



Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín peatonal con material de reciclaje de piezas de cerámica vitrificada de lavabos e inodoros.

Bermeo Morales, Paul Alberto; González Tiempos, Erika Alejandra; Noroña Loza, Héctor
Jordan y Salazar Intriago, Jennery Pamela

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de integración curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Durán Carrillo, José Ricardo

25 de agosto del 2022



Trabajo de titulación1.pdf

Scanned on: 20:23 August 25, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text

Identical Words	268
Words with Minor Changes	111
Paraphrased Words	284
Omitted Words	0



Website | Education | Businesses



Firmado electrónicamente por:
**JOSE RICARDO
DURAN
CARRILLO**

.....
Ing. Durán Carrillo José Ricardo
Director



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Certificación

Certifico que el trabajo de integración curricular: **"Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín peatonal con material de reciclaje de piezas de cerámica vitrificada de lavabos e inodoros"** fue realizado por los señores **Bermeo Morales Paúl Alberto, González Tiempos Erika Alejandra, Noroña Loza Héctor Jordan y Salazar Intriago Jennery Pamela**, el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de agosto de 2022



Firmado electrónicamente por:
**JOSE RICARDO
DURAN
CARRILLO**

.....
Ing. Durán Carrillo José Ricardo

C.C. 1706351192



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción
Carrera de Ingeniería Civil

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Bermeo Morales Paúl Alberto** con cédula de ciudadanía n° **1205808551**, **González Tiempos Erika Alejandra** con cédula de ciudadanía n° **1721225223**, **Noroña Loza Héctor Jordan** con cédula de ciudadanía n° **1723761720** y **Salazar Intriago Jennery Pamela** con cédula de ciudadanía n° **1726537580**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de integración curricular, **“Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín peatonal con material de reciclaje de piezas de cerámica vitrificada de lavabos e inodoros”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 25 de agosto de 2022

.....
Bermeo Morales Paúl Alberto
 C.C. 1205808551

.....
González Tiempos Erika Alejandra
 C.C. 1721225223

.....
Noroña Loza Héctor Jordan
 C.C. 1723761720

.....
Salazar Intriago Jennery Pamela
 C.C. 1726537580



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción
Carrera de Ingeniería Civil

Autorización de Publicación

Nosotros, **Bermeo Morales Paúl Alberto** con cédula de ciudadanía n° **1205808551**, **González Tiempos Erika Alejandra** con cédula de ciudadanía n° **1721225223**, **Noroña Loza Héctor Jordan** con cédula de ciudadanía n° **1723761720** y **Salazar Intriago Jennery Pamela** con cédula de ciudadanía n° **1726537580**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de integración curricular, **“Diseño y determinación de la resistencia de un adoquín peatonal con material de reciclaje de piezas de cerámica vitrificada de lavabos e inodoros”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 25 de agosto de 2022

.....
Bermeo Morales Paúl Alberto
C.C. 1205808551

.....
González Tiempos Erika Alejandra
C.C. 1721225223

.....
Noroña Loza Héctor Jordan
C.C. 1723761720

.....
Salazar Intriago Jennery Pamela
C.C. 172653758

Dedicatoria

Quiero dedicar la culminación de mi carrera a mis padres, Liliana Morales y Aurelio Bermeo, por ser el pilar fundamental en mi etapa de formación académica y más importante aún por su cariño incondicional, a mi hermano Manuel por alentarme todos estos años a seguir adelante, a mis amigos, familiares y demás personas que me apoyaron a lo largo de estos años, y como no puede ser de otra manera a mi amada Doménica Alfaro quien estuvo conmigo desde el inicio de mi carrera, me dio su apoyo incondicional, siendo ella mi inspiración y la razón de esforzarme cada día más por querer ser un gran profesional y finalmente a mi pequeña Nini por dejar su huellita en mi corazón, convirtiéndome en un mejor ser humano.

Paúl Bermeo

A mis amados padres, Maro Alberto y Luz Amparo, pilares fundamentales de mi vida, quienes con su amor, apoyo incondicional y enseñanzas que me han brindado desde niña me han motivado siempre a cumplir con esfuerzo y perseverancia los objetivos que me proponga. A mi hermano Maro, de quien espero lograr ser un ejemplo y guía en su vida. A mis amigos por todos los momentos compartidos, el apoyo que me han brindado siempre, especialmente a Jennery quien estuvo conmigo desde el inicio de este camino, en las alegrías y tristezas, siendo siempre un soporte para mí.

Erika González

Con mucho cariño, a mis padres, principalmente a mi madre Elizabeth, quien además de ser un gran ejemplo de ser humano, ha estado junto a mí en cada una de las etapas que he vivido, demostrándome su confianza, brindándome siempre sus palabras de aliento y enseñándome que al hacer las cosas con constancia y amor lograré cumplir los objetivos que me proponga.

A mis hermanas Jess y Eli, por ser mis confidentes, por guiarme cuando lo he necesitado y por enseñarme que se debe arriesgar para ganar, pero también, que si no se gana es necesario aprender de los errores y seguir intentando. Finalmente, a mis amigos, en especial a Vane, quién siempre ha creído en mí, me motiva a cada momento y me ha enseñado que puedo usar el ingenio no solo para resolver problemas, sino también para disfrutar de los pequeños detalles de la vida.

Jordan Noroña

Dedicó especialmente este trabajo a mi madre Angela Intriago por el amor, el impulso, la motivación y el cuidado que el día de hoy me permiten cumplir este sueño. A mi padre Rodrigo Salazar quien con su amor y sacrificio sentó en mí el deseo de superación y anhelo de triunfo. A mis hermanas Emilia y Danae por su compañía y amor incondicional. A mi familia por creer y confiar en mí y en mis expectativas. A mi amiga Erika, quien ha sido mi mano derecha a lo largo de esta etapa, gracias por tu ayuda desinteresada y palabras de aliento. Finalmente, a Alexis por acompañarme durante este arduo camino y compartir conmigo mis alegrías y fracasos.

Jennery Salazar

Agradecimiento

En primer lugar, agradecer a Dios por otorgarnos la fortaleza y sabiduría para lograr nuestros objetivos y no claudicar en estos años de formación profesional.

A la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE por acogernos en sus aulas, a la Carrera de Ingeniería Civil y a nuestros docentes quienes con su conocimiento y experiencia nos han formado para ser profesionales con capacidad de asumir y solventar los retos que se nos impongan con criterio y ética.

A nuestro director de proyecto el Ing. Ricardo Durán por ser el guía principal de la presente investigación, por su conocimiento, enseñanza y tiempo dedicado.

Al Laboratorio de Ensayo de Materiales, en especial al Ing. Juan Haro por su constante apoyo y guía indispensable para el desarrollo de este proyecto.

A las empresas F.V. Área Andina y Galarami Cia. Ltda., las cuales nos abrieron sus puertas facilitándonos su conocimiento, material y equipo logístico necesario para la ejecución de este trabajo.

A nuestros amigos y compañeros por las experiencias compartidas a lo largo de estos años, pero sobre todo por su amistad.

Y por supuesto, el agradecimiento más profundo y sentido a nuestras familias, quienes nos han brindado su apoyo incondicional...por ellos y para ellos.

