



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA CIVIL**

TEMA:

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA
DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON
HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA DE
ARROZ (CCA)”

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

VERA REYES ALEXIS NAKARY
VILLA GARCÍA ROBINSON MARCOS

TUTOR:

ING. RAÚL ANDRÉS VILLAO VERA, Mg.

LA LIBERTAD, ECUADOR

2025

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

TEMA:

**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA
DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON
HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA
DE ARROZ (CCA)**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

**VERA REYES ALEXIS NAKARY
VILLA GARCÍA ROBINSON MARCOS**

TUTOR:

ING. RAÚL ANDRÉS VILLAO VERA, Mg.

LA LIBERTAD – ECUADOR

2025

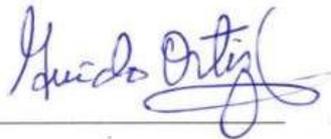
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, PhD.
DIRECTORA DE CARRERA DE
INGENIERIA CIVIL



Ing. Raúl Villao Vera, MSc.
DOCENTE TUTOR



Ing. Guido Ortiz Safadi, Mg.
DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Richard Ramírez Palma, MSc.
DOCENTE UIC

DEDICATORIA

Dedico este logro a quienes han caminado a mi lado con amor y constancia.

A mi madre, por sus oraciones y fe inquebrantable; a mi padre, por su ejemplo de sacrificio silencioso.

A mi compañero de tesis, por el trabajo conjunto basado en el respeto y la responsabilidad compartida.

Y a mí misma, por no rendirme, por creer que cada esfuerzo valió la pena, y por demostrarme que los sueños sí se alcanzan cuando se trabaja con el corazón.

VERA REYES ALEXIS NAKARY

Dedico este esfuerzo a Dios, que me acompañó con sabiduría en cada jornada de aprendizaje.

A mis padres, por todo lo que soy y todo lo que aún aspiro a ser gracias a ellos.

A mis hermanos, por ser mi soporte silencioso y siempre estar presentes.

A mis amigos verdaderos, con quienes compartí risas, frustraciones y grandes lecciones durante la carrera.

A mi compañera de tesis, por su colaboración responsable y por el respeto mutuo que marcó nuestro trabajo.

A cada maestro de la vida, dentro y fuera del aula, que me inspiró a no conformarme, a cuestionar, a buscar siempre mejorar.

Y a mi yo del pasado, que soñaba con este día: lo logramos.

VILLA GARCÍA ROBINSON MARCOS

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “**Análisis del comportamiento de la resistencia del hormigón tradicional a la compresión con hormigón adicionado con cenizas de cáscara de arroz (CCA)**” elaborado por los estudiantes Vera Reyes Alexis Nakary y Villa García Robinson Marcos, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema anti plagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un 4% de la valoración permitida. Se adjunta reporte de similitud.



Ing. Raúl Andrés Villao Vera, Msc

C.I.: 0924204240

DOCENTE TUTOR

TESIS VERA NAKARY Y VILLA ROBINSON 4



Nombre del documento: TESIS VERA NAKARY Y VILLA ROBINSON 4.docx	Depositante: RAUL ANDRES VILLAO VERA	Número de palabras: 19.024
ID del documento: 51c354acce0fa076e5837ccd8f89d380d2d1403f	Fecha de depósito: 3/6/2025	Número de caracteres: 117.125
Tamaño del documento original: 650,82 kB	Tipo de carga: interface	
	fecha de fin de análisis: 3/6/2025	

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuente considerada como idéntica

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	TESIS VERA NAKARY Y VILLA ROBINSON 3.docx TESIS VERA NAKARY Y ... #11c560 El documento proviene de mi biblioteca de referencias	96%		Palabras idénticas: 96% (18.244 palabras)

Fuentes principales detectadas

Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	TESIS VERA NAKARY Y VILLA ROBINSON.docx TESIS VERA NAKARY Y VI... #0c589f El documento proviene de mi biblioteca de referencias 19 fuentes similares	76%		Palabras idénticas: 76% (14.429 palabras)
2	TESIS VERA NAKARY Y VILLA ROBINSON.docx TESIS VERA NAKARY Y VI... #6df5ca El documento proviene de mi grupo 15 fuentes similares	27%		Palabras idénticas: 27% (5013 palabras)
3	TESIS 2 VERA NAKARY Y VILLA ROBINSON.docx TESIS 2 VERA NAKARY ... #5c213c El documento proviene de mi biblioteca de referencias	2%		Palabras idénticas: 2% (386 palabras)
4	SIN TITULO, SIN CITA, TESIS OFICIAL RENATO PLAGIO.docx SIN TITUL... #4308a2 El documento proviene de mi biblioteca de referencias 8 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (71 palabras)
5	Documento de otro usuario #d169e El documento proviene de otro grupo	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

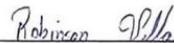
Nº	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	repositorio.ucv.edu.pe https://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/20.500.12692/109206/1/Porotilla_OEJ-SD.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (39 palabras)
2	latam.redilat.org https://latam.redilat.org/index.php/rt/article/view/2178	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (37 palabras)
3	ciencialatina.org https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/7409#:~:text=Los resultados indican ...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (34 palabras)
4	hdl.handle.net Cenizas de residuos agr?colas como reemplazo parcial de ceme... https://hdl.handle.net/20.500.14138/5803	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (31 palabras)
5	hdl.handle.net Comportamiento Mec?nico de Concreto con Adici?n de Ceniza d... https://hdl.handle.net/20.500.14138/4956	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Vera Reyes Alexis Nakary y Villa García Robinson Marcos, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**Análisis del comportamiento de la resistencia del hormigón tradicional a la compresión con hormigón adicionado con cenizas de cáscara de arroz (CCA)**”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería civil, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

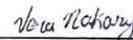
Atentamente,



Robinson Marcos Villa García

Autor de Tesis

C.I. 0940509524



Vera Reyes Alexis Nakary

Autor de Tesis

C.I. 0928079821

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Villao Vera Raúl Andrés, MSc.

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “**ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA)**”, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil elaborado por los estudiantes ALEXIS NAKARY VERA REYES y ROBINSON MARCOS VILLA GARCIA, egresados de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

FIRMA DEL TUTOR



Ing. Raúl Villao Vera, Msc.

C.I. 0924204240

CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA

Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
Celular: 0962183538
Correo: bettyruthgomez@educacion.gob.ec

CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **BETTY RUTH GÓMEZ SUÁREZ**, en mi calidad de **LICENCIADA EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN Y MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el Trabajo de Integración Curricular previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, denominado **“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA).”**, de los estudiantes: **VERA REYES ALEXIS NAKARY** y **VILLA GARCÍA ROBINSON MARCOS**

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo a las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

En cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo a los interesados hacer uso del presente como estimen conveniente.

Santa Elena, 30 de Mayo del 2025



Lcda. Betty Ruth Gómez Suárez, Mgtr.
CI. 0915036529

LICENCIADO EN CIENCIAS DE LA EDUCACIÓN
MAGÍSTER EN DISEÑO Y EVALUACIÓN DE MODELOS EDUCATIVOS
Nº DE REGISTRO DE SENECYT 1050-2014-86052892

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios por ser la luz en mi camino, por fortalecerme en los momentos de incertidumbre y acompañarme en cada paso de esta travesía académica.

A mi madre, por enseñarme a ser fuerte, perseverante y luchar por mis ideales; a mi padre, por su ejemplo de responsabilidad y compromiso.

Gracias infinitas al Ingeniero Raúl Villao Vera, por su dedicación y orientación durante el desarrollo de esta investigación; su paciencia y guía han sido claves en este proceso.

A mis amigos cercanos, por ser refugio en los días difíciles y compartir conmigo alegrías y aprendizajes.

Y, finalmente, a cada docente que sembró en mí el deseo de superación, gracias por ser parte de mi formación.

VERA REYES ALEXIS NAKARY

Agradezco primeramente a Dios, fuente de fuerza y sabiduría, por acompañarme en cada etapa de mi vida académica.

A mis padres, quienes con esfuerzo y amor incondicional han sido el motor de mis sueños y logros.

Al Ingeniero Raúl Villao Vera, por su apoyo como tutor de titulación, guiándome con sus conocimientos y experiencia.

A los docentes y directivos de la Carrera de Ingeniería Civil, por sus enseñanzas y su vocación profesional que dejaron huella en mi formación.

Y a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, por brindarme la oportunidad de desarrollarme académicamente y convertirme en un profesional íntegro.

VILLA GARCÍA ROBINSON MARCOS

TABLA DE CONTENIDO

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
DEDICATORIA	iii
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	vii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	viii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA	ix
AGRADECIMIENTOS	x
TABLA DE CONTENIDO	xii
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABLAS	xx
LISTA DE ECUACIONES	xxiii
RESUMEN.....	xxiv
ABSTRACT	xxv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	26
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	27
1.2. ANTECEDENTES.....	29
1.3. HIPÓTESIS.....	34
1.3.1. Hipótesis General.....	34
1.3.2. Hipótesis Específicas.....	35
1.4. OBJETIVOS	35
1.4.1. Objetivo General.....	35
1.4.2. Objetivos Específicos.....	35
1.5. ALCANCE.....	36
1.6. VARIABLES.....	36

1.6.1.	Variables Independientes.....	36
1.6.2.	Variables Dependientes.	37
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO		38
2.1	PUZOLANAS	38
2.1.1	Puzolanas naturales	39
2.1.2	Puzolanas artificiales.....	40
2.2	CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA).....	41
2.2.1.	Descripción de la cáscara de arroz	41
2.2.2.	Obtención de la ceniza de cáscara de arroz (CCA).....	43
2.2.3.	Propiedades de la ceniza de la cáscara de arroz (CCA).....	43
2.3	HORMIGÓN.....	46
2.3.1.	Definición y componentes.....	46
2.3.2.	Cemento	47
2.3.3.	Agua	50
2.3.4.	Aditivos	52
2.3.5.	Los agregados.....	53
2.3.6.	Propiedades del hormigón fresco	62
2.3.7.	Propiedades del hormigón endurecido	63
2.3.8.	Comportamiento del hormigón	67
2.3.9.	Curado del hormigón.....	69
2.4	PRUEBA DE ASENTAMIENTO – CONO DE ABRAMS.....	70
2.4.1.	Materiales	72
2.4.2.	Procedimiento	72
2.5	DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN SEGÚN LA NORMA ACI 221	73
2.5.1.	Determinación de la resistencia de diseño	74
2.5.2.	Determinación del revenimiento	75
2.5.3.	Selección del tamaño máximo del agregado.....	76

2.5.4.	Estimación del contenido del aire y del contenido de agua de mezclado. 76	
2.5.5.	Selección de la relación agua – cemento (a/c).	77
2.5.6.	Cálculo del contenido de cemento.	77
2.5.7.	Estimación de las proporciones de agregados.....	77
2.5.8.	Ajuste por humedad de los agregados.....	80
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA		82
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN	82
3.1.1.	Tipo.	82
3.1.2.	Nivel.....	82
3.2.	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	83
3.2.1.	Método.	83
3.2.2.	Enfoque.	83
3.2.3.	Diseño.	83
3.3.	POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO.....	85
3.3.1.	Población.....	85
3.3.2.	Muestra.....	86
3.3.3.	Muestreo.....	86
3.4.	UBICACIÓN Y SECTOR DE ESTUDIO	86
3.5.	METODOLOGÍA DEL O.E.1.: CARACTERIZAR LOS MATERIALES COMPONENTES PRESELECCIONADOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA) MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO NORMATIVOS	87
3.6.	METODOLOGÍA DEL O.E.2.: ELABORAR DIFERENTES DISEÑOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN MAYOR O IGUAL A $F'_{C}=210$ KG/CM ² INCORPORANDO CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA) EN PORCENTAJES DE 1%, 3% Y 5% APLICANDO LA NORMATIVA ASTM C618-19, PARA CARACTERIZAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS, CON EL FIN DE EVALUAR SU DESEMPEÑO EN TÉRMINOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y TRABAJABILIDAD	88

3.7.	METODOLOGÍA DEL O.E.3.: COMPARAR LOS COSTOS DE ELABORACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CON EL PORCENTAJE DE CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA) MÁS ADECUADO, EVALUANDO LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS DE CCA COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO	89
3.8.	OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	91
3.9.	EJECUCIÓN, ELABORACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS	93
3.9.1.	Agregados gruesos y finos	93
3.9.2.	Cemento	110
3.9.3.	Ceniza de cascara de arroz (CCA)	112
3.9.4.	Agua	115
3.10.	ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE HORMIGÓN	117
3.11.	ENSAYO DE REVENIMIENTO DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO.....	119
3.12.	ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN	120
3.13.	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	122
	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	125
4.1.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO VOLUMETRICO SUELTO Y VARILLADO DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 858).....	125
4.1.1.	Peso volumétrico suelto del agregado grueso y fino.....	125
4.1.2.	Peso volumétrico varillado del agrega grueso	126
4.2.	RESULTADOS DE LOS ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 696):.....	126
4.2.1.	Granulometría del agregado grueso	126
4.2.2.	Granulometría del agregado fino	127

4.3.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (NTE INEN 857) Y AGREGADO FINO (NTE INEN 856)	129
4.3.1.	Densidad y absorción del agregado grueso	129
4.3.2.	Densidad y absorción del agregado fino	129
4.4.	RESULTADOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 862)	130
4.4.1.	Contenido de humedad del agregado grueso	130
4.4.2.	Contenido de humedad del agregado fino.....	130
4.5.	RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES	131
4.6.	DOSIFICACIÓN $f'c=210$ kg/cm ²	132
4.6.1.	Muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	132
4.6.2.	Muestra $f'c=210$ kg/cm ² con 1% de reemplazo por ceniza de cascara de arroz.	133
4.6.3.	Muestra $f'c=210$ kg/cm ² con 3% de reemplazo por ceniza de cascara de arroz.	135
4.6.4.	Muestra $f'c=210$ kg/cm ² con 5% de reemplazo por ceniza de cascara de arroz.	137
4.6.5.	Análisis y discusión de resultados de las muestras por cada porcentaje de ceniza de cascara de arroz.	139
4.6.6.	Resistencia promedio a 7 días	139
4.6.7.	Resistencia promedio a 14 días	140
4.6.8.	Resistencia promedio a 21 días	140
4.6.9.	Resistencia promedio a 28 días	141
4.6.10.	Análisis y discusión de los resultados de las muestras de $f'c= 210$ kg/cm ² con distintos % de reemplazo por cenizas de cascar de arroz por edad.....	142
4.7.	ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)	143
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		148
5.1	CONCLUSIONES	148

5.2 RECOMENDACIONES	149
BIBLIOGRAFÍA	151
ANEXOS	155

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de las puzolanas	41
Figura 2 Vista microscópica del lado exterior de la cáscara de arroz.	42
Figura 3 Vista microscópica del lado interior de la cáscara de arroz.....	42
Figura 4 Producción de la cáscara de arroz en Ecuador	43
Figura 5 Dosificación de los componentes del hormigón.....	47
Figura 6 Proceso de transformación del cemento	48
Figura 7 Esquema de formación e hidratación del cemento	48
Figura 8 Comportamiento del hormigón.....	68
Figura 9 Esfuerzo promedio requerido (f'_{cr}).....	74
Figura 10 Ejemplificación del revenimiento.....	75
Figura 11 Revenimiento recomendados para diversos tipos de construcción.....	75
Figura 12 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire.....	76
Figura 13 Relación agua/cemento	77
Figura 14 Volumen de agregado grueso (m ³).....	78
Figura 15 Plan de recolección de información.....	85
Figura 16 Enrasado y pesado de la muestra (piedra $\frac{3}{4}$ ")	95
Figura 17 Tamizado del agregado grueso (piedra $\frac{3}{4}$ ").....	98
Figura 18 Tamizado del agregado fino (arena fina).....	98
Figura 19 Proceso de sumergencia y lavado del agregado grueso para su determinación de la absorción.....	101
Figura 20 Secado superficial de la arena fina	103
Figura 21 Ensayo del cono truncado	104
Figura 22 Ensayo gravimétrico; llenado de agua y material en el picnómetro..	104
Figura 23 Ensayo de humedad; secado y pesado de la muestra.....	107
Figura 24 Quemado de la cascara de arroz	115
Figura 25 Almacenamiento y molienda de la ceniza de cascara de arroz (CCA)	115
Figura 26 Producto final de la ceniza de cascara de arroz (CCA)	115
Figura 27 Pesaje de los agregados de acuerdo con su resistencia de diseño	118

Figura 28 Incorporación de los agregados hasta alcanzar una mezcla homogénea de hormigón	118
Figura 29 Ensayo del cono de Abrams; medición de asentamiento (slump)	120
Figura 30 Elaboración y curado de las probetas de hormigón.....	121
Figura 31 Medidas geométricas y peso de las probetas	122
Figura 32 Ensayo a la compresión de las probetas de hormigón	123
Figura 33 Registro de los valores de la carga máxima aplicada.	124
Figura 34 Curva granulométrica del agregado grueso.....	127
Figura 35 Curva granulométrica del agregado fino	128
Figura 36 Gráfico de curvas de "resistencia vs. edad"	138
Figura 37 Gráfico de curvas de "Resistencia vs. %CCA"	142

LISTA DE TABLAS

Tabla 1	Composición química de las puzolanas.....	39
Tabla 2	Composición química de la CCA.....	44
Tabla 3	Propiedades de la ceniza de la cáscara de arroz	44
Tabla 4	Condiciones de combustión del CCA.....	45
Tabla 5	Tipos de cemento.....	49
Tabla 6	Tipos de cemento y porcentajes de composición	49
Tabla 7	Tipos especiales de cemento.....	50
Tabla 8	Contenido máximo de impurezas en el agua.....	51
Tabla 9	Contenido máximo de sustancias nocivas	51
Tabla 10	Porcentajes máximos de finos admisibles	55
Tabla 11	Colores normalizados para colorimetría.....	56
Tabla 12	Descripción del árido fino de acuerdo con el comparador	56
Tabla 13	Requisitos granulométricos	57
Tabla 14	Límites para las sustancias perjudiciales en el árido grueso para el hormigón de cemento portland.....	58
Tabla 15	Especificaciones para la carga.....	59
Tabla 16	Gradación de las muestras de ensayo	59
Tabla 17	Porcentaje de masa que pasa por los tamices normalizados.....	60
Tabla 18	Característica de la mezcla según su asentamiento	62
Tabla 19	Características de la prueba de asentamiento con el cono de Abrams ..	71
Tabla 20	Tipo de hormigón y porcentaje de ceniza de cáscara de arroz (CCA) ..	84
Tabla 21	Operacionalización de variables.....	91
Tabla 22	Tabla resumen de equipos y procedimientos.....	107
Tabla 23	Resumen de equipos y procedimiento del ensayo de abrasión de Los Ángeles.....	109
Tabla 24	Análisis químico del cemento HOLCIM GU.....	110
Tabla 25	Composición del cemento HOLCIM GU.....	111
Tabla 26	Propiedades físicas del cemento HOLCIM GU	111
Tabla 27	Requisitos de componentes minerales en puzolana.....	112
Tabla 28	Composición química típica de la CCA	113

Tabla 29 Características físicas de la CCA	114
Tabla 30 Comparación entre la CCA y otros materiales cementantes suplementarios.....	114
Tabla 31 Requisitos fisicoquímicos del agua para uso en hormigón (según ASTM C1602-18a).....	116
Tabla 32 Comparación de tipos de agua utilizadas en el hormigón	117
Tabla 33 Dosificación para 8 cilindros de ensayo (kg/cm ²)	119
Tabla 34 Determinación de la masa unitaria suelta del agregado grueso.....	125
Tabla 35 Determinación de la masa unitaria suelta del agregado fino.....	126
Tabla 36 Determinación de la masa unitaria compactada del agregado grueso .	126
Tabla 37 Análisis granulométrico del agregado grueso	127
Tabla 38 Análisis granulométrico del agregado fino.....	128
Tabla 39 Determinación de densidad y porcentaje de absorción del agregado grueso	129
Tabla 40 Determinación de densidad y porcentaje de absorción de árido fino..	130
Tabla 41 Determinación del contenido de humedad del árido grueso	130
Tabla 42 Determinación del contenido de humedad del árido fino.....	131
Tabla 43 Resultados del ensayo de abrasión de Los Ángeles – Agregado grueso	131
Tabla 44 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	132
Tabla 45 Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenías de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	133
Tabla 46 Resistencias promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ²	133
Tabla 47 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm ² con 1% de reemplazo por ceniza de cascara de arroz	134
Tabla 48 Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm ² con 1% de reemplazo de ceniza de arroz	134
Tabla 49 Resistencias promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ² con 1% de cenizas de cascara de arroz	135
Tabla 50 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm ² con 3% de reemplazo por ceniza de cascara de arroz	135

Tabla 51 Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm ² con 3% de reemplazo de ceniza de arroz	136
Tabla 52 Resistencias promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ² con 3% de cenizas de cascara de arroz	136
Tabla 53 Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm ² con 5% de reemplazo por ceniza de cascara de arroz	137
Tabla 54 Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm ² con 5% de reemplazo de ceniza de arroz	137
Tabla 55 Resistencias promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210$ kg/cm ² con 5% de cenizas de cascara de arroz	138
Tabla 56 Resistencia a los 7 días para una resistencia $f'c= 210$ kg/cm ² con distintos % de reemplazo por CCA.....	140
Tabla 57 Resistencia a los 14 días para una resistencia $f'c= 210$ kf/cm ² con distintos % de reemplazo por CCA.....	140
Tabla 58 Resistencia a los 21 días para una resistencia $f'c= 210$ kf/cm ² con distintos % de reemplazo por CCA.....	141
Tabla 59 Resistencia a los 28 días para una resistencia $f'c= 210$ kf/cm ² con distintos % de reemplazo por CCA.....	141
Tabla 60 Análisis de precios unitario de Hormigón patrón de $f'c= 210$ kg/cm ²	145
Tabla 61 Análisis de precios unitario de Hormigón patrón de $f'c= 210$ kg/cm ² con sustitución del 3% de CCA	146

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Esfuerzo máximo de tracción en función de la resistencia a la compresión	66
Ecuación 2 Esfuerzo máximo de tracción en función de la resistencia a la compresión	66
Ecuación 3 Cálculo del módulo de elasticidad	69
Ecuación 4 Contenido de cemento	77
Ecuación 5 Contenido de agregado grueso	78
Ecuación 6 Contenido de agregado fino	79
Ecuación 7 Volumen del agregado fino.....	79
Ecuación 8 Masa del agregado fino	79
Ecuación 9 Masa del agregado grueso corregida	80
Ecuación 10 Masa del agregado fino corregida	80
Ecuación 11 Contenido de agua corregido	81
Ecuación 12 Fórmula para calcular la resistencia a la compresión.....	123

“ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA)”

Autores: Vera Reyes Alexis Nakary

Villa García Robinson Marcos

Tutor: Ing. Raúl Villao Borbor, Mg.

RESUMEN

En este trabajo de investigación se diseñaron mezclas de hormigón utilizando ceniza de cáscara de arroz (CCA) como reemplazo parcial del cemento en proporciones del 1%, 3% y 5%, con el objetivo de evaluar su efecto sobre la resistencia a la compresión y determinar el porcentaje óptimo para cumplir con una resistencia de diseño de 210 kg/cm². Se caracterizaron los materiales siguiendo las normativas ASTM y NEC, se elaboraron probetas cilíndricas según el método ACI 211 y se ensayaron a compresión a los 7, 14, 21 y 28 días. Los resultados mostraron que la mezcla con 3% de CCA alcanzó una resistencia promedio de 200.83 kg/cm² a los 28 días, lo que representa una disminución del 1.82% respecto al concreto patrón (204.55 kg/cm²). Las dosificaciones con 1% y 5% de CCA alcanzaron resistencias de 172.58 kg/cm² y 178.75 kg/cm², con reducciones del 15.63% y 12.61% respectivamente. Se concluye que el reemplazo del 3% de cemento por CCA presenta el mejor comportamiento mecánico entre las dosificaciones estudiadas. Adicionalmente, se realizó un análisis de precios unitarios, determinando que la mezcla con 3% de CCA reduce levemente el costo del hormigón en un 0.46% en comparación con el concreto convencional.

Palabras Clave: Ceniza de cáscara de arroz, hormigón, mezcla, dosificación, resistencia a la compresión.

“ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF THE STRENGTH OF TRADITIONAL CONCRETE TO COMPRESSION WITH CONCRETE ADDITIONED WITH RICE HUSK WELL ASH (CCA)”

Authors: Vera Reyes Alexis Nakary
Villa Garcia Robinson Marcos
Tutor: Ing. Raúl Villao Borbor, Mg.

ABSTRACT

This research project involved designing concrete mixtures using rice husk ash (RHA) as a partial replacement for cement in proportions of 1%, 3%, and 5%, with the aim of evaluating its effect on compressive strength and determining the optimal percentage to meet a design strength of 210 kg/cm². The materials were characterized according to ASTM and NEC standards, cylindrical specimens were prepared using the ACI 211 method, and compressive tests were conducted at 7, 14, 21, and 28 days. The results showed that the mixture with 3% RHA reached an average compressive strength of 200.83 kg/cm² at 28 days, representing a 1.82% decrease compared to the control concrete (204.55 kg/cm²). Mixtures with 1% and 5% RHA achieved strengths of 172.58 kg/cm² and 178.75 kg/cm², with reductions of 15.63% and 12.61%, respectively. It is concluded that replacing 3% of cement with RHA yields the best mechanical performance among the studied mixtures. Additionally, a unit price analysis was conducted, determining that the mix with 3% CCA slightly reduces the cost of concrete by 0.46% compared to conventional concrete.

Keywords: Rice husk ash, concrete, mixture, dosage, compressive strength.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

Últimamente, la industria de la construcción se ha enfrentado con dificultades relacionadas a la sostenibilidad y su efecto en el medio ambiente. Uno de los retos más importantes es, definitivamente, la producción de cemento, este proceso libera una cantidad enorme de dióxido de carbono (CO_2) al planeta, lo cual, en realidad, empeora el asunto del cambio climático (Mehta & Monteiro Paulo. J. M., 2014). Ahora, para abordar este problema, la gente está empleando materiales reciclados en el hormigón. Parece una solución bastante buena, para reducir la huella de carbono, y también, para que el hormigón siga funcionando sin problemas (Andrés & César, 2012).

La ceniza de cáscara de arroz, o CCA como se conoce, es un subproducto del arroz, y tiene un potencial significativo para usarla en dosificar hormigón. Se consigue quemando las cáscaras, y lo bueno es que tiene sílice reactiva. Eso es importante porque hace que el hormigón sea más resistente y, además, reduce la cantidad de cemento que se necesita para la mezcla (Gonzales & Ventura, 2021). También ayuda con el tema de la gestión de los residuos agrícolas de manera sostenible, ya que reduce problemas de contaminación que pueden venir al final cuando hay que deshacerse de ellos.

En este análisis, el objetivo primordial es examinar detenidamente la respuesta de la resistencia a la compresión del hormigón tradicional, a la vez que se compara con la sustitución del CCA por cemento en distintas proporciones, a saber: el 1%, 3%, e incluso el 5%, con la finalidad de alcanzar la resistencia prevista en el diseño, que es de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, por lo que se debe tener principal cuidado en cada dato.

El análisis se basa en las normas internacionales, como la ASTM C618-19, la cual proporciona las debidas indicaciones de cómo usar las puzolanas naturales o calcinadas en el hormigón. También aparece la NTE INEN 0496, norma ecuatoriana, para el tema del índice de actividad puzolánica. Estas normas son cruciales porque son las que demuestran que es viable usar la CCA. Además, validan el impacto que tiene en la resistencia, como también la durabilidad (ASTM, 2019).

La meta primordial de este estudio es examinar, de lleno, los beneficios ecológicos de incorporar Ceniza de Cáscara de Arroz, conocida como CCA, en la mezcla del hormigón, considerando las potenciales reducciones de las emisiones de dióxido de carbono y la valorización de desechos agrícolas, factores que le dan un impulso significativo a que la construcción sea sostenible. En el laboratorio, el análisis se centra en investigar si las mezclas, con esta CCA, logran obtener una resistencia a la compresión parecida o incluso superior a la que se obtiene del hormigón estándar. Todo esto, pues, teniendo en mente su aplicación en viviendas residenciales, que, por lo general, no exceden los dos niveles de altura. Evidentemente, se evalúa la durabilidad y cómo reacciona este material en diversos escenarios, basándose en las directrices establecidas en la Norma Ecuatoriana de la Construcción del 2015 y otras regulaciones clave.

El trabajo de investigación se divide de esta forma: el capítulo I se sumerge de lleno en la introducción, el problema, las hipótesis y los objetivos que son lo más relevante. Luego, se presenta el Capítulo II donde se expone el marco teórico, y se muestra conceptos básicos. En el Capítulo III se detalla la metodología utilizada, diseñando las mezclas y explicando paso a paso los ensayos realizados, después, es el momento del capítulo IV, donde se manifiestan los resultados y la discusión de estos para un mejor entendimiento. Y para finalizar, en el capítulo V, es donde se cierra la investigación con las conclusiones y las recomendaciones a las que se llegó conforme a la parte aplicativa del proyecto.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En Ecuador, la ceniza de cáscara de arroz (CCA), es un subproducto agroindustrial que surge en cantidades gigantescas, especialmente en las áreas arroceras del país. Este desecho, concentra sílice amorfa en porcentajes considerables, un elemento que es reactivo en gran medida y sirve para usar como complemento en las cantidades de cemento que se requieren para la elaboración del hormigón. Pero esta práctica aún no se ha estudiado mucho en este país, especialmente en lugares como Santa Elena, donde el clima, y la manera de construir, podrían influir significativamente en cómo funciona.

La creciente necesidad de implementar prácticas sostenibles en la industria de la construcción, debido al alto impacto ambiental asociado a la producción de cemento

Portland, genera un interés particular en investigar alternativas como la inclusión de ceniza de cáscara de arroz (CCA) en el hormigón. Las investigaciones realizadas en otras partes del país ya han mostrado algo interesante, reemplazar en pequeñas cantidades el cemento con ceniza de cáscara de arroz, mejora propiedades mecánicas, específicamente la resistencia a la compresión a la que puede llegar. Y también ayuda a bajar los costos y las emisiones de dióxido de carbono, CO₂. Pero no se ha investigado a fondo si esto funciona bien en Santa Elena, tampoco si la resistencia es lo suficiente para cumplir con los requisitos de construcción, los típicos estándares de resistencia, como $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$.

Adicionalmente, la producción de cemento Portland tiene un alto costo económico y ambiental debido a la liberación de aproximadamente 0,9 toneladas de CO₂ por cada tonelada producida (Scrivener et al., 2018). Ante este panorama, el uso de ceniza de cáscara de arroz (CCA) podría ser una solución viable para reducir la dependencia del cemento, gestionar residuos agroindustriales y avanzar hacia una construcción más sostenible. La falta de estudios específicos que aborden estas problemáticas que limitan la adopción de esta alternativa en proyectos de construcción.

Además, es fundamental evaluar propiedades como la trabajabilidad del hormigón con ceniza de cáscara de arroz (CCA). Y es que, una mezcla bien hecha debería asegurar, no solo la resistencia, sino que también, facilidad para su manipulación durante su aplicación.

En cuanto a sostenibilidad, la investigación concuerda totalmente con el objetivo 11 de la Agenda 2030 de la ONU, esto es, "lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles" (Organización de las Naciones Unidas (ONU), 2023). Este objetivo impulsa la reducción de impactos ambientales y el uso eficaz de recursos en la construcción, algo que podría lograrse al añadir ceniza de cáscara de arroz (CCA) al hormigón.

Por tanto, la problemática general se enmarca en la siguiente interrogante:

¿Cómo influye la incorporación de ceniza de cáscara de arroz (CCA) en las propiedades mecánicas, trabajabilidad y durabilidad del hormigón producido en las condiciones locales de Santa Elena, y cómo se compara su desempeño técnico y económico con el hormigón tradicional?

De esta pregunta general se derivan los siguientes problemas específicos (P.E.):

P.E.1. ¿Cómo afecta la inclusión de ceniza de cáscara de arroz (CCA) a la trabajabilidad del hormigón en las condiciones climáticas y constructivas de Santa Elena?

P.E.2. ¿Qué impacto tiene la sustitución parcial del cemento Portland por ceniza de cáscara de arroz (CCA) (en proporciones de 1%, 3% y 5%) en la resistencia a la compresión del hormigón?

P.E.3. ¿Cuál es la comparación de costos entre el hormigón tradicional y el hormigón con sustitución de ceniza de cáscara de arroz (CCA) por cemento en términos de producción y sostenibilidad?

Por consiguiente, este estudio busca determinar la viabilidad técnica y económica de la inclusión de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustituto parcial en el hormigón, contribuyendo al desarrollo sostenible y a la adopción de prácticas más eficientes en la construcción en la provincia de Santa Elena, Ecuador.

