arcilla Cocida), se elaboraron un total de 54 probetas cilíndricas destinadas a ensayos de compresión y 18 probetas prismáticas para ensayos de flexión.

La elaboración de estas probetas se basó en los resultados del diseño de mezcla y se compuso de la siguiente manera:

- Probetas convencionales: Se prepararon 12 probetas que no incluyeron reemplazo del agregado grueso por arcilla cocida.
- Probetas con reemplazo: Se elaboraron 60 probetas adicionales, distribuidas en 12 probetas por cada porcentaje de reemplazo de agregado grueso por arcilla cocida (10%, 15%, 20%, 25%, y 30%).

De cada uno de estos grupos (convencional y con reemplazo), 9 probetas fueron cilíndricas para ensayos de compresión, y 3 probetas fueron prismáticas para ensayos de flexión.

La elaboración y el curado de las probetas cilíndricas y prismáticas se realizaron siguiendo los procedimientos establecidos en la NTP 339.033 (2021) "CONCRETO. Elaboración y curado de especímenes de concreto en campo".

El tiempo de rotura programado para todos los tipos de probetas fue a los 28 días.

3.9.6. Ensayos de resistencia a la compresión y flexión

Para evaluar las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión a los 28 días de curado.

- Ensayo de Resistencia a la Compresión: Las probetas cilíndricas se sometieron a una carga axial en la prensa de ensayo, siguiendo la metodología de la NTP 339.034 (2021).
- Ensayo de Resistencia a la Flexión: Las probetas prismáticas se ensayaron utilizando una viga simple con carga en los tercios, conforme a la NTP 339.079 (2023).

Para el análisis de los datos obtenidos en laboratorio, se utilizaron las resistencias máximas a la compresión y a la flexión de las probetas convencionales. Estas sirvieron como punto de referencia para la comparación con las resistencias máximas a la compresión y a la flexión de las probetas en las que se reemplazó, en diferentes porcentajes, el agregado grueso de cerro por arcilla cocida. De esta forma, se dedujo qué conjunto de probetas tuvo el mejor comportamiento.

3.10. Tratamiento, análisis de datos y presentación de resultados

3.10.1. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado fino y agregado grueso

a. Propiedades del agregado fino

Los resultados de las propiedades del agregado fino, obtenidos según el procedimiento establecido en la Sección 3.9.1., se presentan a continuación (para mayor detalle, consultar los anexos):

Tabla 10:

Propiedades del agregado fino

CARACTERÍSTICA FÍSICA	AGREGADO FINO	
	Valor	Unidad
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL		
PESO ESPECIFICO DE MASA	2.580	g/cm ³
PESO ESPECIFICO SATURADO	2.650	g/cm ³
SUPERFICIALMENTE SECO		
PESO ESPECIFICO APARENTE	2.770	g/cm ³
PESO UNITARIO SUELTO	1639	Kg/m ³
PESO UNITARIO COMPACTADO	1772	Kg/m ³
CONTENIDO DE HUMEDAD	4.262	%
ABSORCION	2.600	%
MODULO DE FINURA	2.994	%
MATERIAL QUE PASA MALLA Nº 200	15.600	%

b. Propiedades de agregado grueso

Los resultados de las propiedades del agregado grueso, obtenidos según el procedimiento establecido en la Sección 3.9.2., se presentan a continuación (para mayor detalle, consultar los anexos):

Tabla 11:

Propiedades del agregado grueso

CARACTERÍSTICA FÍSICA	AGREGADO GRUESO	
	Valor	Unidad
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL	3/4	pulg
PESO ESPECIFICO DE MASA	2.600	g/cm ³
PESO ESPECIFICO SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO	2.640	g/cm ³
PESO ESPECIFICO APARENTE	2.690	g/cm ³
PESO UNITARIO SUELTO	1409	Kg/m ³
PESO UNITARIO COMPACTADO	1555	Kg/m ³
CONTENIDO DE HUMEDAD	0.358	%
ABSORCION	1.300	%
MODULO DE FINURA	6.650	%
ABRASION	38.00	%
MATERIAL QUE PASA MALLA Nº 200	0.300	%

3.10.2. Diseño de mezcla patrón $f'c = 280\text{Kg}/\text{cm}^2$ y elaboración de probetas convencionales

El procedimiento detallado para el diseño de la mezcla patrón se puede visualizar en la sección de Anexos. A continuación, se presentan los resultados de las proporciones de los materiales, calculadas en gabinete, para la elaboración de las probetas convencionales, seguidas de las cantidades específicas por tanda de mezcla.

Tabla 12:

Proporción en peso para la elaboración de probetas cilíndricas y prismáticas

Material	Proporción en peso
CEMENTO	1
AGUA EFECTIVA	20.7
AGREGADO FINO	1.72
AGREGADO GRUESO	2.42

Tabla 13:

Cantidad de materiales para probetas cilíndricas convencionales (tanda de 0.057 m³ para 9 probetas cilíndricas)

Material	Proporción en volumen
CEMENTO (g)	23,370.00
AGUA EFECTIVA (ml)	11,393.70
AGREGADO FINO (g)	40,287.00
AGREGADO GRUESO (g)	56,536.55

El volumen de cada probeta cilíndrica convencional de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura es de 0.0053 m³. La tanda de material para las 9 probetas, considerando el desperdicio, asciende a 0.057 m³.

Tabla 14:

Cantidad de materiales para probetas prismáticas convencionales (Tanda de 0.038 m³ para 3 probetas prismáticas)

Material	Proporción en volumen
CEMENTO (g)	15,580.00
AGUA EFECTIVA (ml)	7,595.80
AGREGADO FINO (g)	26,858.00
AGREGADO GRUESO (g)	37,691.10

El volumen de cada probeta prismática de 15 cm x 15 cm x 50 cm es de 0.01125 m³. La tanda de material para las 3 probetas, incluyendo el desperdicio, resulta en un volumen de 0.038 m³.

Con base en estos resultados, se procedió a la elaboración de las probetas de concreto convencionales, siguiendo los procedimientos establecidos en la normativa vigente.

3.10.3. Probetas de concreto con reemplazo del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de arcilla cocida

En base al diseño de mezcla patrón, se procedió al cálculo de las cantidades de materiales para las mezclas con reemplazo de agregado grueso por arcilla cocida en porcentajes del 10%, 15%, 20%, 25%, y 30%. Es preciso destacar que la única variación en estas mezclas fue la sustitución de una porción del agregado grueso por el mismo peso de arcilla cocida, manteniendo constantes las cantidades de cemento, agua efectiva y agregado fino.

Las cantidades de materiales utilizadas para la elaboración de las probetas cilíndricas y prismáticas para cada porcentaje de reemplazo se detallan en la Tabla 16 y Tabla 17, respectivamente.

Tabla 15:

Cantidad de material para probetas cilíndricas con diferentes porcentajes de reemplazo (Tanda de 0.057 m³ para 9 probetas cilíndricas)

Material	0%	10%	15%	20%	25%	30%
CEMENTO (g)	23,370.00	23,370.00	23,370.00	23,370.00	23,370.00	23,370.00
AGUA EFECTIVA (ml)	11,393.70	11,393.70	11,393.70	11,393.70	11,393.70	11,393.70
AGREGADO FINO (g)	40,287.00	40,287.00	40,287.00	40,287.00	40,287.00	40,287.00
AGREGADO GRUESO (g)	56,536.65	50,883.00	48,056.20	45,229.30	42,402.50	39,575.70
ARCILLA COCIDA (g)	0.00	5,653.70	8,480.45	11,307.35	14,134.15	16,960.95

Tabla 16:

Cantidad de material para probetas prismáticas con diferentes porcentajes de reemplazo (Tanda de 0.038 m³ para 3 probetas prismáticas)

TANDA = 0.038 m ³	0%	10%	15%	20%	25%	30%
CEMENTO (g)	15,580.00	15,580.00	15,580.00	15,580.00	15,580.00	15,580.00
AGUA EFECTIVA (ml)	7,595.80	7,595.80	7,595.80	7,595.80	7,595.80	7,595.80
AGREGADO FINO (g)	26,858.00	26,858.00	26,858.00	26,858.00	26,858.00	26,858.00
AGREGADO GRUESO (g)	37,691.10	33,922.00	32,037.40	30,152.90	28,268.30	26,383.80
ARCILLA COCIDA (g)	0.00	3,769.10	5,653.70	7.538.20	9.422.80	11.307.30

Con las cantidades obtenidas para cada porcentaje de reemplazo, se procedió a la elaboración de las probetas correspondientes, siguiendo la normativa vigente.

3.10.4. Resistencia a la compresión

Se realizaron ensayos de resistencia a la compresión en los especímenes cilíndricos, siguiendo el procedimiento establecido en la NTP 339.034 (2021). Los ensayos incluyeron tanto a las probetas de concreto convencionales como a aquellas con reemplazo parcial del 10%, 15%, 20%, 25% y 30% de agregado grueso por arcilla cocida.