Tabla de contenido

Reporte de verificación de similitud.....	2
Certificado del director del proyecto.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	8
Tabla de contenido.....	9
Índice de tablas.....	12
Índice de figuras.....	16
Resumen.....	18
Abstract.....	19
Capítulo I: Introducción.....	20
Antecedentes.....	20
Estado del arte.....	20
Planteamiento del problema.....	21
Justificación.....	22
Alcance del proyecto.....	22
Objetivos.....	23
Objetivo General.....	23
Objetivos Específicos.....	23
Hipótesis.....	23

	10
Capitulo II: Marco Teórico	24
Adoquines	24
Descripción general	25
Clasificación.....	26
Requisitos Normativos	27
Composición	29
Métodos de Fabricación.....	31
Material cerámico	33
Definición	33
Clasificación.....	34
Cerámica vítrea.....	37
Residuos cerámicos.....	37
Capítulo III: Materiales y métodos	38
Caracterización de la materia prima	38
Caracterización del agregado pétreo	38
Caracterización del material cerámico reciclado	59
Dosificación de la mezcla	68
Dosificación Hormigón	70
Dosificación de hormigón con árido grueso compuesto por 50% grava y 50% cerámica ...	82
Dosificación de hormigón con árido grueso 100% cerámica	89
Elaboración de cilindros	94

	11
Elaboración de adoquines	96
Capítulo IV: Análisis de Resultados	98
Cilindros de hormigón.....	98
Resistencia a la compresión	98
Módulo de elasticidad	106
Adoquines	118
Resistencia a la abrasión	118
Tracción indirecta.....	120
Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones	125
Conclusiones.....	125
Recomendaciones.....	128
Referencias.....	129

Índice de tablas

Tabla 1	Criterios de conformidad para propiedades de los Adoquines.....	28
Tabla 2	Tipos de cemento Portland.....	29
Tabla 3	Cerámica en la construcción	35
Tabla 4	Porcentajes de agregado fino retenido y pasante por cada tamiz.....	41
Tabla 5	Porcentajes de agregado grueso retenido y pasante por cada tamiz	43
Tabla 6	Pesos y contenido de humedad del agregado fino	46
Tabla 7	Pesos y contenido de humedad del agregado fino	48
Tabla 8	Determinación de la masa unitaria suelta del agregado fino.....	50
Tabla 9	Determinación de la masa unitaria compactada del agregado fino.....	50
Tabla 10	Determinación de la masa unitaria suelta del agregado grueso	52
Tabla 11	Determinación de la masa unitaria compactada del agregado grueso.....	53
Tabla 12	Determinación las densidades y la absorción del agregado fino.....	56
Tabla 13	Determinación las densidades y la absorción del agregado grueso	58
Tabla 14	Requisitos de gradación para áridos gruesos.....	64
Tabla 15	Cantidad de material cerámico triturado por tamaño de árido	65
Tabla 16	Resultados de laboratorio para gravedad específica del material cerámico	66
Tabla 17	Resultados de laboratorio para contenido de humedad del material cerámico ...	67
Tabla 18	Resultados de laboratorio de masa unitaria del material cerámico por el método de varillado.....	68
Tabla 19	Resultados de laboratorio del porcentaje de vacíos del material cerámico.....	68
Tabla 20	Resumen de las propiedades de los agregados pétreos.	70

Tabla 21	Valores de asentamiento del hormigón recomendados según su finalidad.....	71
Tabla 22	Cantidad de agua recomendada en kg/m ³ de concreto	72
Tabla 23	Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.....	73
Tabla 24	Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c.....	74
Tabla 25	Extrapolación de relación agua/cemento para $f'c=491\text{Kg/cm}^2$	75
Tabla 26	Volumen de grava por unidad de volumen de concreto (b/b_0).	76
Tabla 27	Extrapolación de relación b/b_0 para tamaño nominal de 13 mm.	76
Tabla 28	Proporciones de los componentes conocidos de la mezcla en peso y en volumen para un metro cubico de hormigón.....	78
Tabla 29	Cálculo del volumen en m ³	80
Tabla 30	Peso seco de componentes para probetas conformadas por 100% grava.	80
Tabla 31	Agua retirada para peso húmedo de áridos en kg.	81
Tabla 32	Pesos húmedos de cada componente pr.	81
Tabla 33	Resumen de diseño de probetas de hormigón.	82
Tabla 34	Resumen de las propiedades de los agregados pétreos y cerámicos.	83
Tabla 35	Cálculo del volumen en m ³	86
Tabla 36	Peso seco de componentes para probetas conformadas por 50% cerámica 50% grava.....	87
Tabla 37	Agua retirada para peso húmedo de áridos en kg.	87

Tabla 38	Pesos húmedos de cada componente para probetas conformadas por 50% cerámica 50% grava.	88
Tabla 39	Resumen de diseño de probetas conformadas por 50% cerámica 50% grava. ..	88
Tabla 40	Resumen de las propiedades de los agregados pétreos y cerámicos.	89
Tabla 41	Agua retirada para peso húmedo de áridos en kg.	93
Tabla 42	Pesos húmedos de cada componente para probetas conformadas por 100% cerámica.....	93
Tabla 43	Resumen de diseño de probetas conformadas por 100% cerámica.	93
Tabla 44	Resultados de ensayo a compresión a los 7 días.....	99
Tabla 45	Resultados de ensayo a compresión a los 14 días.....	101
Tabla 46	Resultados de ensayo a compresión a los 28 días.....	102
Tabla 47	Resumen de resultados de la resistencia a la compresión	105
Tabla 48	Datos de cilindro 5H conformado por hormigón sin adición de cerámica.....	108
Tabla 49	Coefficiente de Poisson y Esfuerzo para cilindro de hormigón sin adición de cerámica.....	108
Tabla 50	Interpolación de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ϵ_1 , de 0,000050	109
Tabla 51	Valores para interpolación del coeficiente de Poisson.....	110
Tabla 52	Datos de cilindro 5H conformado por 50% cerámica y 50% grava.	110
Tabla 53	Coefficiente de Poisson y Esfuerzo para cilindro de hormigón con árido grueso compuesto por 50% de grava y 50% cerámica.	111
Tabla 54	Interpolación de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ϵ_1 , de 0,000050	112
Tabla 55	Valores para interpolación del coeficiente de Poisson.....	113

Tabla 56	Datos de cilindro 6A conformado por 100% de cerámica.	113
Tabla 57	Coefficiente de Poisson y Esfuerzo para cilindro de hormigón conformado por árido grueso 100% de cerámica.....	114
Tabla 58	Interpolación de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ε_1 , de 0,000050	115
Tabla 59	Valores para interpolación del coeficiente de Poisson.....	116
Tabla 60	Análisis comparativo de módulos de elasticidad experimentales versus teóricos.....	116
Tabla 61	Resultados del ensayo de resistencia a la abrasión	118
Tabla 62	Factor de corrección k.....	121
Tabla 63	Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para probetas con 50% de cerámica.....	122
Tabla 64	Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para probetas con 100% de cerámica.....	122
Tabla 65	Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para probetas de hormigón con 0% de cerámica.....	123
Tabla 66	Resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta	123

Índice de figuras

Figura 1	Caminos en la antigua Roma	24
Figura 2	Vía peatonal adoquinada	25
Figura 3	Clasificación de adoquines según su forma	26
Figura 4	Fabricación manual de adoquines.....	31
Figura 5	Fabricación semi automática de adoquines.....	32
Figura 6	Máquina para la fabricación automática de adoquines	33
Figura 7	Clasificación de la cerámica por su composición.....	34
Figura 8	Lava basáltica tipo “AA” encontrada en la cantera	38
Figura 9	Agregado fino utilizado.....	39
Figura 10	Agregado grueso utilizado.....	39
Figura 11	Límites de gradación y curva granulométrica para el agregado fino	42
Figura 12	Límites de gradación y curva granulométrica para el agregado grueso	44
Figura 13	Utilización de equipo para determinar el contenido de humedad.....	45
Figura 14	Toma del peso del agregado fino para el ensayo de Masa unitaria	49
Figura 15	Toma del peso del agregado grueso para el ensayo de Masa unitaria.....	52
Figura 16	Verificación del agregado fino para el ensayo de gravedad específica.....	55
Figura 17	Utilización de la bomba de vacío para el ensayo de gravedad específica	55
Figura 18	Agregado grueso en estado Saturado superficialmente seco.....	58
Figura 19	Máquina de los ángeles	60
Figura 20	Curva granulométrica de la cerámica triturada por máquina de los ángeles sin esferas.....	60

Figura 21	Curva granulométrica de la cerámica triturada por máquina de los ángeles con 2 esferas.....	61
Figura 22	Máquina de compactación Marshall	62
Figura 23	Curva granulométrica de la cerámica triturada por máquina de compactación Marshall.....	62
Figura 24	Curva granulométrica de la cerámica triturada manualmente.....	63
Figura 25	Material tamizado de los métodos de trituración.....	64
Figura 26	Curva granulométrica ideal de la cerámica triturada.....	65
Figura 27	Proceso de dosificación según ACI 211.1	70
Figura 28	Cono de Abrams en prueba de asentamiento	95
Figura 29	Proceso de elaboración de cilindros de hormigón	96
Figura 30	Proceso de elaboración de cilindros de hormigón	97
Figura 31	Ensayo de resistencia a la compresión	99
Figura 32	Curva de resistencia a los 7 días.....	100
Figura 33	Curva de resistencia a los 14 días.....	102
Figura 34	Curva de resistencia a los 28 días.....	103
Figura 35	Curvas de resistencia a la compresión por edades.	104
Figura 36	Curvas de resistencia a la compresión por dosificaciones.....	106
Figura 37	Valores experimentales versus teóricos módulo de elasticidad	117
Figura 38	Ensayo de módulo de elasticidad	117
Figura 39	Curva de la resistencia a la abrasión.....	119
Figura 40	Curva de la resistencia característica.....	124

Resumen

La presente investigación tiene por objeto evaluar el efecto de la adición de cerámica sanitaria en una mezcla de concreto para elaboración de adoquines con una resistencia de diseño de $f'c=400 \text{ kg/cm}^2$.