1.2. ANTECEDENTES

A nivel mundial, podemos citar el trabajo de (Salas, Gómez, et al., 1986) titulado: “Hormigones con ceniza de cáscara de arroz (R.H.A.): influencia del curado y del agua de amasado”, el cual analiza el impacto de diferentes métodos de curado en la resistencia a compresión de hormigones que incorporan ceniza de cáscara de arroz (CCA) como material cementante suplementario. La investigación parte de la problemática asociada al uso de materiales convencionales en la construcción, que genera altos niveles de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) debido a la producción de cemento. Como la industria se esfuerza por descubrir soluciones ecológicas con el fin de disminuir su huella ambiental, sin afectar negativamente las robustas características del hormigón, la utilización de desechos de la agroindustria, piénsese en la ceniza de cáscara de arroz (CCA), ha ganado atención significativa. Esto es porque promete ser un sustituto parcial del cemento y por su interesante composición, llena de sílice amorfa.

El propósito fundamental de este estudio es descubrir las condiciones más favorables de curado, y la cantidad precisa de CCA para sustituir al cemento, buscando el incremento de la resistencia a la compresión del hormigón. Para llevar

a cabo esto, empleamos una metodología bastante exhaustiva. Se realizó distintas mezclas de hormigón, cada una con diferentes niveles de sustitución de cemento por ceniza de cáscara de arroz, variando del 5% al 20%. Luego, estas muestras fueron sometidas a diversos métodos de curado; esto incluyó sumergirlas en agua, también en cámaras húmedas, y hasta bajo las condiciones normales del ambiente. Adicionalmente, se investigó cómo el agua que se utiliza para mezclar afecta tanto la uniformidad de la mezcla, como el tiempo que tarda en endurecerse, es decir, el fraguado.

Las pruebas que se hicieron a las muestras, sometiéndolas a tests de compresión a los 7, 28, y 90 días con la finalidad de identificar cómo reaccionan mecánicamente, eso es, dependiendo de cómo se curan y cuánto sustitución de cemento requiere.

Los datos obtenidos mostraron que las mezclas con un 10% de cemento reemplazado utilizando ceniza de cáscara de arroz (CCA), superaron con creces la resistencia de un hormigón común, y esto es especialmente cierto, sobre todo, si se les da un buen curado, los cuales se consideran óptimos para el material, lo que resulta en una resistencia a la compresión de 38 MPa después de los 28 días. En resumen, este estudio deja claro que usar CCA no solo es bueno para el planeta, también mejora las propiedades mecánicas del hormigón, lo que sin duda consolida su potencial para que la construcción sea más sostenible.

También, destaca el estudio realizado por (Hernán et al., 2024), que tiene como tema: “Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto mediante la adición de ceniza de cáscara de arroz”, el cual recopila estudios que examinaron la incorporación de ceniza de cáscara de arroz (CCA) en el hormigón, lo cual es clave. Por supuesto se comenzó a saber los desafíos ambientales enfrentando la construcción debido a ese gran uso de cemento motivando esa búsqueda de materiales más verdes. La ceniza de cáscara de arroz (CCA) que sale de los desechos agroindustriales, contiene tanta sílice amorfa, siendo eso un posible aditivo para mejorar el concreto sobre todo fuerza y tiempo.

El propósito de esta revisión fue examinar investigaciones sobre el hormigón con ceniza de cáscara de arroz (CCA) centrándose en sus propiedades mecánicas y fisicoquímicas. El enfoque tiene relevancia en la resistencia a la compresión, la permeabilidad y, también, la trabajabilidad de las mezclas. Para llevar a cabo este estudio, se utilizó una metodología específica, primero, se seleccionó

minuciosamente estudios clave, los que realmente importaban, estos estudios se obtuvieron de diversas bases de datos, empleando criterios rigurosos para determinar su relevancia y determinar los óptimos. Posteriormente, se recolectaron aquellos estudios que sí superaron este filtro inicial, se realizó una revisión exhaustiva de los mismos, buscando información detallada. Entre otras cosas, se observó las variables medidas, como, por ejemplo, la proporción de reemplazo de cemento por la ceniza de cáscara de arroz, normalmente variando entre el 5% y el 30%. Otro factor importante fue la finura de la ceniza de la cáscara de arroz, y por supuesto, la reactividad de esta ceniza con los demás materiales del concreto. La finura y la reactividad eran, en resumen, fundamentales para comprender como la CCA interaccionaba con el cemento.

Los resultados revelan mejoras notables en la resistencia a la compresión, especialmente en mezclas, donde el cemento fue reemplazado por ceniza de cáscara de arroz (CCA) en un 10% a 15% mostrando aumentos promedios de hasta un 15% en la resistencia comparado al concreto normal. También, se notó una baja en la permeabilidad del concreto porque la estructura interna es más densa y uniforme, lo que hace que dure más. La ceniza de cáscara de arroz (CCA) también le cayó bien a la trabajabilidad del concreto cuando se mezcló con aditivos plastificantes. En definitiva, estos hallazgos reafirman la validez de la ceniza de cáscara de arroz (CCA) como un componente sostenible para la construcción, mejorando las propiedades físico-mecánicas del concreto, y disminuyendo el impacto ambiental.

A nivel regional, citamos a (Nurtanto et al., 2020), con el tema: “Comparación de la adición de cenizas de cascarilla de arroz y cenizas de tejas a cemento de geopolímero en base a cenizas volantes con cemento Portland” este estudio analiza el impacto de la incorporación de cenizas de cáscara de arroz (CCA) y cenizas de tejas en las propiedades mecánicas del concreto. La investigación surge ante la necesidad de optimizar las mezclas cementantes mediante el uso de materiales alternativos que mejoren el rendimiento del concreto, además de promover la sostenibilidad en la industria de la construcción. Tanto la CCA como las cenizas de tejas presentan propiedades puzolánicas, lo que las convierte en opciones viables para su uso en la formulación de cementos de geopolímero.

El estudio buscaba comparar el comportamiento del concreto, empleando diferentes proporciones de ceniza de cáscara de arroz (CCA) y cenizas de tejas, por lo tanto,

se evaluó su resistencia a compresión en varias edades 7, 28 y 90 días. La metodología, comprendía la elaboración de mezclas con reemplazos parciales de cemento Portland y cenizas volantes, además de la combinación con ambos tipos de cenizas, entre un 10% y un 20%. Las muestras se curaron cuidadosamente y se les hizo pruebas mecánicas, así para determinar su desarrollo con el paso del tiempo. Además, se observó la microestructura del concreto con técnicas de microscopía, para entender la interacción entre los materiales y la matriz cementante.

Los resultados obtenidos mostraron que la adición de ceniza de cáscara de arroz (CCA) hizo maravillas al fortalecer el concreto, específicamente en lo que respecta a su resistencia a la compresión, superando por mucho a las mezclas que empleaban cenizas de tejas. Ahora, a los 28 días de pruebas, las muestras donde se utilizó un 15% de sustitución con ceniza de cáscara de arroz (CCA), alcanzaron una resistencia promedio asombrosa de 40 MPa, mientras tanto, las que usaban cenizas de tejas no lograron superar los 34 MPa. Aunque a edades más avanzadas las cenizas de tejas demostraron un poder para aumentar la resistencia, sin embargo, todo es por su reacción puzolánica que va despacio. Se concluye que ambos materiales brindan ventajas mecánicas, pero la ceniza de cáscara de arroz o CCA se comporta mejor a inicio de vida útil del concreto, una opción eficiente, para las formulaciones de cemento de geopolímero.

Por otro lado, resalta el estudio de (Loayza Goicochea, 2014) titulado: “Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión del concreto normal” el cual analiza la influencia del reemplazo parcial de cemento con ceniza de cáscara de arroz (CCA) en las propiedades mecánicas del concreto, enfocándose en la resistencia a compresión. La investigación surgió impulsada por la necesidad, muy sentida, de disminuir el uso del cemento Portland, ya que su fabricación genera una tonelada de emisiones de CO₂. La ceniza de cáscara de arroz (CCA), que tiene un alto contenido de sílice amorfa, ha demostrado ser una alternativa, una opción sostenible, para darle un impulso a las propiedades del concreto; y, además, es una manera sostenible de darle una nueva vida a un residuo agroindustrial.

El estudio tuvo como objetivo principal explorar cómo distintos reemplazos de cemento con CCA (5%, 10%, 15% y 20%) afectaban la fuerza del concreto, es decir, su resistencia a la hora de comprimirlo. Se fabricaron, para esta labor, unas probetas

de concreto utilizando esas proporciones de ceniza de cáscara de arroz (CCA), y luego, se curaron, siempre bajo un control super estricto. Se les hicieron pruebas de fuerza compresiva a los 7, 28 y 90 días, para verificar el resultado. Se observó la evolución de la fuerza, así se logró identificar qué proporciones daban los mejores resultados, comparándolas, eso sí, con el concreto sin ningún tipo de aditivo.

Los resultados obtenidos revelaron algo muy interesante: las mezclas con un 10% y un 15% de sustitución del cemento por ceniza de cáscara de arroz (CCA), presentaron una mejora considerable en la resistencia a la compresión; se logró alcanzar valores promedio de 42 MPa a los 28 días, y era mucho mejor que los 38 MPa del concreto normal. Aun así, cuando los porcentajes subieron por encima del 15%, se observó una bajada en la resistencia del material. Las conclusiones destacan que una sustitución moderada de cemento por ceniza de cáscara de arroz (CCA) no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también mejora las propiedades mecánicas del concreto, siempre y cuando se mantenga un equilibrio adecuado en la proporción de sustitución.

A nivel local, se presenta el trabajo de investigación de (Coyasamin Maldonado, 2016), que tiene como tema: “Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón adicionado con cenizas de cáscara de arroz (CCA) y hormigón adicionado con cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBC)”, el proyecto se realizó con dos materiales alternativos que podrán sustituir al cemento en mezclas de hormigones. Se implementó dos materiales de desecho agrícola en cada una de las mezclas, sin afectar las propiedades mecánicas de un hormigón tradicional o común para obtener un hormigón de mayor resistencia a la compresión, y que sea más resistente a los ataques de los sulfatos.

Los materiales con los que se trabajó en este proyecto experimental son: la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), y la ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC), obteniendo buenos resultados sustituyendo parcialmente el cemento por las cenizas. La investigación consistió en realizar sustituciones parciales de cemento con los dos nuevos materiales de desecho agrícola, en porcentajes como lo son: 15% y el 30% en mezclas para hormigones, los cuales se comprobó su resistencia a la compresión a las edades de los 14 y 28 días.

La mezcla que se aproximó más a la resistencia establecida para un hormigón común de 240kg/cm² cuando trabaja con el 15% de la sustitución parcial del

cemento por las dos cenizas, los resultados son favorables ya que se obtiene una resistencia mayor a la establecida y con el 30% se obtiene una resistencia igual o de mayor valor en un 2% que la del hormigón normal.

Por su parte, también destaca el estudio de (Trujillo, 2017), titulado: “Uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de hormigones convencionales en el Ecuador” donde se aborda la problemática de los residuos agroindustriales, específicamente la ceniza de cascarilla de arroz (CCA), generados en la ciudad de Durán, Ecuador. Este residuo, que sale de quemar cosas para crear electricidad en una arrocera, tiene un montón de sílice que reacciona bien. Eso lo hace un material con mucho potencial; podría usarse en el hormigón, como un ingrediente más. El punto clave de todo este estudio es encontrarle un uso real a esa ceniza.

La investigación comenzó con la creación de 5 diseños de mezcla de hormigón, cada uno diferente. En estas mezclas, el cemento fue parcialmente reemplazado por ceniza de cáscara de arroz, conocida como CCA en diferentes proporciones. Para medir su resistencia fueron sometidos a pruebas tras curarse por 28 días, refiriéndose a los ensayos de compresión, los cuales se aplicaron para evaluar como el CCA afectaba las propiedades del hormigón. Los resultados se compararon con una mezcla base, sin adiciones de CCA, para un mejor contraste.

Los datos del estudio demostraron que incorporar CCA, no perjudicaba las propiedades físico-mecánicas del hormigón. Con una sustitución del 5%, la resistencia a la compresión obtenida era muy similar al hormigón normal, si adiciones.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis General.

El uso de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustituto del cemento en la elaboración de sistemas estructurales de uso residencial con $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ permitirá determinar su viabilidad técnica y económica, ofreciendo una alternativa sostenible para la industria de la construcción en la provincia de Santa Elena, Ecuador.

1.3.2. Hipótesis Específicas.

H.E.1.: La caracterización de los materiales componentes preseleccionados para la obtención de hormigones con ceniza de cáscara de arroz (CCA) permitirá definir sus propiedades físicas-mecánicas para el diseño de dosificaciones ACI 211.1.

H.E.2.: Los diseños de mezclas de hormigón que incorporen ceniza de cáscara de arroz (CCA) en porcentajes de 1%, 3% y 5% usando las normativas técnicas mostrarán un desempeño comparable o superior en términos de resistencia a la compresión y trabajabilidad, cumpliendo con los estándares de las Normas Técnicas Ecuatorianas.

H.E.3.: Los costos de elaboración de la dosificación de hormigón con adición de CCA serán inferiores o competitivos en comparación con el hormigón convencional, demostrando beneficios económicos de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustituto parcial del cemento.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General.

Evaluar el uso de la ceniza de cáscara de arroz como sustituto del cemento para la elaboración de sistemas estructurales de uso residencial, mediante el diseño de un hormigón con una resistencia a compresión de $f_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$, con la finalidad de determinar su viabilidad técnica y económica.

1.4.2. Objetivos Específicos.

O.E.1.: Caracterizar los materiales componentes preseleccionados para la obtención de hormigón con ceniza de cascara de arroz (CCA) mediante ensayos de laboratorio normativos.

O.E.2.: Elaborar diferentes diseños de mezclas de hormigón mayor o igual a $f'_c=210 \text{ kg/cm}^2$ incorporando ceniza de ceniza de cascara de arroz (CCA) en porcentajes de 1%, 3% y 5% aplicando la normativa ASTM C618-19, para

caracterizar sus propiedades mecánicas, con el fin de evaluar su desempeño en términos de resistencia a la compresión y trabajabilidad.

O.E.3.: Comparar los costos de elaboración de la dosificación de hormigón convencional y la dosificación de hormigón con el porcentaje de ceniza de cascara de arroz (CCA) más adecuado, evaluando los posibles beneficios económicos de CCA como sustituto del cemento.

1.5. ALCANCE

La presente investigación se sumergirá en examinar si es técnicamente factible y económicamente prudente emplear ceniza de cáscara de arroz CCA para sustituir, parcialmente, el cemento al crear sistemas estructurales. Este estudio, incluirá el diseño, la preparación y el análisis detallado de mezclas de concreto utilizando cantidades distintas de CCA, se observarán las características mecánicas y, también, los gastos de manufactura, confrontándolos con el hormigón estándar.

El análisis se mantendrá acotado a la evaluación de mezclas de hormigón con CCA, utilizándose proporciones definidas como 1%, 3%, y 5%; no tocará otros componentes ni maneras de producir el hormigón, dedicándose únicamente a sistemas estructurales residenciales de dos niveles. El foco de este estudio se encuentra en los beneficios que trae usar CCA para el medio ambiente, aunque no se evaluarán todo lo que pasa a largo plazo, además, se observará cuánto cuesta el hormigón normal versus el que lleva CCA.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que la calidad de la ceniza de cáscara de arroz varía, y eso puede influir en los resultados. Es crucial comprender bien cómo funciona el concreto con CCA y, por supuesto, compararlo con el concreto de toda la vida. Para tener resultados y conclusiones reales, se necesita pruebas en el laboratorio.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables Independientes.

- ✓ Diseño de la mezcla de hormigón convencional a $f'c=210$ kg/cm². con ceniza de cáscara de arroz al 1%, 3% y 5% de sustentación de cemento tipo GU.

1.6.2. Variables Dependientes.

- ✓ Resistencia a la compresión del hormigón a los 7, 14, 21 y 28 días de curado.
- ✓ Costo del hormigón convencional con cascarilla de ceniza de arroz.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1 PUZOLANAS

Las puzolanas, unas sustancias silíceas o aluminosilíceas, carecen de capacidades cementantes solas. Pero estas reaccionan al agua y al hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ originando compuestos con capacidades para pegar, de verdad. Esta reacción puzolánica es clave, mejora la firmeza y aguante del hormigón, y optimiza su trabajo en la ingeniería civil.

Es crucial asegurar un buen uso, por lo que las puzolanas siguen reglas, las cuales se rigen por normativas sobre su estructura, reactividad y como trabajan. Según la ASTM C618 que es una norma de los Estados Unidos de América, clasifica y dice cómo usarlas en las mezclas con cemento (ASTM C618, 2022).

Por ejemplo, las cenizas volantes, producto de quemar carbón, se dividen en categorías importantes.

- **Clase N:** Abarca puzolanas naturales crudas o cocinadas, como la toba o las cenizas volcánicas. Es posible que requieran un poco de calor, para que reaccionen bien y que el hormigón tenga las propiedades correctas.
- **Clase F:** Son las cenizas volantes, provenientes, del quemado de carbón, del tipo antracita o bituminoso. Dichas cenizas tienen mucha sílice lista para reaccionar. Y también son muy puzolánicas mejorando la fuerza a largo tiempo del concreto y menos permeable.
- **Clase C:** Estas son las cenizas volantes, pero de carbón sub-bituminoso o lignito. Al revés que la Clase F, las cenizas de la Clase C tienen también compuestos cementosos, como aluminatos y silicatos de calcio, lo que les da propiedades puzolánicas y cementantes. Sirven para hormigones que necesitan mucha fuerza al principio, y más unidos.

El usar puzolanas y cenizas volantes, en el cemento y concreto, es ventajoso, así usas menos clínter en el cemento Portland, menos CO₂ y, por ende, la industria es más verde. Además, aumentan la trabajabilidad, la durabilidad, y la resistencia a agentes agresivos, es decir, sulfatos y reacciones álcali-sílice, lo cual las convierte en una alternativa eficiente y técnica para optimizar el desempeño del hormigón en diversas estructuras.

Tabla 1

Composición química de las puzolanas

Composición química	Clase de adición		
	N	F	C
Porcentaje mínimo de SO ₂ , Al ₂ O ₃ , FeO ₂	70	70	50
Porcentaje máximo de SO ₃	4	5	5
Porcentaje máximo de contenido de humedad	3	3	3
Porcentaje máximo de pérdida de calcinación	10	6	6

Nota. Tomado de: (ASTM C618, 2022)

2.1.1 Puzolanas naturales

La norma ASTM C 618 clasifica las cenizas volantes en tres categorías principales, una de las cuales corresponde a las puzolanas naturales. Estas son materiales de origen volcánico o biogénico que han experimentado procesos geológicos recientes y presentan una notable actividad puzolánica (ASTM C618, 2022). Entre las principales puzolanas naturales se encuentran:

- **Cenizas volcánicas:** Son partículas finas generadas por erupciones volcánicas explosivas. Estas cenizas, al enfriarse rápidamente en el ambiente, adquieren una estructura vítrea que favorece su reactividad en mezclas cementicias (ASTM C618, 2022)
- **Tobas volcánicas (zeolitas):** Son silicatos de aluminio hidratados, formados a partir de la diagénesis hidrotermal de cenizas volcánicas. Existen más de 40 tipos de tobas volcánicas, ricas en sílice (SiO₂) y alúmina reactiva (Al₂O₃), lo que les confiere una alta capacidad para mejorar las propiedades del hormigón, como la resistencia a largo plazo y la durabilidad (ASTM C618, 2022)

- **Diatomeas (diatomita):** Son puzolanas de origen orgánico, formadas por la acumulación de sedimentos de conchas de diatomeas, que son algas acuáticas unicelulares microscópicas con un esqueleto compuesto principalmente de sílice amorfa. Su estructura porosa y su elevada superficie específica las hacen altamente reactivas en aplicaciones cementicias (ASTM C618, 2022)

2.1.2 Puzolanas artificiales

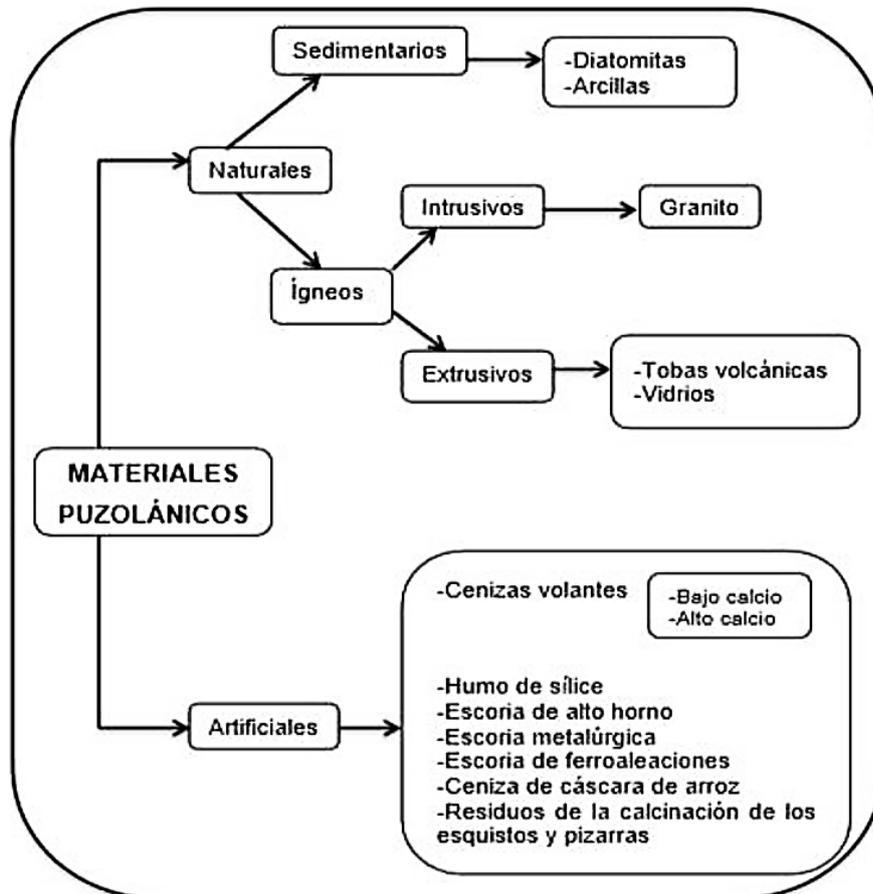
Las puzolanas artificiales son materiales que, tras ser sometidos a tratamientos térmicos o procesos industriales, adquieren propiedades puzolánicas, es decir, la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua para formar compuestos cementantes (ICPA, n.d.). Entre las principales puzolanas artificiales se incluyen:

- **Cenizas volantes:** son unas partículas minúsculas, casi esféricas, que quedan de la quema de carbón pulverizado en las plantas de energía. Tienen una cualidad interesante, son puzolánicas, y se usan para hacer el concreto más resistente (ICPA, n.d.)
- **Arcillas activadas térmicamente:** las arcillas, tal cual como las encuentras en la naturaleza, no son puzolánicas, no sirven de mucho. Pero si las calientas a temperaturas bien altas, entre 600 y 900 grados Celsius, su estructura interna cambia y obtienes unas propiedades puzolánicas geniales, perfectas para mezclarlas con cemento (ICPA, n.d.)
- **Microsílice (humo de sílice):** Es un subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico durante la producción de silicio o aleaciones de ferrosilicio. Este material, extremadamente fino, se recolecta mediante filtración de los gases de escape del horno y posee una alta reactividad puzolánica, mejorando la resistencia y durabilidad del hormigón (ICPA, n.d.)
- **Ceniza de cáscara de arroz (CCA):** Se obtiene al quemar la cascarilla de arroz, un residuo agrícola abundante. La eficacia de la CCA como puzolana depende en gran medida de las condiciones de combustión; temperaturas de quema controladas, preferiblemente por debajo de 700

°C, favorecen la formación de sílice amorfa altamente reactiva (ICPA, n.d.)

Figura 1

Clasificación de las puzolanas



Nota. La figura representa la clasificación de materiales puzolánicos. *Tomado de:* (Juárez, 2012)

2.2 CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA)

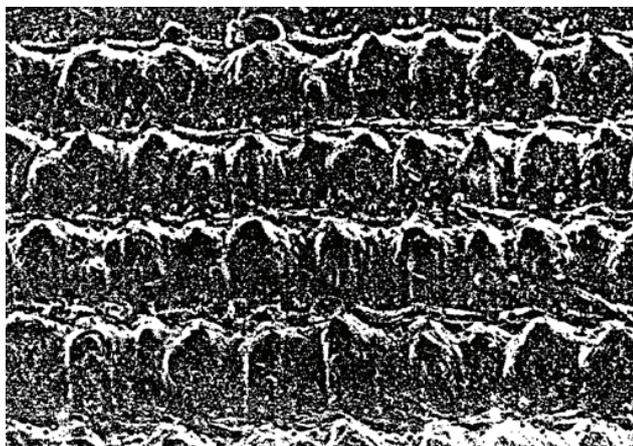
2.2.1. Descripción de la cáscara de arroz

La cáscara de arroz está compuesta en más del 80% por sílice. Sus dimensiones oscilan entre 4 y 14 mm de longitud, 2 a 4 mm de ancho y aproximadamente 50 μm de espesor, lo cual se debe a la amplia variedad de tipos de arroz con cáscara disponibles. (Echeverría & López, 2010) miraron con detenimiento la cáscara, bajo el microscopio. Lo que vieron fue interesante: una superficie exterior áspera, como con pequeñas protuberancias, y por dentro, lisa, bien suave. Estas diferencias en la textura afectan la forma en que la cáscara retiene

el agua, además, el peso varía entre 2.97 y 3.55 mg. Y también tiene una capacidad calórica notable.

Figura 2

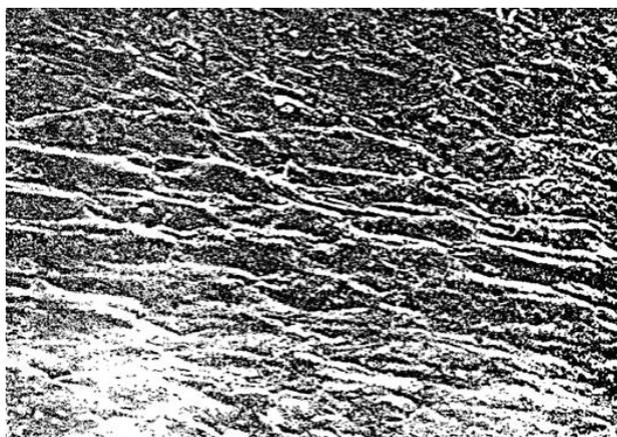
Vista microscópica del lado exterior de la cáscara de arroz.



Nota. Xavier Diaz, Proyecto de grado. Modelo predictivo de combustión de la cascara de arroz. ESPOL, 1991.

Figura 3

Vista microscópica del lado interior de la cáscara de arroz.



Nota. Xavier Diaz, Proyecto de grado. Modelo predictivo de combustión de la cascara de arroz. ESPOL, 1991.

De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), la cáscara de arroz constituye un residuo del proceso de producción de este cereal. Su aprovechamiento en Ecuador se distribuye de la siguiente manera: el 35% se destina a la industria florícola, otro 35% es incinerado en piladoras, el 7.5% se desecha en los márgenes de las carreteras, el 5% se quema

en dichos bordes, otro 7.5% se incinera en terrenos aislados, el 5% es arrojado a ríos y otro 5% es dispersado por el viento. Este subproducto ha sido empleado como combustible alternativo, sustituto de la madera, fertilizante para cultivos y objeto de investigación para su posible aplicación en el sector de la construcción.

Figura 4

Producción de la cáscara de arroz en Ecuador



Nota. (El Universo, n.d.)

2.2.2. Obtención de la ceniza de cáscara de arroz (CCA)

La cáscara de arroz en su estado natural podría fastidiar un poco el tema del fraguado del hormigón y, a la vez, disminuir su resistencia, todo por su composición orgánica. Para poder usarla bien, es necesario introducirla en un horno, un proceso llamado calcinación, a temperaturas que andan entre los 400 y los 800 grados Celsius. Y al final se obtiene una ceniza de cáscara de arroz, o CCA, como le dicen. (Salas, Castillo, et al., 1986)

El proceso de obtención de la CCA también representa una fuente de energía, ya que la combustión de la celulosa y lignina genera un bajo impacto ambiental. Sin embargo, el problema ambiental radica en la incorrecta disposición o manejo inadecuado de esta ceniza. (Salas, Castillo, et al., 1986)

Para el trabajo de investigación se realizó el proceso de producción en áreas libres y con las debidas precauciones, tal y como se muestra en la sección de anexos.

2.2.3. Propiedades de la ceniza de la cáscara de arroz (CCA)

2.2.3.1. Propiedades químicas

Tabla 2*Composición química de la CCA*

Composición %	%
Pérdida por calcinación	-
Residuo insoluble	0.17
Anhídrido Silícico SiO ₂	91.26
Oxido Aluminico Al ₂ O ₃	0.94
Oxido Férrico Fe ₂ O ₃	0.37
Oxido Cálcico CaO	2.15
Oxido Magnésico MgO	0.88

Nota. Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros. *Tomado de:* (Salas, Castillo, et al., 1986)

Por su alto contenido de sílice se consideró su estudio, la ceniza sola no posee ninguna propiedad cementante, pero al reaccionar con el hidróxido de calcio libre que deja el cemento al fraguar adquiere dicha propiedad.

2.2.3.2. Propiedades físicas de la CCA

Tabla 3*Propiedades de la ceniza de la cáscara de arroz*

Propiedades	Valor
Densidad (sss) kg/m ³	2265
Masa Unitaria compactada kg/m ³	452
Masa Unitaria suelta kg/m ³	181
Superficie específica m ² /kg	2000

Nota. Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros. *Tomado de:* (Salas, Castillo, et al., 1986)

La densidad de la ceniza se puede considerar para compararla con la del cemento, lo que podrá influir en la densidad del hormigón.

2.2.3.3. Combustión de la cáscara de arroz

El proceso de calcinación de la cáscara de arroz afecta la calidad de la ceniza producida de manera notable. Hay muchas formas de hacer esto:

Quema a campo abierto: Quemar la cáscara de arroz al aire libre resulta en ceniza de mala calidad, pues no hay mucho control sobre la combustión (Juárez, 2012)

Combustión para generación de electricidad: Este método usa el calor de la cáscara para generar electricidad. Se realiza bajo estrictos controles de temperatura y tiempo de combustión para asegurar la eliminación de impurezas. Como resultado, se obtiene una ceniza con componentes químicos específicos (Juárez, 2012)

Horno industrial: Es el método más recomendado, ya que contribuye a la protección ambiental y resulta económicamente eficiente. También es una solución que ahorra dinero, lo cual siempre es bueno. Gracias a cómo quema, de forma controlada, consigues una ceniza con mucha sílice dentro, más o menos un 90% a 95%. Y lo relevante es que no tiene una forma definida, es amorfa. (Juárez, 2012)

Tabla 4

Condiciones de combustión del CCA

Temperatura de combustión (°C)	Tiempo de combustión	Propiedad de entorno oxidante	Cristalización	Área superficial (m²/s)
500 – 600	1 min	Moderadamente oxidante	No cristalina	122
500 – 600	30 min	Moderadamente oxidante	No cristalina	97
500 – 600	2 horas	Moderadamente oxidante	No cristalina	76
700 – 800	15 min a 1 hora	Moderadamente oxidante	No cristalina	100
700 – 800	15 min a 1 hora	Altamente oxidante	Parcialmente cristalina	6 – 10
>800	>1 hora	Altamente oxidante	Cristalina	<5

Nota. (Juárez, 2012)

Incorporar ceniza de cáscara de arroz al hormigón es un cambio tremendo, básicamente mejora un montón sus características, y además, ayuda al planeta. Este agregado ayuda a que le da más fuerza y el hormigón dura más. También hace que sea menos probable que le salgan grietas, y evita que el agua se filtre.

Las construcciones hechas con esta mezcla son de interés y duran un largo tiempo, manteniendo su estructura intacta por más tiempo. La ceniza de cáscara de arroz entra en unas reacciones químicas que le dan más cuerpo al hormigón, haciéndolo súper resistente contra todo lo que podría dañarlo.