Las pruebas se llevaron a cabo en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca, utilizando las dos máquinas de ensayo de compresión disponibles. Los datos obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 17:

Resistencia a la compresión para un concreto convencional $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Área cm^2	Carca aplicada	Esfuerzo Kg/cm^2	Diseño $\text{Kg/cm}^2 F'c$	CARGA (%)	Verificación	
			P (Kg)	f	F		>75%	>85%
1	28	182.26	49,000.00	268.85	280	96.02%	Cumple	
2	28	179.87	49,000.00	272.42	280	97.29%	Cumple	Cumple
3	28	181.46	50,000.00	275.55	280	98.41%	Cumple	
4	28	181.46	45,105.10	248.57	280	88.77%	Cumple	
5	28	179.08	46,206.22	258.02	280	92.15%	Cumple	Cumple
6	28	181.46	48,742.42	268.61	280	95.93%	Cumple	
7	28	179.87	47,845.42	266.00	280	95.00%	Cumple	
8	28	182.26	47,345.41	259.78	280	92.78%	Cumple	Cumple
9	28	180.66	49,300.31	272.89	280	97.46%	Cumple	

Tabla 18:

Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280$ Kg/cm^2

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Área cm^2	Carca aplicada	Esfuerzo Kg/cm^2	Diseño $Kg/cm^2 F'c$	CARGA (%)	Verificación	
			P (Kg)	f	F		>75%	>85%
1	28	181.46	45,000.00	247.99	280	88.57%	Cumple	
2	28	180.66	46,000.00	254.62	280	90.93%	Cumple	Cumple
3	28	183.05	47,000.00	256.76	280	91.70%	Cumple	
4	28	181.46	44,052.75	242.77	280	86.70%	Cumple	
5	28	179.87	44,427.93	247.00	280	88.21%	Cumple	Cumple
6	28	183.05	44,525.90	243.24	280	86.87%	Cumple	
7	28	178.29	44,126.50	247.50	280	88.39%	Cumple	
8	28	183.05	43,629.57	238.50	280	85.12%	Cumple	Cumple
9	28	183.05	45,278.31	247.35	280	88.34%	Cumple	

Tabla 19:

Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso por arcilla cocida $f'_c=280$ Kg/cm^2

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Área cm^2	Carca aplicada P (Kg)	Esfuerzo Kg/cm^2	Diseño $Kg/cm^2 F'_c$	CARGA (%)	Verificación	
							>75%	>85%
1	28	182.26	39,500.00	216.73	280	77.40%	Cumple	
2	28	180.66	39,413.04	218.16	280	77.91%	Cumple	No Cumple
3	28	181.46	38,523.62	212.30	280	75.82%	Cumple	
4	28	181.46	40,000.00	220.44	280	78.73%	Cumple	
5	28	185.46	39,317.43	212.00	280	75.71%	Cumple	No Cumple
6	28	183.85	39,068.94	212.50	280	75.89%	Cumple	
7	28	184.66	37,000.00	200.37	280	71.56%	No Cumple	
8	28	183.05	38,195.50	208.66	280	74.52%	No Cumple	No Cumple
9	28	183.05	38,290.34	209.18	280	74.71%	No Cumple	

Tabla 20:

Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 20% del agregado grueso por arcilla cocida $f'_c=280$ Kg/cm^2

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Área cm^2	Carca aplicada P (Kg)	Esfuerzo Kg/cm^2 f	Diseño Kg/cm^2 f'_c F	CARGA (%)	Verificación	
							>75%	>85%
1	28	182.26	39,500.00	216.73	280	77.40%	Cumple	
2	28	185.46	36,000.00	194.11	280	69.33%	No cumple	No cumple
3	28	187.07	37,000.00	197.78	280	70.64%	No cumple	
4	28	183.05	37,000.00	202.13	280	72.19%	No cumple	
5	28	183.05	36,694.48	200.46	280	71.59%	No cumple	No cumple
6	28	183.05	36,976.83	202.00	280	72.14%	No cumple	
7	28	183.05	36,926.98	201.73	280	72.05%	No cumple	
8	28	180.66	36,539.17	202.25	280	72.23%	No cumple	No cumple
9	28	181.46	36,672.74	202.10	280	72.18%	No cumple	

Tabla 21:

Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 25% del agregado grueso por arcilla cocida $f'_c=280$ Kg/cm^2

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Área cm^2	Carca aplicada	Esfuerzo Kg/cm^2	Diseño $\text{Kg/cm}^2 f'_c$	CARGA (%)	Verificación	
			P (Kg)	f	F		>75%	>85%
1	28	178.29	37,500.00	210.33	280	75.12%	Cumple	No cumple
2	28	183.85	40,500.00	220.28	280	78.67%	Cumple	No cumple
3	28	183.85	39,000.00	212.13	280	75.76%	Cumple	
4	28	182.26	41,000.00	224.96	280	80.34%	Cumple	No cumple
5	28	181.46	37,000.00	203.90	280	72.82%	No cumple	No cumple
6	28	179.87	41,500.00	230.72	280	82.40%	Cumple	
7	28	183.05	39722.64	217.00	280	77.50%	Cumple	No cumple
8	28	180.66	39222.02	217.10	280	77.54%	Cumple	No cumple
9	28	183.85	39905.48	217.05	280	77.52%	Cumple	

Tabla 22:

Resistencia a la compresión para un concreto con reemplazo del 30% del agregado grueso por arcilla cocida $f'_c=280$ Kg/cm^2

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Área cm^2	Carca aplicada	Esfuerzo Kg/cm^2	Diseño $\text{Kg/cm}^2 F'_c$	CARGA (%)	Verificación	
			P (Kg)	f	F		>75%	>85%
1	28	182.26	43,000.00	235.93	280	84.26%	Cumple	
2	28	179.87	44,000.00	244.62	280	87.36%	Cumple	Cumple
3	28	179.87	43,000.00	239.06	280	85.38%	Cumple	
4	28	183.05	44,500.00	243.10	280	86.82%	Cumple	
5	28	180.66	42,500.00	235.24	280	84.02%	Cumple	Cumple
6	28	179.87	44,000.00	244.62	280	87.36%	Cumple	
7	28	179.87	43240.78	240.40	280	85.86%	Cumple	
8	28	181.46	43631.67	240.45	280	85.88%	Cumple	Cumple
9	28	180.66	43436.90	240.43	280	85.87%	Cumple	

3.10.5. Resistencia a la flexión

Se realizaron ensayos de resistencia a la flexión en los especímenes prismáticos en el Laboratorio de Materiales de la Universidad Nacional de Cajamarca. Las pruebas siguieron el procedimiento establecido en la NTP 339.079 (2023) e incluyeron tanto a las probetas de concreto convencionales (sin reemplazo de agregado grueso) como a las que contenían reemplazo parcial de agregado grueso por arcilla cocida en porcentajes del 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 23:

Resistencia a la flexión para un concreto convencional $f'c=280 \text{ kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Medidas (cm)			Carca aplicada	Módulo de Ruptura	Diseño Kg/cm ² $F'c$	CARGA (%)	Verificación	
		Ancho	Espesor	Largo					>75%	>85%
1	28	15.00	15.00	50.20	2,600.00	37.89	33.04	114.68%	Cumple	
2	28	15.00	15.00	50.00	2,300.00	33.43	33.04	101.18%	Cumple	Cumple
3	28	14.80	15.00	49.80	2,620.00	38.39	33.04	116.19%	Cumple	

Tabla 24:

Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 10% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Medidas (cm)			Carca aplicada	Módulo de Ruptura	Diseño $\text{Kg/cm}^2 f'c$	CARGA (%)	Verificación		
		Ancho	Espesor	Largo					Kg/cm ²	F	>75%
1	28	15.10	15.30	49.80	2,700.00	37.28	33.04	112.83%	Cumple		
2	28	15.60	15.80	49.80	2,700.00	33.84	33.04	102.42%	Cumple	Cumple	
3	28	15.10	16.00	50.00	2,550.00	32.36	33.04	97.94%	Cumple		

Tabla 25:

Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 15% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Medidas (cm)			Carca aplicada	Módulo de Ruptura	Diseño $\text{Kg/cm}^2 f'c$	CARGA (%)	Verificación		
		Ancho	Espesor	Largo					Kg/cm ²	F	>75%
1	28	15.20	15.50	49.90	2,320.00	31.07	33.04	94.04%	Cumple		
2	28	15.00	16.00	50.00	2,650.00	33.85	33.04	102.45%	Cumple	Cumple	
3	28	16.00	15.40	50.30	2,220.00	28.84	33.04	87.29%	Cumple		

Tabla 26:

Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 20% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Medidas (cm)			Carca aplicada	Módulo de Ruptura	Diseño $\text{Kg/cm}^2 f'c$	CARGA (%)	Verificación		
		Ancho	Espesor	Largo					Kg/cm ²	F	>75%
1	28	15.50	15.50	50.00	2,460.00	32.37	33.04	97.97%	Cumple		
2	28	15.10	14.90	50.50	2,100.00	31.00	33.04	93.83%	Cumple	Cumple	
3	28	15.30	15.00	50.60	1,920.00	27.69	33.04	83.81%	Cumple		

Tabla 27:

Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 25% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Medidas (cm)			Carca aplicada	Módulo de Ruptura	Diseño $\text{Kg/cm}^2 f'c$	CARGA (%)	Verificación		
		Ancho	Espesor	Largo					Kg/cm ²	F	>75%
1	28	15.00	15.10	51.00	2,200.00	32.15	33.04	97.31%	Cumple		
2	28	15.10	15.50	51.00	2,740.00	37.75	33.04	114.26%	Cumple	Cumple	
3	28	15.10	15.60	51.30	2,500.00	34.20	33.04	103.51%	Cumple		

Tabla 28:

Resistencia a la flexión para un concreto con reemplazo del 30% del agregado grueso por arcilla cocida $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$

Nº PROBETA	EDAD EN DIAS	Medidas (cm)			Carca aplicada	Módulo de Ruptura	Diseño Kg/cm^2 $F'c$	CARGA (%)	Verificación		
		Ancho	Espesor	Largo					Kg/cm^2	F	$>75\%$
1	28	15.20	15.00	50.00	2,720.00	38.97	33.04	117.95%	Cumple		
2	28	15.20	15.00	51.00	2,700.00	39.46	33.04	119.43%	Cumple	Cumple	
3	28	15.00	15.20	49.80	2,480.00	34.93	33.04	105.72%	Cumple		