El residuo cerámico se trituró y cribó de tal manera que fue llevado hasta una granulometría ajustada a los límites para un tamaño nominal de $\frac{1}{2}$ ", con ello caracterizaron los agregados pétreos y cerámicos: análisis granulométrico, porcentaje de humedad, porcentaje de absorción, masa unitaria y densidad, bajo las especificaciones de la normativa INEN, donde se obtuvo los valores para desarrollar dosificaciones para hormigones conformados por cerámica en porcentajes del 0%, 50% y 100% del agregado grueso.

Para la estimación de la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, se elaboraron probetas representativas de cada composición de hormigón indicada, así mismo para la estimación de la resistencia característica a la tracción indirecta y al desgaste a la abrasión se fabricaron y ensayaron adoquines de igual composición, de acuerdo a la norma NTE INEN 3040.

Con los resultados obtenidos se elaboró un estudio comparativo entre las composiciones de hormigón mencionadas, se estableció que la resistencia a la compresión de diseño muestra una disminución del 15,63% y 23,76% en especímenes con cerámica al 50% y 100% del agregado grueso respectivamente, sin embargo, las mismas superan el valor de resistencia de diseño de $f'c=400 \text{ kg/cm}^2$, también se determinó que el porcentaje de adición de cerámica del 50% del agregado grueso, cumple satisfactoriamente los criterios de conformidad de la normativa acerca de la resistencia a la tracción indirecta y al desgaste a la abrasión para adoquines.

Palabras clave: Hormigón, cerámica, dosificación, resistencia.

Abstract

The purpose of this research is to evaluate the effect of the addition of sanitary ceramics in a concrete mix for the production of pavers with a design strength of $f'_c=400$ kg/cm².

The ceramic residue was crushed and screened in such a way that it was brought to a granulometry adjusted to the limits for a nominal size of ½", thus characterizing the stone and ceramic aggregates: granulometric analysis, moisture percentage, absorption percentage, unit mass and density, under the specifications of the INEN standard, where the values were obtained to develop dosages for concretes made up of ceramics in percentages of 0%, 50% and 100% of the coarse aggregate.

For the estimation of compressive strength and modulus of elasticity, representative specimens were prepared for each concrete composition indicated; likewise, for the estimation of the characteristic resistance to indirect traction and abrasive wear, paving blocks of the same composition were manufactured and tested, according to the NTE INEN 3040 standard.

With the results obtained, a comparative study was made between the mentioned concrete compositions, it was established that the design compressive strength shows a decrease of 15.63% and 23.76% in specimens with ceramic at 50% and 100% of the coarse aggregate respectively, however, It was also determined that the ceramic addition percentage of 50% of the coarse aggregate satisfactorily meets the conformity criteria of the standards for indirect tensile strength and abrasion wear resistance for paving blocks.

Key words: Concrete, ceramic, dosage, strength.

Capítulo I: Introducción

Antecedentes

Uno de los materiales de construcción más conocido al rededor del mundo, es sin duda, el adoquín, y es así desde hace más de 2000 años cuando se empezó a utilizar piedras talladas y pulidas para conformar vías, esta técnica fue perfeccionada por los romanos para mejorar la circulación tanto de personas como de mercancía. Así, con el pasar del tiempo este elemento ya no solo fue utilizado en la conformación de vías, sino también en veredas y plazas (Prefabricados de la Jara, 2019).

En la actualidad los adoquinados ya no están conformados únicamente por piedras pulidas, o por lo menos no en la gran mayoría de casos, en los que se utilizan adoquines de hormigón, esto debido a que como se sabe, el concreto presenta algunas cualidades beneficiosas, entre las que se destacan su resistencia, su durabilidad y su relativa facilidad a tomar una forma definida antes de endurecer, esta última permite que las piezas elaboradas queden perfectamente unidas en sitio.

Es necesario tomar en consideración que la reutilización y el reciclaje de materiales o elementos que se encuentran en el entorno es una importante forma de avanzar, reduciendo la contaminación y los problemas que ella puede generar. En este contexto, la elaboración de adoquines podría dar pasos considerables al utilizar desechos cerámicos entre sus materiales, sobre todo si estos residuos llegan a generar aportes en su resistencia o durabilidad.

Estado del arte

Con el pasar del tiempo y gracias a la curiosidad humana se ha investigado como mejorar los elementos utilizados en distintos tipos de construcciones, una de las formas es la utilización de residuos industriales como los cerámicos.

A nivel internacional existen varias investigaciones referentes al uso de residuos cerámicos, una de ellas es la realizada en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, que se denomina “Análisis de las propiedades de hormigones de altas resistencias fabricados con residuos mixtos y cerámicos”, en la cual se pudo identificar que al reciclar los áridos se puede mejorar el módulo de elasticidad del hormigón sin que se vea afectada la resistencia a compresión del mismo (Lafuerza, 2014).

Se encontró también una investigación cuyo título es “Caracterización de los hormigones realizados con áridos reciclados procedentes de la industria de cerámica sanitaria”, en la que se puede concluir que es factible reemplazar un porcentaje de árido grueso por material cerámico sin que la resistencia del hormigón se vea afectada (Medina et al., 2011).

Planteamiento del problema

En la actualidad, el crecimiento acelerado de la población mundial ha creado nuevas y mayores necesidades, entre ellas, infraestructura vial, estructural e hidrosanitaria. En este ámbito, la demanda de los materiales de la construcción, en especial los áridos ha aumentado, debido a su importancia en la mayoría de procesos constructivos, por lo que también nace la necesidad de una explotación sostenible o la busca de implementar nuevos materiales que puedan brindar propiedades y resultados similares adecuados, y en consecuencia se disminuya el índice de explotación de estos recursos naturales, que, si bien son abundantes en nuestro ámbito, estos no son ilimitados.

La fabricación de un producto siempre va a generar desechos, sean estos líquidos, sólidos, entre otros, por lo que es de gran importancia que las industrias realicen una adecuada gestión de residuos, esta tiene por objeto principal la reducción de desechos que pueden ser utilizados como materia prima, de esta manera se puede disminuir el volumen de materia prima extraído, además que aumenta la vida útil del material. Por el contrario, si se realiza este

proceso de manera inadecuada, va a generar impactos notables, especialmente al medio ambiente.

Justificación

FV (Franz Viegner) es una empresa dedicada a la producción y comercialización de aparatos sanitarios y grifería, proceso del cual se obtienen residuos cerámicos a causa del resquebrajamiento de piezas e incumplimiento de estándares de calidad de los productos, por lo que, se busca determinar una forma de utilizar estos desechos como materia prima, específicamente como áridos gruesos para fabricación de adoquines peatonales.

Según EMASEO (2012) en la ciudad de Quito, se producen en promedio 2000 toneladas de desechos, de los cuales el 0,43% corresponden a material cerámico. Considerando que se pueda reutilizar estos desechos en la fabricación de hormigón y adoquines, se estaría ayudando a la reducción de 860 toneladas de residuos. Por lo que, la investigación realizada en el presente documento tiene la intención de verificar la utilidad que se le puede dar al material cerámico reciclado al utilizarlo como agregado grueso en la elaboración de hormigón y adoquines.

De esta manera, se presentará una composición alternativa, la cual permita el aprovechamiento de estos residuos, y que, además, mitigará el impacto ambiental generado actualmente y los costos asociados a la gestión de estos residuos.

Alcance del proyecto

Mediante una investigación explicativa, se pretende determinar el porcentaje de cerámica óptimo adicionado a la mezcla de hormigón para obtener una resistencia a la compresión mayor o igual a 400 kg/cm^2 (39,23 MPa) y elaborar adoquines peatonales que cumplan con los requerimientos de calidad de la normativa vigente respecto a los ensayos de tracción indirecta y la resistencia a la abrasión.