2.3 HORMIGÓN

2.3.1. Definición y componentes

El hormigón es un material compuesto fundamental en la construcción civil, resultado de la mezcla controlada de cuatro componentes esenciales: agregado grueso, agregado fino, cemento y agua. Según las necesidades específicas del proyecto y las condiciones ambientales del emplazamiento, se puede incorporar un quinto componente: aditivos. Estos aditivos son compuestos químicos que permiten modificar las características del hormigón, mejorando su trabajabilidad, tiempo de fraguado, resistencia mecánica, impermeabilidad y otras propiedades físicas (Solas & Giani, 2010)

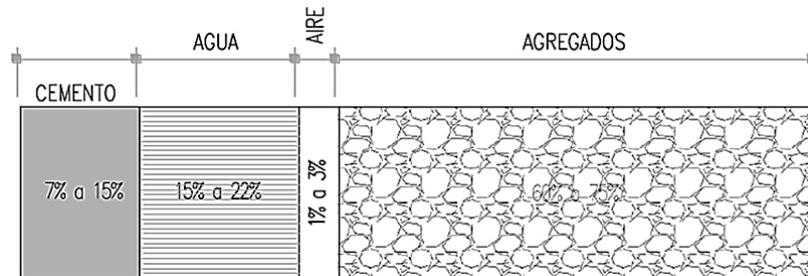
El hormigón empieza a tomar forma cuando el agua se une al cemento. Esa reacción, llamada hidratación, es lo que da origen a una especie de pegamento, cuando esta mezcla se junta con la arena, el agregado fino, entonces, se forma el mortero. Este mortero es el que abraza las piedras más grandes, el agregado grueso, y rellena todos esos huecos, como una especie de puzzle. Al principio, el hormigón es suave, como plastilina, facilitando su adaptación a cualquier forma que se necesite. Con el tiempo, se pone duro, desarrollando la fuerza y la resistencia necesaria para que aguante las construcciones (Solas & Giani, 2010).

Pero la clave está en la mezcla de cada uno de los componentes, que es súper importante. La proporción de cada ingrediente se decide al diseñar el hormigón y depende mucho de cuanta fuerza o resistencia requiera. Esto implica ajustar las proporciones de cemento, agua y agregados, buscando una distribución homogénea

que maximice la compacidad y minimice la porosidad y micro fisuras, garantizando así un mejor desempeño del material a largo plazo (Solas & Giani, 2010)

Figura 5

Dosificación de los componentes del hormigón



Nota. La figura representa las proporciones de los componentes del concreto. *Recuperado de:* Materiales para el Concreto (p.27), por Enrique Rivva López, 2013, Instituto de la Construcción y la Gerencia, Perú.

2.3.2. Cemento

El cemento es un material conglomerante hidráulico, finamente molido, que al mezclarse con agua forma una pasta capaz de fraguar y endurecer tanto al aire como bajo el agua. Su principal componente es el clínker, obtenido mediante la calcinación y molienda de una mezcla precisa de piedra caliza y arcilla. Durante este proceso, se generan compuestos como los silicatos y aluminatos de calcio, responsables de las propiedades aglutinantes del cemento. Además, se añade yeso en pequeñas cantidades para regular el tiempo de fraguado (IECA, n.d.)

El clínker está compuesto principalmente por cuatro fases minerales:

- *Silicato tricálcico (C_3S):* Contribuye a la resistencia inicial del cemento.
- *Silicato dicálcico (C_2S):* Aporta a la resistencia a largo plazo.
- *Aluminato tricálcico (C_3A):* Influye en el calor de hidratación y en la resistencia a los sulfatos.
- *Fase ferrita (C_4AF):* Afecta al color y contribuye en menor medida a las propiedades mecánicas.

Estas etapas dictan el comportamiento del cemento durante el fraguado y el endurecimiento. También influyen en sus características mecánicas y en su durabilidad final. La proporción de cada componente puede variar según el tipo de

cemento y las especificaciones requeridas para su aplicación en la ingeniería civil (IECA, n.d.)

Figura 6

Proceso de transformación del cemento

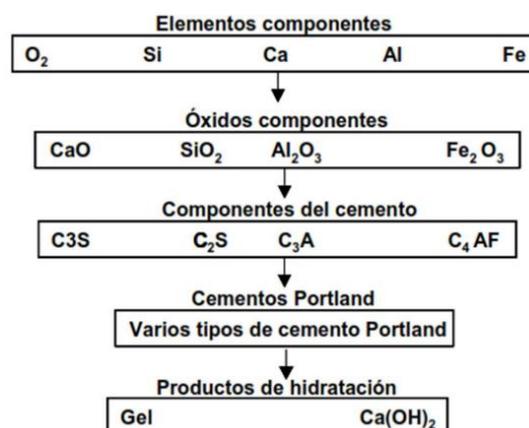


Nota. La figura representa el proceso de transformación del cemento *Tomado de:* Materiales II (p.2), por Hugo Tarelo Barba, (2018).

En la *figura 7*, Neville representa de manera esquemática el proceso de hidratación del cemento, comenzando por sus componentes principales, pasando por los óxidos y culminando en los productos de hidratación. Como se mencionó antes y se analizará más adelante, la cantidad de productos de hidratación generados por los principales compuestos del cemento Portland influye en sus propiedades.

Figura 7

Esquema de formación e hidratación del cemento



Nota. Representación esquemática de la formación e hidratación del cemento *Tomado y traducido de:* Properties of concrete (s/p), por Neville, 1995, Prentice Hall, Estados Unidos.

Existen diferentes tipos de cemento, llamados cemento Portland, que consideramos normales porque se fabrican de una determinada manera según unas normas específicas y estas se describen en la siguiente tabla: (Pasquel, 1993)

Tabla 5

Tipos de cemento

Cemento	Descripción
Tipo I	Para uso general donde no se requieren propiedades especiales Resistencia moderada a los sulfatos y calor de hidratación
Tipo II	moderado. Para uso de estructuras en ambientes hostiles y/0 en fundiciones masivas. Resistencia moderada a los sulfatos y calor de hidratación
Tipo III	moderado. Para uso de estructuras en ambientes hostiles y/0 en fundiciones masivas.
Tipo IV	Rápido desarrollo de la resistencia con alto calor de hidratación. Para uso en climas fríos o cuando las estructuras necesitan ser puestas en servicio con rapidez.
Tipo V	Alta resistencia a ataques de sulfatos. Para ambientes muy agresivos.

Nota. (Pasquel, 1993)

Tabla 6

Tipos de cemento y porcentajes de composición

Cemento				
	C3S	C2S	C3A	C4AF
Tipo II	48	27	12	8
Tipo III	40	35	5	13
Tipo IV	62	13	9	8
Tipo V	25	50	5	12

Nota. Instituto del Concreto, 1997 *Tomado de:* (Matallana Rodríguez, n.d.)

La norma ASTM-C-595-00 establece las especificaciones para la fabricación de los distintos tipos de cemento. Dentro de esta norma se incluyen

cementos especiales que incorporan ingredientes adicionales, como escorias y puzolanas, los cuales modifican su comportamiento y propiedades (Harmsen, 2002), tal como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 7

Tipos especiales de cemento

Cemento	Descripción
Tipo IS	Cemento al que se añade entre un 25% y un 70% en peso de escorias de alto horno.
Tipo ISM	Cemento al que se añade menos del 25% en peso de escoria de alto horno.
Tipo IP	Cemento con adición del 15% al 40% en peso de puzolana.
Tipo PM	Cemento al que se añade menos del 15% en peso de puzolana.

Nota. Tomado de: (ASTM-C595, 2021)

2.3.3. Agua

El agua es un componente esencial en la producción del hormigón, ya que participa activamente en las reacciones químicas de hidratación del cemento y determina la trabajabilidad de la mezcla. Para garantizar la calidad y durabilidad del hormigón, es crucial que el agua utilizada sea limpia y esté libre de impurezas que puedan afectar negativamente el proceso de fraguado y la resistencia final del material (MOP - 001 - F, 2002)

Según las especificaciones del Ministerio de Obras Públicas y Comunicaciones del Ecuador, detalladas en el documento MOP-001-F-2002, el agua destinada al amasado del hormigón debe cumplir con ciertos límites en cuanto a impurezas como indica la *tabla 8* y sustancias nocivas como se muestra en la *tabla 9*. Se enfatiza que el agua no debe contener aceites, ácidos, sales, materia orgánica u otras sustancias que puedan alterar el fraguado o disminuir la resistencia del hormigón (MOP - 001 - F, 2002)

Es recomendable que el agua utilizada sea potable, ya que el agua potable generalmente cumple con los estándares necesarios para la fabricación del hormigón. No obstante, en situaciones donde no se disponga de agua potable, es fundamental realizar análisis químicos para asegurarse de que el agua cumple con

los requisitos establecidos en las especificaciones técnicas pertinentes (MOP - 001 - F, 2002)

Tabla 8

Contenido máximo de impurezas en el agua

Impurezas	%
Acidez y alcalinidad calculadas en términos de carbonato de calcio	0,05
Sólidos orgánicos totales	0.05
Sólidos inorgánicos totales	0.05

Nota. (MOP001, 2002, pág. 45; Cap.800; Tabla 804 3.1)

Tabla 9

Contenido máximo de sustancias nocivas

Determinación	Limitación
PH	≥ 5
Sustancias disueltas	≤ 15 gr/litro
Sulfatos	≤ 1 gr/litro
Sustancias orgánicas	
Solubles de éter	≤ 15 gr/litro
Ion cloro	≤ 6 gr/litro
Hidratos de carbono	No deben contener

Nota. (MOP001, 2002, pág. 46; Cap.800)

la Norma Técnica Ecuatoriana, la NTE INEN 2617:2012, dicta algo importante, dice que usar agua potable para hacer la mezcla de hormigón está bien, completamente aceptable, ni siquiera necesitas someterla a pruebas extras, esas que sirven para confirmar que cumple con todo lo que se pide. Es decir, no hace falta más, así mismo se queda. (NTE INEN 2617, 2012)

Sin embargo, cuando se considera la utilización de agua no potable en la elaboración del hormigón, es imperativo llevar a cabo análisis químicos detallados. Estos análisis tienen como objetivo determinar la presencia de impurezas o sustancias que puedan influir adversamente en las propiedades del hormigón, como aceites, ácidos, sales o materia orgánica. Solo tras confirmar que el agua no potable

cumple con los parámetros establecidos en la norma, se podrá emplear en la mezcla de hormigón (NTE INEN 2617, 2012)

2.3.4. Aditivos

Los aditivos son sustancias incorporadas al hormigón en estado fresco con el propósito de modificar o mejorar sus propiedades en estado fresco o endurecido. Disponibles en formas líquidas, en polvo o pasta, su dosificación varía según el efecto deseado, generalmente no superando el 5% de la masa del cemento (PSI, n.d.)

A continuación, se detallan los principales tipos de aditivos y sus funciones:

2.3.4.1. Plastificantes o Reductores de Agua

Estos aditivos mejoran la trabajabilidad del hormigón, permitiendo reducir la cantidad de agua necesaria sin afectar la consistencia de la mezcla. Al disminuir la relación agua/cemento, se incrementa la resistencia mecánica del hormigón (PSI, n.d.)

2.3.4.2. Superplastificantes

Similares a los plastificantes, pero con un efecto más pronunciado, los superplastificantes permiten reducciones de agua de hasta un 25%. Son ideales para la producción de hormigones de alta resistencia y elementos con geometrías complejas, donde se requiere una alta fluidez sin comprometer la resistencia (PSI, n.d.)

2.3.4.3. Incorporadores de Aire

Estos aditivos introducen microburbujas de aire en la mezcla, mejorando la trabajabilidad del hormigón fresco y aumentando su resistencia a ciclos de congelación y deshielo en el estado endurecido. Además, mejoran la durabilidad frente a agentes agresivos y reducen la segregación y exudación (PSI, n.d.)

2.3.4.4. Controladores de Fraguado

Acclerantes: Incrementan la velocidad de fraguado y desarrollo de resistencias iniciales del hormigón, siendo útiles en climas fríos o cuando se requiere un rápido desencofrado (PSI, n.d.)

Retardantes: Prolongan el tiempo de fraguado, permitiendo una mayor trabajabilidad en climas cálidos o en proyectos de gran envergadura donde el transporte y colocación del hormigón requieren más tiempo (PSI, n.d.)

Expansores-Plastificantes: estos aditivos son superútiles en el mundo de la construcción. Se usan para rellenar fisuras, grietas, juntas y hasta los ductos de cables postensados. Básicamente, los mezclas con mortero o pasta de cemento. Estos "expansores" compensan la retracción del material para que no se encoja, y también mejoran la adherencia, haciendo que todo se pegue bien fuerte. El resultado final es un relleno total, que dura (PSI, n.d.)

La selección y dosificación adecuada de estos aditivos son fundamentales para garantizar que el hormigón cumpla con las especificaciones técnicas y las condiciones particulares de cada proyecto. Es esencial considerar factores como el tipo de estructura, las condiciones ambientales y los requerimientos de durabilidad al elegir el aditivo más adecuado.

2.3.5. Los agregados

Para garantizar que el concreto alcance los estándares, es importante lo siguiente: examinar las especificaciones que marca la Norma Técnica Ecuatoriana NTE. Ahora, se muestra un análisis sobre agregados y como estos afectan las propiedades del hormigón; todo basado en la NTE INEN 8722011: “Áridos para hormigón Requisitos”.

Clasificación de los Agregados según la NTE INEN 872:2011:

Agregado Fino: Material que pasa por el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y queda retenido en el tamiz de 75 μ m (No. 200) (NTE INEN 872, 2011)

Agregado Grueso: Material que queda retenido en el tamiz de 4,75 mm (No. 4) (NTE INEN 872, 2011)

Requisitos de Calidad para los Agregados

Granulometría: Los agregados deben ajustarse a las granulometrías requeridas, fundamental para una mezcla densa y que se trabaje bien.

Contenido de Materiales Nocivos: es ideal que los agregados no contengan sustancias perjudiciales que dañen la duración y fortaleza del hormigón, tipo arcillas, limos, elementos orgánicos y sales solubles.

Forma y Textura Superficial: Los agregados que se caractericen por ser rugosos y con formas irregulares, usualmente conseguidos con trituración, permiten mejor agarre con el cemento, evitando huecos y aumentando la fuerza del hormigón.

Influencia de los Agregados en las Propiedades del Hormigón

Escoger de forma correcta los agregados, teniendo en cuenta características importantes como su tamaño, forma, textura y limpieza, es clave para que el hormigón alcance las propiedades mecánicas y durabilidad esperadas. Controlar rigurosamente estos parámetros, en conformidad con la NTE INEN 872:2011, garantiza la calidad y buen funcionamiento del hormigón en estructuras.

2.3.5.1. Agregados finos

Los agregados finos, la arena, por ejemplo, son importantes en la fórmula del hormigón. Su papel primordial consiste en rellenar los huecos entre los áridos bastos, reduciendo de esta manera los espacios vacíos y, contribuyendo a que la mezcla se mantenga unida. Es sumamente importante, por esta razón, que su graduación granulométrica sea idónea.

De acuerdo con la Norma Técnica Ecuatoriana, la NTE INEN 872:2011, los agregados finos, o sea, la arena, deben cumplir algunos requisitos muy importantes sobre su tamaño y calidad. Esto es crucial, ya que aseguramos un hormigón, un concreto, con propiedades espectaculares. Esta norma establece límites para el contenido de partículas finas (material que pasa el tamiz de 0.063 mm), ya que un exceso de estas puede aumentar la demanda de agua en la mezcla, afectando negativamente propiedades como la resistencia y durabilidad del hormigón (NTE INEN 872, 2011)

En cuanto al origen de la arena, la NTE INEN 872:2011 no especifica una preferencia entre arena de río o arena triturada. Sin embargo, es fundamental que, independientemente de su procedencia, el agregado fino cumpla con los límites granulométricos y de contenido de finos establecidos en la norma para asegurar la calidad del hormigón, como se indica en la *tabla 10*:

Tabla 10*Porcentajes máximos de finos admisibles*

Tamaño del árido	% máximo de finos (>0.063mm)	Tipo de árido y ambiente
Árido grueso	1%	Tipo 1: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos redondeados • Áridos triturados no calizos
	2%	Tipo 2: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos triturados calizos
	6%	Tipo 3: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos redondeados • Áridos triturados no calizos para estructuras marinas o en contacto con agua de elevado contenido en cloruros
Árido fino	10%	Tipo 4: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos triturados calizos para estructuras marinas o en contacto con agua de elevado contenido de cloruros. • Áridos triturados no calizos para estructuras en ambiente normal.
	15%	Tipo 5: <ul style="list-style-type: none"> • Áridos triturados calizos para estructuras en ambiente normal

Nota. Tomado de: (NTE INEN 872, 2011)

Cuando existe excedente de fino, este reseca la mezcla obligando a utilizar mayor cantidad de agua que perjudicará a ciertas propiedades como la resistencia.

Para alcanzar un hormigón de calidad, contar con un agregado fino limpio es vital, antes de planificar las mezclas de hormigón, pues, la cantidad de impurezas en este material se debe identificar. Según la norma INEN 855, las impurezas no deberían exceder el 5% de arcilla o limos ni el 15% de material orgánico. Los parámetros de evaluación se encuentran

especificados en las tablas 11 y 12 de esta norma. Aparte, la granulometría del agregado fino necesita alinearse con lo dispuesto en la norma INEN 696, que, como puedes ver, sigue los límites de la ASTM C33-99a, expresados en la Tabla 13.

Por otra parte, la densidad aparente del agregado fino tiene que medirse como dice la norma INEN 859. Y para saber cuál es la densidad óptima hay que seguir la INEN 858. Además, la densidad relativa en estado saturado se evaluará siguiendo la INEN 856. Y, por otro lado, el contenido de humedad se va a determinar siguiendo la INEN 862.

Tabla 11

Colores normalizados para colorimetría

Color normalizado escala de Gardner No.	Número de orden en el comparador
5	1
8	2
11	3 (normalizado de referencia)
14	4
16	5

Nota. Tomado de: (NTE INEN 855, 2010)

Estos controles y todos esos parámetros son importantes. Porque garantizan que el agregado fino que se usa para hacer la mezcla de hormigón cumpla con todo lo que debe tener, es decir, con todos esos requisitos de calidad y propiedades que son imprescindibles, o sea, vitales, para que el material quede bien formulado.

Tabla 12

Descripción del árido fino de acuerdo con el comparador

Tabla de descripción colorimétrica de la arena		
1	Blanco claro a transparente	Arena de muy buena claridad por no contener materia orgánica, limos o arcillas
2	Amarillo pálido	Arena con poca presencia de materia orgánica, limos o arcillas. Se considera de buena calidad

Tabla de descripción colorimétrica de la arena		
3	Amarillo encendido	Contiene materia orgánica en altas cantidades. Puede usarse en hormigones de baja resistencia.
4	Café	Contiene materia orgánica en concentraciones muy elevadas. Se considera de mala calidad.
5	Café chocolate	Arena de muy mala calidad. Existe demasiada materia orgánica, limos o arcillas. No se usa

Nota. Tomado de: (NTE INEN 855, 2010)

Tabla 13

Requisitos granulométricos

Requisitos granulométricos que deben ser satisfechos por el agregado fino	
Tamiz estándar	% en peso del material que pesa el tamiz
3/8" (9.5 mm)	100
No. 4 (4.75 mm)	95 – 100
No. 8 (2.36 mm)	80 – 100
No. 16 (1.18 mm)	50 – 85
No. 30 (600 µm)	25 – 60
No. 50 (300 µm)	5 – 30
No. 100 (150 µm)	0 – 5

Nota. (Ministerio de Obras Públicas, CAP_800, 2000, Pág. 41)

2.3.5.2. Agregados gruesos

Los agregados gruesos constituyen las partículas de mayor tamaño en la composición del hormigón. Estos pueden ser de origen natural o de un proceso de trituración. En el caso de los naturales, provienen de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias. Así como los agregados finos, es imperativo que estén puros y que cumplan la norma ACI-3 3 2 (ACI-318-19, 2022)

Para determinar si un agregado grueso es idóneo para uso en concreto, sus propiedades deben evaluarse. La Tabla 14 establece los límites aceptables y condiciones negativas. Analizando la granulometría, según la norma INEN

696 y los parámetros de ASTM C33-99a (Tabla 17), junto al módulo de finura. También se consideran la densidad aparente (INEN 859), la densidad óptima (INEN 858), la densidad relativa en estado saturado (INEN 857), el contenido de humedad (INEN 862) y la resistencia a la abrasión (INEN 860) (NEC, 2015). Para esta última, es necesario la carga la *Tabla 15*, además de realizar la graduación de la *Tabla 16*.

Tabla 14

Límites para las sustancias perjudiciales en el árido grueso para el hormigón

Sustancia perjudicial	% máximo en masa	Método de ensayo INEN
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables		
a) Para hormigón sometido a abrasión	5	698
b) Para cualquier otro hormigón	100	
Material más fino que el tamiz INEN 75 µm (No. 200)		
a) Para hormigón sometido a abrasión	1	697
b) Para cualquier otro hormigón	1	
Partículas livianas		
a) Para hormigón sometido a abrasión	0.5	699
b) Para cualquier otro hormigón	1	
Resistencia a la abrasión		
a) Para hormigón sometido a abrasión	50	860
b) Para cualquier otro hormigón	500	861
Resistencia a la disgregación (pérdida de masa después de 5 ciclos de inmersión y secado)		
a) Si se utiliza sulfato de magnesio	18	863
b) Si se utiliza sulfato de sodio	12	
<ul style="list-style-type: none"> • En caso de áridos gruesos triturados, si el material más fino que el tamiz INEN 75 µm es polvo resultante de trituración, libre de arcilla o esquistos, el porcentaje se puede aumentar a 1.5 • El método propuesto por el INEN es obligatorio 		

Nota. (Ministerio de Obras Públicas, CAP_800, 2000, Pág. 41)

Tabla 15*Especificaciones para la carga*

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (gr)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 25
D	6	2500 ± 25

Nota. (NTE INEN 860:2011, Pág. 4)**Tabla 16***Gradación de las muestras de ensayo*

Tamaño de las aberturas del tamiz (mm)		Masa por tamaños indicada (gr)			
Aberturas cuadradas		Gradación			
Pasante	Retenido	A	B	C	D
37.5	25	1250 ± 25			
25	19	1250 ± 25			
19	12.5	1250 ± 25	2500 ± 10		
12.5	9.5	1250 ± 25	2500 ± 10		
9.5	6.3			2500 ± 10	
6.3	4.75			2500 ± 10	
4.75	2.36				5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Nota. (NTE INEN 860:2011, Pág. 4)

Tabla 17*Porcentaje de masa que pasa por los tamices normalizados*

Tamaño nominal	Porcentajes que pasa por los límites normalizados												
	100 (mm)	90 (mm)	75 (mm)	63 (mm)	50 (mm)	37.5 (mm)	25 (mm)	19 (mm)	12.5 (mm)	9.5 (mm)	4.75 (mm)	2.36 (mm)	1.18 (mm)
90 a 37.5 3 ½" a 1 ½"	100	90-100		25-60		0-15		0-5					
63 a 37.5 2 ½" a 1 ½"			100	90-100	35-70	0-15		0-5					
50 a 25 2" a 1"				100	90-100	35-70	0-15		0-5				
50 a 4.75 2" a No. 4				100	95-100		35-70		10-30		0-5		
37.5 a 19 2 ½" a ¾"					100	90-100	20-55	0-15		0-5			
37.5 a 4.75 2 ½" a No. 4					100	95-100		35-70		10-30	0-5		
25 a 12.5 1" a ½"						100	90-100	20-55	0-10	0-5			
25 a 9.5 1" a 3/8"						100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5		

Tamaño nominal	100 (mm)	90 (mm)	75 (mm)	63 (mm)	50 (mm)	37.5 (mm)	25 (mm)	19 (mm)	12.5 (mm)	9.5 (mm)	4.75 (mm)	2.36 (mm)	1.18 (mm)
25 a 4.75 1" a No. 4						100	95-100		25-60		0-10	0-5	
19 a 9.5 3/4" a 3/8"							100	90-100	20-55	0-15	0-5		
19 a 4.75 3/4" a No.4							100	90-100		20-55	0-10	0-5	
12.5 a 4.75 1/2" a No. 4								100	90-100	40-70	0-15	0-5	
9.5 a 2.36 3/8" a No. 8									100	85-100	10-30	0-10	0-5

Nota. (Ministerio de Obras Públicas, CAP_800, 2000, Pág. 41)

2.3.6. Propiedades del hormigón fresco

Las siguientes propiedades son observables durante la mezcla del hormigón, permitiendo evaluar su estado y los factores que pueden influir en su comportamiento:

2.3.6.1. Exudación

Se refiere a la tendencia del hormigón fresco a segregar sus componentes, donde el agua asciende hacia la superficie, formando una delgada capa de matriz cementante. Esta propiedad permite identificar si la mezcla presenta un déficit o exceso de agua, afectando la calidad y resistencia del hormigón (Morán Cabré et al., 2000)

2.3.6.2. Consistencia

Define la capacidad del hormigón fresco para deformarse bajo su propio peso. Esta propiedad depende principalmente de la granulometría de los agregados y la cantidad de agua en la mezcla (Morán Cabré et al., 2000). La determinación de la consistencia se realiza mediante el ensayo del cono de Abrams, donde el asentamiento medido clasifica la mezcla de acuerdo con parámetros preestablecidos, como se muestra en la *tabla 18*.

Tabla 18

Característica de la mezcla según su asentamiento

Consistencia	Consistencia
Asentamiento (cm)	Asentamiento (cm)
Seca (S)	0 a 2
Plástica (P)	3 a 5
Blanda (B)	6 a 9
Fluida (F)	10 a 15
Líquida (L)	16 o más

Nota. (JIMENEZ MONTOYA P.; GARCIA MESEGGUER A.; MORAN CABRE E., 2001)

2.3.6.3. Trabajabilidad o Docilidad

Esta propiedad indica la facilidad con la que el hormigón fresco puede ser mezclado, transportado, colocado y compactado en obra. Depende de

factores como la plasticidad, que es la capacidad del hormigón para ser moldeado; la consistencia, que se refiere a la facilidad con que se deforma el hormigón fresco; y la cohesión, que es la resistencia del hormigón a la segregación de sus componentes. Es importante destacar que la trabajabilidad disminuye con el tiempo debido al inicio del proceso de fraguado desde el momento de la mezcla (Morán Cabré et al., 2000)

2.3.6.4. Homogeneidad

La homogeneidad se refiere a la distribución uniforme de todos los componentes del hormigón en la mezcla. Esto implica que, al tomar muestras de diferentes puntos de la mezcla, estas deben presentar características similares. Una mezcla homogénea se logra mediante un proceso de mezclado adecuado, evitando la segregación y asegurando una distribución uniforme de los materiales (Morán Cabré et al., 2000)

2.3.6.5. Masa Específica

La masa específica, o densidad, del hormigón se define como la relación entre la masa del hormigón fresco y el volumen que ocupa (Morán Cabré et al., 2000). Esta propiedad puede determinarse tanto en el hormigón compactado como en el no compactado. Para obtener la densidad, se debe:

- Determinar el volumen y la masa de un cilindro vacío y previamente engrasado.
- Pesar el cilindro lleno de hormigón fresco.
- Restar la masa del cilindro vacío a la masa del cilindro lleno para obtener la masa del hormigón.
- Dividir la masa obtenida entre el volumen del cilindro para calcular la densidad.

Este procedimiento posibilita ejecutar las correcciones requeridas en los componentes de la mezcla, para que así se alcancen las propiedades ideales para el hormigón.

2.3.7. Propiedades del hormigón endurecido

El hormigón, al endurecerse, experimenta una serie de transformaciones fisicoquímicas influenciadas por factores ambientales, temporales y de temperatura,

que lo llevan de un estado plástico a uno sólido. Este proceso, conocido como fraguado, confiere al material propiedades distintas a las iniciales, las cuales dependen de sus componentes y de las condiciones mencionadas. A continuación, se detallan algunas de las principales propiedades físicas del hormigón endurecido:

2.3.7.1. Propiedades físicas

Densidad

La densidad del hormigón se define a través de la relación entre su masa y el volumen ocupado. Claro, esta propiedad se ve influenciada por la naturaleza misma de los materiales constitutivos, así como, la granulometría y el método de compactación empleado en su colocación en la obra. Por cierto, en un hormigón bien compactado con áridos normales, la densidad típicamente fluctúa entre, 2300 y 2500 kg/m³. En el caso de utilizar áridos ligeros, la densidad puede estar en rangos de 1,000 y 1,300 kg/m³, mientras que con áridos pesados dicha densidad puede tener valores alrededor de 3,000 y 3,500 kg/m³ (Universidad de Alicante, 2020)

Compacidad

La compacidad se define como una propiedad física en la que el hormigón puede llegar a ser lo más denso usando los materiales que tenemos a mano. Es importante una compacidad alta porque con ella hay menos huecos en la mezcla, lo que a su vez minimiza el paso de estratos que puedan dañarlo, esos agentes agresivos que, si los dejas, le hacen daño a la integridad del material. Por lo tanto, un hormigón con buena compacidad presenta una mayor resistencia tanto física como química (Universidad de Alicante, 2020)

Permeabilidad

La permeabilidad se refiere al grado en que el hormigón permite la entrada de líquidos o gases. Esta propiedad depende principalmente de la relación agua/cemento (a/c) utilizada en el diseño de la mezcla. Una menor relación a/c da como resultado en la práctica una menor permeabilidad en la mezcla, lo que mejora la durabilidad del hormigón al limitar la penetración de sustancias potencialmente dañinas (Universidad de Alicante, 2020)

Retracción

La retracción es la disminución de volumen que experimenta el hormigón durante el proceso de fraguado y endurecimiento (Universidad de Alicante, 2020). Este fenómeno puede manifestarse de diversas formas, entre las cuales se incluyen:

- **Retracción hidráulica:** Ocurre debido a la pérdida de agua por evaporación en la pasta de cemento.
- **Retracción térmica:** Se produce por cambios de temperatura durante el proceso de endurecimiento.
- **Retracción por carbonatación:** Resulta de la reacción del hidróxido de calcio presente en el hormigón con el dióxido de carbono del ambiente, formando carbonato de calcio.

Estas retracciones pueden generar fisuras en el material si no se controlan adecuadamente.

Durabilidad

La durabilidad es la habilidad que tiene el hormigón para aguantar las condiciones del ambiente. Y no solo eso, también es sobre mantener sus características, cómo se comporta, con el tiempo. Va de la mano con la permeabilidad y la compacidad de este material. Porque si el hormigón es menos permeable y más compacto eso hace que sea súper difícil para esos agentes. (Universidad de Alicante, 2020)

2.3.7.2. *Propiedades físicas*

Resistencia a la Compresión

Esta es la propiedad mecánica más relevante del hormigón. Se evalúa mediante ensayos en especímenes cilíndricos, siguiendo la norma NTE INEN 1573:2010, que establece el procedimiento y los parámetros necesarios para su determinación. Es recomendable utilizar al menos tres probetas para obtener resultados estadísticamente significativos, ya que pueden presentarse variaciones incluso entre muestras de la misma mezcla. El índice de compresión se ve afectado por la proporción de agua y cemento, es decir, una menor cantidad de agua. En relación con el cemento

usualmente eleva esta resistencia. Además, de eso otros factores juegan un papel importante para aumentar la fortaleza, como la cantidad de cemento usado, la compactación y la forma en que están acomodados los agregados.

Resistencia a la Tracción

El hormigón muestra débil resistencia a la tracción, dada su estructura interna, siendo mejor para aguantar cargas comprimidas. Generalmente, se considera que su resistencia a la tracción es aproximadamente del 10% al 15% de su resistencia a la compresión. Diversas investigaciones han propuesto fórmulas empíricas para estimar la resistencia a la tracción en función de la resistencia a la compresión (Romo Proaño, 2008). Por ejemplo, una expresión común es:

Ecuación 1

Esfuerzo máximo de tracción en función de la resistencia a la compresión

$$f't = 1.5\sqrt{f'c}$$

Nota. (ROMO, Fundamentos de Hormigón, 2008, pág. 20; Cap. I)

Resistencia al Corte

La resistencia al corte se refiere a la capacidad del hormigón para soportar fuerzas paralelas de sentido opuesto que tienden a deslizar sus partículas internas sin provocar flexión. Esta propiedad se evalúa mediante ensayos de corte directo (ACI 318-19, 2019). Basándose en resultados experimentales, se ha sugerido la siguiente relación para estimar la resistencia al corte en función de la resistencia a la compresión:

Donde

$f't$ = es la resistencia a la tracción, y;

$f'c$ = la resistencia a la compresión, ambas en MPa.

Ecuación 2

Esfuerzo máximo de tracción en función de la resistencia a la compresión

$$Vc = \sqrt{f'c}$$

Nota. (ROMO, Fundamentos de Hormigón, 2008, pág. 20; Cap. I)

Donde

V_c = es la resistencia al corte, y;

f'_c = la resistencia a la compresión, ambas en kg/cm^2 .

Resistencia al Desgaste

La resistencia al desgaste es fundamental para asegurar la longevidad del hormigón, es bien usada en estructuras que soportan ambientes ásperos como heladas, calor extremo, nevadas copiosas, o fuertes ráfagas de viento (ICH, n.d.). Para mejorar esta propiedad, se recomienda:

- Utilizar relaciones agua/cemento bajas.
- Emplear agregados gruesos de alta resistencia.
- Seleccionar agregados finos libres de materiales orgánicos.

Estas prácticas contribuyen a minimizar el pronto desgaste y a prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón.