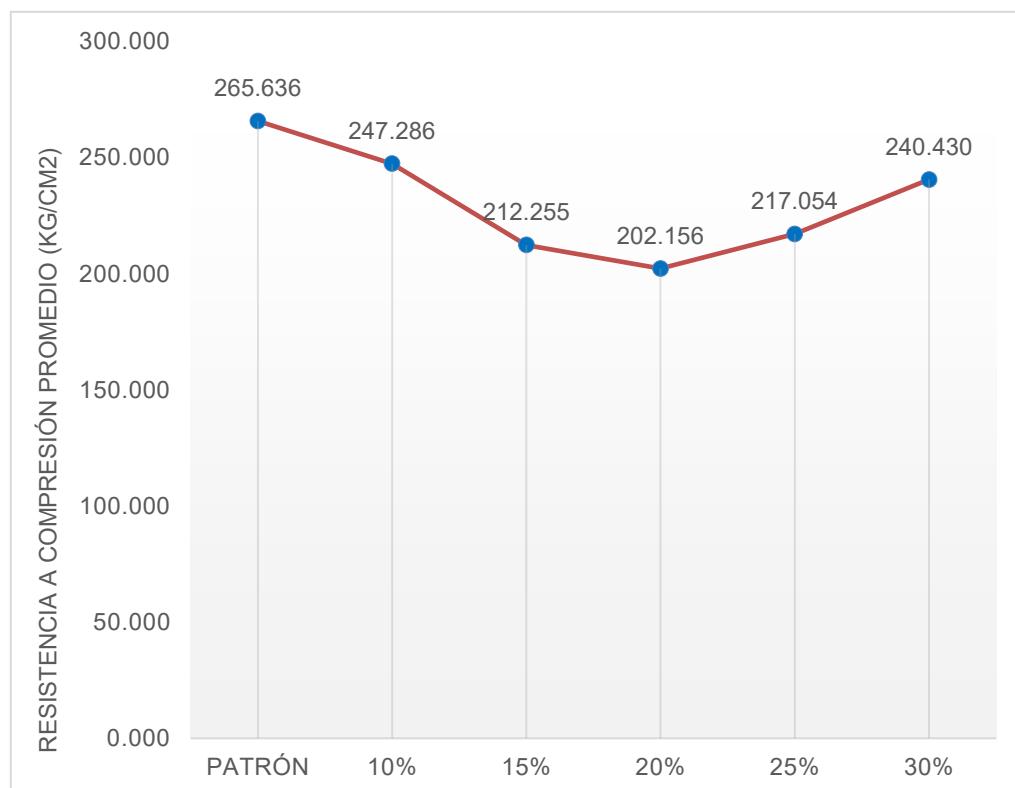
3.11. Comparación de resultados de ensayos del concreto en estado endurecido.

3.11.1. Resistencia a la compresión

Se examinaron los resultados promedio de resistencia a la compresión ($f'c=280\text{kg/cm}^2$) de probetas curadas por 28 días. Los ensayos incluyeron un concreto patrón (sin reemplazo) y cinco mezclas con diferentes porcentajes de reemplazo parcial del agregado grueso por arcilla cocida, específicamente, 10%, 15%, 20%, 25% y 30%. La Figura 05 presenta una comparación visual de las resistencias promedio absolutas obtenidas para cada una de estas mezclas.

Figura 05:

Comparación de resistencia a la compresión promedio $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$ a 28 días con reemplazos parciales de agregado grueso

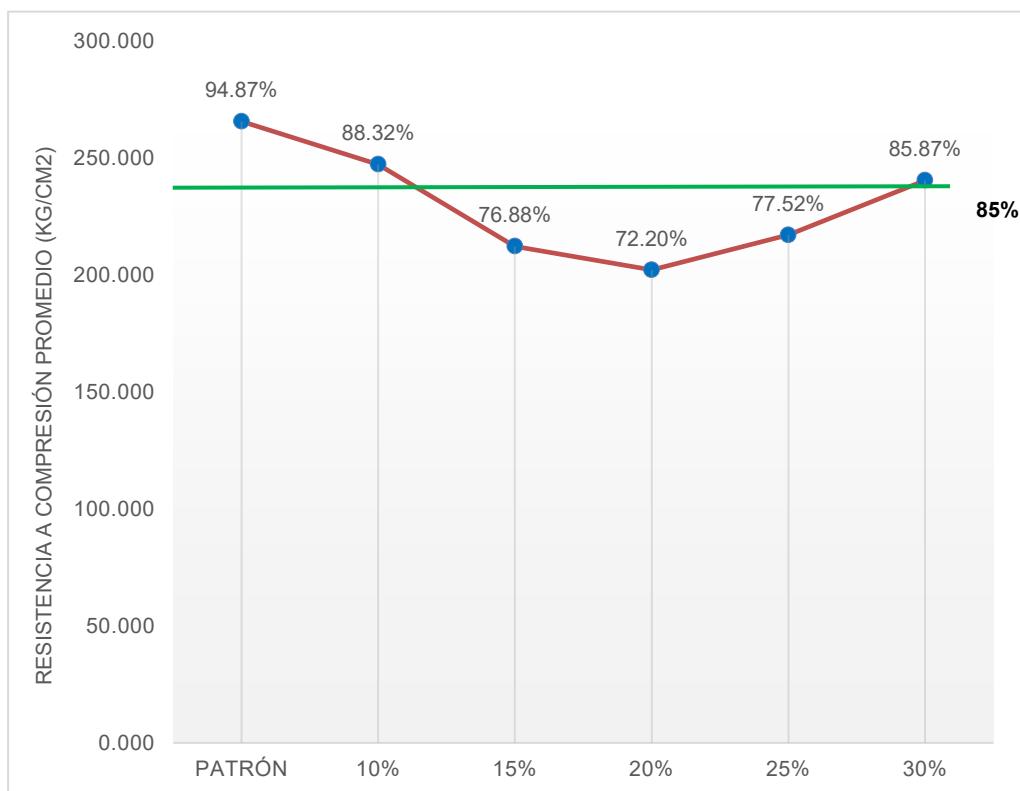


Para una evaluación de la conformidad con la Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado de Perú, se calculó el porcentaje de cumplimiento de cada mezcla respecto a la resistencia de diseño. La

Figura 06 ilustra estos porcentajes para cada nivel de reemplazo, permitiendo una comparación directa con el umbral mínimo del 85% establecido por dicha normativa.

Figura 06:

Porcentaje de cumplimiento de la resistencia a la compresión promedio $f'c=280\text{kg/cm}^2$ a 28 días con reemplazos parciales de agregado grueso



Al comparar los resultados de la Figura 05 (valores absolutos) y su relación con el umbral de cumplimiento visible en la Figura 06 (porcentajes), se observa que el concreto patrón, aunque no alcanzó la resistencia de diseño de 280kg/cm^2 , logró un 94.87% de dicha resistencia, superando así el 85% requerido por la normativa. Entre las mezclas con reemplazo, aquellas con 10% y 30% de arcilla cocida también superaron este umbral del 85%, estando por debajo de la resistencia del concreto patrón. En contraste, las mezclas con 15%, 20% y 25% de reemplazo no alcanzaron el porcentaje mínimo de cumplimiento establecido. Adicionalmente, conforme a las Tablas 18, 19 y 23 (donde se registran los resultados individuales de las probetas

patrón, con 10% y con 30% de reemplazo, respectivamente), se destaca que ninguna de las probetas individuales ensayadas presentó una resistencia inferior al 75% de la resistencia de diseño especificada.

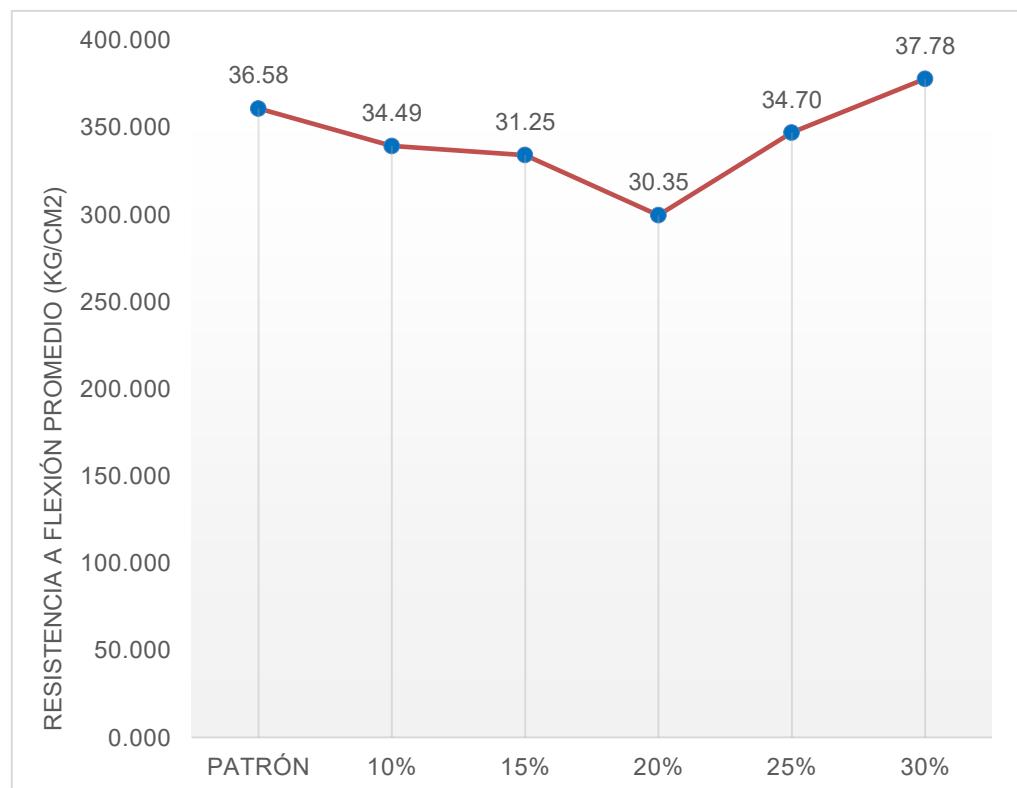
3.11.2. Resistencia a la flexión

Los resultados promedio de resistencia a la flexión del concreto en estado endurecido fueron también examinados para el concreto patrón y las mezclas con reemplazo parcial de agregado grueso por arcilla cocida, a los 28 días de curado.

La Figura 07 presenta los valores promedio de la resistencia a la flexión obtenidos para cada una de las mezclas.