Objetivos

Objetivo General

Determinar la dosificación del cemento, áridos gruesos, arena, cerámica triturada y agua, para varias composiciones de mezcla, con agregado pétreo proveniente de la cantera de Pintag.

Objetivos Específicos

- Determinar las propiedades físicas de los materiales pétreos y residuos cerámicos para elaborar una adecuada dosificación.
- Dosificar hormigones de resistencia de $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$, con varias proporciones de cerámica triturada.
- Evaluar la influencia del uso de cerámica triturada en la resistencia y desgaste de adoquines.
- Elaborar ensayos de tracción indirecta y resistencia a la abrasión de adoquines.

Hipótesis

El uso de cerámica sanitaria reciclada como agregado grueso en la mezcla de hormigón puede aportar a la obtención de una mejor resistencia y desgaste del adoquín.

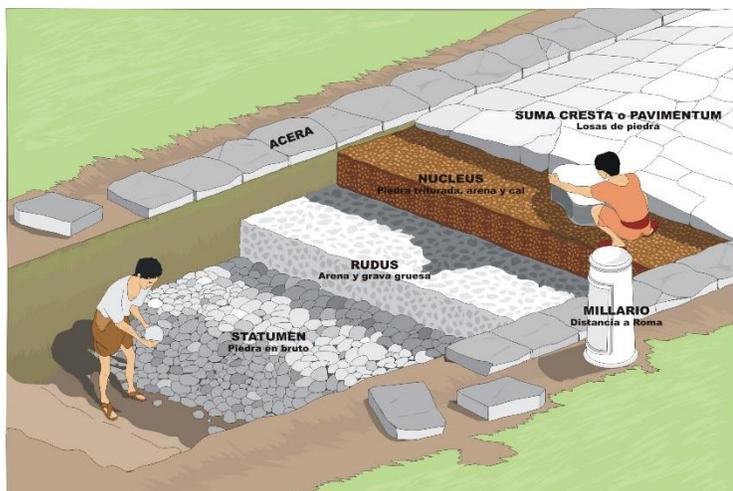
Capítulo II: Marco Teórico

Adoquines

El adoquín comenzó a utilizarse 3.000 años a. C. en Creta, Babilonia, el antiguo Egipto y Grecia. En Creta, consistían en rocas amorfas con una cara plana, que soportaban las cargas del tráfico. La civilización romana elaboró un pavimento de mayor complejidad para su red vial imperial, que incluía subrasante, sistema de drenaje y una geometría adecuada para que las ruedas de los carros siguieran una huella determinada. Posteriormente, en la época medieval, existió un mayor desarrollo de los adoquines, definiendo un tamaño estándar de 75 x 200 x 225 mm aproximadamente, los cuales fueron implementados en las calles de las ciudades. El uso de adoquines disminuyó significativamente con el desarrollo e implementación de pavimentos asfálticos y de hormigón a principios del siglo XX, destinando al adoquín a aplicaciones orientadas al urbanismo y en menor medida a la infraestructura vial principal (Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile, 2013).

Figura 1

Caminos en la antigua Roma



Nota. Se muestra el proceso constructivo y la conformación de caminos en implementada por la antigua civilización romana

Actualmente, el adoquín es ampliamente usado en varios países alrededor del mundo como Japón, India, Holanda, Gran Bretaña y Estados Unidos. Particularmente, en Ecuador aún existen calles en ciudades como Quito y Cuenca pavimentadas con adoquines, que en algunos casos datan de los tiempos de la colonia.

Figura 2

Vía peatonal adoquinada



Nota. La vía está ubicada en el Centro Histórico de la ciudad de Quito, Ecuador

Descripción general

Los adoquines son aquellos bloques macizos individuales que son habitualmente prefabricados con hormigón, los cuales son elaborados mediante un proceso de vibrocompactación, debido a que su forma es prismática, es posible la colocación de elementos de forma continua y ordenada para formar así, superficies de pavimentos articulados con ventajas constructivas como su durabilidad y fácil colocación (Hidalgo & Poveda, 2013).

Clasificación

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) en su normativa 1483 clasifica 3 tipos de adoquines,

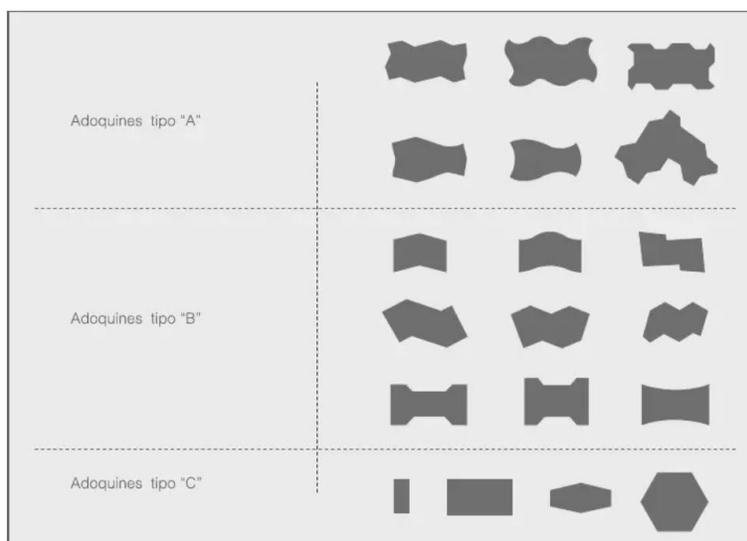
Tipo A. Adoquines dentados que se unen entre sí por los cuatro lados, pueden colocarse en esterilla, y, por su geometría plana, al unirse, resisten la expansión de las juntas paralelamente, tanto en los ejes longitudinales como en los transversales de las unidades

Tipo B. Adoquines dentados que se unen con el otro solamente en dos de sus lados, que no pueden colocarse en esterilla y que, por su geometría plana, al unirse, resisten la expansión de las juntas paralelamente sólo en los ejes longitudinales de los adoquines; dependen de su precisión en su colocación para que se unan con las otras caras.

Tipo C. Adoquines rectangulares de perfil sencillo que no se unen y que dependen de su precisión dimensional y de la precisión en su colocación para desarrollar el punteo.

Figura 3

Clasificación de adoquines según su forma



Nota. Obtenido del Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón, por el Instituto del Cemento y Hormigón de Chile, 2013.

Sin embargo, actualmente la normativa INEN 3040 señala que los adoquines son clasificados en monocapa, en el caso de ser elaborados con un solo tipo de hormigón, o doble capa, si se utiliza diferentes tipos de hormigón en su capa superficial y de apoyo. Cuando los adoquines sean fabricados con capa superficial, o doble capa, ésta, debe tener un espesor mínimo de 4 mm.

Requisitos Normativos

La normativa INEN 3040 referente a *Adoquines De Hormigón. Requisitos Y Métodos De Ensayo*, señala los requisitos de los materiales y de los productos que se deberán considerar, los cuales se especifican a continuación.

Requisitos de los materiales

El control de calidad de los adoquines que se fabrican en el país se debe realizar de acuerdo a lo indicado en la normativa NTE INEN 3040.

Se deberá utilizar para la fabricación de adoquines de hormigón solamente materiales cuyas propiedades y características sean adecuadas. Adicionalmente considerar que, no se podrá usar materiales que contengan amianto o este elemento en general.