2.3.8. Comportamiento del hormigón

El hormigón presenta de forma general comportamientos elásticos e inelásticos ante la aplicación de cargas, los cuales pueden analizarse mediante la relación conocida como esfuerzo y deformación, más conocida como el módulo de elasticidad o módulo de Young.

2.3.8.1. Comportamiento Elástico

Durante el estado elástico, el hormigón presenta una relación directamente proporcional entre la fuerza ejercida y la deformación que sufre. Las deformaciones son reversibles; es decir que, el hormigón vuelve a su forma original si se elimina la carga. Esta fase precede el punto de esfuerzo máximo que el hormigón podría aguantar (Romo Proaño, 2008). Puede haber pequeñas fisuras, aunque casi no afectan la integridad del material.

2.3.8.2. Comportamiento Inelástico

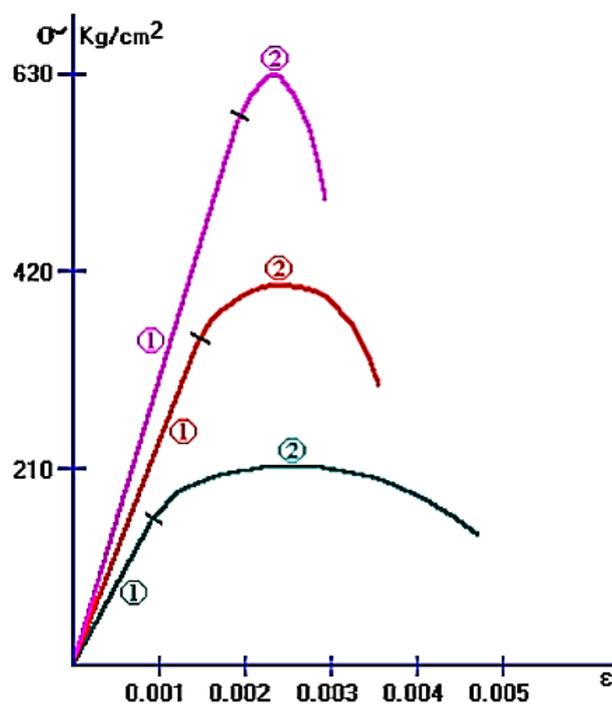
Una vez que se superó del límite elástico, ahí es cuando el hormigón entra en algo que se llama comportamiento inelástico. En esa parte del camino, la relación entre cuánto se estira y cuánta fuerza se aplica ya no es una línea

recta, se vuelve no lineal. Además, cualquier cambio en la forma se queda, pues son permanentes, ahora, durante toda esa fase, el hormigón todavía puede aguantar un poco más, incluso si se le coloca más y más fuerza, hasta que llega su punto de quiebra (Romo Proaño, 2008). El estado elástico, representado en el Tramo 1 de la *Figura 8*, se caracteriza por un comportamiento lineal del hormigón antes de alcanzar su esfuerzo máximo. Durante esta etapa, el material puede desarrollar microfisuras, pero las deformaciones son temporales y desaparecen al retirar la carga.

De otra manera, estado inelástico, mostrado en el Tramo 2 de la figura, presenta una curva que describe la fuerza que el hormigón tolera hasta el punto de ruptura. La *Figura 8*, ilustra el comportamiento del hormigón, a diferentes grados de resistencia.

Figura 8

Comportamiento del hormigón



Nota. (ROMO, Fundamentos de Hormigón, 2008, pág. 17)

De acuerdo con la Norma Ecuatoriana de la Construcción, en el apartado correspondiente al Hormigón Armado, basado en el ACI 318-2011, el cálculo del módulo de elasticidad o también conocido como módulo de Young se determina mediante la pendiente de la secante trazada desde el origen hasta un esfuerzo de

compresión equivalente al 45% de $f'c$. A partir de este criterio, se establece una fórmula para su cálculo aproximado, dentro de la ecuación 3:

Ecuación 3

Cálculo del módulo de elasticidad

$$E_c = 4.7\sqrt{f'c}$$

Nota. (NEC-SE-HM, 2015, pág. 33)

Donde

E_c = módulo de elasticidad en GPa, y;

$f'c$ = la resistencia a la compresión, en MPa.

2.3.9. Curado del hormigón

El curado del hormigón es un paso fundamental para su endurecimiento y fraguado. Realmente implica el uso de humedad de manera controlada y regular, también hay es de estar atento a la temperatura, algo super importante. Este proceso crucial, ya que asegura que el hormigón alcance su máximo potencial. Es decir, obtiene mayor resistencia, mucha durabilidad, y, un beneficio extra, menos fisuras en la superficie (Mehta & Monteiro, 2014)

2.3.9.1. Importancia del curado del hormigón

La relevancia del curado influye en características del hormigón, como su fuerza, su cohesión, y reduce las fisuras por contracción. Si no se cura bien, el hormigón se debilita, porque se evapora el agua antes, y el cemento no se hidrata bien (Mehta & Monteiro, 2014)

Y la temperatura es clave en el curado también. Es bueno mantener el hormigón a más de 10 °C, sino el fraguado da problemas, con el frío ralentizando reacciones y el calor puede crear fisuras térmicas. (Mehta & Monteiro, 2014)

2.3.9.2. Métodos de Curado

Existen varios métodos para el curado del hormigón, los cuales se eligen en función de las condiciones ambientales y el tipo de obra:

Curado con Agua

Consiste en mantener la superficie del hormigón continuamente húmeda mediante riego, inmersión o la aplicación de mantas mojadas. Es uno de los métodos más efectivos para prevenir la evaporación del agua de mezcla y asegurar una hidratación adecuada (Mehta & Monteiro, 2014).

Curado con Materiales Sellantes

Se aplican compuestos selladores o membranas líquidas sobre la superficie del hormigón para formar una barrera impermeable que retiene la humedad. Este método es útil en zonas donde el suministro de agua es limitado o en climas áridos (Mehta & Monteiro, 2014).

Curado al Vapor

Utilizado principalmente en la prefabricación de elementos de hormigón, este método consiste en aplicar vapor a temperaturas controladas. El curado al vapor acelera el desarrollo de la resistencia inicial y es ideal para procesos industriales donde el tiempo de fraguado debe ser reducido (Mehta & Monteiro, 2014).

2.4 PRUEBA DE ASENTAMIENTO – CONO DE ABRAMS

La prueba de asentamiento representa la resistencia del hormigón a experimentar deformaciones y como consecuencia de esta propiedad de ocupar todos los huecos del encofrado o molde donde se vierte, los factores que influyen en el asentamiento es la cantidad de agua de amasado, el tamaño máximo del árido, la forma del árido y su granulometría, para la realización de esta prueba es fundamental que se realice en el hormigón fresco. A esta prueba también se le llama consistencia del hormigón y se realiza mediante el ensayo del cono de Abrams el cual consiste en la colocación del hormigón fresco en un molde con forma de cono truncado dicho molde se llena en capas de igual volumen de las cuales se tiene que varillar 25 veces cada capa, luego se retira el molde y el hormigón se hunde, finalmente se mide el asentamiento que experimenta el hormigón.

Tabla 19*Características de la prueba de asentamiento con el cono de Abrams*

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistemas de colocación	Sistemas de compactación
Muy seca		Prefabricados de alta resistencia, revestimientos de pantalla de cimentación.	Con vibradores de formaleta; hormigón lanzado.	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse precisión.
		Seca 20 a 30 Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración extrema.
Semiseca	35 a 50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple o con refuerzo simple.	Con máquinas operadas manualmente	Vibración mecánica
Media	50 a 100	Pavimentos, losas, muros, vigas y secciones medianamente reforzadas. Elementos estructurales	Colocación manual	Vibración mecánica
Húmeda	100 a 150	esbeltos y secciones bastantes reforzadas.	Bombeo	Vibración mecánica
Muy húmeda	150 o mas	Elementos muy esbeltos, pilotes	Bombeo, tubo-embudo, tremie.	Normalmente no adecuados para vibrarse.

Nota. Tomado de ASTM C143

2.4.1. Materiales

Molde (cono de abrams): Molde en forma de cono truncado de 20 cm de diámetro en la base inferior, 10 cm en la base superior y 30 cm de altura. Las dimensiones del diámetro y la altura tendrán una tolerancia de 3 mm con respecto a las medidas dadas anteriormente, el molde deberá estar libre de abolladuras, deformaciones o mortero adherido.

Placa base: Placa metálica en donde se fijará el molde con grapas que permitan que el mismo pueda ser liberado sin movimiento del molde y la placa base debe ser lo suficientemente grande para contener todo el concreto asentado en el ensayo.

Varilla: Varilla de acero lisa de 5/8”(16mm) de diámetro con extremos redondeados en forma de semiesférica y altura aproximada de 60cm.

Instrumento de medida: Utilizado para medir el asentamiento.

Cuchara: Utilizado para introducir el hormigón fresco en el molde.

Muestra de hormigón fresco.

2.4.2. Procedimiento

Se humedece el molde y la placa base, luego se coloca el cono sobre la misma, se debe apoyar firmemente el molde sobre la base presionando con los dos pies los estribos del molde y no se debe mover los pies durante el llenado del molde.

Llenar el cono en tres capas de igual volumen, cada capa se apisonará con 25 golpes uniformes en cada capa cuidando que la varilla penetre ligeramente la capa anterior, los golpes se realizaran en forma de espiral hacia el centro, en la última capa se debe mantener la mezcla sobre el borde del cono hasta completar los 25 golpes.

Luego se procede a enrasar el cono con ayuda de la varilla rodándola sobre el borde superior del molde.

Seguidamente se procede a levantar el molde de forma vertical, esta operación debe realizarse en un tiempo de 5 ± 2 segundos sin mover el hormigón en ningún momento.

Finalmente se procede a medir el asentamiento, si la superficie es irregular se determina midiendo la diferencia entre la altura del molde y la del punto medio de la parte superior de la muestra después del ensayo.

El tiempo total para realizar el ensayo no debe ser mayor de 2½ minutos. Después de obtener el asentamiento requerido se realiza el moldeo de los cilindros.

Si el hormigón sufre un gran deslizamiento lateral o diagonal por corte hay que repetir el ensayo. Si este fenómeno se produce dos veces consecutivas es señal que al hormigón le falta agregados finos o cemento y la realización de este ensayo no tiene sentido.

2.5 DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGÓN SEGÚN LA NORMA ACI 221

El método ACI para el diseño de una mezcla de hormigón es usado cuando los agregados cumplen con las recomendaciones granulométricas ASTM C33, y este consiste en hallar el volumen de agregado grueso y fino por metro cúbico de concreto.

Para realizar un diseño de mezcla se debe de contar con unos datos esenciales de los materiales que vamos a usar para realizar la mezcla, como lo son:

- Determinación de la granulometría de los agregados.
- Módulo de finura de los agregados.
- Tamaño máximo de la grava.
- Masa unitaria compacta de la grava.
- Capacidad de absorción de los agregados.
- Contenido de humedad de los agregados
- Determinar las densidades del cemento (Ensayos de laboratorio).
- Determinar el asentamiento por Cono de ABRAMS.

Luego de tener los datos anteriores se establecen una serie de pasos para llevar a cabo el diseño de mezcla.

- Determinación de la resistencia de diseño.
- Determinación del Revenimiento.
- Selección del tamaño máximo del agregado.

- Estimación del contenido del aire y del contenido de agua de mezclado.
- Selección de la relación agua- cemento.
- Cálculo del contenido de cemento.
- Estimación de las proporciones de agregados.
- Ajuste por humedad de los agregados.
- Ajuste a las mezclas de prueba.

2.5.1. Determinación de la resistencia de diseño

Primero se debe definir cuál será la resistencia a la compresión que deberá cumplir el concreto. El concreto debe diseñarse y producirse para asegurar una resistencia a la compresión promedio con el propósito de minimizar la frecuencia de resultados de pruebas de resistencia por debajo del valor de la resistencia a compresión especificada del concreto. Para ello se utilizan factores de seguridad que aumentan la resistencia ya previamente determinada por el análisis estructural. Esto con el objetivo de asegurar que la mezcla este en todo momento por encima de los requerimientos calculados.

Según el RNC-07, éste podrá determinarse en base a experiencia de campo (Artículo 131) o por medio de mezclas de prueba de laboratorio (Artículo 132).

Figura 9

Esfuerzo promedio requerido (f'_{cr})

Esfuerzo a compresión especificado $f'c$, kgf/cm²	Esfuerzo promedio requerido a compresión f'_{cr}, kgf/cm²
< 210	$f'c+70$
210-350	$f'c+84$
>350	$1.10f'c+49$

Tabla 5.3.2.2: Esfuerzo promedio requerido a compresión cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar

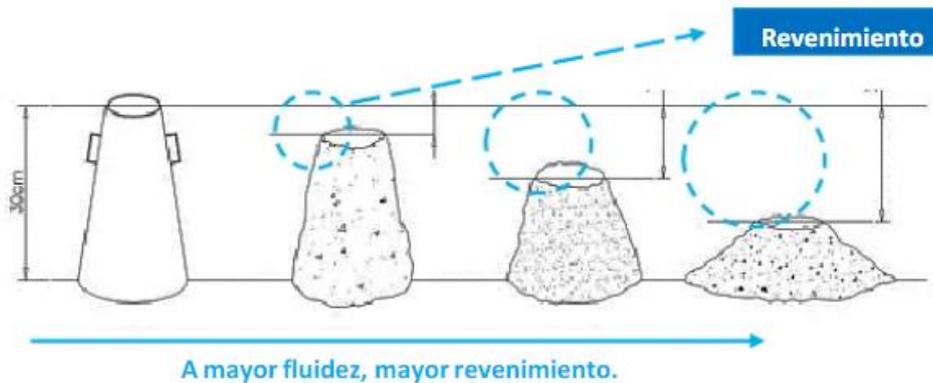
Nota. Se utiliza cuando no se dispone de datos para establecer una desviación estándar. *Tomado de:* RNC-07

2.5.2. Determinación del revenimiento

Se le llama revenimiento a la diferencia de altura que hay entre la parte superior del molde y la parte superior de la mezcla fresca cuando ésta se ha asentado después de retirar el molde. Esta distancia se expresa generalmente en cm y varía según la fluidez del concreto.

Figura 10

Ejemplificación del revenimiento



Nota. Tomado de: RNC-07

La norma ACI 211 recomienda el uso de revenimientos acorde al tipo de proyecto u obra civil mediante la siguiente tabla:

Figura 11

Revenimiento recomendados para diversos tipos de construcción

Tabla A1. Revenimientos recomendados para diversos tipos de construcción.

Tipo de construcción	Revenimiento (cm)	
	Máximo*	Mínimo
Muros de subestructura sencillos, zapatas, muros y cajones de cimentación.	7.5	2.5
Vigas y muros reforzados	10	2.5
Columnas para edificios	10	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	7.5	2.5

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.1; Diseño de mezclas de concreto – IMCYC

Nota. Tomado de: ACI – 211.

2.5.3. Selección del tamaño máximo del agregado.

La A.C.I -211 establece que los agregados bien gradados con mayor tamaño máximo tienen menos vacíos y menor área superficial que los de menor tamaño máximo (ACI-211, n.d.)

El Artículo 121 de (RNC, 2007) señala que el tamaño nominal del agregado grueso no podrá ser mayor a las siguientes medidas:

- Un quinto de la separación menor entre los lados de la cimbra (formaleta).
- Un tercio del peralte (altura) de la losa.
- Tres cuartos del espaciamiento mínimo libre entre varillas individuales de refuerzo.
- En esta práctica se asignó el tamaño máximo del agregado grueso que es de ¾” (19mm).

2.5.4. Estimación del contenido del aire y del contenido de agua de mezclado.

Durante el mezclado quedan partículas de aire atrapado dentro del concreto por ello es necesario considerarlo en el cálculo volumétrico. También es fundamental tener en cuenta las funciones del agua en la mezcla, hidrata las partículas de cemento, también produce fluidez necesaria. La siguiente tabla correspondiente a la norma ACI 211 muestra el contenido de agua y el porcentaje de aire atrapado en función del revenimiento y el tamaño máximo del agregado.

Figura12

Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire

Tabla A2. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregado.

Revenimiento (cm)	Tamaño máximo de la grava (mm)							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Concreto sin aire incluido								
2.5 -> 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 -> 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 -> 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Aire atrapado aprox. (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido								
2.5 -> 5	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 -> 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 -> 17.5	216	205	197	174	174	166	154	---
Promedio recomendado de aire a incluir según el tipo de exposición (%)								
Exposición Ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición Moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición Severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.3; Diseño de mezclas de concreto - IMCYC

Nota. Tomado de: ACI – 211.

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

Esta se determina teniendo en cuenta los requisitos de resistencia y la durabilidad, debido a que el cemento, agua y agregado producen generalmente diferentes resistencias con la misma A/C este es calculable o se puede estimar mediante a tablas una de ellas es la siguiente:

Figura 13

Relación agua/cemento

Tabla A3. Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión.

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm ²)	Relación agua/cemento (a partir del peso)	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.4 (a); Diseño de mezclas de concreto - IMCYC

Nota. Tomado de: ACI – 211.

2.5.6. Cálculo del contenido de cemento.

Ya obtenida la relación Agua/Cemento y la cantidad de agua necesaria para 1 m³ de concreto, procedemos a calcular la cantidad de cemento necesaria para dicho metro cúbico de concreto de la siguiente manera:

Ecuación 4

Contenido de cemento

$$CONTENIDO DE CEMENTO = \frac{(CONTENIDO DE AGUA)}{RELACION AGUA CEMENTO (POR TABLA)}$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

2.5.7. Estimación de las proporciones de agregados.

2.5.7.1. Contenido de agregado grueso

Para determinar el contenido de agregado grueso, se debe contar con los datos de los ensayos de laboratorio de la densidad seca varillada y el módulo de finura del agregado fino. Para el cálculo de la masa del agregado grueso se usa la siguiente fórmula:

Ecuación 5

Contenido de agregado grueso

$$M_{AG} = b_o \times D_{sss}$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

Donde:

M_{AG} es la masa del agregado grueso.

D_{sss} es la densidad seca varillada.

b_o es volumen de agregado grueso, seco y c por unidad de volumen de concreto.

Este último lo podemos hallar mediante la siguiente tabla:

Figura 14

Volumen de agregado grueso (m^3)

Tabla A5. Volumen de agregado grueso (m^3) por volumen unitario de concreto.

Tamaño máximo del agregado grueso (mm)	Módulo de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.6; Diseño de mezclas de concreto - IMCYC

Nota. Tomado de: ACI – 211.

2.5.7.2. Contenido de agregado fino

Se calcula sumando todos los porcentajes de los elementos del concreto y luego se resta con un metro cúbico y así calculamos el porcentaje de arena necesario para nuestro diseño de mezcla del concreto. Para aquello, utilizamos los datos de la gravedad específica de los materiales obtenidos previamente además de la fórmula despejada para obtener el volumen de cada material.

Ecuación 6

Contenido de agregado fino

$$V = \frac{M}{G_s \times \gamma_w}$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

Donde:

V es el volumen para 1 m³ de concreto.

M es la masa del material.

G_s la gravedad específica del material.

γ_w es el peso específico estándar del agua de 1000 kg/m³.

Una vez calculado el volumen de agua, cemento, agregado grueso y aire, aplicando la siguiente fórmula se puede calcular el volumen del agregado fino para 1 m³ de mezcla.

Ecuación 7

Volumen del agregado fino

$$\text{Volumen de agregado fino} = 1\text{m}^3 - \text{SUMA}$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

Para calcular la masa de agregado fino se debe tener el dato de la gravedad específica de la arena y usar la siguiente fórmula:

Ecuación 8

Masa del agregado fino

$$M_{AF} = V \times G_s \times \gamma_w$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

Donde:

M_{AF} es la masa del agregado fino.

V es el volumen de la arena para un metro cúbico de concreto.

G_s es la gravedad específica de la arena.

2.5.8. Ajuste por humedad de los agregados.

Se sabe que los agregados pétreos presentan cierta porosidad, el agua de mezclado puede ser absorbida dentro del cuerpo de las partículas esta puede ser definida de la siguiente manera:

- Seco al horno (S)
- Seco al aire (SA)
- Saturado y superficialmente seco (SSS)
- Húmedo (HS)

Por lo general los agregados están húmedos y a su peso seco se requiere aumentarle el porcentaje de agua que contengan.

Se deben poseer los datos de contenido humedad natural y el grado de absorción de los agregados.

Se utilizan las siguientes fórmulas:

2.5.8.1. Corrección por contenido de humedad de los agregados.

Ecuación 9

Masa del agregado grueso corregida

$$M_{AG}^* = M_{AG} \left(1 + \frac{\% \text{ de Humedad de la grava}}{100} \right)$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

Ecuación 10

Masa del agregado fino corregida

$$M_{AF}^* = M_{AF} \left(1 + \frac{\% \text{ de Humedad de la arena}}{100} \right)$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

2.5.8.2. Corrección por contenido de humedad de los agregados.

Ecuación 11

Contenido de agua corregido

$$A_C = A - (M_{AG}(\% \omega_{AG} - \% Abs_{AG}) + M_{AF}(\% \omega_{AF} - \% Abs_{AF}))$$

Nota. Tomado de: ACI – 211.

Donde:

A_C es el contenido de agua corregido.

A es el contenido de agua.

$\% \omega_{AG}$ es el contenido de humedad natural del agregado grueso.

$\% Abs_{AG}$ es el grado de absorción del agregado grueso.

$\% \omega_{AF}$ es el contenido de humedad natural del agregado fino.

$\% Abs_{AF}$ es el grado de absorción del agregado fino.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

En este capítulo se describe el procedimiento metodológico aplicado en el desarrollo del trabajo de investigación, específicamente dentro del diseño experimental de mezcla de hormigón conocido como dosificación, incorporando cenizas de cáscara de arroz (CCA) en proporciones del 1%, 3% y 5% como sustituto parcial del cemento Portland. Se detallan los procedimientos que se usaron para la elaboración de probetas, se explican con detalle las características de los materiales empleados, junto con el proceso para hacer los especímenes que tienen forma de cilindro. Además, se incluye los experimentos físico mecánicos realizados a los hormigones ya endurecidos, refiriéndonos a las pruebas de resistencia a los 7, 14, 21 y 28 días después de que se curaron, para ver si lograba similar o superior resistencia de 210 kg/cm².

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo.

La presente investigación es de tipo *aplicada*, ya que busca generar conocimientos, los cuales su finalidad es la de utilizarse para resolver problemas determinados en el ámbito de la construcción, específicamente en la mejora de las propiedades mecánicas del hormigón a través de materiales alternativos que sean amigables con el medio ambiente, resultado en la CCA. Según Lozada (2014), “la investigación aplicada se centra en convertir las ideas científicas en soluciones para beneficio de la sociedad, fomentando relación entre la ciencia y el sector industrial”.

3.1.2. Nivel.

El nivel de la investigación es *explicativo*, ya que como su nombre lo indica permite explicar la influencia del reemplazo parcial de cemento por CCA en la resistencia del hormigón a la compresión, identificando las causas de variación en su comportamiento mecánico. Según Eliseo (2021), “el nivel explicativo permite determinar las causas que originan determinados fenómenos, estableciendo relaciones entre las variables estudiadas para comprender su dinámica y generalizar resultados en un contexto teórico”.

3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método.

El presente trabajo de investigación se desarrolla bajo el método *hipotético-deductivo*, el cual permite establecer una serie de hipótesis que son argumentadas mediante la observación empírica y el análisis de los resultados. Según Bastis Consultores (2021), este método se basa en una estructura lógica que parte de premisas generales para derivar hipótesis específicas, las cuales se someten a verificación a través de la experimentación. La aplicación de este método es adecuada para investigaciones científicas como la que se está llevando a cabo que busca determinar el efecto del uso de CCA como sustituto parcial del cemento en la resistencia del hormigón a la compresión, validando o refutando la hipótesis formulada con base en los resultados de los ensayos realizados a distintas edades de curado.

3.2.2. Enfoque.

El enfoque utilizado en esta investigación es *cuantitativo*, ya que se recurre a la medición y recopilación de datos numéricos, específicamente en las propiedades mecánicas del hormigón para establecer relaciones entre las variables involucradas. De acuerdo con Pinto y Maldonado (2018) “el enfoque cuantitativo se caracteriza por el uso de herramientas estadísticas y mediciones objetivas para responder a preguntas específicas de investigación y contrastar hipótesis”. En este caso, se cuantificaron y tabularon los resultados del ensayo de resistencia a la compresión para determinar cómo influye la incorporación de distintos porcentajes de ceniza de cáscara de arroz en el comportamiento del hormigón.

3.2.3. Diseño.

El diseño investigativo de este estudio es experimental, se manipuló la variable independiente, el porcentaje de CCA, para observar sus impactos en la variable dependiente, la resistencia a la compresión del hormigón. Arias y Covinos (2021), indican que el diseño experimental hace posible probar cuantitativamente la relación causa-efecto entre variables, a través de un control estricto de los factores involucrados en el experimento.

3.2.3.1. *Diseño experimental*

El experimento consistió en la preparación de mezclas de hormigón con una dosificación base diseñada para alcanzar una resistencia de 210 kg/cm², sustituyendo parcialmente el cemento por ceniza de cáscara de arroz en proporciones de 1%, 3% y 5% en función de su peso. Para efectos comparativos, también se fabricaron probetas de hormigón convencional sin adición de CCA. En total se elaboraron 32 probetas cilíndricas con cemento tipo GU (Holcim), divididas equitativamente entre los diferentes porcentajes mencionados y ensayadas a edades de 7, 14, 21 y 28 días de curado.

Tabla 20

Tipo de hormigón y porcentaje de ceniza de cáscara de arroz (CCA)

Tipo de Hormigón	Cemento GU (C)	Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA)
CCA0%	100%	0%
CCA1%	99%	1%
CCA3%	97%	3%
CCA5%	95%	5%

Nota: *Cemento GU (C) = Tipo GU; CCA = ceniza de cáscara de arroz calcinada.*

3.2.3.2. *Metodología del diseño*

Selección de materiales: Se eligieron agregados finos y gruesos de origen natural, cemento Portland tipo GU (Holcim) y ceniza de cáscara de arroz en estado seco previamente calcinada a 600 °C durante 2 horas.

Ensayos a los materiales: Se realizaron pruebas como granulometría, peso específico, absorción y contenido de humedad a los agregados, conforme a las normas NTE INEN 696 e INEN 861.

Dosificación del hormigón: La mezcla fue dosificada con base en el método ACI 211.1 (2002), adaptando los porcentajes de reemplazo del cemento por CCA.

Preparación de especímenes: Se elaboraron cilindros de 15 x 30 cm, siguiendo lo establecido por la norma NTE INEN 1573 (2012).

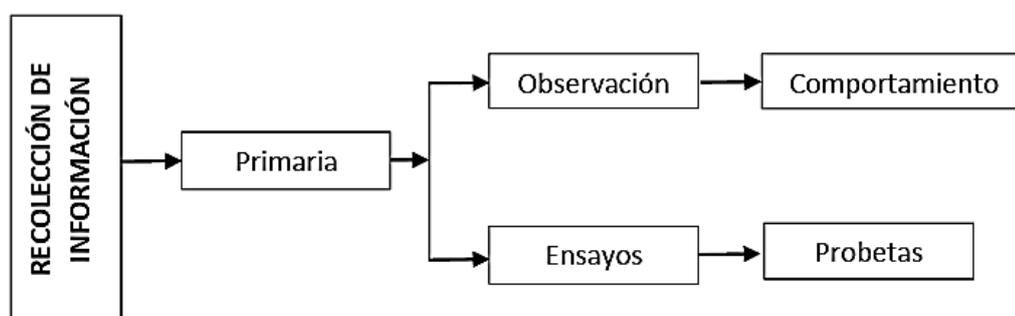
Ensayos en estado fresco: Se determinó el asentamiento de la mezcla mediante el ensayo del cono de Abrams conforme a la norma NTE INEN 1578 (2013).

Ensayos en estado endurecido: Se evaluó la resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días, de acuerdo con NTE INEN 1573 (2012).

Esta estructura facilitó evaluar el efecto de incluir CCA en el desempeño del concreto, al dominar factores externos para confirmar la certeza de los hallazgos.

Figura 15

Plan de recolección de información



3.3. POBLACIÓN, MUESTRA Y MUESTREO

3.3.1. Población.

Condori (2020, p. 2), define a la población como aquellos elementos accesibles o unidades de análisis que forman parte del entorno donde se ejecuta el estudio. Por su parte, Arias y Covinos (2021, p. 113) explican que la población puede ser un conjunto finito o infinito de sujetos que comparten características similares y que son objeto de análisis. En este proyecto experimental, la población está conformada por los materiales utilizados para la elaboración del hormigón: cemento Portland tipo GU, agregados gruesos y finos, agua potable, y cenizas de cáscara de arroz. Específicamente, se seleccionaron como población los agregados pétreos procedentes de la constructora Morocho S.A., ubicada en la ciudad de La Libertad.

3.3.2. Muestra.

La muestra, según Condori (2020, p. 2), corresponde a la fracción representativa de la población, cuya selección debe obedecer a criterios definidos que permitan reflejar con precisión las características del conjunto. Hernández et al. (2017, p. 175), refuerzan que la muestra debe ser un subgrupo representativo, suficientemente homogéneo y relevante para los fines del análisis. En el presente estudio, la muestra consistió en un conjunto de agregados pétreos: grava clasificada como #56 con un tamaño máximo nominal de 1" (25.4 mm) proveniente de la constructora Morocho S.A., y arena natural extraída también del mismo lugar. A estos agregados se les incorporó cemento tipo GU y diferentes proporciones de ceniza de cáscara de arroz (0%, 1%, 3% y 5%) para la fabricación de las probetas de concreto.

3.3.3. Muestreo.

El muestreo, entendido como la técnica utilizada para extraer y estudiar una muestra representativa de una población, se define según Arias y Covinos (2021), como el procedimiento que permite obtener datos fiables sin necesidad de estudiar a todos los elementos del universo. En este trabajo se aplicó un muestreo experimental no probabilístico por conveniencia, el cual se basa en la disponibilidad de los materiales y la factibilidad de su utilización en condiciones controladas. Se elaboraron 32 probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura, divididas en cuatro grupos:

- 8 probetas sin adición de CCA (0%)
- 8 probetas con 1% de CCA
- 8 probetas con 3% de CCA
- 8 probetas con 5% de CCA

Cada grupo fue sometido a ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días, conforme a la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1573 (2012), garantizando la validez de los resultados mediante el uso de muestras replicadas.

3.4. UBICACIÓN Y SECTOR DE ESTUDIO

Los ensayos requeridos para llevar a cabo este estudio se realizaron en las instalaciones del Laboratorio de Suelos, Asfalto y Hormigón de la Universidad

Estatal Península de Santa Elena (UPSE), ubicado en la ciudad de La Libertad, provincia de Santa Elena, Ecuador.

El sector fue seleccionado debido a su accesibilidad, control de condiciones ambientales y disponibilidad de infraestructura técnica, lo que permitió garantizar la precisión y validez de los ensayos realizados. Además, la ubicación es ideal para mover materiales; el cemento GU, los agregados de la constructora Morocho S A, y la ceniza de cáscara de arroz (CCA) preparada para usarse como sustituto parcial al cemento, llegaron sin problemas a los laboratorios para los ensayos. Así, se garantizó que todo el experimento siga las reglas del libro, con estándares técnicos y académicos de confianza, para un estudio con resultados de calidad.

3.5. METODOLOGÍA DEL O.E.1.: CARACTERIZAR LOS MATERIALES COMPONENTES PRESELECCIONADOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGÓN CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA) MEDIANTE ENSAYOS DE LABORATORIO NORMATIVOS

La caracterización de los materiales se realiza como fase inicial fundamental para garantizar la calidad y confiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio. Este proceso incluye la evaluación física de los componentes del hormigón, tales como el cemento tipo GU, la ceniza de cáscara de arroz (CCA), el agregado grueso y el agregado fino, mediante ensayos de laboratorio estandarizados conforme a las normativas ecuatorianas NTE INEN y estándares internacionales ASTM.

Los agregados seleccionados consisten en: agregado grueso #56 (con tamaño máximo nominal de 1" – 25.4 mm), proveniente de la constructora Morocho S.A. en la ciudad de La Libertad, y agregado fino correspondiente a arena natural del mismo lugar. Estos materiales fueron sometidos a los siguientes ensayos:

- Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) en condición suelta o compactada – NTE INEN 858.
- Análisis granulométrico para agregados finos y gruesos – NTE INEN 696.

- Determinación de la absorción y densidad de los agregados gruesos – NTE INEN 857, y para agregados finos – NTE INEN 856.
- Determinación del contenido de humedad total de agregados – NTE INEN 862.

En el tema del cemento, se usará cemento tipo GU de Holcim. A la par, la ceniza de cáscara de arroz (CCA) se calcinará, luego se molerá y tamizará para lograr un material fino, apto para la elaboración del hormigón. La CCA se estudiará mediante pruebas de tamaño, color, y finura, como pide la norma ASTM C61819, esa norma regula las puzolanas naturales para su uso en cemento Portland.