Figura 07:

Comparación de resistencia a la flexión promedio con $f'c=280\text{ Kg/cm}^2$ a 28 días con reemplazos parciales de agregado grueso



Al comparar las resistencias promedio a la flexión a los 28 días, se observa que el concreto patrón obtuvo 36.58 kg/cm^2 , superando la resistencia de diseño de 33.04 kg/cm^2 . Las mezclas con 10% (34.49 kg/cm^2) y 25% (34.70 kg/cm^2) de reemplazo mostraron valores ligeramente inferiores al patrón, pero aún por encima del valor de diseño. Los promedios más bajos dentro del grupo se registraron en las mezclas con 15% (31.25 kg/cm^2) y 20% (30.35 kg/cm^2) de reemplazo, siendo inferiores a la resistencia de diseño. En contraste, la mezcla con 30% de reemplazo (37.78 kg/cm^2) no solo superó la resistencia a la flexión del concreto patrón, sino que también registró el valor más alto del conjunto.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección, se presentan y discuten los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión y a la flexión del concreto, tanto para la mezcla patrón como para las mezclas con reemplazo parcial del agregado grueso por arcilla cocida. La discusión se organiza siguiendo los objetivos específicos planteados en la presente investigación, comparando los hallazgos con la literatura relevante para identificar coincidencias, divergencias y posibles explicaciones.

4.1. Determinación de la resistencia a la compresión del concreto

El análisis de la resistencia a la compresión a los 28 días para la mezcla de concreto patrón arrojó un promedio de 265.63 kg/cm^2 . Si bien este valor no alcanzó la resistencia de diseño especificada de 280 kg/cm^2 , es importante destacar que cumplió con los criterios de aceptación de la normativa peruana (Norma E.060 Concreto Armado del RNE, 2020), la cual requiere que el promedio de resistencia sea superior al 85% (238 kg/cm^2) y que ninguna probeta individual esté por debajo del 75% (210 kg/cm^2).

La uniformidad de estos resultados se valida con una desviación estándar de 8.73 kg/cm^2 y un coeficiente de variación del 3.29%, el cual indica un excelente control de calidad en la dosificación y elaboración de la mezcla patrón. En las mezclas con reemplazo, los coeficientes de variación también se mantuvieron en rangos bajos (del 1.41% al 3.65%), lo que sugiere que la inclusión de la arcilla cocida no afectó significativamente la consistencia de los resultados.

La diferencia entre la resistencia de diseño nominal y la resistencia promedio obtenida en laboratorio es un fenómeno que puede atribuirse a varios factores. En este caso específico, dos elementos clave pudieron haber contribuido a que no se alcanzara la resistencia nominal de 280 kg/cm^2 .

Por un lado, existe evidencia y experiencia local que sugiere que el agregado de cerro proveniente de la región de Cajamarca podría no poseer la calidad óptima para alcanzar altas resistencias en el concreto. Propiedades como la forma, la

angularidad, la textura superficial, la presencia de partículas blandas o la composición mineralógica del agregado pueden influir directamente en la adherencia con la pasta de cemento y, por ende, en la resistencia final del concreto. Una calidad subóptima del agregado puede limitar el potencial de resistencia de la mezcla, incluso con un buen diseño de mezcla y un curado adecuado.

Por otro lado, durante los primeros días de curado, se identificaron fugas en las cámaras de curado. Aunque la situación fue corregida, la pérdida de humedad inicial pudo haber afectado la hidratación temprana del cemento. El curado adecuado es crítico en las primeras etapas para el desarrollo de la resistencia del concreto, y cualquier deficiencia en este periodo puede resultar en una menor resistencia final.

A pesar de estos factores, el hecho de que el concreto patrón superara los criterios de aceptación del 85% de la resistencia promedio y el 75% de la resistencia individual, indica que su comportamiento es aceptable dentro de los parámetros de control de calidad para usos estructurales que no exijan un cumplimiento estricto del 100% de la resistencia nominal en todas las evaluaciones.

La evaluación de la resistencia a la compresión a los 28 días en los concretos con reemplazo parcial de agregado grueso por arcilla cocida reveló un comportamiento variable. Las mezclas con 10% ($247.29\text{kg}/\text{cm}^2$) y 30% ($240.43\text{kg}/\text{cm}^2$) de reemplazo mostraron promedios de resistencia que superaron el umbral del 85% de la resistencia de diseño, lo cual sugiere su potencial viabilidad bajo ciertas condiciones de aplicación. Por otro lado, los porcentajes de reemplazo del 15% ($212.26\text{kg}/\text{cm}^2$), 20% ($202.16\text{kg}/\text{cm}^2$) y 25% ($217.05\text{kg}/\text{cm}^2$) presentaron promedios de resistencia que no lograron alcanzar el umbral del 85% de la resistencia de diseño. Esta disminución más pronunciada en la resistencia para estos rangos intermedios de reemplazo sugiere un impacto más significativo y menos favorable de la arcilla cocida en la matriz del concreto, lo cual podría atribuirse a factores como una mayor porosidad intrínseca o una elevada absorción de agua de la arcilla cocida en

esos porcentajes específicos, que afectan negativamente la interfase pasta-agregado y la compactación de la mezcla.

Al comparar la resistencia a la compresión de los concretos con reemplazo frente al concreto patrón, se observa una tendencia general a la disminución de la resistencia con la incorporación de arcilla cocida como agregado grueso, especialmente notoria en los porcentajes de 15%, 20% y 25%.

Estos hallazgos coinciden parcialmente con lo reportado en la literatura internacional y nacional. Moreno et al. (2019) y López (2022) establecieron que los concretos con agregados de arcilla o ladrillo suelen presentar menor resistencia a la compresión que las mezclas tradicionales, con López (2022) observando una disminución aproximada del 10% para reemplazos de hasta el 30%. Nuestros resultados para 15%, 20% y 25% de reemplazo de arcilla cocida (ladrillo triturado) reflejan esta tendencia a la baja resistencia, con disminuciones de aproximadamente 20.1%, 23.9% y 18.3% respectivamente, con respecto al concreto patrón.

Sin embargo, nuestros resultados muestran una divergencia interesante en los porcentajes de 10% y 30%. Mientras que el 10% de reemplazo experimentó una disminución moderada en resistencia (aproximadamente 6.9% respecto al patrón), el 30% de reemplazo, a pesar de estar en un rango donde otros estudios reportan disminución (López, 2022), mostró una resistencia superior a la del 15%, 20% y 25% de reemplazo, acercándose más al rendimiento del 10%. Esta recuperación o estabilidad inesperada al 30% es notable. Podría explicarse por lo sugerido por Mimbela Orderique (2021), quien encontró que la inclusión de ladrillos triturados en porcentajes moderados (10% y 20%) podía alcanzar resistencias comparables o superiores, atribuyéndolo a una mejor interacción entre la pasta de cemento y la superficie rugosa y porosa del ladrillo. Es posible que para el 30% de reemplazo en nuestra mezcla específica, se haya logrado una compactación o una formación de interfase pasta-agregado más favorable, quizás compensando en cierta medida la mayor porosidad que podría haber afectado a los porcentajes intermedios. Rosas (2018) también concluyó que la arcilla cocida es viable hasta el 30% de reemplazo, siempre que la condición de

humedad sea la adecuada, lo que subraya la importancia del control de la humedad en estas mezclas para su desempeño.

La Norma E.060 (2020) establece criterios de aceptación para la resistencia a la compresión, incluyendo el cumplimiento del 85% de la resistencia de diseño y que ninguna probeta individual esté por debajo del 75%. La mezcla patrón y las mezclas con 10% y 30% de reemplazo lograron ambos criterios, indicando su potencial viabilidad estructural en un contexto de control de calidad.

4.2. Determinación de la resistencia a la flexión por el módulo de rotura del concreto

El módulo de rotura del concreto patrón es un valor fundamental para la comparación, pues representa la capacidad de la mezcla convencional para resistir los esfuerzos de tracción por flexión antes de la fisuración. Para un concreto con una resistencia a la compresión de diseño ($f'c$) de 280kg/cm², la Norma E.060 Concreto Armado (2020), basada en las directrices del American Concrete Institute (ACI 318-19), estima empíricamente el módulo de rotura (fr) mediante la expresión $fr=0.62f'c$ (en MPa). Al aplicar esta fórmula, el valor estimado para nuestra resistencia de diseño sería de aproximadamente 3.24MPa o 33.04kg/cm². Los ensayos experimentales de laboratorio para el concreto patrón revelaron un módulo de rotura promedio de 36.58kg/cm² (valor sin la multiplicación por diez para visualización), el cual es superior a la estimación normativa.

El control de la variabilidad en esta propiedad fue aceptable, evidenciado por una desviación estándar de 27.37 kg/cm² y un coeficiente de variación del 7.48%. En las mezclas con reemplazo, los coeficientes de variación se mantuvieron en un rango similar (del 6.59% al 8.16%), indicando que la variabilidad de la resistencia a la flexión no se vio comprometida por la sustitución de agregado.

Este resultado favorable indica que la mezcla patrón no solo cumple, sino que excede lo esperado en términos de resistencia a la flexión para un concreto de 280kg/cm². Aunque la Norma E.060 establece criterios de aceptación detallados

principalmente para la resistencia a la compresión, el hecho de que el módulo de rotura experimental supere la correlación empírica sugiere una excelente calidad y desempeño de la mezcla base en su capacidad para resistir la tracción por flexión. Este valor real de $36.58\text{kg}/\text{cm}^2$ servirá como línea base fundamental para evaluar el impacto de la arcilla cocida en la resistencia a la flexión.

El análisis de la resistencia a la flexión (módulo de rotura) reveló un comportamiento no lineal y complejo con el reemplazo parcial de agregado grueso de cerro por arcilla cocida. Inicialmente, se observó una reducción de la resistencia con porcentajes de reemplazo del 10% ($34.49\text{ kg}/\text{cm}^2$) y 15% ($31.25\text{ kg}/\text{cm}^2$), seguida de la disminución más marcada al 20% ($30.35\text{ kg}/\text{cm}^2$), donde se registraron los valores inferiores a la resistencia de diseño ($33.04\text{ kg}/\text{cm}^2$). Sin embargo, esta tendencia a la baja se invierte drásticamente al aumentar el reemplazo al 25% ($34.70\text{ kg}/\text{cm}^2$) y, de manera más notable, al 30% ($37.78\text{ kg}/\text{cm}^2$), donde se aprecia una recuperación e incluso una superación de la resistencia a la flexión en comparación con el concreto patrón ($36.58\text{ kg}/\text{cm}^2$).