El cemento deberá ser evaluado de conformidad con los requisitos del fabricante y la normativa correspondiente (*INEN 152 Cemento Pórtland. Requisitos*). Los áridos utilizados deberán cumplir con la normativa *INEN 872 Áridos para hormigón. Requisitos*; deberá verificarse la granulometría de los agregados y la presencia de contaminación o impurezas. El tamaño máximo nominal del árido no deberá ser mayor a 1/4 del espesor del adoquín

Requisitos de los productos

La normativa INEN 3040 señala las propiedades a ser verificadas, mismas que son indicadas en la tabla siguiente

Tabla 1*Criterios de conformidad para propiedades de los Adoquines*

Propiedad	Criterio de conformidad
Aspectos visuales	Ningún adoquín debe mostrar fisuras, descamaciones
Espesor de la doble capa	Igual o mayor a 4 mm. Ningún adoquín debe presentar delaminación.
Forma y dimensiones	Las tolerancias admisibles para adoquines de espesor <100mm será ± 2 mm de longitud, ± 2 mm de ancho y ± 3 mm de espesor. Para adoquines con un espesor ≥ 100 mm, las tolerancias que se admitirán son ± 3 mm de longitud, ± 3 mm de ancho y ± 4 mm de espesor
Resistencia y carga de tracción indirecta	La resistencia característica a la tracción indirecta debe ser igual o mayor a 3,6 MPa. Ningún adoquín debe tener una resistencia a la tracción indirecta menor que 2,9 MPa, ni una carga de tracción indirecta inferior a 250 N/mm.
Resistencia a la abrasión	Todo adoquín debe satisfacer una longitud de cuerda máxima de 23 mm o un desgaste máximo de 20 000 mm ³ / 5 000 mm ² , según el caso.
Resistencia a deslizamiento/resbalamiento (solo donde se ensaye).	Los adoquines de hormigón tienen una resistencia satisfactoria al deslizamiento/resbalamiento siempre y cuando la totalidad de su cara vista no haya sido pulida para producir una superficie muy lisa. Debe declararse el valor medio de los 5 adoquines.
Resistencia climática	Los adoquines deben cumplir con un índice de absorción inferior o igual a 6 %. Debe declararse el valor medio de los 5 adoquines.

Nota. Esta tabla se basa en los parámetros presentados por la *INEN 3040, referente a*

Adoquines De Hormigón. Requisitos Y Métodos De Ensayo, 2016

En el presente proyecto, se realizará la verificación de la resistencia a la abrasión y la resistencia y carga de tracción indirecta de los especímenes obtenidos.

Composición

Los adoquines de hormigón se elaboran a partir de un diseño de mezcla que se basa en la adecuada elección de sus elementos, agua, cemento, agregados y aditivo en caso de ser necesario para producir un elemento de calidad, pero también económico.

Cemento

El cemento es un elemento que tienen la propiedad de fraguar y posteriormente endurecerse, debido a que reaccionan químicamente con el agua para formar un elemento con altas propiedades aglutinantes. Una vez endurecido el elemento conservará su resistencia y estabilidad (Asocreto, Sanchez, & Gomez, 1998).

El cemento más utilizado es el cemento hidráulico Portland, este tipo de cemento es de uso general y adecuado, en el caso de no ser necesario propiedades especiales tal como exposición a sulfatos o agua a elevadas temperaturas.

Tabla 2

Tipos de cemento Portland

Tipo	Característica
I	Para usarse cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo
IA	Cemento con incorporador de aire para los mismos usos del Tipo I, donde se desea incorporación de aire
II	Para uso general, especialmente cuando se desea una moderada resistencia a los sulfatos o moderado calor de hidratación.
IIA	Cemento con incorporador de aire para los mismos usos del Tipo II, donde se desea incorporación de aire.
III	Para usarse cuando se desea alta resistencia inicial o temprana.

Tipo	Característica
IIIA	Cemento con incorporador de aire para el mismo uso que el Tipo III, donde se desea incorporación de aire
IV	Para usarse cuando se desea bajo calor de hidratación.
V	Para usarse cuando se desea alta resistencia a la acción de los sulfatos.

Nota. Clasificación presentada por la INEN 152 (*Cemento Portland. Requisitos*), 2010

Agregados pétreos

Son materiales usualmente de origen pétreo compuestos de partículas duras, de formas preferentemente prismáticas de diferentes tamaños. Los agregados como componentes son los responsables de la resistencia a la aplicación de cargas, mejorar la durabilidad de la mezcla y disminuir las retracciones por el fraguado.

Chauveinc (2011) menciona que la resistencia y la adherencia de la mezcla de hormigón está vinculada con la calidad, la limpieza y la textura de la superficie de las partículas de árido, además, estos materiales constituyen aproximadamente tres cuartos del volumen total del hormigón.

Según la norma INEN 694 se tienen dos clases de agregados según el tamaño de las partículas, el agregado grueso con tamaños mayores a 5mm y los agregados finos con tamaños entre 0,07mm y 5 mm.

El agregado grueso o grava debe estar limpio, sin adherencias de limo o arcilla y no debe tener partículas livianas (como pómez) o terrones. No son convenientes las partículas demasiado lisas ya que disminuirá la adherencia con los otros materiales, aunque son las más duras. Para el agregado fino es recomendado usar arena natural de minas de antiguos lechos de ríos o de ríos de régimen actual, siempre que esté libre de contaminación con arcilla, limo o

materia orgánica. Las arenas gruesas son preferibles, pero siempre deben contener un buen porcentaje de partículas finas. El polvo de la trituración de la piedra es una opción de sustituto de la arena; sin embargo, se debe tener precaución respecto a la granulometría, ya que puede presentar exceso de material fino y partículas muy gruesas (Chaluiza, 2012).

Métodos de Fabricación

Existen tres métodos para la fabricación de adoquines, manual, semi automático y automático, el método a utilizarse en la presente investigación será el semi automático.

Método Manual

Este método comprende la realización manual de todos los procesos necesarios para la fabricación de los adoquines, este método brinda resultados con baja calidad y poco satisfactorios, por lo que no es comúnmente utilizado, con excepción de algunas zonas rurales (Yugsi, 2018).

Figura 4

Fabricación manual de adoquines



Nota. Se observa la elaboración manual de adoquines de cemento, obtenido de *Cómo hacer adoquines de cemento*, por Rubén Durán, 2018

Método Semiautomático

Es el método de mayor uso en el Ecuador, la dosificación se realiza de manera manual, mientras que, el proceso de realización de esta se elabora en una maquina mezcladora impulsada mecánicamente. El proceso de vibro compactación de los adoquines se realiza mediante la utilización de una maquinaria compuesta por una plataforma de masa excéntrica, dejando caer apisonadores vibratorios sobre el material. El tiempo de vibrado es controlado de manera Manual, al igual que el proceso de desmolde (Chaluiza, 2012).

Figura 5

Fabricación semi automática de adoquines



Nota. Se puede apreciar el proceso de colocación de materiales para la realización del hormigón de los adoquines en la maquina mezcladora

Método automático

Casi o en su totalidad el proceso de elaboración se realiza de manera automática, la intervención de actores externos como operarios es baja o nula. Para este método es de gran importancia contar con el equipo especializado (Chaluiza, 2012).

Figura 6

Máquina para la fabricación automática de adoquines



Nota. Imagen obtenida de BOLTEC

Material cerámico

Definición

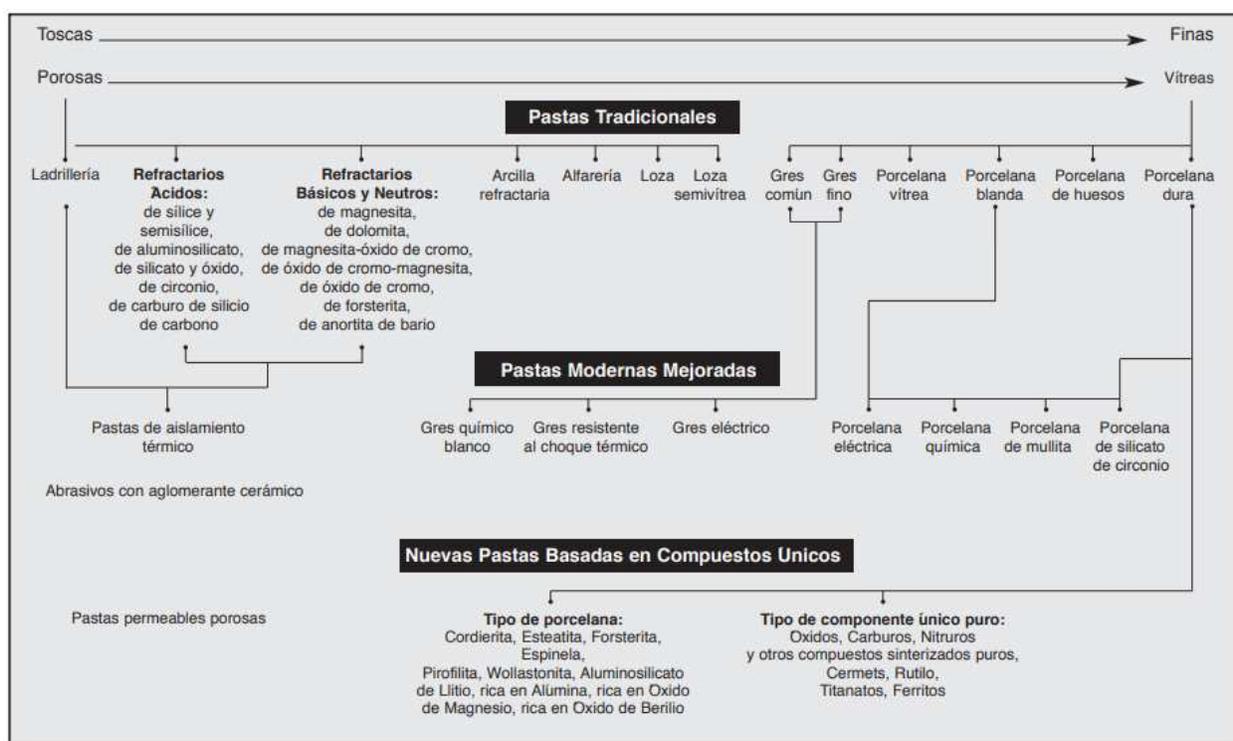
La palabra cerámica, proviene del griego κεραμος (kéramos) que significa arcilla. Tradicionalmente, se definía al producto cerámico como cualquier pasta a base de materia terrosa a la que por su propiedad plástica se le otorgaba forma en estado húmedo, y tras ser secada al aire y con ayuda del fuego se producía una pérdida de plasticidad dejando su forma moldeada e inalterable. Actualmente, se entiende como producto cerámico a cualquier manufacturado, compuesto esencialmente de materia sólida, inorgánica, no metálica, conformada en frío y consolidada por el calor (Morales, 2005).