Esta etapa metodológica permite verificar que todos los componentes cumplan con las propiedades físicas y químicas necesarias para ser empleados en la elaboración de mezclas de hormigón.

3.6. METODOLOGÍA DEL O.E.2.: ELABORAR DIFERENTES DISEÑOS DE MEZCLAS DE HORMIGÓN MAYOR O IGUAL A $F'C=210 \text{ KG/CM}^2$ INCORPORANDO CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA) EN PORCENTAJES DE 1%, 3% Y 5% APLICANDO LA NORMATIVA ASTM C618-19, PARA CARACTERIZAR SUS PROPIEDADES MECÁNICAS, CON EL FIN DE EVALUAR SU DESEMPEÑO EN TÉRMINOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y TRABAJABILIDAD

Para este objetivo, se diseñaron diferentes mezclas de hormigón convencional con resistencia objetivo de 210 kg/cm^2 , incorporando la ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustituto parcial del cemento en proporciones del 1%, 3% y 5%, considerando también una mezcla de control sin adición de CCA (0%). El procedimiento de dosificación se realizó conforme al método ACI 211.1, que permite establecer proporciones óptimas de materiales para alcanzar la resistencia requerida.

La inclusión de la CCA se realizó conforme el peso total del cemento GU, acatando las directrices de la norma ASTM C61819, dicha normativa determina los requerimientos químicos, físicos y de procesamiento que las puzolanas naturales deben observar para su uso en adiciones cementantes. Esta norma fue crucial para acreditar el potencial puzolánico de la ceniza empleada, tratada antes por calcinación en temperaturas controladas, seguido de molienda y tamizado.

Se elaboraron un total de 32 probetas cilíndricas de hormigón (de 15 cm x 30 cm), distribuidas en 8 unidades por cada tipo de mezcla (CCA0%, CCA1%, CCA3% y CCA5%). Estas probetas fueron curadas en condiciones estándar en el Laboratorio de Suelos, Asfalto y Hormigón de la Universidad Estatal Península de Santa Elena y sometidas a ensayos de resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días de acuerdo con la norma NTE INEN 1573, utilizando una prensa hidráulica certificada.

Además, se evaluó la trabajabilidad de cada mezcla mediante el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams según la norma NTE INEN 1578, permitiendo comparar el comportamiento en estado fresco de cada dosificación. Estas pruebas permitieron valorar si la incorporación de CCA afecta la consistencia, cohesión y manejabilidad del hormigón.

3.7. METODOLOGÍA DEL O.E.3.: COMPARAR LOS COSTOS DE ELABORACIÓN DE LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CONVENCIONAL Y LA DOSIFICACIÓN DE HORMIGÓN CON EL PORCENTAJE DE CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA) MÁS ADECUADO, EVALUANDO LOS BENEFICIOS ECONÓMICOS DE CCA COMO SUSTITUTO DEL CEMENTO

La metodología para cumplir con este objetivo específico se centró en el análisis comparativo de los costos directos involucrados en la producción de hormigón convencional (sin CCA) y la mezcla modificada con el porcentaje de ceniza de cáscara de arroz (CCA) que obtuvo el mejor desempeño mecánico en los ensayos

de resistencia a la compresión, trabajabilidad y calidad general del material. Este análisis económico se basó en los costos unitarios de los materiales utilizados en la elaboración de las mezclas.

Para establecer una comparación objetiva, se consideraron los siguientes elementos en el análisis de costos:

- Cemento tipo GU (Holcim).
- Agregado grueso #56 (proveniente de la constructora Morocho S.A).
- Agregado fino (arena de la constructora Morocho S.A).
- Agua potable para la mezcla.
- Ceniza de cáscara de arroz (incluyendo el proceso de calcinación, molienda y tamizado).
- Mano de obra y consumo energético durante el proceso de mezclado.

Los datos se recopilaron mediante cotizaciones directas a proveedores locales y mediante la observación y registro de consumos reales durante la elaboración de las probetas en el laboratorio. Se utilizó una hoja de cálculo estructurada para determinar el costo por metro cúbico de hormigón convencional y el de cada una de las dosificaciones con CCA (1%, 3% y 5%).

Posteriormente, se identificó la mezcla con CCA que ofreció mejor relación costo-beneficio en función de su desempeño técnico (resistencia a la compresión y asentamiento) y su costo total por metro cúbico. Esta información se comparó con el costo del hormigón convencional, y se calcularon los ahorros potenciales o incrementos que podrían generarse con la implementación de esta alternativa en obras de pequeña y mediana escala.

3.8. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 21

Operacionalización de variables

Variables	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
<p>Variable Independiente:</p> <p>Diseño de la mezcla de hormigón con CCA (1%, 3% y 5%).</p>	<p>Mezcla dosificada de hormigón con sustitución parcial de cemento por ceniza de cáscara de arroz. Según ASTM C618, la CCA puede actuar como una puzolana natural.</p>	<p>Elaboración de mezclas de hormigón con un reemplazo parcial del cemento por CCA en proporciones de 1%, 3% y 5%, empleando el método ACI 211.1, verificando propiedades físicas y químicas de los materiales según normas INEN y ASTM.</p>	<p>Proporción de CCA</p> <p>Diseño de mezcla</p>	<p>% de reemplazo del cemento por CCA</p> <p>Dosificación en kg/m³</p>	<p>Porcentaje (%)</p> <p>Kilogramos por metro cúbico (kg/m³)</p>

Variab les	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala
Variable Dependiente 1: Resistencia a la compresión del hormigón	Capacidad del hormigón endurecido para soportar cargas de compresión axial, determinada mediante ensayos normalizados.	Medición de la resistencia a la compresión a los 7, 14, 21 y 28 días de curado de probetas cilíndricas de 15x30 cm, de acuerdo con normas INEN 1573 y ASTM C39/C39M.	Edad del curado Propiedades mecánicas	Resistencia en kg/cm ² por día de curado (7, 14, 21 y 28 días)	Kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm ²)
Variable Dependiente 2: Costo del hormigón con CCA	Valor económico de producción por metro cúbico de mezcla de hormigón utilizando CCA en diferentes porcentajes.	Análisis de costos considerando el precio de materiales (cemento, agregados, agua, CCA), mano de obra y energía, para obtener el costo por m ³ de cada dosificación. Comparación con el costo del hormigón convencional.	Composición del costo Tipo de mezcla	Costo total por m ³ Diferencia de costos entre mezclas	Dólares estadounidenses por metro cúbico (USD/m ³) Dólares estadounidenses (USD)

Nota: Las variables fueron definidas y estructuradas conforme a los objetivos específicos del estudio, siguiendo normas ACI 211.1, ASTM C618-19, ASTM C39/C39M y las normas INEN vigentes en Ecuador.

Fuente: Elaboración propia con base en ACI 211.1 (2009), ASTM C618-19, INEN 1573, y literatura científica relacionada.

3.9. EJECUCIÓN, ELABORACIÓN E IDENTIFICACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

3.9.1. Agregados gruesos y finos

Para la elaboración de las probetas de hormigón que incluyen porcentajes de ceniza de cáscara de arroz (CCA), se emplearon agregados naturales, tanto gruesos como finos. El agregado grueso utilizado fue una grava tipo #56, con tamaño máximo nominal de 1" (25.4 mm), procedente de la constructora Morocho S.A., ubicada en la ciudad de La Libertad. Por su parte, el agregado fino corresponde a arena, proveniente del mismo lugar. Estos materiales fueron seleccionados por su disponibilidad local y sus características físico-mecánicas adecuadas para el diseño de mezclas de hormigón con fines experimentales.

Previo a su uso, ambos agregados fueron sometidos a diversos ensayos de caracterización según las normativas ecuatorianas vigentes, los cuales permitieron verificar que cumplieran con las especificaciones técnicas requeridas. Los ensayos realizados fueron:

- Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) en condición suelta y compactada – Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 858.
- Análisis granulométrico – NTE INEN 696.
- Determinación de la absorción y densidad para el agregado grueso – NTE INEN 857, y para el agregado fino – NTE INEN 856.
- Determinación del contenido de humedad total – NTE INEN 862.

3.9.1.1. Ensayo de determinación de la masa unitaria suelta y compactada del árido – NTE INEN 858

Para asegurar la calidad y uniformidad en la dosificación de mezclas de hormigón con ceniza de cáscara de arroz (CCA) añadida, el ensayo de masa unitaria se llevó a cabo, tanto en estado suelto como compactado, para los agregados gruesos empleados en el estudio. Esta prueba ayuda a estimar la densidad aparente del árido, también a calcular el porcentaje de huecos entre las partículas, lo cual es fundamental para ajustar bien la relación agua/cemento y el volumen total de la mezcla, con el propósito de obtener la resistencia a la compresión que se necesita.

Para realizar el ensayo, se usaron equipos e instrumentos regidos por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 858. Entre estos se pueden mencionar:

- Una balanza electrónica, con buena capacidad y precisión de 0,05 kg,
- Un molde cilíndrico metálico resistente, con volumen conocido (altura y diámetro iguales),
- Una varilla de acero, de 16 mm de diámetro y 600 mm de largo, con puntas redondeadas
- Una pala metálica para llenar el molde,
- Un termómetro con sensibilidad de 0,5 °C es muy útil para chequear las condiciones del ambiente durante el proceso.

La muestra del agregado grueso fue previamente secada en un horno a una temperatura constante de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, se dejó enfriar a temperatura ambiente antes de realizar el procedimiento.

Para la masa unitaria suelta, se realizó el siguiente procedimiento:

- El molde fue llenado cuidadosamente con el árido seco, utilizando una pala para verter el material desde una altura inferior a 50 mm, minimizando la segregación de partículas.
- Se evitó todo tipo de compactación durante el llenado.
- Una vez rebosado el molde, la superficie fue nivelada manualmente utilizando una regla o los dedos, distribuyendo las partículas grandes para ocupar los vacíos evidentes y logrando una superficie uniforme.
- La masa del molde vacío y luego con el árido fue registrada con exactitud, con una aproximación de 0,05 kg.

En cuanto a la masa unitaria compactada, se realizó el siguiente procedimiento:

- Llenar el molde en tres capas iguales. Cada capa fue compactada con 25 golpes de la varilla metálica, distribuidos de forma uniforme sobre toda la superficie.
- Durante la primera capa, se tuvo especial cuidado en no golpear el fondo del molde para evitar alteraciones estructurales del ensayo.

- Las capas subsiguientes fueron compactadas sin que la varilla penetrara la capa inferior ya establecida.
- Al finalizar, se llenó hasta el borde y se enrasó nuevamente con una regla, manteniendo una superficie nivelada y representativa, tal como se observa en la figura 16.
- La masa del molde lleno fue registrada para el cálculo correspondiente, como se muestra en la figura 16.

Este ensayo permitió determinar la densidad aparente del árido en ambas condiciones, lo cual fue clave para el diseño de las mezclas de hormigón con sustitución parcial de cemento por CCA en proporciones de 1%, 3% y 5%. A través de estos valores fue posible cuantificar la porosidad del árido, optimizar el volumen de pasta necesaria y establecer un control preciso de la dosificación en la producción de las probetas que posteriormente fueron sometidas a curado y evaluación de resistencia a compresión a los 7, 14, 21 y 28 días.

Figura 16

Enrasado y pesado de la muestra (piedra $\frac{3}{4}$ ")



3.9.1.2. Análisis granulométrico según NTE INEN 696

El análisis granulométrico es una técnica clave para entender cómo están distribuidas las partículas de los agregados de hormigón en cuanto a tamaño. Con este método, lo que se hace es medir la proporción de los tamaños de las partículas en una muestra, tanto las pequeñas como las grandes, es importante para el trabajo del hormigón, para su fuerza, cuánto dura y cómo se comporta mecánicamente. Siguiendo la norma NTE INEN 696, es

fundamental seguir una serie de pasos bien definidos, usando equipos que son bastante precisos para asegurar que los resultados sean exactos y que se pueda tomar buenas decisiones sobre si el material sirve o no.

Para realizar este ensayo, se emplearon los siguientes equipos y materiales y procedimiento:

- Se usa dos balanzas, una para la arena fina, donde la lectura mínima debe ser de 0,1 gramos, o con una exactitud del 0,1% de la carga de ensayo, o, si es mayor, 0,1 g. La otra, es para el árido grueso, o para las mezclas, y su precisión mínima tiene que ser de 0,5 gramos, o el 0,1% de la masa, más o menos. Estas balanzas son fundamentales para poder registrar con certeza las masas que quedan retenidas en cada tamiz, esta información es crucial para crear la curva granulométrica del material. Es importante que el equipo de pesaje esté debidamente calibrado y cumpla con los criterios establecidos para garantizar la trazabilidad y repetibilidad del ensayo.
- Otro equipo clave es el conjunto de tamices normalizados, cuyas aberturas deben estar montadas sobre marcos resistentes que eviten la pérdida de material durante la operación. Estos tamices deben ajustarse a los estándares establecidos en la NTE INEN 154, tanto para tamices normalizados como no normalizados. La disposición de los tamices debe hacerse en orden descendente, de modo que las partículas se separen desde el mayor tamaño hacia los inferiores.
- Para hacer más efectivo el proceso, un agitador mecánico se podría emplear generando vibraciones o movimientos que van y vienen, facilita el paso de las partículas por las mallas.
- Antes de tamizar, secar la muestra en un horno es imperativo; uno que aguante la temperatura fija de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$. El secado debe seguir hasta que la masa sea constante, a menudo 24 horas basta. Esta parte es importante pues la humedad puede cambiar los pesos en cada tamiz, perjudicando la precisión del experimento.
- Una vez seca la muestra, se procede a pesar la cantidad de material requerida, procurando que no exceda la capacidad operativa de los

tamices, con el objetivo de evitar obstrucciones o deformaciones en la malla.

- Durante el proceso de tamizado, el material se coloca cuidadosamente en el tamiz superior y se agita manual o mecánicamente, como se presenta en la figura 17 y 18. Ahora, si se está trabajando con mezclas que tienen pedazos más grandes que 75 mm, hay que tamizarlas a mano, una por una. Después, toca averiguar en cuál abertura de tamiz cada una puede pasar. Esto es para asegurar que cada partícula quede bien clasificada por su tamaño real, sin forzar el material, o peor, dañar el equipo.
- Después de completar la tarea, esos residuos capturados en cada tamiz son pesados con la balanza apropiada, anotando los pesos correctos. La suma completa de las fracciones retenidas debería ser la misma que la masa seca original de la muestra con una diferencia de menos del 0,3%. Si esto se excede, los resultados no valen para aceptar el material, tal vez hubo una pérdida notable en el proceso. Este control asegura la fiabilidad de la prueba, permitiendo interpretar bien la granulometría del árido.
- Para terminar, se hace la curva granulométrica, graficando el porcentaje acumulado de material que atraviesa cada tamiz respecto al tamaño de la abertura. Esa curva es clave para saber si el agregado cumple o no con los requerimientos técnicos y normativos del diseño del concreto, por lo que ayuda con el módulo de finura y la distribución perfecta de las partículas. Los agregados reciclados que se mencionan son materiales diferentes, la curva es esencial, ya que permite acomodar las proporciones para una mezcla pareja y eficaz.

El análisis granulométrico es importante dentro de este estudio, ya que es una herramienta esencial para asegurar que los agregados empleados en la dosificación del hormigón ofrezcan un desempeño eficaz y correcto. Dentro del estudio se enfoca el comportamiento de las combinaciones de hormigón con CCA, esta evaluación resulta crucial, ya que facilita la identificación de cambios importantes en la distribución granulométrica al agregar el residuo, potencialmente afectando la fuerza final ante la compresión. Llevar a cabo esta prueba, respetando los lineamientos de la NTE INEN 696, verifica que

las características de los agregados no presentan riesgos en los resultados de la resistencia del hormigón a lo que se desea llegar.

Figura 17

Tamizado del agregado grueso (piedra ¾")



Figura 18

Tamizado del agregado fino (arena fina)



3.9.1.3. Determinación de la absorción y densidad de los agregados

Agregado Grueso – NTE INEN 857

La determinación de la absorción y la densidad del agregado grueso también es otro ensayo invaluable para el diseño de mezclas de hormigón de alta calidad. Estos parámetros permiten conocer el comportamiento del árido frente al agua y su masa específica, factores que inciden directamente en la dosificación del concreto. Según la norma NTE INEN 857, este método de

ensayo permite establecer la densidad promedio del árido grueso sin considerar los vacíos entre partículas, la densidad relativa (gravedad específica) y su capacidad de absorción de agua.

- Primero que todo, se necesita una balanza de precisión, con una sensibilidad mínima del 0,05 % del peso de la muestra o al menos 0,5 g, usando el valor superior. La balanza debería tener un accesorio especial para colgar el recipiente con la muestra dentro del tanque con agua, asegurando la medición exacta del peso sumergido.
- Además, es fundamental un recipiente para la muestra, como una canasta metálica con malla de 3,35 mm o menos, o incluso, un cubo de similares dimensiones de alto y ancho. La capacidad del recipiente oscila entre 4 y 7 litros, dependiendo del tamaño nominal máximo del árido, que no debería pasar los 37,5 mm. El recipiente debe ser bastante resistente, capaz de aguantar el peso del árido bajo el agua y favorecer el flujo del agua.
- Además, se necesita un tanque de agua hermético donde se pueda suspender el recipiente durante la medición del peso bajo el agua. Este tanque debe mantener una temperatura estable, preferentemente a $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- También se emplean tamices normalizados conforme a la NTE INEN 154 para clasificar el árido antes del ensayo, y un horno de secado con capacidad suficiente para mantener una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el tiempo necesario para el secado completo de la muestra.
- El proceso empieza con secar la muestra de árido en el horno, esperando hasta que su masa quede estable, asegurando así que se erradicó toda la humedad.
- Posteriormente, la muestra debe enfriarse a temperatura ambiente durante un periodo de 1 a 3 horas, o hasta que se pueda manipular sin dificultad.
- Una vez fría, se sumerge completamente en agua durante unas 24, más o menos 4, horas, para que los poros del material se empapen, lo cual es crucial si se quiere medir bien la absorción.

- Es importante mencionar que, si se asegura que las partículas del agregado grueso se han mantenido húmedas de forma continua desde su recolección hasta el momento del ensayo, el paso de inmersión de 24 horas puede considerarse opcional. Esta condición se aplica especialmente cuando los datos obtenidos se usarán en el diseño de mezclas donde los áridos estarán en condiciones de humedad natural.
- Una vez pasado el tiempo en el agua, la muestra sale y se seca por arriba con un trapo que absorba. Se hace con cuidado para quitar solo el agua de encima, sin tocar la de los poros. Las partículas grandes, a veces, se secan solas, así todo es parejo. Si hace falta, un poco de aire ayuda, pero sin que se vaya el agua de adentro.
- Una vez seco superficialmente, se procede a medir la masa del árido en esta condición de saturación superficialmente seca (SSS), lo que permite calcular posteriormente la absorción del agregado.
- Acto seguido la exhibición se suspende en el recipiente bajo el agua del tanque y se determinan su masa aparente sumergida. En esta fase hay que eliminar las burbujas de aire atrapado, que se consigue agitando manualmente el recipiente durante la inmersión.
- Una vez que se mide todo, toca devolver la muestra al horno, esta vez a unos 110 °C, hasta que se seque del todo y su peso no cambie. Es esencial que se logre un peso constante. Con este último paso, se logra saber la masa completamente seca. Este dato, junto con las otras mediciones que se tomó, nos ayudará a calcular la densidad aparente y la densidad relativa también conocida como gravedad específica, y se pueda hacerlo en diferentes estados: seca, saturada, y sumergida.

Los hallazgos aquí son fundamentales para juzgar la cualidad del árido, como reacciona en el concreto. Si un árido muestra alta absorción, quizás sugiera porosidad. Eso podría minar la fortaleza del hormigón, a menos que el diseño de la mezcla sea cauteloso. Por el contrario, saber su densidad ayuda a calibrar los volúmenes de los materiales, diseñando un hormigón estable y parejo.

La norma NTE INEN 857 proporciona además fórmulas específicas para el cálculo de cada uno de estos parámetros. La densidad relativa se calcula como el cociente entre la masa seca y la diferencia entre la masa saturada y la masa sumergida. El porcentaje de absorción se obtiene al comparar la diferencia entre la masa SSS y la masa seca respecto a esta última, expresado en porcentaje.

En efecto, aplicar el protocolo definido en la NTE INEN 857 para calcular la absorción y densidad del agregado grueso, es primordial. Esto no solo da una radiografía técnica del material sino también proporciona los cimientos firmes para crear mezclas de hormigón, que cumplan con lo necesario de la seguridad estructural y que perduren en el tiempo.

Figura 19

Proceso de sumergencia y lavado del agregado grueso para su determinación de la absorción.



Agregado Fino – NTE INEN 856

El procedimiento de determinación de la absorción y densidad del agregado fino se realiza con base en la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 856. Este método establece cómo obtener la densidad promedio de una muestra de árido fino sin considerar el volumen de vacíos entre partículas, así como la gravedad específica o densidad relativa y la capacidad de absorción del material.

Equipos requeridos según NTE INEN 856:

- **Balanza:** Debe ser precisa a 0,05% de la masa de la muestra o 0,5 g, lo que sea mayor, y equipada con un dispositivo para suspender el recipiente en agua desde el centro de la plataforma.
- **Picnómetro:** Puede ser un matraz de 500 cm³, con un volumen legible dentro de $\pm 0,1$ cm³, adecuado para 500 g de muestra de árido fino.
- **Molde cónico truncado y compactador:** El molde metálico debe tener 40 mm ± 3 mm en el extremo superior, 90 mm ± 3 mm en la base y 75 mm ± 3 mm de altura. El compactador debe tener una cara plana de 25 mm ± 3 mm de diámetro y un peso de 340 g ± 15 g.
- **Horno:** Capaz de mantener una temperatura de 110 °C ± 5 °C de manera constante.

Procedimiento técnico:

- **Secado inicial:** La muestra se seca en horno a 110 °C ± 5 °C y se enfría hasta temperatura ambiente. Se añade agua para alcanzar un contenido mínimo del 6% y se deja reposar durante 24 h ± 4 h.
- **Secado superficial:** El exceso de agua se retira de una superficie no absorbente empleando un ligero flujo de aire y agitación constante, tal como lo ilustra la figura 20. Usamos la prueba del cono truncado, para verificar si el árido está listo, si llegó a secarse. Si el árido se deshace un poco al sacar el molde, significa que alcanzó esa condición.
- **Reajuste en caso de sobresecado:** Si el árido se ha secado en exceso, se adicionan algunos cm³ de agua y se deja reposar por 30 minutos antes de repetir el secado y el ensayo del cono truncado.
- **Ensayo del cono truncado:** Se llena el molde con el árido fino de forma suelta, se compacta con 25 golpes ligeros del compactador y se evalúa si el material conserva la forma del molde. Si no lo hace, se considera superficialmente seco, como se muestra en la figura 21.
- **Prueba alternativa para áridos especiales:** Para áridos con alta angularidad o contenido de finos, se verifica el estado seco

observando el colapso parcial al dejar caer un puñado desde 100–150 mm.

- **Ensayo gravimétrico:** Se llena parcialmente el picnómetro con agua y se introduce 500 g \pm 10 g de árido fino superficialmente seco. Se completa con agua hasta el 90% de su capacidad, como se observa en la figura 22.
- **Agitación:** Se elimina aire atrapado manualmente (agitación, inversión, rotación) o con agitador mecánico, siempre que no degrade la muestra.
- **Medición de temperatura:** Se ajusta el picnómetro con su contenido a 23 °C \pm 2 °C y se completa con agua hasta la marca de calibración. Se mide la masa total.
- **Secado final:** Se extrae la muestra, se seca en horno a 110 °C \pm 5 °C, se enfría por 1 h \pm ½ h, y se mide la masa seca.
- **Determinación final:** Se registra la masa del picnómetro lleno solo con agua a 23 °C \pm 2 °C, lo cual se utiliza junto con las demás mediciones para calcular la densidad, gravedad específica y absorción del árido fino.

Figura 20

Secado superficial de la arena fina



Figura 21

Ensayo del cono truncado



Figura 22

Ensayo gravimétrico; llenado de agua y material en el picnómetro



3.9.1.4. Ensayo de cono para determinar el estado Saturado Superficialmente Seco (S.S.S.) del agregado fino

Este procedimiento permite determinar el momento en cual el agregado fino ha alcanzado el estado saturado superficialmente seco conocida como estados SSS, es decir, cuando sus poros están completamente llenos de agua, pero no hay agua libre en su superficie. Se debe llegar a este estado para realizar ensayos de densidad y absorción con precisión.

Equipos necesarios:

- Molde de cono truncado: De metal, con las siguientes dimensiones:

- Diámetro superior: 40 mm ± 3 mm
- Diámetro base: 90 mm ± 3 mm
- Altura: 75 mm ± 3 mm
- Compactador metálico: De masa 340 g ± 15 g, con cara circular de 25 mm ± 3 mm.
- Superficie no absorbente: Lisa y rígida.
- Recipiente para mezclado: Para contener la muestra en proceso.
- Espátula metálica o cuchara de acero.

Procedimiento:

- Colocar el molde sobre una superficie plana no absorbente con el extremo más ancho hacia abajo.
- Llenar el molde con el agregado fino parcialmente seco, sin compactar, en forma suelta hasta el borde.
- Añadir material adicional para que sobresalga del molde.
- Sujetar el molde firmemente y compactar la muestra con 25 golpes ligeros usando el compactador, iniciando cada caída a unos 5 mm sobre la superficie del árido.
- El compactador debe caer por gravedad libremente en cada golpe.
- Retirar el material suelto de la base del molde y levantar el molde verticalmente.

Interpretación de resultados:

- Si el agregado fino mantiene la forma del molde, aún contiene humedad superficial.
- Si el material se desmorona ligeramente al retirar el molde, se ha alcanzado el estado S.S.S.
- Si el material se seca en exceso, se debe agregar una pequeña cantidad de agua, dejar reposar 30 minutos y repetir el procedimiento hasta identificar el estado S.S.S.

En agregados angulosos o con alto contenido de finos, puede que no se desmoronen. En este caso, se verifica el estado S.S.S. dejando caer una porción de agregado desde 100–150 mm: si se observan partículas individuales separadas, se considera S.S.S.

3.9.1.5. *Determinación del contenido total de humedad – NTE INEN 862*

Este ensayo tiene como finalidad calcular el porcentaje total de humedad presente en una muestra de árido (fino o grueso), incluyendo tanto la humedad superficial como la contenida dentro de los poros del material.

Equipos necesarios:

- Horno: Capaz de mantener una temperatura constante de $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Balanza: Con sensibilidad de 0,1% de la masa de la muestra. Debe garantizar precisión dentro del 10% de su capacidad total.
- Recipiente resistente al calor: Tamaño suficiente para evitar pérdida de material por derrame.
- Agitador manual: Espátula o cuchara metálica.

Procedimiento:

- Muestreo y pesaje inicial:
 - ✓ Tomar una muestra representativa del árido.
 - ✓ Determinar su masa húmeda (M_h) en el recipiente, con una aproximación del 0,1%.
- Secado:
 - ✓ Introducir la muestra en el horno durante 24 horas a $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$.
 - ✓ Evitar la pérdida de partículas durante el secado.
- Verificación de secado completo:
 - ✓ El secado se considera completo cuando un mayor tiempo de exposición al horno no produce una pérdida de masa mayor al 0,1%.
- Enfriamiento y pesaje final:
 - ✓ Enfriar la muestra a temperatura ambiente.
 - ✓ Determinar la masa seca (M_s) con aproximación del 0,1%.
- Cálculo de humedad total (H%):

$$\text{Humedad}(\%) = \frac{\text{Masa}_{\text{húmeda}} - \text{Masa}_{\text{seca}}}{\text{Masa}_{\text{seca}}} * 100$$

Figura 23

Ensayo de humedad; secado y pesado de la muestra



Tabla 22

Tabla resumen de equipos y procedimientos

Elemento	Descripción técnica
Horno	Constancia térmica 110 ± 5 °C
Balanza	Precisión del 0,1% de la carga de ensayo
Recipiente para muestra	Resistente al calor, volumen suficiente
Molde de cono truncado	Diámetros: 40 mm sup., 90 mm base. Altura: 75 mm
Compactador metálico	340 g \pm 15 g. Diámetro cara: 25 mm \pm 3 mm
Criterio de S.S.S.	Desmoronamiento ligero indica ausencia de humedad superficial
Método de verificación alternativa	Caída libre del árido desde 100–150 mm para observar separación de partículas

3.9.1.6. Ensayo de abrasión de Los Ángeles para agregado grueso (ASTM C131 / ASTM C535)

Este procedimiento permite determinar la resistencia al desgaste, es decir, que tan duro es el material por abrasión e impacto del agregado grueso mediante el ensayo de abrasión de Los Ángeles. Es un ensayo fundamental

para evaluar la calidad del árido destinado a la producción de concreto, ya que simula las condiciones de desgaste que sufren los agregados en mezclas y estructuras durante su vida útil.

Equipos necesarios:

- Máquina de Los Ángeles: Cilindro de acero de 710 mm de diámetro interior y 508 mm de longitud interior, montado horizontalmente sobre ejes y capaz de girar a 30–33 revoluciones por minuto.
- Esferas de acero (carga abrasiva): De diámetro aproximado de 46.8 mm, con masa entre 390 g y 445 g cada una.
- Tamices estándar: De aberturas 37.5 mm, 25.0 mm, 19.0 mm, 12.5 mm y 1.70 mm, según el tamaño nominal del agregado.
- Balanza: Capacidad mínima de 5 kg, con precisión de 0.1 g.
- Horno: Capaz de mantener 110 ± 5 °C para el secado del agregado.
- Recipientes metálicos o bandejas resistentes al calor.

Procedimiento:

- Preparación de la muestra:
 - ✓ Selección del tamaño de la muestra, por ejemplo, 3/4" o 19.0 mm nominal.
 - ✓ Lavar el agregado para eliminar polvo adherido y secarlo en horno a 110 ± 5 °C hasta masa constante.
 - ✓ Enfriar la muestra a temperatura ambiente y pesar la masa seca total (P_0) con una aproximación del 0.1%.
- Carga de la muestra y las esferas:
 - ✓ Introducir el agregado seco en el tambor de la máquina.
 - ✓ Agregar la carga de esferas de acero según la norma ASTM C131 (para tamaños menores a 37.5 mm) o ASTM C535 (para tamaños mayores), típicamente de 6 a 12 esferas dependiendo del tamaño y masa de la muestra.
- Rotación del tambor:
 - ✓ Cerrar herméticamente el tambor.
 - ✓ Hacer girar la máquina a 30–33 rpm durante 500 revoluciones.
- Tamizado del material:

- ✓ Descargar el contenido del tambor con cuidado.
- ✓ Separar las partículas desgastadas mediante el tamiz de 1.70 mm (No. 12).
- ✓ Lavar y secar el material retenido y el que pasa el tamiz.
- Cálculo del desgaste por abrasión (pérdida de masa):
 - ✓ Pesar el material que pasó por el tamiz (Pf).
 - ✓ Calcular el porcentaje de desgaste con la fórmula:

$$\% \text{ de perdida} = \frac{P_o - P_f}{P_o} * 100$$

Donde:

Po = Peso antes del ensayo.

Pf = Peso después del ensayo por tamiz No. 12.

Consideraciones

Los agregados gruesos con una pérdida por abrasión menor al 40% se consideran aptos para uso en concreto estructural, según especificaciones. Una pérdida elevada indica que ese material tiene una baja resistencia a la fragmentación y al desgaste, lo cual compromete la durabilidad del concreto ya su vez los ensayos de compresión que se someten en laboratorio.

Tabla 23

Resumen de equipos y procedimiento del ensayo de abrasión de Los Ángeles

Elemento	Descripción técnica
Máquina de Los Ángeles	Tambor de acero de 710 mm diámetro × 508 mm largo
Esferas de acero	Ø ≈ 46.8 mm; masa individual entre 390–445 g
Tamices	Series estándar: 37.5 mm a 1.70 mm
Balanza	Precisión del 0.1% sobre la masa total
Horno	Temperatura constante de 110 ± 5 °C
Criterio de aceptación	Desgaste ≤ 40% (uso estructural)

3.9.2. Cemento

Dentro del proceso experimental de esta investigación, el cemento constituye uno de los componentes fundamentales en la elaboración de las mezclas de hormigón, tanto tradicional como el modificado con cenizas de cáscara de arroz (CCA). Para asegurar la calidad y compatibilidad del material con los requisitos normativos, se seleccionó el cemento tipo GU de la marca HOLCIM. Cumple esto con las especificaciones ya establecidas en la NTE INEN 2380 ecuatoriana, e igualmente estándares globales como ASTM C1157. Así, se asegura el uso seguro en estudios, dirigidos a evaluar la resistencia del hormigón a la compresión.