Este patrón bifásico (disminución inicial y posterior recuperación) sugiere que la arcilla cocida puede influir en la resistencia a la flexión a través de mecanismos diferentes y potencialmente favorables a mayores niveles de reemplazo. La resistencia a la flexión, al depender crucialmente de la capacidad del concreto para resistir esfuerzos de tracción, podría beneficiarse de las propiedades superficiales y texturales de la arcilla cocida, que actúan de forma distinta a cómo afectan la compresión.

La comparación de la resistencia a la flexión entre el concreto patrón y las mezclas con arcilla cocida presenta una clara divergencia respecto a la tendencia observada en la resistencia a la compresión. Mientras que la compresión mostró una tendencia general a la disminución de la resistencia (con la particularidad de la recuperación al 30%), la flexión exhibe un comportamiento bifásico bien definido: una caída inicial en los porcentajes bajos e intermedios (10% a 20%) y luego una recuperación significativa y progresiva al 25% y 30%.

Este hallazgo es particularmente interesante en contraste con la literatura, donde la mayoría de los estudios se centran en la resistencia a la compresión. No obstante, Mimbela Orderique (2021), en su investigación sobre el uso de ladrillos triturados, también evaluó la tracción por flexión y encontró que el concreto elaborado con ladrillos triturados podía alcanzar resistencias comparables e incluso superiores, especialmente con porcentajes de sustitución moderados (10% y 20%). Aunque nuestros resultados muestran una disminución inicial en el 10% y 15%, la notable recuperación al 25% y 30% podría alinearse con la idea de una "mejor interacción entre la pasta de cemento y la superficie rugosa y porosa del ladrillo triturado", como sugiere Mimbela Orderique (2021), lo que podría generar una zona de transición interfacial más densa y resiliente a la tensión. El estudio de López Mego (2017) en Cajamarca también encontró que el curado interno con fragmentos de ladrillo podía aumentar la resistencia a la flexión a los 28 días, aunque en un contexto diferente (curado interno vs. reemplazo simple), lo que sugiere un potencial del material para mejorar esta propiedad.

La superación de la resistencia a la flexión del concreto patrón en porcentajes de reemplazo mayores (25% y 30%) es un resultado relevante que indica que la arcilla cocida, con su posible mayor rugosidad y porosidad interconectada, actúa como un "anclaje" o mejora la interfase pasta-agregado de una manera que es particularmente beneficiosa para la resistencia a la tensión (flexión), a diferencia de la compresión. Este comportamiento promisor sugiere la viabilidad de la arcilla cocida en aplicaciones donde la resistencia a la flexión es un criterio de diseño crítico, como en pavimentos o losas. Para comprender mejor los mecanismos microestructurales detrás de este efecto, futuras investigaciones podrían explorar esta hipótesis a través de análisis detallados de la Zona de Transición Interfacial (ITZ) mediante técnicas como microscopía electrónica de barrido (MEB).

4.3. Contrastación de la hipótesis

La hipótesis de esta investigación postuló que el reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida incidiría en un incremento de más del 10% la resistencia del concreto $f'c=280\text{ kg/cm}^2$. Tras el análisis de los resultados, se evidencia que esta suposición se refuta en el caso de la resistencia a la compresión, pero se confirma de manera parcial para la resistencia a la flexión en un porcentaje específico.

En la resistencia a la compresión, la incorporación de arcilla cocida en todos los porcentajes evaluados no solo no incrementó la resistencia, sino que la disminuyó en comparación con la mezcla de diseño. Los valores obtenidos para las mezclas con reemplazo fueron inferiores a la resistencia de diseño (280 kg/cm^2), lo que indica una tendencia contraria a la planteada en la hipótesis, llevando a su rechazo en este aspecto.

Sin embargo, el comportamiento de la resistencia a la flexión presenta un matiz significativo. Se utilizó la correlación del ACI 318-19, que estima el módulo de rotura en 33.04 kg/cm^2 para un concreto de 280 kg/cm^2 . Los resultados experimentales revelaron que la mezcla con un 30% de reemplazo alcanzó una resistencia promedio de 37.78 kg/cm^2 , lo que representa un incremento del 14.3% sobre el valor estimado de diseño. Este resultado demuestra que, en este porcentaje específico de sustitución, la arcilla cocida influye de manera positiva en la resistencia a la flexión, cumpliendo la condición de la hipótesis de un incremento superior al 10%.

Estos hallazgos sugieren que el impacto de la arcilla cocida es diferente para las propiedades mecánicas del concreto, abriendo la puerta a futuras investigaciones sobre su uso en aplicaciones donde la resistencia a la tensión sea un criterio de diseño primordial.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- El reemplazo parcial del agregado grueso de cerro por arcilla cocida no logró incidir en un incremento de más del 10% en la resistencia del concreto $f_c=280 \text{ kg/cm}^2$.
- La resistencia a la compresión del concreto convencional alcanzó a los 28 días el 94.87% de la resistencia de diseño de 280 kg/cm^2 . Aunque no llegó a la resistencia nominal, cumplió con los criterios de aceptación de la normativa peruana. Además, su resistencia a la flexión de 36.58 kg/cm^2 superó la estimación normativa (33.04 kg/cm^2), demostrando un excelente comportamiento.
- La resistencia a la compresión de las mezclas con reemplazo parcial de agregado grueso por arcilla cocida fue inferior a la del concreto de diseño (280 kg/cm^2); no obstante, los porcentajes de 10% (247.29 kg/cm^2) y 30% (240.43 kg/cm^2) aún cumplieron con los criterios de aceptación de la normativa. En cuanto a la resistencia a la flexión, solo las mezclas con 10%, 25%, y 30% de reemplazo superaron el valor de diseño (33.04 kg/cm^2); de estas, únicamente la mezcla con 30% logró el incremento de más del 10% postulado, pues alcanzó una resistencia de 37.78 kg/cm^2 (14.3%).
- Al comparar la resistencia del concreto convencional con las mezclas de reemplazo, la sustitución por arcilla cocida disminuyó la resistencia a la compresión de forma general. Sin embargo, en la resistencia a la flexión se observó un comportamiento mixto, donde la mezcla con un 30% de reemplazo superó la resistencia del concreto convencional, lo que demuestra un desempeño superior en esta propiedad.

5.2. Recomendaciones

- Se recomienda llevar a cabo un estudio exhaustivo de las propiedades físico-químicas del agregado de cerro de Cajamarca y de la microestructura del concreto con arcilla cocida, para comprender los mecanismos que influyen en las propiedades mecánicas y la variabilidad de los resultados.
- Se recomienda realizar ensayos de durabilidad, como la resistencia a la carbonatación y la permeabilidad, para determinar el comportamiento del concreto con arcilla cocida en el tiempo.
- Se sugiere continuar la investigación en porcentajes de sustitución superiores al 30% y explorar la inclusión de aditivos, a la vez que se implementa un control riguroso del curado, con el fin de optimizar la resistencia y viabilidad de este material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Concrete Institute (ACI) Committee 201. (2021). *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-21)*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 211.1. (2024). *Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete (ACI 211.1-24)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 214.4R-17. (2017). *Guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results (ACI 214.4R-17)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (ACI) Committee 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary*. American Concrete Institute.
- ASTM International. (2017). *ASTM D6913/D6913M-17: Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*.
- ASTM International. (2024). *ASTM C150: Standard Specification for Portland Cement*.
- Chavarría-Reyes, L. J., Chavarry-Vallejos, C., Valencia-Gutiérrez, A., Pereyra-Salardi, E., & Hurtado-Iglesias, C. (2021). Arcilla cocida como agregado fino para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón estructural. *Aporte Santiaguino*, 14(2), 147-158.
- Cordero Estévez, G. D., & Camargo Sanabria, A. F. (2017). *Diseño de mezclas de concreto elaboradas con chamota de arcilla cocida como parte del agregado grueso* [Tesis de pregrado]. Universidad Francisco de Paula Santander.
- De La Vega, M. (2021). *Perú puede tener un boom en la construcción*. Diario El Peruano. <https://elperuano.pe/noticia/119555-peru-puede-tener-un-boom-en-la-construcion>
- Diario El Comercio. (2020). *El ladrillo, un material cálido y resistente que tiene varios usos*. <https://www.elcomercio.com/constructir/ladrillo-usos-construcion-arquitectura-vivienda.html>
- ELDeeb, I. S., Bakry, A., et al. (2024). Sustainable Clay Brick Manufacturing: A Review of Mechanical Properties, Firing Technologies, Emissions, and Control Strategies. *Journal of Engineering Research*, 8(5).
- Grimán, A., González, B., & Rodríguez, M. (2015). *Tecnología de los Materiales Cerámicos*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cádiz.

- Instituto Nacional de Calidad (INACAL). (2013-2023). *Normas Técnicas Peruanas (NTP) sobre ensayos de materiales, agregados y concreto*.
- Jiménez, E., & Balderas, E. (2018). *Materiales de construcción*. Grupo Editorial Patria.
- López Epiquién, H. A. (2022). *Influencia del ladrillo Lark triturado como agregado grueso para mejorar la resistencia a la compresión del concreto* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas.
- López Mego, J. (2017). *Estudio experimental del curado interno de un concreto con adiciones de arcilla cocionada en reemplazo del agregado grueso* [Tesis de pregrado]. Universidad Nacional de Cajamarca.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2020). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Mimbela Orderique, L. F. (2021). *Caracterización mecánica del concreto con el uso de ladrillos triturados como reemplazo del agregado grueso* [Tesis de pregrado]. Universidad Señor de Sipán.
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2017). *Concrete* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2009). *Norma Técnica de Edificación E.060 Concreto Armado. Reglamento Nacional de Edificaciones*.
- Moreno, L. M., Ospina, E., & Rodríguez, A. L. (2019). *Resistencia de concreto con agregado de bloque de arcilla triturado como reemplazo de agregado grueso* [Tesis de pregrado]. Universidad Nueva Granada.
- National Ready Mixed Concrete Association. (s.f.). *Resistencia a la flexión del concreto*. Recuperado de <https://concretesupplyco.com/wp-content/uploads/2017/01/16pes.pdf>.
- Perú Construye. (s.f.). *Concreto en obra: material fundamental para la construcción* (Ed. 69). Revista Perú Construye. Recuperado de <https://n9.cl/k16uz>.
- Rosas Moreto, H. A. (2018). *Uso de ladrillo de arcilla con exceso de cocción como agregado grueso en concretos hidráulicos* [Tesis de pregrado]. Universidad de Piura.
- Velásquez, R. (2019). *Manual de Geología Aplicada a la Ingeniería*. Universidad Nacional de Ingeniería.