Clasificación

La cerámica puede clasificarse según su temperatura de quema a (baja, media y alta), por su densidad (porosas y densas), por su color (blancas o coloreadas) o por su uso. De acuerdo a su composición se puede dividir en tres grupos, las pastas tradicionales, pastas modernas mejoradas y las nuevas pastas basadas en compuestos únicos.

Figura 7

Clasificación de la cerámica por su composición



Nota. El gráfico permite observar la clasificación de las pastas cerámicas y sus principales características, tomado de *Materiales cerámicos: propiedades, aplicaciones y elaboración*, por Emma Vázquez, 2005.

Las pastas tradicionales son cerámicas las cuales están compuestas principalmente por arcilla o una mezcla de arcillas combinada comúnmente con sílice y feldespato. Los diferentes

tipos de cerámica de este tipo se obtienen gracias a la variación de los porcentajes de sus componentes (Vázquez, 2005).

Las pastas modernas mejoradas se originan de las pastas tradicionales y la adición de otros materiales que mejoran sus características originales, también se las conoce como pastas técnicas ya que el uso de este grupo es particular, especialmente en la ingeniería y química. Las pastas basadas en compuestos únicos son derivaciones de las pastas modernas mejoradas, pero estas tienen un mínimo o nulo porcentaje de arcilla en su composición, para producirlas se necesita materia prima pura, altas temperaturas para su cocción y un gran control en su producción (Vázquez, 2005).

En la industria de la construcción son utilizadas principalmente las cerámicas de ladrillera, alfarería, gres común, porcelana vítrea y gres fino, los productos obtenidos en base a estos se detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3

Cerámica en la construcción

Tipo	Característica	Producto	Aplicaciones
Ladrillería	- Piezas porosas con o sin esmalte. - De media a mayor dureza. - Aislante térmico.	- Ladrillo común. - Ladrillo de fachada. - Ladrillo hueco. - Ladrillo técnico. - Ladrillo azul.	- Construcción. - Ingeniería Civil.
Alfarería	-De grano fino y textura más compacta que la de ladrillería con o sin esmalte. -Teñida. -Que se superpongan o encajen.	- Teja.	- Techado. - Protección de paredes exteriores.

Tipo	Característica	Producto	Aplicaciones
Alfarería	Piezas redondas, huecas, rojas, porosas	- Tubos de chimenea. - Macetas.	- Chimeneas. - Jardinería. - Artículo decorativo.
Gres común	Resistencia a: - Ataque químico. - Compresión. - Descomposición, corrosión, contaminación. - Ataque de bacterias. - Erosión, condiciones húmedas y secas. - Heladas, roedores, raíces, etc.	- Tubería de drenaje. - Tubería de gres vidriado con sal.	- Drenaje.
Gres, Loza, Alfarería	- Semiporosas con o sin esmalte. - Densas y vitrificadas, con o sin esmalte. - Colores y decorados varios. - Lisas o con textura. - Antiderrapantes. - Resistencia a la abrasión y a la intemperie.	- Azulejos. - Loseta para piso.	- Revestimiento de pisos y paredes. - Decorativo.
Porcelana vítrea, Gres fino	Artículos vitrificados. - Baja absorción de agua (1%). - Alta resistencia. - Superficie lisa y esmaltada por limpieza. - Resistencia al trabajo duro. - Resistencia al ataque químico.	Artículos sanitarios.	Uso sanitario en genera

Nota. La tabla presenta los usos de la cerámica en la industria de la construcción, especificación sus características, productos y aplicación, obtenido de *Materiales cerámicos: propiedades, aplicaciones y elaboración*, por Emma Vázquez, 2005.

Cerámica vítrea

También nombrada como porcelana vítrea por su composición, es una pasta blanca opaca, de alta resistencia, vitrificada y absorción de agua casi nula. Se usa en la fabricación de varios aparatos sanitarios. Es una pasta de alta temperatura de quema, necesitando entre 1200 °-1450 °C para este proceso (Vázquez, 2005).

Esmaltado

El esmaltado es una capa fina vítrea de 0,15 a 0,5 mm de espesor, colocada sobre el material cerámico, este proceso se realiza con fines de protección o decorativos, se puede aplicar el esmalte por: rociado, atomizado, inmersión y posteriormente, pasar por otro horno con un ciclo térmico adecuado para fundir el esmalte y lograr su adhesión y por enfriamiento controlando su consolidación (Pinto, 2011). La normativa NTE INEN 3082 referente a *Aparatos Sanitarios. Requisitos Y Métodos De Ensayo*, menciona que, el esmalte es un recubrimiento cerámico liso, impermeable como el vidrio que debe quedar totalmente fundido al cuerpo del aparato sanitario.

Residuos cerámicos

Las piezas de cerámica salidas de los hornos son enviadas a las zonas encargadas de la inspección y control de calidad, en la que se separan los elementos defectuosos de las conformes. Aquellas que superan el control de calidad final son embaladas y paletizadas para su transporte al almacén (Cerámicas Gala S.A, 2018).

Sin embargo, las piezas que no cumplen con los estándares establecidos por las empresas son categorizadas como desperdicios, mismos que comúnmente son desechados en escombreras o rellenos sanitarios. La empresa Franz Viegner produce un promedio de 51188,40 Kg de residuos de cerámica sanitaria al mes, sin embargo, este volumen puede variar según la producción de la fábrica (Área Andina F.V., 2014).

Capítulo III: Materiales y métodos

Caracterización de la materia prima

Caracterización del agregado pétreo

El agregado pétreo fue obtenido de las canteras ubicadas en la parroquia de Pintag, al Sureste de Quito, en la provincia de Pichincha, las cuales aprovechan un flujo lávico generado por el volcán Antisana. A lo largo de los aproximadamente 11 km del flujo denominado Antisanilla se pueden identificar varias litologías, sin embargo, el agregado utilizado es obtenido de la trituración mecánica de lava basáltica tipo “AA”.

Figura 8

Lava basáltica tipo “AA” encontrada en la cantera



Nota. La imagen muestra una vista panorámica de la concesión minera REVTON S.A.

Descripción del material

Determinar las características de los materiales es sumamente importante para la calidad del hormigón, pues ayuda a asegurar que la dosificación planteada llegue a la resistencia esperada en el diseño. Por tal motivo es necesario seguir las normativas correspondientes.

Agregado fino

El agregado fino es arena obtenida de la trituración de lava basáltica.

Figura 9

Agregado fino utilizado



Nota. En la figura se puede observar una muestra del agregado fino, el cual fue obtenido por un proceso de trituración.

Agregado grueso

El agregado grueso que se utilizó es producto de la trituración de lava basáltica y tiene un tamaño nominal de 12,5 mm (1/2").