El cemento HOLCIM GU se obtiene por la molienda homogénea de Clinker, juntando todo con agregados minerales. La caliza lo que hace es darle flexibilidad al hormigón en su fase fresca, por otro lado, la puzolana, que es de origen volcánico, para crear cementantes secundarios al reaccionar con hidróxido de calcio, y eso que fortalece la matriz del hormigón, que es como su esqueleto. En la Tabla 24, se muestra el análisis químico del cemento empleado, donde se explica la concentración de óxidos importantes.

Tabla 24

Análisis químico del cemento HOLCIM GU

Parámetro	RTCR 479:2015	ASTM C1157 GU
Óxido de magnesio (MgO) (%)	≤ 3.0	≤ 6.0
Trióxido de azufre (SO ₃) (%)	≤ 3.0	≤ 4.0

Nota: Adaptado de Holcim (2015).

En términos de composición, el cemento HOLCIM GU presenta proporciones que cambian, del 45% al 64% de Clinker, con agregados minerales del 36% al 55%, más otros ingredientes hasta un 5%. Esas proporciones, que se detallan en la Tabla 25, para comprender el comportamiento mecánico del hormigón ya duro.

Tabla 25*Composición del cemento HOLCIM GU*

Componente	Rango porcentual (%)
Clinker	45 - 64
Adiciones minerales	36 - 55
Otros	0 - 5

Nota: Adaptado de Holcim (2015).

sus características físicas, el cemento HOLCIM cumple con los límites establecidos por el reglamento técnico RCTR 479:2015, los criterios de desempeño de la norma ASTM C1157 para cementos hidráulicos. Entre sus propiedades se encuentra su resistencia a compresión a diferentes edades, su comportamiento ante el fraguado, y su estabilidad dimensional, como en la Tabla 26.

Tabla 26*Propiedades físicas del cemento HOLCIM GU*

Ensayo	Requisito máximo o mínimo	Resultado
Contenido de aire (%)	12.0	12.0
Resistencia a compresión (MPa)		
- A los 3 días	≥ 13	13
- A los 7 días	≥ 20	20
- A los 28 días	≥ 28	28
Fraguado inicial (min)	≤ 45	45
Fraguado final (min)	≤ 420	420
Expansión autoclave (%)	≤ 0.8	0.8
Expansión en mortero a 14 días (%)	≤ 0.02	0.02
Falso fraguado (%)	≥ 50	50

Nota: Adaptado de Holcim (2015).

Un aspecto relevante en este estudio es el tipo de puzolana utilizada en el cemento HOLCIM, la cual presenta un elevado contenido de sílice reactiva, lo que facilita la formación de silicatos de calcio hidratados (C-S-H), fundamentales en el desarrollo de resistencia mecánica. Este mecanismo es similar al esperado con la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz, cuyo contenido de sílice también permite una acción puzolánica favorable. La Tabla 27 presenta los requisitos que debe cumplir una puzolana según la norma ASTM C618, parámetros que se utilizaron como referencia para contrastar las propiedades químicas de la CCA empleada.

Tabla 27

Requisitos de componentes minerales en puzolana

Propiedad	Puzolana HOLCIM	ASTM C618
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (%) mínimo	80	70
Trióxido de azufre (SO ₃) (%) máximo	2	4
Contenido de humedad (%) máximo	2	3
Pérdida por ignición (%) máximo	10	10
Índice de actividad a 7 o 28 días (%) mínimo	75	75

Nota: Adaptado de Holcim (2015).

Analizando a fondo el cemento, relacionándolo con normas, tanto locales como globales, establece un fundamento sólido para pruebas. Así, incorporar la CCA como un ingrediente que complementa al cemento, nos permite examinar su efecto en las cualidades del concreto, eliminando variables descontroladas en otros materiales.

3.9.3. Ceniza de cascara de arroz (CCA)

La CCA, obtenida de quemar la capa exterior del grano de arroz, es un residuo de la industria agropecuaria. Cuando se somete a un tratamiento térmico bien controlada entre 600 °C y 700 °C, la ceniza obtiene propiedades puzolánicas, funcionando como reemplazo parcial sostenible del cemento Portland en el

concreto. Esa acción no sólo disminuye el daño al ambiente, provocado por la manufactura del cemento, sino que también aprecia residuos agrícolas, haciendo el proceso constructivo más eficiente.

La actividad de la CCA se relaciona fuertemente con su sílice amorfa, su porosidad, y el tamaño específico de su superficie. Cuando se queman apropiadamente estas cenizas pueden hasta tener un 85 de dióxido de silicio (SiO_2), que ayuda a crear cementos secundarios cuando reaccionan con hidróxido de calcio, ese liberado cuando el cemento se hidrata, especialmente esos geles de silicato de calcio hidratados (C-S-H)

Investigaciones diversas que incluyen análisis muestran que la CCA no sólo incrementa la resistencia a la compresión del hormigón, al tiempo, sino que también aporta una mejor mezcla, trabajable y duradera. Además, estudios como el de Montero (2017), y Graus y Zelada (2023), confirman que reemplazos entre el 5% y 15% del cemento por CCA muestran resultados favorables en términos de desempeño mecánico y reducción de costos.

Tabla 28

Composición química típica de la CCA

Componente	Rango (% en masa)
Dióxido de silicio (SiO_2)	80.0 – 92.0
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	0.5 – 2.5
Óxido férrico (Fe_2O_3)	0.3 – 2.0
Óxido de calcio (CaO)	0.5 – 2.0
Óxido de potasio (K_2O)	1.5 – 3.0
Pérdida por ignición	≤ 6.0

Nota: Valores aproximados según Graus y Zelada (2023) y Montero (2017).

Tabla 29*Características físicas de la CCA*

Propiedad	Valor promedio	Unidad
Color	Gris claro a blanco	-
Densidad	2.1 – 2.3	g/cm ³
Área superficial específica	20,000 – 30,000	cm ² /g
Tamaño medio de partícula	10 – 45	µm
Temperatura de calcinación óptima	600 – 700	°C

Nota: Adaptado de Montero (2017).**Tabla 30***Comparación entre la CCA y otros materiales cementantes suplementarios*

Material	SiO₂ (%)	Al₂O₃ (%)	Fe₂O₃ (%)	CaO (%)	Aplicación típica
Ceniza de cáscara de arroz	80 – 92	0.5 – 2.5	0.3 – 2.0	0.5 – 2.0	Sustituto puzolánico parcial del cemento
Humo de sílice	≥ 96	0.3	0.2	0.03	Alta resistencia y durabilidad
Ceniza volante	50 – 60	20 – 30	5 – 9	≤ 2	Hormigón estructural y masivo
Metacaolín	49 – 73	23 – 45	≤ 4	≤ 2.7	Cementante suplementario

Nota: Adaptado de Montero (2017).

Figura 24

Quemado de la cascara de arroz



Figura 25

Almacenamiento y molienda de la ceniza de cascara de arroz (CCA)



Figura 26

Producto final de la ceniza de cascara de arroz (CCA)



3.9.4. Agua

El agua es crucial para hacer hormigón, realmente juega un papel clave en la hidratación del cemento. Esto es el secreto para que el concreto tenga fuerza y resista químicamente bien. No se trata solo de mezclar todo y hacerlo fácil de manejar, lo verdaderamente importante es que el agua ayuda a que el cemento se hidrate correctamente, y así el hormigón se vuelve más fuerte y dura más tiempo.

Según la ASTM C1602-18a, el agua que se usa no debería tener sustancias o estratos indeseables que interfieran con la hidratación del cemento o que dañen

los agregados. El agua potable, es decir de la que se puede beber, suele ser la mejor para la construcción, ya que su composición está afinada para evitar contaminantes que puedan fastidiar al concreto. Pero el agua de río o reciclada también sirve, siempre y cuando cumpla con esas reglas.

Es importante destacar que la presencia excesiva de sales, materia orgánica, aceites o sólidos disueltos puede perjudicar la resistencia final del concreto, generar corrosión en el refuerzo de acero y reducir la adherencia de los materiales. El agua utilizada debe someterse a ensayos fisicoquímicos para asegurar que su pH, contenido de cloruros, sulfatos y alcalinidad se mantenga dentro de límites permitidos. La relación agua/cemento (a/c) es fundamental para que el concreto aguante pues mucha agua puede crear poros. Es aconsejable calibrar esta relación pensando en la estructura, el clima y las propiedades que uno le busca al hormigón.

Tabla 31

Requisitos fisicoquímicos del agua para uso en hormigón (según ASTM C1602-18a)

Parámetro	Valor Máximo Permitido	Observaciones
pH	6.0 – 8.5	Valores fuera del rango pueden alterar el fraguado
Sólidos disueltos totales	≤ 2000 mg/L	Alta concentración reduce resistencia
Cloruros (como Cl ⁻)	≤ 500 mg/L	Corrosivo para armaduras
Sulfatos (como SO ₄ ²⁻)	≤ 1000 mg/L	Puede provocar expansión y fisuración del concreto
Materia orgánica	≤ 50 mg/L	Inhíbe hidratación y afecta resistencia
Aceites o grasas	≤ 10 mg/L	Disminuyen adherencia entre componentes

Nota: Adaptado de ASTM C1602-18a y Arce (2019).

Tabla 32*Comparación de tipos de agua utilizadas en el hormigón*

Tipo de Agua	Adecuación para el Hormigón	Observaciones técnicas
Agua potable	Alta	Recomendada por cumplir criterios de calidad y pH neutro
Agua reciclada	Media	Requiere tratamiento y pruebas químicas previas
Agua de mar	Baja	No recomendada, alta salinidad acelera corrosión
Agua subterránea	Variable	Aceptable si se analiza y controla su composición
Agua de lluvia	Media	Debe almacenarse adecuadamente, puede tener contaminantes

Nota: Adaptado de Herrera (2020) y Bustamante (2021).

3.10. ELABORACIÓN DE LAS PROBETAS PARA LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS DE DISEÑO DE HORMIGÓN

Los diseños de mezclas fueron desarrollados en el Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfalto de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, cantón La Libertad, provincia de Santa Elena. La ejecución de estos diseños contó con la supervisión y asistencia del laboratorista de la carrera de Ingeniería Civil. Para los ensayos se utilizaron moldes cilíndricos de acero desmontables con dimensiones de 300 mm de altura por 150 mm de diámetro, y se realizaron diferentes mezclas en las que el cemento fue sustituido parcialmente por ceniza de cáscara de arroz (CCA) en proporciones de 1%, 3% y 5%.

La preparación de las mezclas se inició con el pesaje de los agregados de acuerdo con la resistencia de diseño, como se presenta en la figura 27. Este proceso se llevó a cabo utilizando básculas calibradas de distintas capacidades. Posteriormente, los

materiales se introdujeron en una concretera de medio saco con una velocidad de rotación de 30 rpm, procedimiento repetido para cada mezcla: una mezcla patrón sin CCA (0%) y las mezclas con los distintos porcentajes de sustitución.

Figura 27

Pesaje de los agregados de acuerdo con su resistencia de diseño



El proceso para mezclar empezó por añadir primero el agregado grueso, seguidamente por la mitad del agua, y depuse el agregado fino, terminando con el cemento o la combinación de cemento y CCA más el resto del agua. Se mezcló hasta obtener una consistencia pareja, como se ve en la figura 28. Las cantidades empleadas fueron determinadas por el método ACI 211.1, teniendo en cuenta pruebas previas a los agregados.

Figura 28

Incorporación de los agregados hasta alcanzar una mezcla homogénea de hormigón



A continuación, se detallan las dosificaciones utilizadas tanto para la elaboración de 8 cilindros por mezcla como para un metro cúbico de hormigón:

Tabla 33

Dosificación para 8 cilindros de ensayo (kg/cm²)

Material	1 M3	0% CCA	1% CCA	3% CCA	5% CCA
Cemento	351.16	17.87	17.70	17.34	16.98
CCA	-	0.00	0.18	0.54	0.89
Grava	1104.97	56.24	56.24	56.24	56.24
Arena	740.33	37.68	37.68	37.68	37.68
Agua	213.91	10.89	10.89	10.89	10.89
Total	2410.37	122.69	122.69	122.69	122.69

Nota: Elaborado por el autor (2025).

3.11. ENSAYO DE REVENIMIENTO DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

El ensayo de revenimiento, también conocido como el ensayo del cono de Abrams, fue llevado a cabo en el Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfalto de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, ubicado en el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena. Este procedimiento fue ejecutado con el acompañamiento del laboratorista de la carrera de Ingeniería Civil, cumpliendo estrictamente con las especificaciones técnicas establecidas en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1578, la cual regula el ensayo para hormigones con cemento hidráulico.

Una vez la mezcla de hormigón fue lista y homogénea, seleccionaron una muestra, representativa para el experimento. La muestra, que se escogió, fue colocada con cuidado al molde, también se realizó el cono de Abrams. Sus dimensiones son estándares; con una altura de 30 cm, 20 cm de diámetro abajo y 10 cm arriba.

Luego, la mezcla se metió en tres capas iguales, cada una ocupando como un tercio del cono. Después, en cada capa, dieron 25 golpes con una varilla, de 16 mm de gruesa, de acero, para que el material quedara bien compactado. Para terminar, al

poner la tercera capa, emparejaron arriba, con cuidado, para que el hormigón quedara justo al borde.

Posteriormente, el cono fue levantado verticalmente de forma continua y sin movimientos bruscos, con el objetivo de no perturbar la muestra durante el proceso de asentamiento. Inmediatamente se midió la diferencia de altura entre el molde y el punto más alto de la muestra colapsada, como se observa en la figura 29. Esta diferencia constituye el valor del asentamiento o revenimiento (slump), que indica la consistencia del hormigón en estado fresco y permite verificar su trabajabilidad.

Este ensayo fue aplicado a cada una de las mezclas diseñadas (0%, 1%, 3% y 5% de sustitución de cemento por CCA), con el fin de comparar los niveles de trabajabilidad y observar si la adición de ceniza de cáscara de arroz influye en el comportamiento plástico del hormigón.

Figura 29

Ensayo del cono de Abrams; medición de asentamiento (revenimiento)



3.12. ELABORACIÓN DE PROBETAS DE HORMIGÓN

Evaluar la resistencia a la compresión, tanto del hormigón usual como el modificado con ceniza de cáscara de arroz, exigió preparar probetas cilíndricas. Estas fueron creadas utilizando moldes metálicos desarmables, siguiendo las normas técnicas concretas y empleando medidas estándar de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura. Se limpian y lubrican con aceite mineral después de utilizarlos para facilitar la extracción y que no cambien la forma.

El proceso para el vaciado del hormigón en los moldes se realizó de forma manual y especial cuidado, donde se procedió a dividir el contenido total del hormigón en

tres capas de igual altura. Cada una de estas capas fue compactada mediante 25 golpes con una varilla de acero lisa de 16 mm de diámetro (según normativa. Posteriormente, para mejorar la compactación y evitar la formación de vacíos o burbujas de aire, se aplicaron 10 golpes suaves con un martillo de goma sobre las paredes exteriores del molde en cada capa. Este procedimiento fue ejecutado de forma uniforme para todas las mezclas, tanto para la dosificación patrón como para las mezclas con reemplazo parcial de cemento por CCA (1%, 3% y 5%).

Una vez que el hormigón ya fue colocado, procedimos a alisar la superficie, empleando una espátula de metal para lograr un buen nivelado, también retiramos el exceso de la mezcla. Las probetas, fueron dejadas en reposo por veinticuatro horas a la temperatura ambiental, protegiéndolas de las corrientes de aire, evitando la luz solar directa, para impedir un fraguado acelerado, o un curado demasiado temprano.

Transcurrido el tiempo de 24 horas se procedió a desencofrar las probetas, seguido de una marcación con una nomenclatura que incluía la fecha exacta del vaciado, el número de cilindro y el porcentaje de CCA que contenía. Esta codificación fue clave para reconocerlas durante el curado y los ensayos.

Las probetas fueron trasladadas a una piscina de curado, en donde se mantuvieron totalmente sumergidas en agua limpia a temperatura controlada hasta alcanzar las edades de rotura establecidas: 7, 14, 21 y 28 días. Durante este periodo se aseguró que las condiciones de almacenamiento fueran estables, evitando fluctuaciones térmicas o pérdida de humedad que pudieran interferir con el desarrollo normal de las propiedades mecánicas del hormigón.

Figura 30

Elaboración y curado de las probetas de hormigón



3.13. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El ensayo de resistencia a la compresión constituye una de las pruebas más relevantes en la caracterización del comportamiento mecánico del hormigón, ya que permite determinar su capacidad para soportar cargas axiales, lo cual es esencial para evaluar la viabilidad de su aplicación estructural. Este ensayo fue ejecutado conforme a lo establecido en la NTE INEN 1573, norma técnica ecuatoriana que regula el procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión en especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.

De acuerdo con esta normativa, se debe considerar un mínimo de dos probetas por cada edad de ensayo; sin embargo, en este estudio se elaboraron dos probetas cilíndricas por cada combinación de mezcla y porcentaje de ceniza de cáscara de arroz (0%, 1%, 3% y 5%), ensayadas a las edades de 7, 14, 21 y 28 días, con la finalidad de obtener datos más representativos y minimizar errores experimentales.

Las pruebas fueron hechas en la prensa hidráulica en el Laboratorio de Suelos, Hormigones y Asfalto de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, en el cantón La Libertad. Antes de nada, se midieron el diámetro, la altura y el peso de cada probeta, tal como muestra la figura 31, esto era importante, controlando las dimensiones antes del ensayo en la máquina.

Figura 31

Medidas geométricas y peso de las probetas



En medio del proceso, las probetas se colocaron bien centradas, encima de superficies planas y niveladas. La carga se aplicó de forma continua y uniforme, sin

parar ni dar golpes, siguiendo la velocidad que dice la norma. Gracias a esto, la falla del espécimen pasó gradualmente, sin problemas, como se ve en la figura 32.

Figura 32

Ensayo a la compresión de las probetas de hormigón



En los casos en que se emplearon almohadillas no adherentes (neoprenos) para la transmisión de carga, se observaron fracturas diagonales o roturas parciales en las esquinas del espécimen, fenómeno contemplado dentro de los modos típicos de falla aceptados por la normativa. Luego alcanzada la rotura completa de la probeta, la máquina registró automáticamente los valores de carga máxima aplicada, como se observa en la figura 33, los cuales fueron utilizados para calcular la resistencia a la compresión (en kg/cm² o MPa), conforme a la fórmula:

Ecuación 12

Fórmula para calcular la resistencia a la compresión

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Donde:

F'c = resistencia a la compresión (MPa),

P = carga máxima aplicada (N),

A = área de la sección transversal de la probeta (mm²).

Finalmente, se recopiló toda la información correspondiente a cada espécimen, incluyendo fecha de ensayo, tipo de mezcla, porcentaje de CCA, edad del concreto,

peso y dimensiones. Esta información fue organizada en tablas para su posterior análisis comparativo y estadístico, lo que permitió identificar la evolución de la resistencia a lo largo del tiempo y el impacto del reemplazo parcial del cemento por ceniza de cáscara de arroz en el desempeño mecánico del hormigón.

Figura 33

Registro de los valores de la carga máxima aplicada.



CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se analizan e interpretan los resultados obtenidos durante la realización de los ensayos de laboratorio del agregado fino y grueso, a la vez se hicieron los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas de hormigón tradicional y hormigón con porcentajes de cenizas de cascara de arroz con el 1%, 3% y 5% con una dosificación de 210 kg/cm^2

El objetivo de este análisis es comparar las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión de un diseño de hormigón tradicional con cemento Holcim de uso general (GU) y uno adicionado con las cenizas de cascara de arroz.

4.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE PESO VOLUMETRICO SUELTO Y VARILLADO DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 858)

4.1.1. Peso volumétrico suelto del agregado grueso y fino

En la Tabla 34 se muestran los resultados de ensayos de peso volumétrico suelto del agregado grueso:

Tabla 34

Determinación de la masa unitaria suelta del agregado grueso

Árido grueso	Muestra 1
Volumen de recipiente (m^3):	0.009737
Masa suelta de material contenido (kg)	25
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: m_s (kg/m^3)	1443,99

En la Tabla 35 se muestran los resultados de ensayos de peso volumétrico suelto del agregado fino.

Tabla 35*Determinación de la masa unitaria suelta del agregado fino*

Árido fino	Muestra 1
Volumen de recipiente (m ³):	0.009737
Masa suelta de material contenido (kg)	25
Masa unitaria (densidad aparente) suelta: ms (kg/m ³)	1443,99

4.1.2. Peso volumétrico varillado del agrega grueso

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de peso volumétrico varillado del agregado grueso que se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36*Determinación de la masa unitaria compactada del agregado grueso*

Árido grueso	Muestra
Volumen del recipiente (m ³): B	0.009737
Masa suelta de material contenida en B (kg): A	26.7
MASA UNITARIA (DENSIDAD APARENTE) suelta: Mc (kg/m ³)	1618.59

4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 696):

4.2.1. Granulometría del agregado grueso

Se presentan los resultados de los ensayos granulométricos estos son mostrados; en la Tabla 37 se presentan la distribución granulométrica del agregado grueso, en la Figura 34 se representa la curva de distribución granulométrica del agregado cumpliendo con las normas.

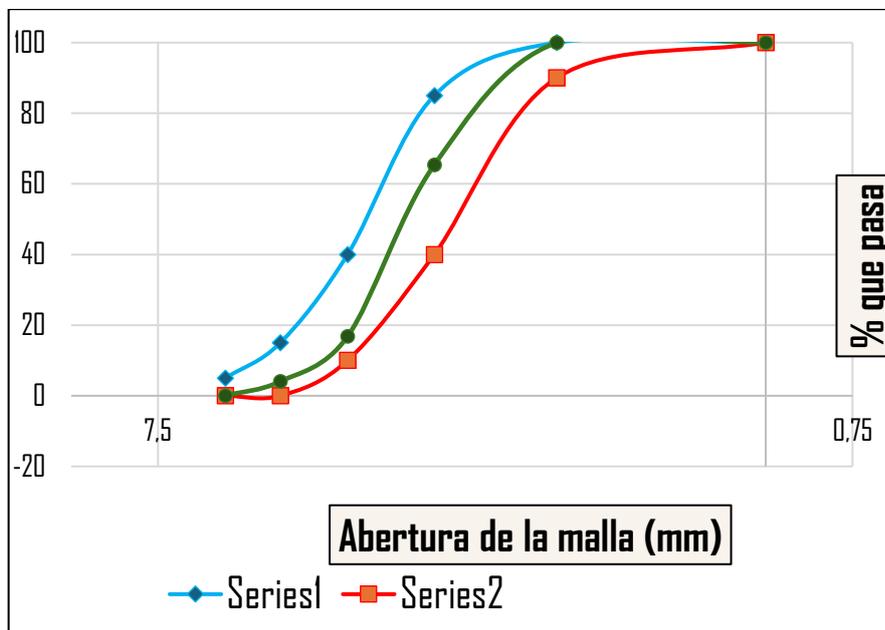
Tabla 37

Análisis granulométrico del agregado grueso

Agregado grueso					
Numero de tamaño		Tamaño máximo nominal (mm)			
Tamiz Nro.	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
2"	50	0	0	0	100
1 ½"	37.5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
¾"	19	4843	4843	34.61	65.39
½"	12.5	6798	11641	83.20	65.39
3/8"	9.5	1784	13425	95.95	16.80
N4	4.75	564	13989	99.98	4.05
N8	2.36	3.220	13992.22	100	0.02
N16	1.18	0		100	0
FONDO TOTAL		0		100	0
		13992.22			
				MF	6.14

Figura 34

Curva granulométrica del agregado grueso.



4.2.2. Granulometría del agregado fino

En la Tabla 38 tenemos los valores obtenidos de granulometría del agregado fino y en la Figura 35 encontramos la curva de distribución granulométrica del agregado fino.

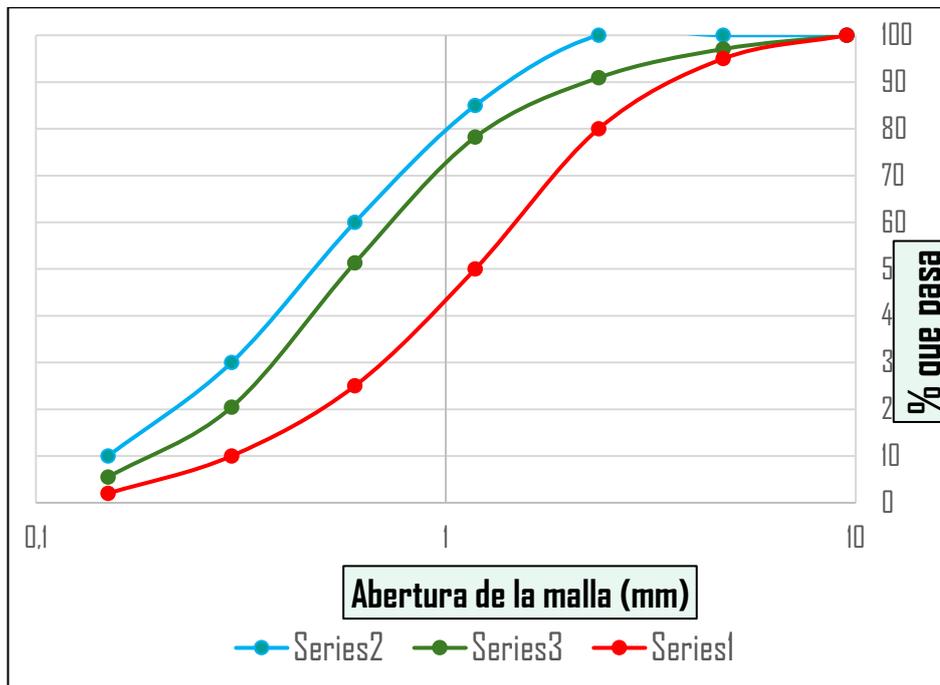
Tabla 38

Análisis granulométrico del agregado fino

Agregado fino					
Tamiz Nro	Abertura (mm)	Masa retenida (gr)	Masa retenida acumulada (gr)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)
3/8"	9.50	0	0	0	100
N4	4.75	58	58	2.94	97.06
N8	2.36	121	179	9.07	90.93
N16	1.18	251	430	21.79	78.21
N30	0.60	531	961	48.70	51.30
N50	0.30	609	1570	79.56	20.44
N100	0.15	295	1865	94.51	5.49
FONDO TOTAL		108.24	1973.24	100	0
		1973.240			
			MF	2.57	

Figura 35

Curva granulométrica del agregado fino



4.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO (NTE INEN 857) Y AGREGADO FINO (NTE INEN 856)

4.3.1. Densidad y absorción del agregado grueso

A continuación, en la Tabla 39 se muestran los resultados de los ensayos de densidad y absorción del agregado grueso.

Tabla 39

Determinación de densidad y porcentaje de absorción del agregado grueso

Árido grueso	Muestra 1
Masa de la muestra en estado S.S.S (gr): B	2000
Masa de la muestra sumergida en agua (gr): C	2177
Masa de la muestra seca al horno (gr): A	2133
Densidad relativa (estado sss): D _{sss} (gr/cm ³)	2.89
Densidad relativa seca (estado seco): D _s (gr/cm ³)	3.08
Densidad relativa aparente: D (gr/cm ³)	3.14
Porcentaje de absorción: Pa (%)	2.063
Densidad relativa SSS (D _{sss})	$D_{sss}=B/(B-C)$
Densidad relativa seca (D _s)	$D_s=A/(B-C)$
Densidad relativa aparente (D)	$D=A/(A-C)$
Porcentaje de absorción (Pa)	$Pa=((B-A)/(A))*100$

4.3.2. Densidad y absorción del agregado fino

A continuación, en la Tabla 40 se muestran los resultados de los ensayos de densidad y absorción del agregado fino.

Tabla 40*Determinación de densidad y porcentaje de absorción de árido fino*

DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA		
P.S.S.S.	500	gr
LECTURA INICIAL	200	gr
LECTURA FINAL	396	gr
W Desalojado	196	gr
V Desalojado	196	cm ³
Densidad relativa (estado sss): D _{ss}	2.55	gr/cm ³
Porcentaje de absorción: Pa (%)	1.32	%

4.4. RESULTADOS DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS (NTE INEN 862)

4.4.1. Contenido de humedad del agregado grueso

A continuación, en la Tabla 41 se muestran los resultados del ensayo de humedad del agregado grueso.

Tabla 41*Determinación del contenido de humedad del árido grueso*

ÁRIDO GRUESO	Muestra 1
Masa de la muestra humedad (g): A	526.48
Masa de la muestra seca al horno (g): B	523.48
Humedad total (%): H	0.57
Humedad total	$H = (A - B) / B * 100$

4.4.2. Contenido de humedad del agregado fino

A continuación, en la Tabla 42 se muestran los resultados del ensayo de humedad del agregado fino.

Tabla 42*Determinación del contenido de humedad del árido fino*

ÁRIDO FINO	Muestra 1
Masa de la muestra humedad (g): A	442.88
Masa de la muestra seca al horno (g): B	439.550
Humedad total (%): h	0.76
Humedad total	$H = (A-B) / B * 100$

4.5. RESULTADOS DEL ENSAYO DE ABRASIÓN DE LOS ÁNGELES

En la Tabla 43 se detalla el peso inicial y final de la muestra de agregado sometido al ensayo, así como el porcentaje de pérdida por abrasión calculado con la fórmula:

$$\% \text{ de pérdida} = \frac{P_o - P_f}{P_o} * 100$$

Donde:

Po = Peso antes del ensayo

Pf = Peso después del ensayo por tamiz No. 12

Tabla 43*Resultados del ensayo de abrasión de Los Ángeles – Agregado grueso*

TAMIZ	PASA	RETIENE	Peso antes del ensayo (g)	Peso después por tamiz N.º 12 (g)	% de pérdida
3/4"	1/2"				
1/2"	3/8"				
Total	—	—	5003	4539	9.27

El porcentaje de pérdida obtenido fue de 9.27%, valor que se encuentra muy por debajo del límite máximo permitido por la normativa MTOP – Capítulo 800, Sección 816-2, que establece un máximo del 50% para agregados destinados a subbases.

4.6. DOSIFICACIÓN $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

4.6.1. Muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Los resultados correspondientes al ensayo de resistencia a la compresión de las probetas estándar, diseñadas para una resistencia de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$. La Tabla 44 contiene los valores obtenidos de diámetro, altura y área, así como del peso y volumen, la cual presentó un asentamiento (revenimiento) de 11.7 cm.

Tabla 44

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de cilindro	#	Fecha de vaciado	D1(cm)	D2 (cm)	Dprom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	vol. (cm ³)
Muestra patrón de 210 kg/cm ²	1	19/02/2025	15.18	15.15	15.17	29.98	180.62	13.44	5415.10
	2	19/02/2025	15.13	15.09	15.11	29.97	179.32	13.18	5374.10
	3	19/02/2025	14.95	14.95	14.95	30.12	175.54	13.02	5287.22
Reven. 11.7 cm	4	19/02/2025	15.02	15.22	15.12	30.06	179.55	13.28	5397.37
	5	19/02/2025	15.21	15.08	15.15	30.18	180.15	13.36	5436.85
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	19/02/2025	15.13	15.12	15.13	30.13	179.67	13.26	5413.52
	7	19/02/2025	15.12	15.10	15.11	30.29	179.32	12.99	5431.48
	8	19/02/2025	15.14	15.23	15.19	30.09	181.10	13.35	5449.31

A continuación, en la Tabla 45 se mostrarán los resultados durante los días 7, 14, 21 y 28 que son pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra patrón de acuerdo con las edades.

Tabla 45

Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenidas de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de cilindro	#	Peso vol. (kg/m ³)	Fecha de rotura	Carga (kn)	Resistencia		Edad (días)
					(Mpa)	(kg/cm ²)	
Muestra patrón de 210 kg/cm ²	1	2481.95	26/02/2025	224.3	12.42	126.65	7
	2	2452.50	26/02/2025	230.1	12.83	130.83	7
	3	2462.54	05/03/2025	266.3	15.17	154.69	14
Revenimiento 11.7 cm	4	2460.46	05/03/2025	293.0	16.32	166.42	14
	5	2457.30	12/03/2025	345.3	19.17	195.48	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	2449.42	12/03/2025	345.7	19.24	196.19	21
	7	2391.61	19/03/2025	372.6	20.78	211.89	28
	8	2449.85	19/03/2025	350.2	19.34	197.21	28

En la Tabla 46 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra patrón de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 46

Resistencias promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$

Tipo de cilindro	#	Densidad (kg/m ³)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(kg/cm ²)	(%)	
Muestra patrón de 210 kg/cm ²	1	2467.28	128.74	98.38	126.65	60.31	7
	2						
	3						
Revenimiento 11.7 cm	4	2461.49	160.55	96.35	154.69	73.66	14
	5	2453.37	195.83	99.82	195.48	93.08	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	2420.78	204.55	103.59	211.89	100.90	28
	7						
	8						

4.6.2. Muestra $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 1% de reemplazo por ceniza de cáscara de arroz.

La Tabla 47 contiene los valores obtenidos de diámetro, altura y área, así como del peso y volumen de las probetas pertenecientes a la muestra con 1% de reemplazo de ceniza de arroz, la cual presentó un asentamiento (revenimiento) de 11.1 cm.