ANEXOS

1. Determinación de las propiedades física mecánicas del agregado fino

a. Granulometría

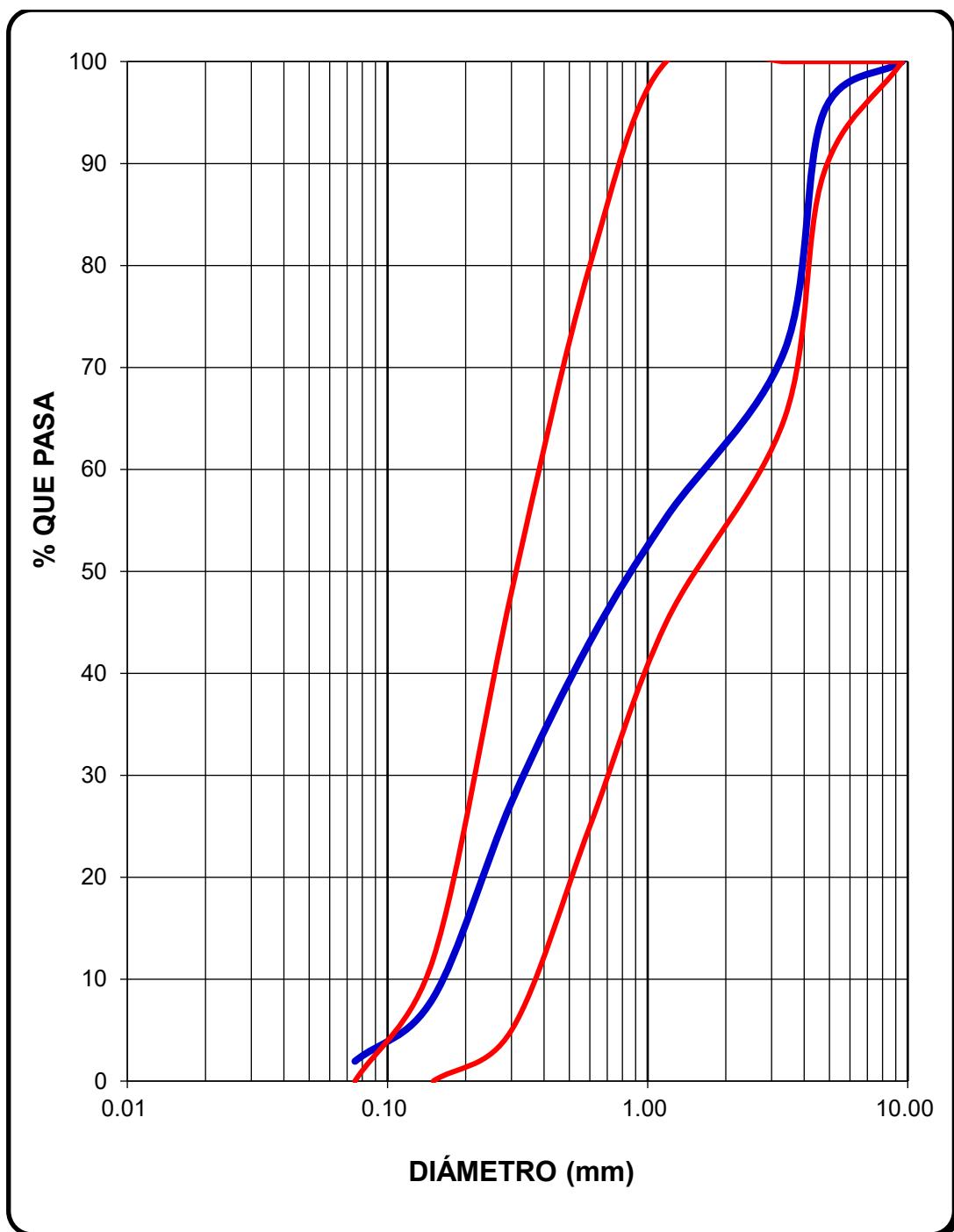
Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 29:

Granulometría de agregado fino

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
1/4"	6.35	0.00	0.000	0.000	100.000
N° 4	4.75	53.00	5.000	5.000	95.000
N° 8	2.36	247.60	23.358	28.358	71.642
N° 16	1.18	173.40	16.358	44.717	55.283
N° 30	0.60	129.20	12.189	56.906	43.094
N° 50	0.30	166.60	15.717	72.623	27.377
N° 100	0.15	203.60	19.208	91.830	8.170
N° 200	0.07	66.00	6.226	98.057	1.943
Fondo		20.60	1.943	100.000	0.000
TOTAL		1060.00	100.00	<i>Módulo de Fineza</i>	
				2.994	

Figura 08:
Curva de distribución granulométrica del agregado fino



Para el agregado fino, se determinaron los siguientes diámetros característicos y coeficientes de uniformidad: D60: 1.58mm, D30: 0.34mm y D10: 0.16mm. Estos valores arrojaron un Coeficiente de Uniformidad (Cu) de 9.88 y un Coeficiente de Curvatura (Cc) de 0.46.

b. Peso unitario suelto

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 30:

Cálculo del peso específico del agua

DESCRIPCIÓN	UND	Peso
Peso de la fiola	g	191.98
Peso de la fiola + agua	g	689.50
Volumen de la fiola	cm ³	500.00
Peso específico	g/cm ³	0.99504
Peso específico	Kg/cm ³	995.04

Tabla 31:

Cálculo del factor "f"

DESCRIPCIÓN	UND	Peso
Peso del molde	g	1995.45
Peso del molde llenado con agua	g	4816.00
Peso agua	Kg	2.82055
Factor f	1/m ³	352.78

Tabla 32:*Peso unitario suelto del agregado fino*

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso del recipiente	g	1995.00	1995.00	1995.00
Peso de muestra suelta + recipiente	g	6676.00	6569.00	6681.00
Peso de la muestra suelta	g	4681.00	4574.00	4686.00
Factor (f)	g	352.78	352.78	352.78
Peso Unitario Suelto	g	1.651	1.614	1.653
Peso Unitario Suelto	Kg/cm ³	1651	1614	1653
Promedio Peso Unitario Suelto		Kg/m³		1639

c. Peso unitario compactado

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 33:*Peso unitario compactado del agregado fino*

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso del recipiente	g	1995.00	1995.00	1995.00
Peso de muestra compactada + recipiente	g	7009.00	7017.00	7028.00
Peso de la muestra suelta	g	5014.00	5022.00	5033.00
Factor (f)	1/ m ³	352.78	352.78	352.78
Peso Unitario Compactado	g/ cm ³	1.769	1.772	1.776
Peso Unitario Compactado	Kg/m ³	1769	1772	1776
Prom. Peso Unitario Compactado	Kg/m³		1772	

d. Peso específico y absorción

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 34:

Peso específico y absorción del agregado fino

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso de fiola	g	191.98	191.98	191.98
Peso de la fiola + agua hasta menizco	g	689.50	689.50	689.50
Peso de la fiola + agua + muestra	g	1003.11	1003.44	1003.28
Peso de la muestra superficialmente seca	g	500.00	500.00	500.00
Peso de la muestra secada al horno	g	487.20	486.60	487.80
Volumen de agua añadida al frasco	g	311.13	311.46	311.30
Peso específico de masa	g/m ³	2.580	2.581	2.585
Peso específico de masa saturado superficialmente seco	g/m ³	2.647	2.652	2.650
Peso específico aparente	g/m ³	2.767	2.778	2.764
Absorción	%	2.627	2.754	2.501
Promedio peso específico de masa	g/m ³	2.580		
Promedio peso específico de masa saturado superficialmente seco	g/m ³	2.650		
Promedio peso específico aparente	g/m ³	2.770		
Promedio Absorción	%	2.600		

e. **Contenido de humedad**

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 35:

Contenido de humedad del agregado fino

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso del recipiente	g	358.00	357.00	361.00
Peso del recipiente + muestra húmeda	g	6537.00	5755.00	5894.00
Peso del recipiente + muestra seca	g	6287.00	5529.00	5671.00
Contenido de humedad	%	4.22	4.37	4.20
Promedio del contenido de humedad	%		4.26	

f. **Ensayo partículas < N° 200 para el Agregado Fino:**

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 36:

Material que pasa el tamiz N° 200

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso de muestra original	g	500.00	500.00	500.00
Peso de la muestra lavada	g	421.70	422.80	421.20
Peso del material que pasa el Tamiz N° 200	g	78.30	77.20	78.80
Material que pasa el tamiz N° 200	%	15.66	15.44	15.76
Promedio del contenido de humedad	%		15.60	