Figura 10

Agregado grueso utilizado



Nota. Imagen en la que se identifica una muestra del agregado grueso utilizado.

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico de un agregado corresponde a la distribución de las partículas de acuerdo con el tamaño que tienen, para esto se emplean tamices de diferentes aberturas, dependiendo de si el agregado es fino o grueso.

Agregado fino

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 696, según esta normativa el equipo que se emplea es el siguiente:

- Tamices: 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100
- Bandejas o taras
- Horno
- Tamizadora mecánica
- Balanza

Proceso:

Se debe secar el árido por 24 horas y a una temperatura constante de 110 °C, cuando el material se encuentre seco, se procede a pesar una porción de alrededor de 500 gramos para ser colocado en el juego de tamices, los cuales deben estar armados en orden descendente, es decir, con el de mayor abertura en la parte superior. Posteriormente poner el juego de tamices en la tamizadora mecánica durante 1 minuto, para que cada partícula se retenga en el tamiz que le corresponda, se retiran los tamices uno por uno y se pesa el material atrapado en cada uno de ellos. Con los pesos tomados, se determina tanto el porcentaje de material que se retiene como el que pasa por cada tamiz, estos datos permitirán la generación de la curva granulométrica (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Para poder clasificar el agregado fino en función de su granulometría es necesario determinar el módulo de finura, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$M_f = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulados de los tamices}}{100}$$

Donde:

M_f = Módulo de finura de agregado fino.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado fino utilizado.

Tabla 4

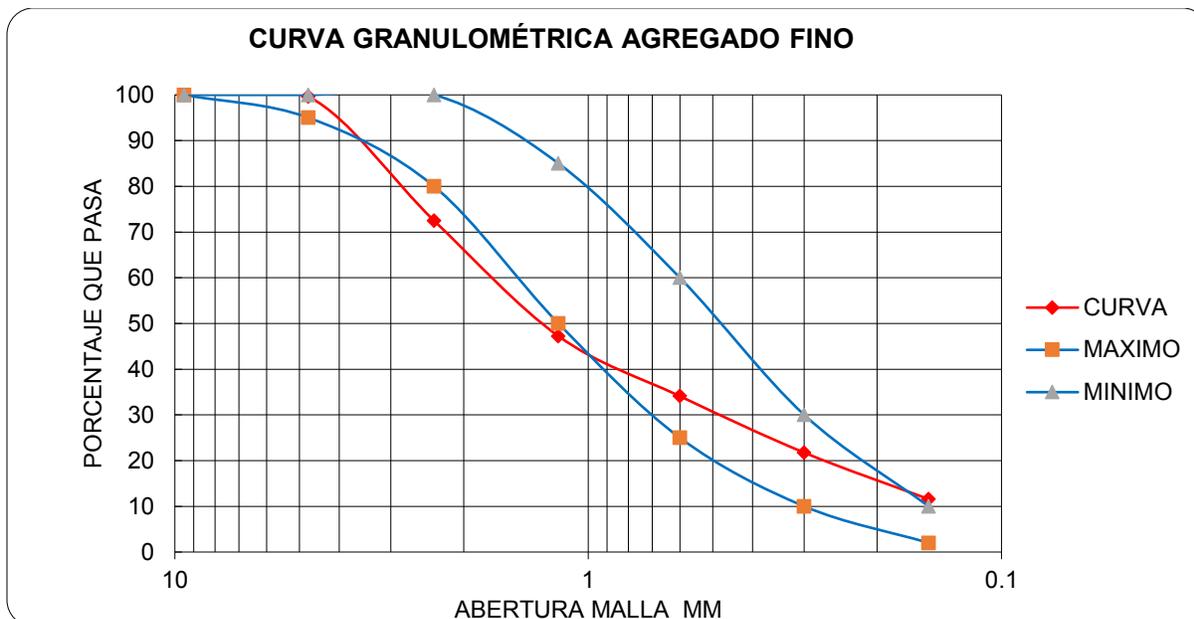
Porcentajes de agregado fino retenido y pasante por cada tamiz

Tamices	Peso retenido (g)	Retenido acumulado	% retenido acumulado	% acumulado pasa total
3/8" (9.5mm)	0,00	0,00	0	100
No. 4 (4,76 mm)	1,74	1,74	0	100
No. 8 (2,36 mm)	121,63	123,37	28	72
No. 16(1,18 mm)	113,30	236,67	53	47
No. 30(0,6 mm)	58,92	295,59	66	34
No. 50(0,30mm)	55,41	351,00	78	22
No. 100(0,15 mm)	45,62	396,62	88	12
Pasante No 100	51,87	448,49		
Peso inicial de la muestra: (g)				657,20
Módulo de finura:				3,13

Nota. Esta tabla permite evidenciar los datos tomados y los resultados obtenidos del ensayo granulométrico del agregado fino.

Figura 11

Límites de gradación y curva granulométrica para el agregado fino



Nota. La imagen muestra los límites de gradación para el agregado fino, así como la curva granulométrica obtenida.

Agregado grueso

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 696, según esta normativa el equipo que se emplea es el siguiente:

- Tamices: 1/2", 3/8", N°4, N°8
- Bandejas o taras
- Horno
- Tamizadora mecánica
- Balanza

Proceso:

Se debe secar el árido por 24 horas y a una temperatura constante de 110 °C, cuando el material se encuentre seco, se procede a pesar una porción de alrededor de 2000 gramos para ser colocado en el juego de tamices, los cuales deben estar armados en orden descendente, es decir, con el de mayor abertura en la parte superior. Posteriormente poner el juego de tamices en la tamizadora mecánica durante 1 minuto, para que cada partícula se retenga en el tamiz que le corresponda, se retiran los tamices uno por uno y se pesa el material atrapado en cada uno de ellos. Con los pesos tomados, se determina tanto el porcentaje de material que se retiene como el que pasa por cada tamiz, estos datos permitirán la generación de la curva granulométrica (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado grueso utilizado.

Tabla 5

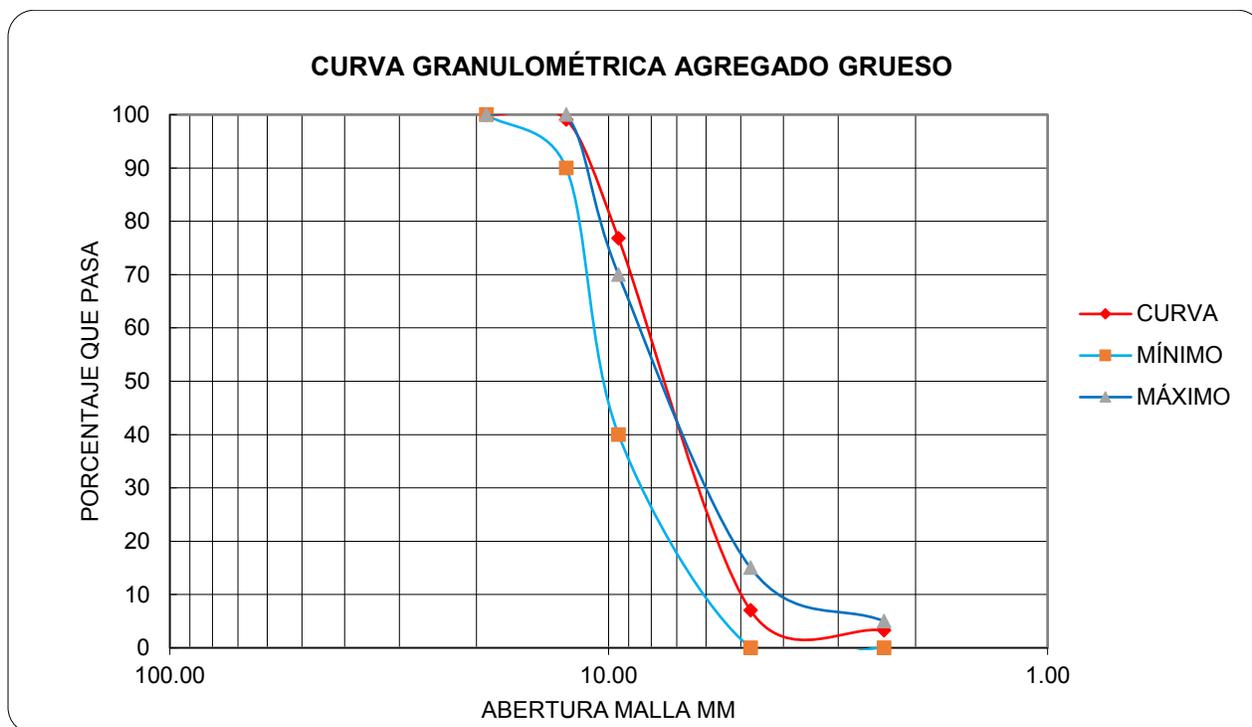
Porcentajes de agregado grueso retenido y pasante por cada tamiz