Tabla 47

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas con 1% de reemplazo

Tipo de cilindro	#	Fecha de vaciado	D1 (cm)	D2 (cm)	D Prom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	vol. (cm ³)
Muestra de 210 kg/cm ² con 1% CCA	1	19/02/2025	15.18	15.11	15.15	30.11	180.15	13.10	5424.24
	2	19/02/2025	15.16	15.13	15.15	30.08	180.15	13.14	5418.84
	3	19/02/2025	15.14	15.13	15.14	30.32	179.91	13.42	5454.86
Revenimiento 11.1 cm	4	19/02/2025	15.15	15.16	15.16	30.28	180.39	13.20	5462.07
	5	19/02/2025	15.21	15.11	15.16	29.96	180.50	13.18	5407.92
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	19/02/2025	15.11	15.12	15.12	30.23	179.43	13.12	5424.31
	7	19/02/2025	15.33	15.16	15.25	30.29	182.53	13.22	5528.97
	8	19/02/2025	15.12	15.13	15.13	30.20	179.67	13.13	5426.10

A continuación, en la Tabla 48 se mostrarán los resultados durante los días 7, 14, 21 y 28 que son pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de 1% de cenizas de cáscara de arroz de acuerdo con las edades.

Tabla 48

Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenidas de las probetas de la muestra de $f'c=210$ kg/cm² con 1% de reemplazo de ceniza de cáscara de arroz

Tipo de cilindro	#	Peso vol. (kg/m ³)	Fecha de rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)
					(Mpa)	(kg/cm ²)	
Muestra de 210 kg/cm ² con 1% CCA	1	2415.08	26/02/2025	168.8	9.37	95.55	7
	2	2424.87	26/02/2025	188.6	10.47	106.76	7
	3	2460.19	05/03/2025	245.9	13.67	139.39	14
Revenimiento 11.1 cm	4	2416.66	05/03/2025	241.9	13.41	136.74	14
	5	2437.17	12/03/2025	277.1	15.35	156.52	21
	6	2418.74	12/03/2025	284.8	15.87	161.83	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	7	2391.04	19/03/2025	308.5	16.90	172.33	28
	8	2419.79	19/03/2025	304.5	16.95	172.84	28

En la Tabla 49 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 1% de cenizas de cáscara de arroz de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 49

Resistencias promedio y eficiencia de las probetas con 1%

Tipo de cilindro	#	Densidad (kg/m ³)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(kg/cm ²)	(%)	
Muestra de 210 kg/cm ² con 1% de CCA	1	2419.98	101.15	94.46	95.55	45.50	7
	2						
	3						
Revenimiento	11.1 cm	4	138.07	100.96	139.39	66.38	14
		5	2427.94	159.18	98.33	156.52	74.54
Resistencia de diseño	210 kg/cm ²	6	172.58	99.85	172.33	82.06	28
		7					
		8					

4.6.3. Muestra $f_c=210$ kg/cm² con 3% de reemplazo por ceniza de cáscara de arroz.

La Tabla 50 contiene los valores de diámetro, altura y área, peso y volumen a la muestra con 3% de reemplazo un asentamiento (revenimiento) de 8.8 cm.

Tabla 50

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas con 3% de reemplazo

Tipo de cilindro	#	Fecha de vaciado	D1(cm)	D2 (cm)	Dprom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	vol. (cm ³)	
Muestra patron de 210 kg/cm ² con 3% CCA	1	19/02/2025	15.19	15.22	15.21	30.08	181.58	13.30	5461.86	
	2	19/02/2025	15.16	15.19	15.18	30.09	180.86	13.22	5442.14	
	3	19/02/2025	15.17	15.18	15.18	30.20	180.86	13.38	5462.03	
	4	19/02/2025	15.08	15.18	15.13	30.08	179.79	13.34	5408.11	
Revenimiento	8.8 cm	5	19/02/2025	15.13	15.13	15.13	30.32	179.79	13.31	5451.26
		6	19/02/2025	15.13	15.19	15.16	30.33	180.50	13.17	5474.70
Resistencia de diseño	210 kg/cm ²	7	19/02/2025	15.12	15.16	15.14	29.75	180.03	13.04	6366.85
		8	19/02/2025	15.21	15.27	15.24	30.39	182.41	13.46	6643.58

A continuación, en la Tabla 51 se mostrarán los resultados durante los días 7, 14, 21 y 28 que son pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de 3% de cenizas de cáscara de arroz de acuerdo con las edades.

Tabla 51

Pesos volumétricos, cargas y resistencia obtenidas de la muestra con 3%

Tipo de cilindro	#	Peso vol. (kg/m ³)	Fecha de rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)
					(Mpa)	(kg/cm ²)	
Muestra patrón de 210 kg/cm ² con 3% CCA	1	2435.07	26/02/2025	239.5	13.19	134.50	7
	2	2429.19	26/02/2025	222.8	12.32	125.63	7
	3	2449.64	05/03/2025	277.6	15.35	156.52	14
Revenimiento 8.8 cm	4	2466.67	05/03/2025	256.0	14.24	145.21	14
	5	2441.64	12/03/2025	351.5	19.55	199.35	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	2405.61	12/03/2025	325.1	18.01	183.65	21
	7	2434.72	19/03/2025	364.9	20.27	206.69	28
	8	2428.03	19/03/2025	348.8	19.12	194.97	28

En la Tabla 52 se muestran los resultados de resistencias promedios y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 3% de cenizas de cáscara de arroz de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 52

Resistencias promedio y eficiencia de las probetas con 3%

Tipo de cilindro	#	Densidad (kg/m ³)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(kg/cm ²)	(%)	
Muestra de 210 kg/cm ² con 3% de CCA	1	2432.14	130.06	103.41	134.50	64.05	7
	2						
	3						
Revenimiento 8.8 cm	4	2458.11	150.86	103.75	156.52	74.54	14
	5						
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	2423.58	191.50	104.10	199.35	94.93	21
	7						
	8						

4.6.4. Muestra $f_c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de reemplazo por ceniza de cáscara de arroz.

La Tabla 53 contiene los valores obtenidos de diámetro, altura y área, así como del peso y volumen de las probetas pertenecientes a la muestra con 5% de reemplazo de ceniza de cáscara de arroz, la cual presentó un asentamiento (revenimiento) de 14.5 cm.

Tabla 53

Diámetro, altura, área, peso y volumen de las probetas con 5%

Tipo de cilindro	#	Fecha de vaciado	D1(cm)	D2 (cm)	Dprom (cm)	Alt. (cm)	Área (cm ²)	Peso (kg)	vol. (cm ³)
Muestra de 210 kg/cm ² con 5% CCA	1	19/02/2025	15.13	15.12	15.13	30.10	179.67	13.10	5408.13
	2	19/02/2025	15.14	15.11	15.13	30.13	179.67	13.14	5413.52
	3	19/02/2025	15.15	15.16	15.16	30.28	180.39	13.24	5462.07
Revenimiento 14.5 cm	4	19/02/2025	15.13	15.16	15.15	30.31	180.15	12.95	5460.27
	5	19/02/2025	15.12	15.10	15.11	30.17	179.32	13.08	5409.96
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	19/02/2025	15.07	15.09	15.08	29.77	178.60	12.94	5317.06
	7	19/02/2025	15.21	15.17	15.19	30.28	181.22	13.20	5487.33
	8	19/02/2025	15.23	15.27	15.25	30.13	182.65	13.25	5503.37

A continuación, en la Tabla 54 se mostrarán los resultados durante los días 7, 14, 21 y 28 que son pesos volumétricos, cargas y resistencias obtenidas de las probetas de la muestra de 5% de cenizas de cáscara de arroz de acuerdo con las edades.

Tabla 54

Pesos volumétricos, cargas y resistencia de la muestra con 5%

Tipo de cilindro	#	Peso vol. (kg/m ³)	Fecha de rotura	Carga (KN)	Resistencia		Edad (días)
					(Mpa)	(kg/cm ²)	
Muestra de 210 kg/cm ² con 5% CCA	1	2422.28	26/02/2025	198.4	11.04	112.57	7
	2	2427.26	26/02/2025	198.4	11.04	112.57	7
	3	2423.99	05/03/2025	249.5	13.85	141.02	14
Revenimiento 14.5 cm	4	2371.68	05/03/2025	280.3	15.56	158.67	14
	5	2417.76	12/03/2025	237.4	13.24	135.01	21
Resistencia de diseño 210 kg/cm ²	6	2433.68	12/03/2025	310.8	17.40	177.43	21
	7	2405.54	19/03/2025	315.1	17.39	177.33	28
	8	2407.62	19/03/2025	322.7	17.67	180.18	28

En la Tabla 55 se muestran los resultados de resistencias promedio y eficiencias obtenidas de las probetas de la muestra con 5% de cenizas de cáscara de arroz de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 55

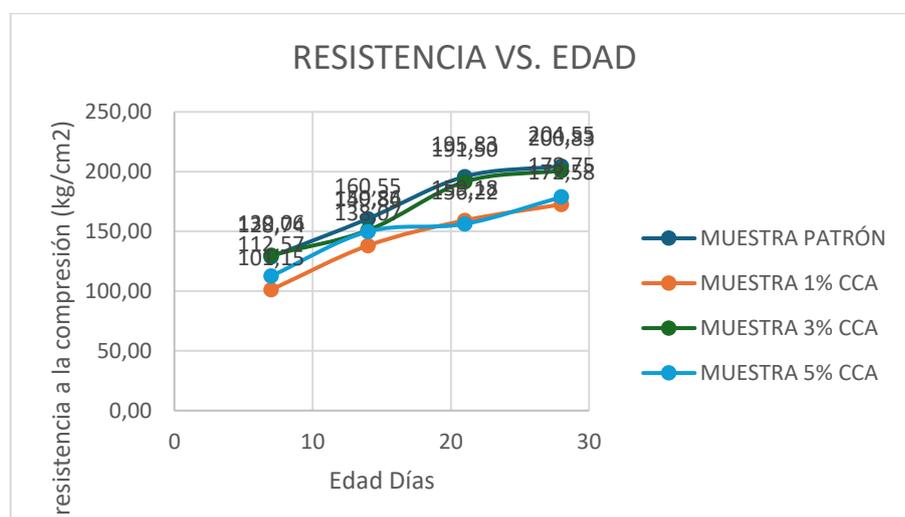
Resistencias promedio y eficiencia de las probetas de la muestra patrón de $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de cenizas de cáscara de arroz

Tipo de cilindro	#	Densidad (kg/m^3)	Resistencia promedio	Eficiencia (%)	Resistencia y eficiencia de diseño		Edad (días)
					(kg/cm^2)	(%)	
Muestra de 210 kg/cm^2 con 5% de CCA	1	2424.77	112.57	100	112.57	53.61	7
	2						
	3	2397.84	149.84	94.11	141.02	67.15	14
	4						
Revenimiento 14.5 cm	5	2425.65	156.22	86.42	135.01	64.29	21
	6						
Resistencia de diseño 210 kg/cm^2	7	2406.58	178.75	99.20	177.33	84.44	28
	8						

En la siguiente figura 36 se muestran las curvas de resistencia vs edad para las distintas muestras de $f'c$ de 210 kg/cm^2 con porcentajes de cenizas de cáscara de arroz (1%, 3% y 5%) que vayan de acuerdo con las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

Figura 36

Gráfico de curvas de "resistencia vs. edad"



4.6.5. Análisis y discusión de resultados de las muestras por cada porcentaje de ceniza de cáscara de arroz.

Una vez hecho los cálculos para la dosificación de hormigón, como se manifestó en las Tablas 44, 45, y 46, se obtuvo una resistencia promedio de $f'c = 211.89 \text{ kg/cm}^2$ a los 28 días de edad, la cual fue superior a la de diseño que es de 210 kg/cm^2 , resultando en una eficiencia del 100.90%, lo que valida la mezcla convencional sin adición de ceniza como un punto de referencia fiable.

Al reemplazar el 1% del cemento con CCA, se observó una resistencia de $f'c = 172.33 \text{ kg/cm}^2$ después de 28 días de curado, resultando en una eficiencia del 82.06%, lo cual significó una caída bastante significativa en comparación con la muestra original. Sin embargo, el porcentaje de reemplazo al 3% fue cuando hubo una mejora notable, ya que se pudo obtener una recuperación asombrosa en la resistencia, logrando un $f'c$ de 206.69 kg/cm^2 , y la eficiencia superó el 95%, específicamente llegó al 98.43%, manifestando que este porcentaje es, por mucho, el ideal, para mantener las propiedades mecánicas del concreto, sin perjudicar su rendimiento.

De manera similar, Praveenkumar et al. (2021), analizaron concretos con reemplazo parcial de cemento por CCA y determinaron que reemplazos entre el 2% y el 3% permiten un desarrollo óptimo de resistencia, mientras que porcentajes superiores presentan reducción de propiedades mecánicas.

A partir de los resultados obtenidos y del respaldo teórico citado, se concluye que con la sustitución del cemento por ceniza de cáscara de arroz al 3% en relación de su peso se mantiene una resistencia a la compresión a 28 días de edad muy cercana al concreto patrón, sin representar una desventaja significativa. Por el contrario, la sustitución al 1% y 5% reduce la resistencia a compresión de manera considerable, por lo que no se recomienda su uso en estas proporciones si se busca cumplir con una resistencia mínima estructural de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$.

4.6.6. Resistencia promedio a 7 días

A continuación, en la tabla 56 se mostrará la resistencia a los 7 días para la dosificación de $f'c 210 \text{ kg/cm}^2$ con cada porcentaje que se reemplazó de cemento por 1%, 3% y 5% ceniza de cáscara de arroz.

Tabla 56

Resistencia a los 7 días para una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por CCA

Porcentaje de CCA %	Resistencia (Kg/cm ²)		Resistencia promedio
	1	2	
0%	126.65	130.83	128.74
1%	95.55	106.76	101.15
3%	134.50	125.63	130.06
5%	112.57	112.57	112.57

4.6.7. Resistencia promedio a 14 días

A continuación, en la tabla 58 se mostrará la resistencia a los 14 días para la dosificación de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con cada porcentaje que se reemplazó de cemento por 1%, 3% y 5% ceniza de cáscara de arroz.

Tabla 57

Resistencia a los 14 días para una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por CCA

Porcentaje de CCA %	Resistencia (Kg/cm ²)		Resistencia promedio
	1	2	
0%	154.69	166.42	160.55
1%	139.39	136.74	138.07
3%	156.52	145.21	150.86
5%	141.02	158.67	149.84

4.6.8. Resistencia promedio a 21 días

A continuación, en la tabla 58 se mostrará la resistencia a los 21 días para la dosificación de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con cada porcentaje que se reemplazó de cemento por 1%, 3% y 5% ceniza de cáscara de arroz.

Tabla 58

Resistencia a los 21 días para una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por CCA

Porcentaje de CCA %	Resistencia (Kg/cm ²)		Resistencia promedio
	1	2	
0%	195.48	196.19	195.83
1%	156.52	161.83	159.18
3%	199.35	183.65	191.50
5%	135.01	177.43	156.22

4.6.9. Resistencia promedio a 28 días

A continuación, en la tabla 59 se mostrará la resistencia a los 28 días para la dosificación de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con cada porcentaje que se reemplazó de cemento por 1%, 3% y 5% ceniza de cáscara de arroz.

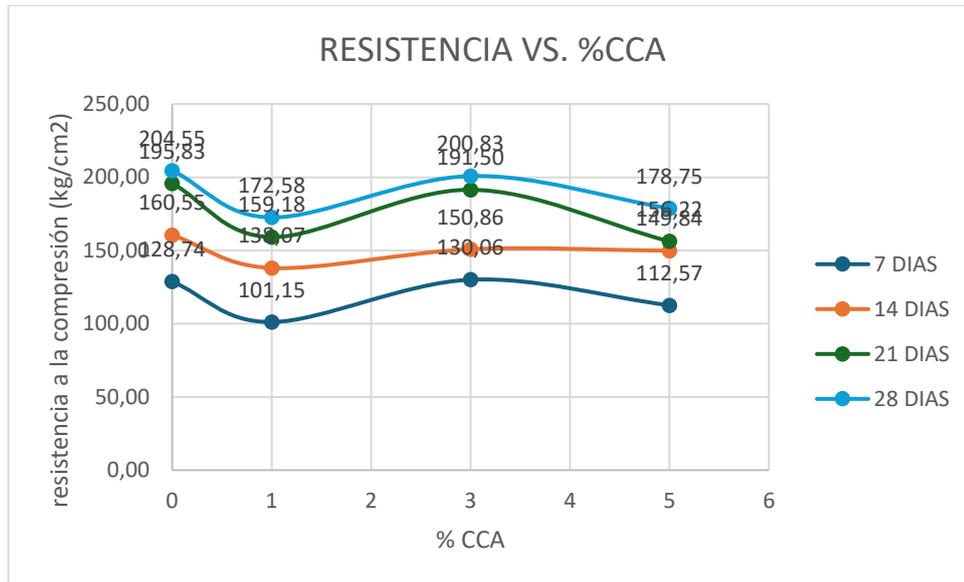
Tabla 59

Resistencia a los 28 días para una resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por CCA

Porcentaje de CCA %	Resistencia (Kg/cm ²)		Resistencia promedio
	1	2	
0%	211.89	197.21	204.55
1%	172.33	172.84	172.58
3%	206.69	194.97	200.83
5%	177.33	180.18	178.75

Figura 37

Gráfico de curvas de "Resistencia vs. %CCA"



4.6.10. Análisis y discusión de los resultados de las muestras de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con distintos % de reemplazo por cenizas de cáscara de arroz por edad

De acuerdo con los resultados obtenidos en las Tablas 56, 57, 58 y 59, se realizó una comparación de la resistencia a compresión del hormigón con una dosificación de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, que es la de diseño, al ser reemplazado parcialmente el cemento por ceniza de cáscara de arroz (CCA) en proporciones del 1%, 3% y 5%. Como se puede observar, la muestra patrón (0% CCA) alcanzó una resistencia promedio de 204.55 kg/cm^2 a los 28 días, confirmando el cumplimiento del diseño planteado.

La relevancia de este estudio se observó cuando se mezcló y elaboró las probetas sustituyendo el 3% del CCA por cemento, pues superó a la muestra de referencia en apenas siete días, como resultado se obtuvo un $f'c$ de 130.06 kg/cm^2 vs. Los 128.74 kg/cm^2 de la mezcla convencional. Además, la resistencia a la compresión a los 28 días para la mezcla con una sustitución del 3% de CCA obtuvo un valor promedio de 200.83 kg/cm^2 , este resultado sugiere que un porcentaje bajo de ceniza puede generar un efecto puzolánico positivo en las primeras etapas del curado, promoviendo la formación de compuestos cementantes adicionales.

En línea con estos hallazgos, Chindaprasirt et al. (2007), en su estudio sobre la incorporación de cenizas en el concreto, concluyeron que reemplazos moderados (hasta 10%) de cenizas ricas en sílice pueden mejorar las propiedades mecánicas del concreto gracias a la actividad puzolánica, especialmente si el material ha sido calcinado adecuadamente. Según su investigación, la reacción con el hidróxido de calcio mejora la densidad de la matriz del concreto y favorece el desarrollo de resistencia a mediano plazo.

Por otro lado, el reemplazo con 1% de CCA mostró una menor resistencia en todas las edades analizadas, alcanzando solo un $f'c$ de 172.58 kg/cm² a los 28 días, lo que representa una reducción del 15.6% con respecto a la muestra patrón (0% de CCA). Finalmente, la mezcla con un 5% de CCA evidenció un desempeño intermedio, aunque presentó fluctuaciones en su ganancia de resistencia con el tiempo, alcanzando 178.75 kg/cm² a los 28 días. Este comportamiento sugiere que, a mayores proporciones, la ceniza actúa más como material de relleno que como reactivo puzolánico, disminuyendo la cohesión interna y la resistencia mecánica del concreto. Esto coincide con lo reportado por Bui et al. (2005), quienes señalaron que dosis superiores al 5% pueden afectar negativamente las propiedades del concreto si la ceniza no posee alta reactividad o si su granulometría no es adecuada.

En definitiva, se determina que el uso de CCA como reemplazo parcial del cemento en proporciones bajas, particularmente del 3%, puede ser beneficioso para mantener o incluso mejorar la resistencia del concreto, siempre que la ceniza cuente con características físicas y químicas óptimas.

4.7. ANÁLISIS DE PRECIO UNITARIO (APU)

En el presente estudio se realizó el análisis de precio unitario correspondiente a un metro cúbico de hormigón convencional con una resistencia característica de $f'c = 210$ kg/cm², comparado con un diseño de mezcla modificado mediante la adición del 3% de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como sustituto parcial del cemento. Esta proporción fue seleccionada por sus resultados representativos en cuanto a resistencia a la compresión.

Los análisis de precios unitarios se elaboraron considerando valores comerciales del mercado local. Para este cálculo, se utilizaron los siguientes costos: cemento tipo I a \$0.16 por kg, piedra ¾" a \$22.00 por m³, arena a \$20.00 por m³, agua potable

a \$1.50 por m³ y ceniza de cáscara de arroz (CCA) a \$0.07 por kg. También se contemplaron costos de materiales auxiliares para el encofrado (tablas, cuarterones, tiras y clavos), así como mano de obra y equipos como concretera y vibrador de manguera.

El diseño de mezcla patrón (0% de CCA), que alcanzó una resistencia promedio de 204.55 kg/cm² a los 28 días, presenta un costo total de \$257.53 por metro cúbico, incluyendo costos directos e indirectos. Por su parte, el diseño de mezcla con el 3% de sustitución de cemento por CCA alcanzó una resistencia promedio de 200.83 kg/cm² y tuvo un costo total de \$256.34 por metro cúbico, según se detalla en la Tabla 61.

El análisis refleja que la incorporación del 3% de CCA permite obtener un hormigón con resistencia mecánica similar a la mezcla convencional, con una leve reducción en el costo unitario del orden de \$1.19 por metro cúbico, lo que representa un ahorro aproximado del 0.46%. Esta variación, aunque modesta en términos económicos, resulta significativa al considerar el potencial ambiental de reutilización de residuos agroindustriales como la ceniza de cáscara de arroz.

Tabla 60

Análisis de precios unitario de Hormigón patrón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
TEMA:	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA)				
RUBRO:	1,00			UNIDAD:	M3
DETALLE:	HORMIGON F'C= 210Kg/cm2				
EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R
Herramienta menor 5 % M/O					2,1669
Concretera de 1 Saco	1,000	5,0000	5,0000	1,1429	5,714
Vibrador de Manguera	1,000	4,0000	4,0000	1,1429	4,571
SUBTOTAL M =					12,4519
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION (CATEGORIAS)	CANTIDAD A	ORNAL / H B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R
Peon (estr.ocp. E2)	5,000	4,1400	20,7000	1,1429	23,6571
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	4,1900	8,3800	1,1429	9,5771
Carpintero (estr.ocp. D2)	1,000	4,1900	4,1900	1,1429	4,7886
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,6500	4,6500	1,1429	5,3143
SUBTOTAL N =					43,3371
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	
Cemento tipo I(50 Kg)	kg	350,000	0,1600	56,0000	
Piedra 3/4"	m3	0,900	22,0000	19,8000	
Arena	m3	0,600	20,0000	12,0000	
Agua	m3	0,200	1,5000	0,3000	
Tablas de Encofrado semidura	u	6,019	5,0000	30,0926	
Cuarton semiduras	u	7,417	3,0000	22,2500	
Tira de encofrado semiduras	u	3,694	1,5000	5,5417	
Clavo 2"x 8	lb	5,000	0,8500	4,2500	
Ceniza de cáscara de arroz (CCA)	kg	0,000			
SUBTOTAL O =					150,2343
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	
SUBTOTAL P =					0,0000
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					206,0233
INDIRECTOS Y UTILIDAD .				25,00%	51,5058
OTROS INDIRECTOS %					
COSTO TOTAL DEL RUBRO					257,5291
VALOR OFERTADO				\$	257,53

Tabla 61

Análisis de precios unitario de Hormigón patrón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con sustitución del 3% de CCA

ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS					
TEMA:	ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN TRADICIONAL A LA COMPRESIÓN CON HORMIGÓN ADICIONADO CON CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ (CCA)				
RUBRO:	1,00			UNIDAD:	M3
DETALLE:	HORMIGON FC= 210Kg/cm2				
EQUIPOS					
DESCRIPCION	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R
Herramienta menor 5 % M/O					2,1669
Concretera de 1 Saco	1,000	5,0000	5,0000	1,1429	5,714
Vibrador de Manguera	1,000	4,0000	4,0000	1,1429	4,571
SUBTOTAL M =					12,4519
MANO DE OBRA					
DESCRIPCION (CATEGORIAS)	CANTIDAD A	ORNAL /HR B	COSTO HORA C=A*B	RENDIMIENTO R	COSTO D=C*R
Peon (estr.ocp. E2)	5,000	4,1400	20,7000	1,1429	23,6571
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	4,1900	8,3800	1,1429	9,5771
Carpintero (estr.ocp. D2)	1,000	4,1900	4,1900	1,1429	4,7886
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,6500	4,6500	1,1429	5,3143
SUBTOTAL N =					43,3371
MATERIALES					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	PRECIO UNIT. B	COSTO C=A*B	
Cemento tipo I(50 Kg)	kg	339,390	0,1600	54,3024	
Piedra 3/4"	m3	0,900	22,0000	19,8000	
Arena	m3	0,600	20,0000	12,0000	
Agua	m3	0,200	1,5000	0,3000	
Tablas de Encofrado semidura	u	6,019	5,0000	30,0926	
Cuarton semiduras	u	7,417	3,0000	22,2500	
Tira de encofrado semiduras	u	3,694	1,5000	5,5417	
Clavo 2"x 8	lb	5,000	0,8500	4,2500	
Ceniza de cáscara de arroz (CCA)	kg	10,610	0,0700	0,7427	
SUBTOTAL O =				149,2794	
TRANSPORTE					
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD A	TARIFA B	COSTO C=A*B	
SUBTOTAL P =				0,0000	
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)				205,0684	
INDIRECTOS Y UTILIDAD . 25,00%				51,2671	
OTROS INDIRECTOS %					
COSTO TOTAL DEL RUBRO				256,3355	
VALOR OFERTADO				\$ 256,34	

La comparación sugiere que el uso de CCA puede representar una alternativa viable desde el punto de vista técnico, económico y ambiental, al mantener niveles de resistencia aceptables y, al mismo tiempo, contribuir a la sostenibilidad mediante la valorización de subproductos agrícolas.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La incorporación de ceniza de cáscara de arroz (CCA) como reemplazo parcial del cemento en mezclas de hormigón, con una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², se presenta como una alternativa viable para construcciones de uso residencial. En particular, la dosificación con un 3% de CCA mostró un comportamiento mecánico comparable al del hormigón convencional. Además, el análisis de precio unitario reveló que el costo por metro cúbico del hormigón con CCA fue ligeramente inferior, alcanzando \$256.34, frente a los \$257.53 del hormigón convencional, lo que representa una reducción del 0.46%. Esta diferencia, aunque modesta, refuerza su viabilidad, al combinar rendimiento técnico aceptable con una mejora en la eficiencia económica y ambiental.

Durante el proceso, se analizaron minuciosamente las características físicas y químicas de los materiales, incluyendo la ceniza de cáscara de arroz. Las pruebas de laboratorio confirmaron que la CCA posee sílice reactiva, la cual le da propiedades puzolánicas a la mezcla. Esto significa que puede reaccionar con otros componentes del cemento y fortalecer la mezcla, cumpliendo de esta forma con los estándares de calidad definidos por la norma ASTM C618-19 para adiciones minerales en el concreto.

Los resultados experimentales fueron los siguientes: la mezcla con 3% de CCA logró una resistencia de 200.83 kg/cm² a los 28 días, un valor similar al del hormigón tradicional (204.55 kg/cm²). Inclusive, mostró una ventaja muy pequeña en las etapas iniciales de curado, confirmando así su buena actividad puzolánica. Por otro lado, las mezclas con 1% y 5% de CCA no demostraron ser tan eficientes, ya que se concluye que existe una proporción ideal para este tipo de sustitución. Usar cantidades altas o bajas de CCA puede afectar negativamente el desempeño del hormigón, como era de esperarse.

En cuanto al análisis económico, la incorporación del 3% de CCA no solo permite mantener un comportamiento estructural aceptable, sino que también representa una opción económica y sostenible, al aprovechar un residuo agroindustrial de bajo costo. Esto contribuye a una gestión más responsable de los recursos y al desarrollo de prácticas constructivas más amigables con el ambiente.

5.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar aplicando procedimientos estandarizados conforme a lo establecido por normas técnicas como la ASTM C618-19 y las directrices del American Concrete Institute (ACI), especialmente en lo que respecta a la caracterización y uso de materiales cementantes suplementarios como la CCA. Esto garantiza que los componentes empleados en las mezclas sean adecuados, uniformes y compatibles con las exigencias estructurales del hormigón.

Se sugiere adoptar el 3% de sustitución de cemento por ceniza de cáscara de arroz como una proporción óptima para aplicaciones en hormigón de uso residencial, debido a que esta relación ha demostrado mantener una resistencia a la compresión similar a la mezcla convencional, favoreciendo además la actividad puzolánica sin comprometer la trabajabilidad ni la durabilidad del material.

Se recomienda considerar el uso de CCA como una alternativa económicamente viable, ya que su incorporación en un 3% permite reducir el costo por metro cúbico de hormigón en un 0.46%. Esta pequeña disminución puede ser significativa a gran escala, especialmente en proyectos que buscan reducir costos sin sacrificar calidad estructural.

Se aconseja integrar la CCA como parte de una estrategia de construcción sostenible, principalmente en proyectos que buscan mitigar su impacto ambiental mediante el uso de residuos agroindustriales. Esta práctica favorece la economía circular y promueve una edificación más responsable, sin dejar de cumplir con los estándares técnicos de resistencia y durabilidad.

Se recomienda que, durante la preparación de los cilindros de ensayo a la resistencia, se conserve como mínimo un testigo por cada dosificación para evaluar la resistencia a edades superiores a 28 días (40 o 60 días). Esta práctica va a

determinar el rendimiento de la resistencia a largo plazo y evaluar el comportamiento mecánico de cada mezcla. Por ejemplo, en la muestra con adición de 3 % de CCA, que alcanzó una resistencia de 20,27 MPa a 28 días, la rotura del testigo a 40 días permitió verificar un incremento significativo, alcanzando una resistencia de 21,44 MPa.

BIBLIOGRAFÍA

- ACI 318-19. (2019). *Resistencia al cortante V_c según ACI 318-19*.
https://www.dlupal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001666?utm_source=chatgpt.com
- ACI-211. (n.d.). *American Concrete Institute*. Retrieved February 9, 2025, from
<https://www.concrete.org/>
- ACI-318-19. (2022). *ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022)*.
https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=318U19&Language=English&Units=US_Units
- Andrés, D., & César, N. (2012). *EVALUACIÓN DEL USO DE ARCILLAS Y PUZOLANAS EN LA ETAPA DE MOLIENDA DE ACABADO PARA LA FABRICACIÓN DE CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP*.
- Arias, F., & Covinos, J. (2021). El proyecto de investigación científica. *Editorial Episteme*. <https://www.editorialepisteme.com/libro-proyecto-investigacion>
- ASTM. (2019). *Designation: C618 – 17a C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete 1*.
<https://doi.org/10.1520/C0618-1>
- ASTM C618. (2022). *Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0618-22>
- ASTM-C595. (2021). *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*.
- Bastis Consultores. (2021). *Método hipotético-deductivo*.
- Condori, M. (2020). Metodología de la investigación científica. *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*.
<https://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/12794>
- Coyasamin Maldonado, O. V. (2016). *Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón adicionado con cenizas de cáscara de arroz (CCA) y hormigón adicionado con cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBC)*. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Carrera de Ingeniería Civil.
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/23482>
- Echeverría, M., & López, O. (2010). *Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica*.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/2058>
- El Universo. (n.d.). *Industriales: Sí está saliendo la cosecha de arroz y esa mayor oferta genera una baja en el precio de la saca en cáscara | Economía | Noticias | El Universo*. Retrieved January 28, 2025, from

<https://www.eluniverso.com/noticias/economia/industriales-si-esta-saliendo-la-cosecha-de-arroz-y-esa-mayor-oferta-genera-una-baja-en-el-precio-de-la-saca-en-cascara-nota/>

Eliseo, J. (2021). Diseño y análisis de investigaciones aplicadas en ingeniería civil. *Ediciones Académicas*.

<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80385>

Gonzales, T., & Ventura, L. (2021). *Incorporación de ceniza de cascarilla de arroz para aumentar la resistencia a la compresión del concreto $f'c=210$ kg/cm², Moyobamba 2021*.