2. Determinación de las propiedades físicas mecánicas del agregado grueso

a. Granulometría

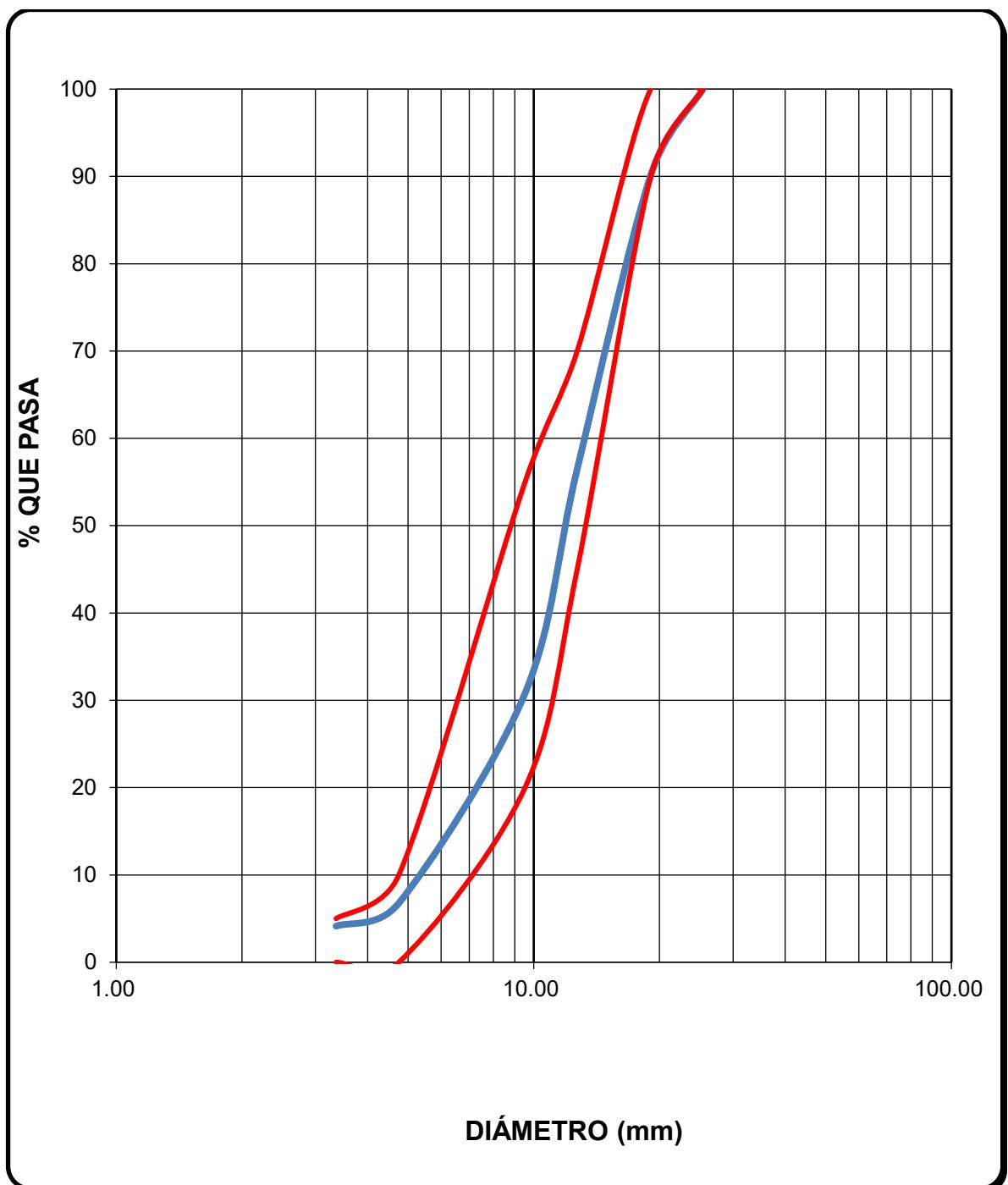
Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 37:

Granulometría del agregado grueso

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado
2 1/2"	63.00	0.00	0.000	0.000	100.000
2"	50.00	0.00	0.000	0.000	100.000
1 1/2"	37.50	0.00	0.000	0.000	100.000
1"	25.00	0.00	0.000	0.000	100.000
3/4"	19.00	790.00	9.88	9.88	90.13
1/2"	12.50	2692.00	33.65	43.53	56.48
3/8"	9.50	2054.00	25.68	69.20	30.80
N° 4	4.75	1922.00	24.03	93.23	6.78
N° 8	2.36	211.40	2.64	95.87	4.13
N° 16	1.18	143.00	1.79	97.66	2.35
N° 30	0.60	120.60	1.51	99.16	0.84
N° 50	0.30	60.00	0.75	99.91	0.09
N° 100	0.15	0.00	0.00	99.91	0.09
N° 200	0.07	0.00	0.00	99.91	0.09
Fondo	0	7.00	0.09	100.00	0.00
TOTAL		8000.00	100.00	<i>Módulo de Fineza</i>	
				6.648	

Figura 09:
Curva granulométrica del agregado grueso



Para el agregado fino, se determinaron los siguientes diámetros característicos y coeficientes de uniformidad: D60: 13.40mm, D30: 9.20mm y D10: 5.20mm. Estos valores arrojaron un Coeficiente de Uniformidad (Cu) de 2.58 y un Coeficiente de Curvatura (Cc) de 1.21.

b. Peso unitario suelto

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 38:

Cálculo del peso específico del agua

DESCRIPCIÓN	UND	Peso
Peso de la fiola	g	191.98
Peso de la fiola + agua	g	689.50
Volumen de la fiola	cm ³	500.00
Peso específico	g/cm ³	0.99504
Peso específico	Kg/cm ³	995.04

Tabla 39:

Cálculo del factor "f"

DESCRIPCIÓN	UND	Peso
Peso del molde	g	4226.00
Peso del molde lleno de agua	g	13558.00
Peso agua	Kg	9.3320
Factor f	1/m ³	106.627

Tabla 40:*Peso unitario suelto del agregado grueso*

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso del recipiente	g	4224.00	4224.00	4224.00
Peso de muestra suelta + recipiente	g	17456.00	17376.00	17480.00
Peso de la muestra suelta	g	13232.00	13152.00	13256.00
Factor (f)	1/m ³	106.627	106.627	106.627
Peso Unitario Suelto	g/cm ³	1.411	1.402	1.413
Promedio del P.U. Suelto	g/cm ³		1.409	
Promedio del P.U. Suelto	Kg/m ³		1409	

c. Peso unitario compactado

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 41:*Peso unitario suelto del agregado grueso*

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso del recipiente	g	4224.00	4224.00	4224.00
Peso de muestra Compactada + recipiente	g	18755.00	18812.00	18856.00
Peso de la muestra suelta	g	14531.00	14588.00	14632.00
Factor (f)	1/m ³	106.627	106.627	106.627
Peso Unitario Compactado	g/cm ³	1.549	1.555	1.560
Promedio peso unitario compactado	g/cm ³		1.555	
Prom. del P.U. Compactado	Kg/m ³		1555	

d. Peso específico y absorción

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 42:

Peso específico y absorción del agregado grueso

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso de muestra SSS + canastilla sumergida	g	2635.72	2637.20	2638.20
Peso de canastilla sumergida	g	775.00	775.00	775.00
Peso de la muestra superficialmente seca	g	3000.00	3000.00	3000.00
Peso de la muestra secada al horno	g	2962.10	2962.30	2963.30
Peso de la muestra sumergida en el agua	g	1860.72	1862.20	1863.20
Peso específico de masa	g/m ³	2.600	2.604	2.607
Peso específico de masa saturado superficialmente seco	g/m ³	2.633	2.637	2.639
Peso específico aparente	g/m ³	2.689	2.693	2.694
Absorción	%	1.279	1.273	1.238
Promedio peso específico de masa	g/m ³		2.600	
Promedio peso específico de masa saturado superficialmente seco	g/m ³		2.640	
Promedio peso específico aparente	g/m ³		2.690	
Promedio Absorción	%		1.300	

e. Contenido de humedad

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 43:

Contenido de humedad del agregado grueso

DESCRIPCIÓN	UND	M1	M2	M3
Peso del recipiente	g	555.00	558.00	560.00
Peso del recipiente + muestra húmeda	g	1855.00	1556.00	1669.00
Peso del recipiente + muestra seca	g	1851.00	1552.00	1665.00
Contenido de humedad	%	0.31	0.40	0.36
Promedio del contenido de humedad	%	0.36		

f. Resistencia a la Abrasión

Del procedimiento realizado se obtuvieron los siguientes resultados:

Datos:

- Gradación: B
- Equipo mecánico: Máquina de Los Ángeles
- N° de esferas: 11
- Velocidad (rev./mim): 30-33
- N° de revoluciones: 500
- TMN: 3/4"
- Peso de la muestra (g): 5000.00

Tabla 44:

Resistencia a la abrasión

Nº DE ENSAYOS	1°	2°	3°
Peso Inicial de la muestra seca al horno (g)	5000	5000	5000
Peso ret en malla N° 12 lav y sec al horno (g)	3052	3086	3091
% Desg. =((Pi -Pf) / Pi) x 100	38.96	38.28	38.18
Abrasión % Desgaste Promedio			38.00

3. Diseño de mezclas patrón $f'c$ 280 kg/cm²

3.1. Especificaciones

- La resistencia a la compresión fue de 280 Kg/cm², a los 28 días.
- Las condiciones de colocación exigen el empleo de mezclas de consistencia: plástica.

3.2. Materiales

- a. **Cemento:** el tipo de cemento a utilizarse es para usos generales donde no se requiere propiedades especiales. Por lo tanto, se utilizará el Cemento tipo I de la clasificación ASTM C 150. Peso específico: 3.110 g/cm³
- b. El **agua** es potable, tomado de la red pública de Cajamarca.
- c. **Características de los agregados:** los resultados descritos en la sección anterior se plasman en la siguiente tabla:

Tabla 45:*Características de los Agregados*

CARACTERÍSTICA FÍSICA	AGREGADO FINO		AGREGADO GRUESO	
	Valor	Unidad	Valor	Unidad
TAMAÑO MAXIMO NOMINAL			3/4	pulg
PESO ESPECIFICO DE MASA	2.580	g/cm ³	2.600	g/cm ³
PESO ESPECIFICO SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO	2.650	g/cm ³	2.640	g/cm ³
PESO ESPECIFICO APARENTE	2.770	g/cm ³	2.690	g/cm ³
PESO UNITARIO SUELTO	1639	Kg/m ³	1409	Kg/m ³
PESO UNITARIO COMPACTADO	1772	Kg/m ³	1555	Kg/m ³
CONTENIDO DE HUMEDAD	4.262	%	0.358	%
ABSORCION	2.600	%	1.300	%
MODULO DE FINURA	2.994	%	6.650	%
ABRASION	-		38.00	%
MATERIAL QUE PASA MALLA N° 200	15.600	%	-	%

3.3. Procedimiento

a. Determinación de la resistencia promedio

Para determinar la resistencia promedio realizamos el siguiente cálculo:

$$- F'_{cr} = 280 + 85 \text{ Kg/cm}^2$$

$$- F'_{cr} = 365 \text{ Kg/cm}^2$$

La resistencia promedio es de 365 Kg/cm².

b. Selección del Tamaño Máximo Nominal

De acuerdo a la granulometría del agregado grueso, le corresponde un TMN = 3/4".

c. Selección del Asentamiento

De acuerdo a las especificaciones, las condiciones de colocación requieren que la mezcla tenga una consistencia Plástica correspondiente a un asentamiento de 3" a 4".

d. Volumen Unitario de Agua

Según la Tabla 07, el volumen unitario de agua de diseño requerido para una mezcla de concreto sin aire incorporado, con un asentamiento de 3" a 4" y un TMN de 3/4", es de 205 l/m³.

e. Contenido de aire

De la Tabla N° 08 se determina que el contenido de aire atrapado para un agregado grueso de TMN= 3/4" es de 2.0%.

f. Relación agua/cemento

La relación agua/cemento se considerará solo por resistencia, debido a que no hay problemas de intemperismo, ni ataques por sulfatos u otro tipo de acciones que logren dañar el concreto. Por ende, realizamos la siguiente operación de interpolación:

$$F'_{cr} = 365 \text{ Kg/cm}^2$$

$$350 \text{ ---- } 0.48$$

$$365 \text{ ---- A/C}$$

$$400 \text{ ---- } 0.43$$

$$A/C = 0.465$$

Aunque la interpolación para una resistencia promedio de 365kg/cm² arrojó una relación A/c de 0.465, se adoptó una relación A/c de 0.50 para los fines de esta investigación. Esta decisión se tomó como resultado de ajustes internos realizados previamente al diseño patrón, buscando optimizar el desempeño o la trabajabilidad del concreto.

g. Factor cemento

El factor cemento se obtiene de la división de los siguientes valores:

$$\text{Factor Cemento (Kg/m}^3\text{)} = \frac{\text{Cantidad de agua de mezclado}}{\text{Relación A/C}}$$

$$\text{Factor cemento} = \frac{205}{0.5} = 410 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Factor cemento(bolsas/m}^3\text{)} = \frac{\text{Cantidad de agua de mezclado}}{\text{Relación A/C}}$$

$$\text{Factor cemento} = \frac{410}{42.5} = 9.65 \text{ bolsas/m}^3$$

h. Cálculo de volúmenes absolutos

A continuación, se muestra los volúmenes absolutos de los materiales:

- Cemento:

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Factor cemento}}{\text{Peso específico del cemento}}$$

$$\text{Cemento} = \frac{410}{3.11 \times 1000} = 0.131833 \text{ m}^3$$

- Agua:

$$\text{Agua} = \frac{\text{Volumen unitario de agua}}{\text{Peso específico del agua}}$$

$$\text{Agua} = \frac{205.0}{1.0 \times 1000} = 0.205 \text{ m}^3$$

- Aire:

$$\text{Aire} = 2 \% = 0.020 \text{ m}^3$$

- Agregados:

$$\text{Volumen de agregados} = 1 - 0.131833 - 0.205 - 0.02 = 0.643167 \text{ m}^3$$

Los módulos de combinación y porcentajes de agregados se pueden visualizar en la siguiente tabla:

Tabla 46:

Módulo de combinación

MODULO DE COMBINACION	5.236
MODULO DE COMBINACION CORREGIDO	5.136
% AGREGADO FINO	41.40
% AGREGADO GRUESO	58.60

Tabla 47:

Método de Volúmenes Absolutos

CEMENTO	0.131833	m ³
AGUA DE MEZCLADO	0.205	m ³
AIRE (%)	0.02	m ³
SUMA =	0.356833	m ³
VOLUMEN DE AGREGADOS	0.643167	m³

i. Contenido de agregados

Peso del agregado fino en estado seco=0.643167x41.40x2.580x10

Peso del agregado fino en estado seco=687 Kg/m³

Peso del agregado fino en estado seco=0.643167x58.60x2.600x10

Peso del agregado fino en estado seco=976 Kg/m³

j. Valores de diseño de mezcla

Las cantidades de materiales a ser empleados como valores de diseño serán:

- Cemento: 410.0 Kg
- Agua de diseño: 205 l
- Agregado fino seco: 687 Kg
- Agregado grueso seco: 976 Kg

k. Materiales corregidos por humedad

A continuación, se presentan los pesos de los materiales, ajustados por el contenido de humedad del agregado, que se emplearán en la mezcla:

- Cemento: 410.0 Kg
- Agua efectiva: 119.9 l
- Agregado fino húmedo: 706.79 Kg
- Agregado grueso húmedo: 991.87 Kg

I. Proporción en peso

$$\begin{array}{cccc}
 \text{Cemento} & \text{Ag. Fino} & \text{Ag. Grueso} & \text{Agua} \\
 \frac{410.0}{410.0} & : & \frac{706.79}{410.0} & : \frac{991.87}{410.0} & : \frac{199.9*42.5}{410.0}
 \end{array}$$

1: 1.72: 2.42: 20.7 l/bolsa

m. Proporción en Volumen

$$\text{Agregado} = \frac{\text{Proporción en peso} \times 42.50 \times 35.315}{\text{Peso unitario suelto seco}}$$

- Cemento = 1
- Agregado fino:

$$\text{Agregado fino} = \frac{1.72 \times 42.50 \times 35.315}{1639} = 1.53$$

- Agregado grueso:

$$\text{Agregado grueso} = \frac{2.42 \times 42.50 \times 35.315}{1409} = 2.54$$

- Agua:

$$\text{Agua} = \frac{199.9*42.5}{410.0} = 20.72 \text{ l/bolsa.}$$

1: 1.53: 2.54: 20.72 l/bolsa

n. Cantidad de material para nueve probetas cilíndricas

Medidas de la probeta cilíndrica:

- Altura: $h = 0.30\text{m}$
- Diámetro: $D = 0.15\text{m}$
- $Volumen = 0.0053 \text{ m}^3 \times 9 \text{ cilindros} = 0.057 \text{ m}^3$

Calculamos:

- Cemento: $410.0 \times 0.057 \times 1000 = 23,370.0 \text{ g.}$
- Agua efectiva: $199.9 \times 0.057 \times 1000 = 11,393.7 \text{ ml.}$
- Agregado fino húmedo: $706.79 \times 0.057 \times 1000 = 40,287.0 \text{ g.}$
- Agregado grueso húmedo: $991.87 \times 0.057 \times 1000 = 56,536.6 \text{ g}$

o. Cantidad de material para tres probetas prismáticas

Medidas de la probeta prismática:

- Altura: $h = 0.15\text{m}$
- Ancho: $D = 0.15\text{m}$
- Largo: $L = 0.50 \text{ m}$
- $Volumen = 0.011 \text{ m}^3 \times 3 \text{ probetas prismáticas} = 0.038 \text{ m}^3$

Calculamos:

- Cemento: $410.0 \times 0.038 \times 1000 = 15,580.0 \text{ g.}$
- Agua efectiva: $199.9 \times 0.038 \times 1000 = 7,595.8 \text{ ml.}$
- Agregado fino húmedo: $706.79 \times 0.038 \times 1000 = 26,858.0 \text{ g.}$
- Agregado grueso húmedo: $991.87 \times 0.038 \times 1000 = 37,691.1 \text{ g}$

4. Evidencias fotográficas

4.1. Características generales

Figura 10:

Agregado grueso – cantera ESGA



Figura 11:

Agregado fino – cantera ESGA



Figura 12:
Ladrillera CECAJ



Figura 13:
Chancadora operativa en cantera Aguilar



4.2. Propiedades de los materiales

Figura 14:

Muestreo agregado



Figura 15:

Ensayo de agregados



4.3. Elaboración de probetas de concreto

Figura 16:

Probetas cilíndricas elaboradas el día anterior a 24 horas de aireado



Figura 17:

Vaciado de probetas prismáticas



4.4. Ensayos de resistencia a la compresión y flexión

Figura 18:

Ensayo de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas



Figura 19:

Ensayo de la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas



Figura 20:

Probetas prismáticas a someter en ensayo de resistencia a la flexión



Figura 21:

Ensayo de resistencia a la flexión



5. Constancia de uso de laboratorio de ensayo de materiales para realización de tesis de investigación:



**Universidad Nacional de Cajamarca
FACULTAD DE INGENIERÍA
Laboratorio de Ensayo de Materiales**



El jefe del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Cajamarca expide, la siguiente:

CONSTANCIA

Al Bach. LUIS BRYAN PAREDES PAUCAR, Exalumno de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Cajamarca, que ha realizado en el Laboratorio de Ensayo de Materiales “Mg. Ing. Carlos Esparza Díaz” las siguientes actividades:

ÍTEM	DETALLE
01	Contenido de humedad
02	Análisis granulométrico
03	Peso unitario suelto y compactado
04	Peso específico
05	Ensayo material más fino que pasa malla N° 200
06	Elaboración especímenes de concreto
07	Ensayo resistencia a la compresión muestras cilíndricas.
08	Ensayo a flexión en muestras prismáticas

Para la Tesis Titulada: “INCIDENCIA DEL REMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO GRUESO DE CERRO POR ARCILLA COCIDA EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO f’c 280 Kg/cm² CAJAMARCA 2023”. Mencionadas actividades se desarrollaron durante los meses de setiembre a diciembre de 2023

Se expide el presente, para fines que se estime conveniente.

Cajamarca, 17 de enero de 2024.

Atentamente:

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA

Ing. Maturo Comisión Vargas
JEFE DEL LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES

c.c. a:
Archivo