Graus Cuba, J. A., & Zelada Mestanza, H. L. (2023). “EFECTOS DE LA ADICIÓN DE CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ EN LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DEL CONCRETO, TRUJILLO-2023.” [https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/38764/Graus%20Cuba,%20Julian%20Alexander%20Zelada%20Mestanza%20Hugo%20Luis%20\(resumen\).pdf?sequence=1](https://repositorio.upn.edu.pe/bitstream/handle/11537/38764/Graus%20Cuba,%20Julian%20Alexander%20Zelada%20Mestanza%20Hugo%20Luis%20(resumen).pdf?sequence=1)

Harmsen, T. (2002). *DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO ARMADO*.

Hernán, H., Panta, P., Cesar, U., & Piura -Perú, V. (2024). Revisión sistemática de la literatura sobre la mejora de las propiedades físico-mecánicas del concreto con adición de ceniza de cáscara de arroz. *LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(3), 2055-2062–2055 – 2062.

<https://doi.org/10.56712/LATAM.V5I3.2178>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2017). Metodología de la investigación (6.^a ed.). . *McGraw-Hill*.

<https://www.mheducation.es/bcv/guide/capitulo/8448603673.pdf>

ICH, I. del C. y del H. de C. (n.d.). *Propiedades del Hormigón Endurecido*. Retrieved February 9, 2025, from https://ich.cl/unidades/04-propiedades-del-hormigon-endurecido/?utm_source=chatgpt.com

ICPA. (n.d.). *ADICIONES MINERALES. LIDERES EN INNOVACIÓN Y TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA*.

IECA. (n.d.). *Componentes y propiedades del cemento | Características - IECA*. Retrieved January 29, 2025, from <https://www.ieca.es/componentes-y-propiedades-del-cemento/>

Juárez, B. (2012). LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS. *Universidad Juan Carlos de Guatemala*.

Loayza Goicochea, P. (2014). Efecto de la ceniza de cáscara de arroz sobre la resistencia a la compresión del concreto normal. *Universidad Nacional de Cajamarca*. <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/663>

Lozada, M. (2014). Metodología de la investigación científica. *Editorial Científica*. <https://www.researchgate.net/publication/282257716>

- Matallana Rodríguez, R. (n.d.). *EL CONCRETO FUNDAMENTOS Y NUEVAS TECNOLOGÍAS*.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. In *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Fourth Edition*. McGraw-Hill Education.
<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>
- Mehta, P. K., & Monteiro Paulo. J. M. (2014). *CONCRETE MICROSTRUCTURE, PROPERTIES AND MATERIALS*.
- Montero Trujillo, D. A. (2017). *Uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de hormigones convencionales en el Ecuador*.
<http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/6412>
- MOP - 001 - F. (2002). *ESPECIFICACIONES GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE CAMINOS Y PUENTES*.
- Morán Cabré, F., Jiménez Montoya, P., & García Meseguer, A. (2000). Hormigón armado: 14ª edición basada en la EHE. *Editora Gustavo Gili*, 846.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=303342>
- NEC. (2015). *ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO*.
- NTE INEN 855. (2010). *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN*.
<https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/855-normas-nte-inen-855-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180405>
- NTE INEN 872. (2011). *Áridos para Hormigón: Requisitos*.
<https://es.scribd.com/document/515214336/NTE-INEN-872-2011-Aridos-Hormigon-Requisitos>
- NTE INEN 2617. (2012). *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. AGUA PARAMEZCLA. REQUISITOS*.
- Nurtanto, D., Junaidi, I., Wahyuningtyas, W., Yunarni, W., Nurtanto, D., Junaidi, I., Wahyuningtyas, W., & Yunarni, W. (2020). Comparación de la adición de cenizas de cascarilla de arroz y cenizas de tejas a cemento de geopolímero en base a cenizas volantes con cemento Portland. *Revista Ingeniería de Construcción*, 35(3), 287–294. <https://doi.org/10.4067/S0718-50732020000300287>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2023). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>
- Pasquel, E. (1993). *Temas de Tecnología de Concreto en El Perú*.
<https://es.scribd.com/document/369456174/Tematicas-de-Tecnologia-de-Concreto-en-El-Peru>

- Pinto, L., & Maldonado, R. (2018). Metodología de la investigación cuantitativa. *Universidad Técnica de Ambato*.
<https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/28344>
- PSI. (n.d.). *Aditivos para concreto: tipos y sus usos I PSI Concreto*. Retrieved January 29, 2025, from <https://psiconcreto.com/aditivos-para-concreto/>
- RNC. (2007). *REGLAMENTO NACIONAL DE CONSTRUCCIÓN*.
- Romo Proaño, M. (2008). *Fundamentos de Hormigón*. Quito: *Escuela Politécnica del Ejército*. <https://www.studocu.com/latam/document/universidad-central-de-venezuela/tecnologia-del-concreto/01-hormigon-armado-materiales/8384971>
- Salas, J., Castillo, P., Sanchez, I., Rojas, D. E., & Veras, J. (1986). *Empleo de cenizas de cascara de arroz como adiciones en morteros; Use or rice husk ash an addition in mortar*. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Salas, J., Gómez, G., & Veras, J. (1986). Hormigones con ceniza de cascara de arroz (R.H.A.): influencia del curado y del agua de amasado. *Informes de La Construcción*, 38(385), 31–41.
<https://doi.org/10.3989/IC.1986.V38.I385.1692>
- Scrivener, K. L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research.*, 144,2-26.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Solas, A., & Giani, R. (2010). *Tecnología del hormigón avanzada*. 775.
https://www.google.com.pe/books/edition/Tecnología_del_hormigón_avanzada/me5TDwAAQBAJ?hl=es-419&gbpv=1&kptab=overview
- Trujillo, D. M. (2017). *Uso de la ceniza de cascarilla de arroz como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de hormigones convencionales en el Ecuador*.
https://www.academia.edu/91408233/Uso_de_la_ceniza_de_cascarilla_de_arroz_como_reemplazo_parcial_del_cemento_en_la_fabricaci%C3%B3n_de_hormigones_convencionales_en_el_Ecuador
- Universidad de Alicante. (2020). *MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN II*.
<https://cvnet.cpd.ua.es/Guia-Docente/?wlengua=es&wcodasi=16020&scaca=2019-20>

ANEXOS

Anexo 1

Ensayo de granulometría del agregado grueso

GRANULOMETRÍA AGREGADO GRUESO													
TAMIZ	ABERTURA	W PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIFICACIONES A.S.T.M							
						Nº 56		Nº 57		Nº 6		Nº 67	
2"	50	0	0,00	0,00	100,00								
1 1/2"	37,5	0	0,00	0,00	100,00	100	100	100	100				
1"	25	0,000	0,00	0,00	100,00	90	100	95	100	100	100	100	100
3/4"	19	4,843,000	34,61	34,61	65,39	40	85	-----	-----	90	100	90	100
1/2"	12,5	6,798,000	48,58	83,20	16,80	10	40	25	60	20	55	-----	-----
3/8"	9,5	1,784,000	12,75	95,95	4,05	0	15	-----	-----	0	15	20	55
Nº 4	4,75	564,000	4,03	99,98	0,02	0	5	0	10	0	5	0	10
Nº 8	2,36	3,220	0,02	100,00	0,00			0	5			0	5
Nº 16	1,18	0,000	0,00	100,00	0,00								
FONDO		0,000	0,00	100,00	0,00								
TOTAL		13992,22	100,00										

Requisito para que se cumpla el módulo de finura en agregado grueso entre 5 y 7 según ASTM C-33

$$MF = \frac{\sum \% \text{retenido}_{\text{acumulado}}(6''+3''+1'')^2 + 1/2'' + 3/4'' + 1'' + 1 1/2'' + 2'' + 2 1/2'' + 3'' + 4'' + 5'' + 6'' + 7'' + 8'' + 9'' + 10''}{100}$$

		¿CUMPLE REQUISITO?
Modulo de Finura	6,14	SI

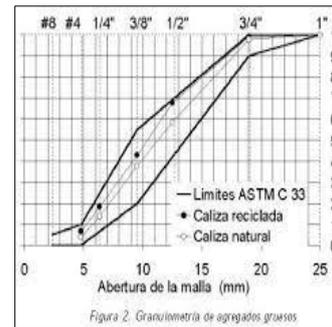
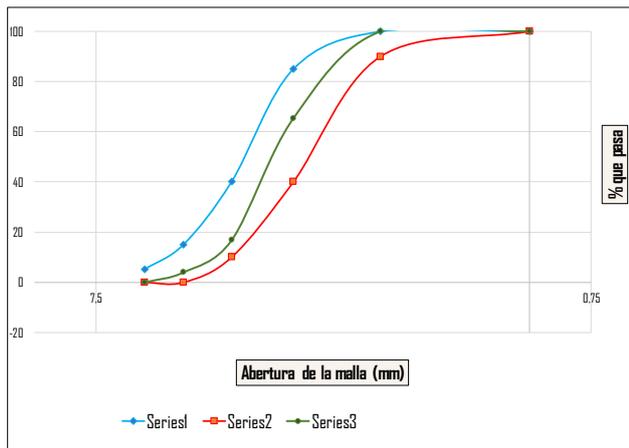


Figura 2. Granulometría de agregados gruesos

Anexo 2

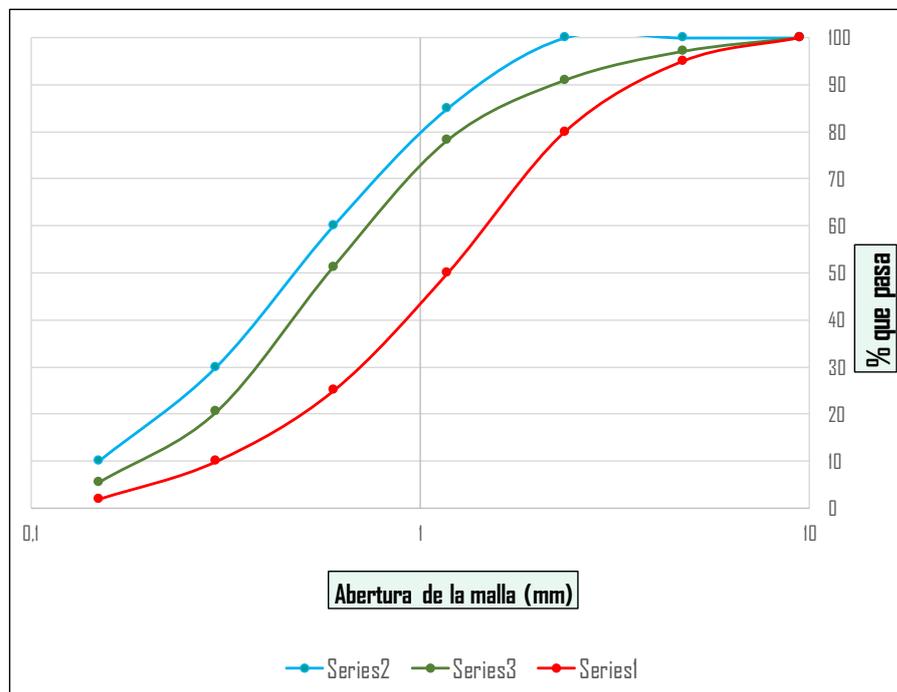
Ensayo de granulometría del agregado fino

GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO							
TAMIZ	ABERTURA	W PARCIAL	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	ESPECIFICACIÓN A.S.T.M	
3/8"	9,5	0	0,00	0,00	100,00	100	100
Nº 4	4,75	58	2,94	2,94	97,06	95	100
Nº 8	2,36	121	6,13	9,07	90,93	80	100
Nº 16	1,18	251	12,72	21,79	78,21	50	85
Nº 30	0,6	531	26,91	48,70	51,30	25	60
Nº 50	0,3	609	30,86	79,56	20,44	10	30
Nº 100	0,15	295	14,95	94,51	5,49	2	10
FONDO		108,24	5,49	100,00	0,00	0	0
TOTAL		1973,240	100,00				

Requisito para que se cumpla el módulo de finura en agregado fino entre 2.3 y 3.1 según ASTM C-33

$$MF = \frac{\sum \%retenido_acumulado(6''+3''+1\frac{1}{2}''+\frac{3}{4}''+\frac{3}{8}''+N^{\circ}4+N^{\circ}8+N^{\circ}16+N^{\circ}30+N^{\circ}50+N^{\circ}100)}{100}$$

		¿CUMPLE REQUISITO?
Modulo de Finura	2,57	SI



Anexo 3

Densidad y absorción del agregado grueso

AGREGADO GRUESO					
PESO VOLUMÉTRICO SUELTO			PESO VOLUMÉTRICO VARILLADO		
VOLUMEN	0,009737	m ³	VOLUMEN	0,009737	m ³
P.V.S + RECIPIENTE	25	kg	P.V.V + RECIPIENTE	26,7	kg
RECIPIENTE	10,94	kg	RECIPIENTE	10,94	kg
PESO	14,06	kg	PESO	15,76	kg
P.V.S	1443,99	kg/m³	P.V.V	1618,59	kg/m³

DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA (D.S.S.S)		
P.S.S.S.	2000	gr
W(canastilla sumergida)	1064	gr
W(canastilla sumergida + material)	2371	gr
W(canastilla sumergida + material) - W(canastilla)	1307	gr
VOLUMEN	693,00	cm ³
D.S.S.S.	2,89	gr/cm³
	2886,00	kg/m³

PESO GRAVA SATURADA	PESO GRAVA SECA	AGUA DESALOJADA	% Absorción
2177	2133	44	2,063
3,14	3,08		

Anexo 4

Densidad y absorción del agregado fino

AGREGADO FINO					
PESO VOLUMÉTRICO SUELTO			DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA		
VOLUMEN	0,009737	m ³	P.S.S.S.	500	gr
P.V.S + RECIPIENTE	25	kg	LECTURA INICIAL	200	gr
RECIPIENTE	10,94	kg	LECTURA FINAL	396	gr
PESO	14,06	kg	W Desalojado	196	gr
P.V.S	1443,99	kg/m ³	V Desalojado	196	cm ³
D.S.S.S.			2,55	gr/cm³	2551,02
					kg/m³
PESO ARENA SATURADA (gr)	PESO ARENA SECA (gr)	AGUA DESALOJADA	% Absorción		
450,88	445	5,88	1,32		

Anexo 5

Humedades del agregado grueso y fino

HUMEDAD DE ARENA		HUMEDAD DE GRAVA	
RECIPIENTE	A1	RECIPIENTE	B1
W RECIPIENTE (gr)	40,650	W RECIPIENTE (gr)	38,250
W ARENA+ R	483,530	W GRAVA + R	564,730
W ARENA SECA+ R	480,200	W GRAVA SECA+ R	561,730
W de AGUA	3,330	W de AGUA	3,000
W ARENA SECA	439,550	W GRAVA SECA	523,480
HUMEDAD (%)	0,76	HUMEDAD	0,57

Anexo 6

Datos generales para la dosificación

RESUMEN DE DATOS		
Peso específico del cemento	3150	kg/m ³
ARENA		
Módulo de finura de la arena	2,57	
Peso volumetrico de la arena	1443,99	kg/m ³
D.S.S.S. de la arena	2551,02	Kg/m ³
Absorción de la arena	1,32	%
Humedad de la arena	0,76	%
GRAVA		
Peso volumetrico suelto de la grava	1443,99	kg/m ³
Peso volumetrico varillado de la grava	1618,59	kg/m ³
D.S.S.S. de la grava	2886,00	kg/m ³
Tamaño máximo del agregado (GRAVA)	25	mm
Absorción de la grava	2,06	%
Humedad de la grava	0,57	%

MR =		mpa
------	--	-----

$$MR = 0.392(f'c)^{2/3} \Rightarrow f'c = \left(\frac{MR}{0.392}\right)^{3/2}$$

f'c	0	kg/cm ²
-----	---	--------------------

diseñar (fc)	210	kg/cm ²
--------------	-----	--------------------

Anexo 7

Dosificación del hormigón de 210 kg/cm²

DISEÑO DE HORMIGÓN HIDRÁULICO

F' c	210	kg/cm ²
Desviación	84	
F' cr (sin aire)	294	kg/cm ²
F' cr (con aire)	0	kg/cm ²

Revenimiento	10,00	cm
---------------------	-------	----

AGUA

Tamaño máximo de la grava	
25	mm

CANTIDAD DE AGUA		AIRE ATRAPADO	
193	kg/m ³	1,5	%

Relación a/c	0,550
CANTIDAD DE CEMENTO	
351,16	kg/m ³

AGREGADO GRUESO

Tabla A5.	MF arena	P.V.V.	
0,693	2,57	1618,59	kg/m ³

CANTIDAD DE GRAVA	
1121,68	kg/m ³

AGREGADO FINO

	W (kg)	D (kg/m ³)	V (m ³)	Corrección 60-40 de agregados		
Agua	193	1000	0,193	Agreg.Total	1866,21	kg
Cemento	351,16	3150	0,111	Arena	746,49	kg
Grava	1121,68	2886,00	0,389	Grava	1119,73	kg
Arena	744,53	2551,02	0,292			
Aire	0	0	0,015			
			1,000			

Anexo 8

Correcciones por humedad y absorción y datos del volumen de las probetas

CORRECCION POR HUMEDAD Y ABSORCION											
	Humedad			Absorción							
	W (kg)	%	kg	%	kg	Diferencia	W (kg)	D (kg/m3)	V (m3)	%propor V	
AIRE									0,015	1,48	
CEMENTO	351,16						351,16	3150	0,111	11,00	
GRAVA	1121,68	0,57	6,43	2,06	-23,14	-16,71	1104,97	2886,00	0,383	37,78	
ARENA	744,53	0,76	5,64	1,32	-9,84	-4,20	740,33	2551,02	0,290	28,64	
AGUA	193		-12,07		32,98	20,91	213,91	1000	0,214	21,11	
TOTAL	2410,38	Para un metro cúbico						2410,37		1,013	100,00
						AGUA EFECTIVA	213,91				

Datos cilindro		
Pi	3,14156	
Radio	0,075	m
A= Pi*r ²	0,017671	m ²
h	0,3	m
V. cilindro	0,005301	m ³
# cilindros	8	unidades
VolumenCilindro	0,04241	m ³

	# Cilindros
	8
Volumen requerido	0,04241
Desperdicio	20%
Volumen con desperdicio	0,0509

Peso en Kg por M3 /(1/Volumen con desperdicios)

Anexo 9

Cantidades corregidas para la dosificación de probetas en laboratorio

CANTIDAD SIN CCA		
	w (kg)	
AIRE		Kg
CEMENTO	17,87	
GRAVA	56,24	
ARENA	37,68	
AGUA	10,89	
TOTAL	122,69	

PORCENTAJES DE CCA		
1%	3%	5%

CANTIDAD CON 1% DE CCA		
	w (kg)	
AIRE		Kg
CCA	0,18	
CEMENTO	17,70	
GRAVA	56,24	
ARENA	37,68	
AGUA	10,89	
TOTAL	122,69	

CANTIDAD CON 3% DE CCA		
	w (kg)	
AIRE		Kg
CCA	0,54	
CEMENTO	17,34	
GRAVA	56,24	
ARENA	37,68	
AGUA	10,89	
TOTAL	122,69	

CANTIDAD CON 5% DE CCA		
	w (kg)	
AIRE		Kg
CCA	0,89	
CEMENTO	16,98	
GRAVA	56,24	
ARENA	37,68	
AGUA	10,89	
TOTAL	122,69	

Anexo 10

Resultados con la sustitución de un 0% de CCA

RESULTADOS CON UN 0% DE CCA																													
CILINDRO	FECHA DE INICIO (CURADO)	ÁREA					ROTURA						RESISTENCIA Y EFICIENCIA DE DISEÑO																
		DIA M. INF. (cm)	DIA M. SUP. (cm)	DIA M. PROM. (cm)	H CILINDRO (cm)	ÁREA (cm ²)	FECHA	EDAD (DÍAS)	σ (MPa)	σ (Kg/cm ²)	σ_{prom} (Kg/cm ²)	F (Kg)	F (Kg)	P (Kg)	P (Kg) PROM	carga (KN)	EFICIENCIA (%)	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN m ³ PROM	DENSIDAD (kg/m ³)	(kg/cm ²)	(%)	VOL. m ³	PESO VOL. (kg/m ³)				
1	26/2/2025	15.18	15.15	15.17	29.98	180.62	26/2/2025	7	12.42	126.65	128.74	23252.97	22875.40	13.44	224.3			5415.10										0.0054151	2481.95
2	26/2/2025	15.13	15.09	15.11	29.97	179.32	26/2/2025	7	12.83	130.83		23459.45	13.18	230.1	13.31	230.1	98.3762376	5374.10	5394.59794	0.0053946	2467.28	126.64674	60.3079714				0.0053741	2452.50	
3	5/3/2025	14.95	14.95	14.95	30.12	175.54	5/3/2025	14	15.17	154.69	160.55	28183.01	2763.78	13.02	266.3			5287.22										0.0052872	2462.54
4	5/3/2025	15.02	15.22	15.12	30.06	179.55	5/3/2025	14	16.32	166.42		29880.37	13.28	293.0	13.15	293.0	96.348047	5397.37	5342.29565	0.0053423	2461.49	154.68849	73.6611857				0.0053973	2460.46	
5	12/3/2025	15.21	15.08	15.15	30.18	180.15	12/3/2025	21	19.17	195.49	195.83	35278.91	35214.62	13.36	345.3			5436.85										0.0054368	2457.30
6	12/3/2025	15.13	15.12	15.13	30.13	179.67	12/3/2025	21	19.24	196.19		35249.92	13.26	345.7	13.31	345.7	99.8177558	5413.52	5425.18722	0.0054251	2453.37	195.47649	93.0840429				0.0054135	2449.42	
7	19/3/2025	15.12	15.10	15.11	30.29	179.32	19/3/2025	28	20.78	210.89	204.55	36679.39	37995.90	12.99	372.6			5431.48										0.0054314	2391.61
8	19/3/2025	15.14	15.23	15.19	30.09	181.00	19/3/2025	28	19.34	197.21		3574.81	13.35	350.2	13.17	350.2	103.589232	5449.31	5440.39529	0.0054404	2420.78	211.89366	100.901743				0.0054493	2449.85	

Anexo 11

Resultados con la sustitución de un 1% de CCA

RESULTADOS CON UN 1% DE CCA																														
CILINDRO	FECHA DE INICIO (CURADO)	ÁREA					ROTURA						RESISTENCIA Y EFICIENCIA DE DISEÑO																	
		DIA M. INF. (cm)	DIA M. SUP. (cm)	DIA M. PROM. (cm)	H CILINDRO (cm)	ÁREA (cm ²)	FECHA	EDAD (DÍAS)	σ (MPa)	σ (Kg/cm ²)	σ_{prom} (Kg/cm ²)	F (Kg)	F (Kg)	P (Kg)	P (Kg) PROM	carga (KN)	EFICIENCIA (%)	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN m ³ PROM	DENSIDAD (kg/m ³)	(kg/cm ²)	(%)	VOL. m ³	PESO VOL. (kg/m ³)					
1	26/2/2025	15.18	15.11	15.15	30.11	180.15	26/2/2025	7	9.37	95.55	101.15	18222.69	1722.36	13.10	168.8			5424.24											0.0054242	2415.08
2	26/2/2025	15.16	15.13	15.15	30.08	180.15	26/2/2025	7	10.47	106.76		19233.02	13.14	188.6	13.12	188.6	94.46	5418.84	5421.54	0.0054215	2419.98	95.55	45.50				0.0054188	2424.87		
3	5/3/2025	15.14	15.13	15.14	30.32	179.91	5/3/2025	14	13.67	139.39	138.07	24839.67	25078.16	13.42	245.9			5454.86										0.0054548	2460.19	
4	5/3/2025	15.15	15.16	15.16	30.28	180.39	5/3/2025	14	13.41	136.74		24686.24	13.20	241.9	13.31	241.9	100.96	5462.07	5458.47	0.0054584	2438.41	139.39	66.38				0.0054620	2416.66		
5	12/3/2025	15.21	15.11	15.16	29.96	180.50	12/3/2025	21	15.35	156.52	159.18	28731.85	28253.29	13.18	271.1			5407.92										0.0054079	2437.17	
6	12/3/2025	15.11	15.12	15.12	30.23	179.43	12/3/2025	21	15.87	161.83		29037.25	13.12	284.8	13.15	284.8	98.33	5424.31	5416.11	0.0054161	2427.94	156.52	74.54				0.0054243	2418.74		
7	19/3/2025	15.53	15.16	15.25	30.29	182.53	19/3/2025	28	16.90	172.33	172.58	31502.56	31456.03	13.22	308.5			5528.97										0.0055289	2391.04	
8	19/3/2025	15.12	15.13	15.13	30.20	179.67	19/3/2025	28	16.95	172.84		3054.37	13.13	304.5	13.18	304.5	99.85	5426.10	5477.53	0.0054775	2405.28	172.33	82.06				0.0054261	2419.79		

Anexo 12

Resultados con la sustitución de un 3% de CCA

RESULTADOS CON UN 3% DE CCA																								
CILINDRO	FECHA DE INICIO (CURADO)	ÁREA					ROTURA							RESISTENCIA Y EFICIENCIA DE DISEÑO										
		DIAM. INF. (cm)	DIAM. SUP. (cm)	DIAM. PROM. (cm)	H CILINDRO (cm)	ÁREA (cm ²)	FECHA	EDAD (DÍAS)	σ (MPa)	σ (Kg/cm ²)	σ_{prom} (Kg/cm ²)	F (Kg)	F (Kg)	P (Kg)	P (Kg) PROM	carga (KN)	EFICIENCIA (%)	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN m ³ PROM	DENSIDAD (kg/m ³)	(kg/cm ²)	(%)	VOL m ³
1	26/2/2025	15.19	15.22	15.21	30.08	181.58	26/2/2025	7	13.19	134.50	130,06	23616,50	24421.93	13.30	239.5	103,41	5461.86	5452.00	0,005452	2432,14	134,50	64,05	0,00546186	2435,07
2	26/2/2025	15.16	15.19	15.18	30.09	180.86	26/2/2025	7	12.32	125.63			22721.16	13.22			222.8						5442.14	0,00544214
3	5/3/2025	15.17	15.18	15.18	30.20	180.86	5/3/2025	14	15.35	156.52	150,86	27285,67	28308.23	13.38	277.6	103,75	5462.03	5435,07	0,00543507	2458,11	156,52	74,54	0,00546203	2449,64
4	5/3/2025	15.08	15.18	15.13	30.08	179.79	5/3/2025	14	14.24	145.21			28106.59	13.34			256.0						5408.11	0,00540811
5	12/3/2025	15.13	15.13	15.13	30.32	179.79	12/3/2025	21	19.55	193.35	191,50	34429,90	35941.56	13.3	351.5	104,10	5451.26	5462,98	0,00546298	2423,58	199,35	94,93	0,00545126	2441,64
6	12/3/2025	15.13	15.19	15.16	30.33	180.50	12/3/2025	21	18.01	183.65			33949.30	13.17			325.1						5474.70	0,0054747
7	19/3/2025	15.12	15.16	15.14	29.75	180.03	19/3/2025	28	20.27	206.69	200,83	38155,14	37211.70	13.04	364.9	102,92	5355.85	5449,72	0,00544972	2431,32	206,69	98,43	0,00535585	2434,72
8	19/3/2025	15.21	15.27	15.24	30.39	182.41	19/3/2025	28	19.12	194.97			35564.78	13.46			348.8						5543.58	0,00544358

Anexo 13

Resultados con la sustitución de un 5% de CCA

RESULTADOS CON UN 5% DE CCA																								
CILINDRO	FECHA DE INICIO (CURADO)	ÁREA					ROTURA							RESISTENCIA Y EFICIENCIA DE DISEÑO										
		DIAM. INF. (cm)	DIAM. SUP. (cm)	DIAM. PROM. (cm)	H CILINDRO (cm)	ÁREA (cm ²)	FECHA	EDAD (DÍAS)	σ (MPa)	σ (Kg/cm ²)	σ_{prom} (Kg/cm ²)	F (Kg)	F (Kg)	P (Kg)	P (Kg) PROM	carga (KN)	EFICIENCIA (%)	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN cm ³	VOLUMEN m ³ PROM	DENSIDAD (kg/m ³)	(kg/cm ²)	(%)	VOL m ³
1	26/2/2025	15.13	15.12	15.13	30.10	179.67	26/2/2025	7	11.04	112.57	112,57	20226,57	20226.57	13.10	198.4	100,00	5408.13	5410,83	0,00541083	2424,77	112,57	53,61	0,00540813	2422,28
2	26/2/2025	15.14	15.11	15.13	30.13	179.67	26/2/2025	7	11.04	112.57			20226.57	13.14			198.4						5413.52	0,00541352
3	5/3/2025	15.15	15.16	15.16	30.28	180.39	5/3/2025	14	13.83	141.02	149,84	27029,86	25438.78	13.24	249.5	13,10	5462.07	5460,27	0,00546117	2397,84	141,02	67,15	0,00546207	2423,99
4	5/3/2025	15.13	15.16	15.15	30.31	180.15	5/3/2025	14	15.56	158.67			28583.17	12,95			280.3						5460.27	0,00546027
5	12/3/2025	15.12	15.10	15.11	30.17	179.32	12/3/2025	21	13.24	135.01	156,22	28012,38	24209.13	13.08	237.4	13,01	5409.96	5363,51	0,00536351	2425,65	135,01	64,29	0,00540996	2417,76
6	12/3/2025	15.07	15.09	15.08	29.77	178.60	12/3/2025	21	17.40	177.43			3689.42	12,94			310.8						5317.06	0,00531706
7	19/3/2025	15.21	15.17	15.19	30.29	181.22	19/3/2025	28	17.39	177.33	178,75	32393,64	32194.94	13.20	315.1	99,20	5487.33	5495,35	0,00549535	2406,58	177,33	84,44	0,00548733	2405,54
8	19/3/2025	15.23	15.27	15.25	30.13	182.65	19/3/2025	28	17.67	180.18			32990.81	13,25			322.7						5503.37	0,00550337

Anexo 14

Resistencia a los 7 días de un 0 % de CCA, muestra 1



Anexo 15

Resistencia a los 7 días de un 1 % de CCA, muestra 1



Anexo 16

Resistencia a los 7 días de un 3 % de CCA, muestra 1



Anexo 17

Resistencia a los 7 días de un 0 % de CCA, muestra 2



Anexo 18

Resistencia a los 7 días de un 1 % de CCA, muestra 2



Anexo 19

Resistencia a los 7 días de un 3 % de CCA, muestra 2



Anexo 20

Resistencia a los 7 días de un 5 % de CCA, muestra 1



Anexo 23

Resistencia a los 7 días de un 5 % de CCA, muestra 2



Anexo 21

Resistencia a los 14 días de un 0 % de CCA, muestra 1



Anexo 24

Resistencia a los 14 días de un 0 % de CCA, muestra 2



Anexo 22

Resistencia a los 14 días de un 1 % de CCA, muestra 1



Anexo 25

Resistencia a los 14 días de un 1 % de CCA, muestra 2



Anexo 26

Resistencia a los 14 días de un 3 % de CCA, muestra 1



Anexo 29

Resistencia a los 14 días de un 3 % de CCA, muestra 2



Anexo 27

Resistencia a los 14 días de un 5 % de CCA, muestra 1



Anexo 30

Resistencia a los 14 días de un 5 % de CCA, muestra 2



Anexo 28

Resistencia a los 21 días de un 0 % de CCA, muestra 1



Anexo 31

Resistencia a los 21 días de un 0 % de CCA, muestra 2



Anexo 32

Resistencia a los 21 días de un 1 % de CCA, muestra 1



Anexo 35

Resistencia a los 21 días de un 1 % de CCA, muestra 2



Anexo 33

Resistencia a los 21 días de un 3 % de CCA, muestra 1



Anexo 36

Resistencia a los 21 días de un 3 % de CCA, muestra 2



Anexo 34

Resistencia a los 21 días de un 5 % de CCA, muestra 1



Anexo 37

Resistencia a los 21 días de un 5 % de CCA, muestra 2



Anexo 38

Resistencia a los 28 días de un 0 % de CCA, muestra 1



Anexo 39

Resistencia a los 28 días de un 1 % de CCA, muestra 1



Anexo 40

Resistencia a los 28 días de un 3 % de CCA, muestra 1



Anexo 41

Resistencia a los 28 días de un 0 % de CCA, muestra 2



Anexo 42

Resistencia a los 28 días de un 1 % de CCA, muestra 2



Anexo 43

Resistencia a los 28 días de un 3 % de CCA, muestra 2



Anexo 44

Resistencia a los 28 días de un 5 % de CCA, muestra 1



Anexo 46

Resistencia a los 28 días de un 5 % de CCA, muestra 2



Anexo 45

Resistencia a los 40 días de un 3% de CCA, testigo