Tamices	Peso retenido (g)	Retenido acumulado	% retenido acumulado	% acumulado pasa
3" (76,1 mm)	0,0	0,00	0	100
2"(51,8mm)	0,0	0,00	0	100
1 1/2 " (38,1 mm)	0,0	0,00	0	100
1"(25,4mm)	0,0	0,00	0	100
3/4 " (19,0 mm)	0,0	0,00	0	100
1/2"(12,5mm)	23,50	23,46	1	99
3/8 " (9,51 mm)	562,60	586,10	23	77
No. 4 (4,76 mm)	1764,80	2350,91	93	7
No. 8 (2.36 mm)	94,30	2445,22	97	3

Nota. Esta tabla permite evidenciar los datos tomados y los resultados obtenidos del ensayo granulométrico del agregado grueso.

Figura 12

Límites de gradación y curva granulométrica para el agregado grueso



con un alto contenido de agua o, por el contrario, en una mezcla reseca y poco manejable (Castro Solano, 2020).

Agregado fino

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 862, según esta normativa el equipo que se emplea es el siguiente:

- Bandejas o taras
- Balanza
- Horno

Figura 13

Utilización de equipo para determinar el contenido de humedad



Nota. La imagen muestra la toma del peso húmedo de una muestra de agregado fino.

Proceso:

Se inicia tomando una tara vacía para pesarla, posteriormente se debe colocar una porción del agregado en la tara y tomar nuevamente el peso. Adicionalmente se deja secar la tara con el material, en el horno, durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C para después pesarlo por última vez y registrar el dato (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Con los datos obtenidos se procede a determinar el contenido de humedad con la siguiente expresión:

$$\% W = \frac{B - C}{C - A} * 100\%$$

Donde:

A= Peso de la tara en gramos

B= Peso de la tara con el agregado húmedo (en estado normal), en gramos.

C= Peso de la tara con material después de haber sido secado al horno, en gramos.

% W= Porcentaje o contenido de humedad.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado fino utilizado.

Tabla 6

Pesos y contenido de humedad del agregado fino

Parámetro	Valor	
Recipiente	47	M3
Peso del recipiente (g)	120,64	118,92
Peso del recipiente + muestra húmeda (g)	277,41	274,23
Peso del recipiente + muestra seca (g)	270,28	267,64
Peso del agua (g)	7,13	6,59
Peso seco (g)	149,64	148,72
% agua	4,76	4,43
% agua media	4,60	

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos al ensayar el agregado fino.

Agregado grueso

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 862, según esta normativa el equipo que se emplea es el siguiente:

- Bandejas o taras
- Balanza
- Horno

Proceso:

Se inicia tomando una tara vacía para pesarla, posteriormente se debe colocar una porción del agregado en la tara y tomar nuevamente el peso. Adicionalmente se deja secar la tara con el material, en el horno, durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C para después pesarlo por última vez y registrar el dato (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Con los datos obtenidos se procede a determinar el contenido de humedad con la siguiente expresión:

$$\% W = \frac{B - C}{C - A} * 100\%$$

Donde:

A= Peso de la tara en gramos

B= Peso de la tara con material húmedo, en gramos.

C= Peso de la tara con material seco, en gramos.

% W= Porcentaje de humedad.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado grueso utilizado.

Tabla 7*Pesos y contenido de humedad del agregado fino*

Parámetro	Valor	
Recipiente	165	11
Peso del recipiente (g)	122,15	120,50
Peso del recipiente + muestra húmeda (g)	264,78	260,10
Parámetro	Valor	Parámetro
Peso del recipiente + muestra seca (g)	258,21	253,38
Peso del agua (g)	6,57	6,72
Peso seco (g)	136,06	132,88
% agua	4,83	5,06
% agua media	4,94	

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos al realizar el ensayo del agregado grueso.

Masa Unitaria

La masa unitaria de un material corresponde al peso de este para un determinado volumen, este valor de densidad varía notablemente si el material se encuentra suelto o compactado, es por esta razón que se miden ambos valores.

Agregado fino

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 858, según esta normativa el equipo que se emplea es el siguiente:

- Balanza
- Molde cilíndrico con barra de compactación
- Horno

Proceso:

Para calcular la masa unitaria suelta, se debe determinar el volumen del molde cilíndrico que se va a usar y también se toma su peso, a continuación, se debe llenar el molde con agregado fino, el cual debió ser secado en el horno por 24 horas a una temperatura de 110 °C, se retira el material excedente del llenado y se enrasa el molde, una vez enrasado se toma su peso. Por otro lado, para la masa unitaria compactada, el proceso será similar al anterior, pero

cuando se realice el llenado del recipiente cilíndrico, se lo debe hacer en 3 capas de igual espesor, cada capa debe ser compactada aplicando 25 golpes de la barra de compactación, una vez compactadas las 3 capas, se retira el material excedente del llenado y se enrasa el molde, para tomar su peso (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Con los datos obtenidos se procede a determinar la masa unitaria con la siguiente expresión:

$$\text{Masa unitaria} = \frac{B - A}{V}$$

Donde:

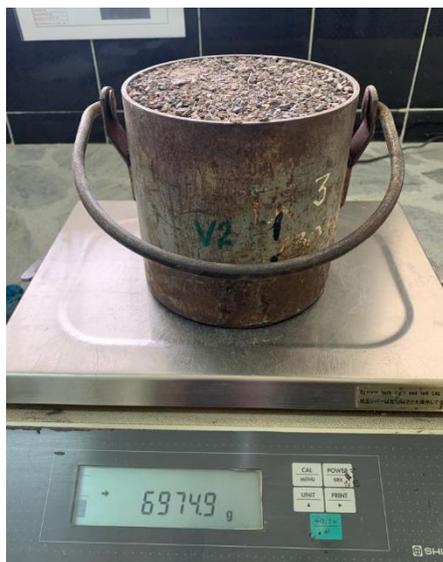
A= Peso del molde cilíndrico en gramos

B= Peso del molde cilíndrico con material suelto o compactado, en gramos.

V= Volumen del molde cilíndrico, en centímetros cúbicos.

Figura 14

Toma del peso del agregado fino para el ensayo de Masa unitaria



Nota. La imagen muestra la toma del peso del agregado fino para empezar con el ensayo de masa unitaria.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado fino utilizado.

Tabla 8

Determinación de la masa unitaria suelta del agregado fino

Parámetro	Valor	
Peso del molde (g)	2596,06	2596,06
Peso molde +suelo (g)	6982,10	6982,10
Peso suelo (g)	4385,50	4386,04
Volumen (cm ³)	2817,70	2817,70
Densidad suelta (g/cm ³)	1,56	1,56
Media	1,56	

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos del ensayo de masa unitaria suelta del agregado fino.

Tabla 9

Determinación de la masa unitaria compactada del agregado fino

Parámetro	Valor	
Peso del molde (g)	2596,06	2596,06
Peso molde +suelo (g)	6974,90	6974,90
Peso suelo (g)	4378,30	4378,84
Volumen (cm ³)	2817,70	2817,70
Densidad Varillada (g/cm ³)	1,55	1,55
Media	1,55	

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos del ensayo de masa unitaria compactada del agregado fino.

Agregado grueso

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 858, según esta normativa el equipo que se emplea es el siguiente:

- Balanza
- Molde cilíndrico con barra de compactación

- Horno

Proceso:

Para calcular la masa unitaria suelta, se debe determina el volumen del molde cilíndrico que se va a usar y también se toma su peso, a continuación, se debe llenar el molde con agregado fino, el cual debió ser secado en el horno por 24 horas a una temperatura de 110 °C, se retira el material excedente del llenado y se enrasa el molde, una vez enrasado se toma su peso. Por otro lado, para la masa unitaria compactada, el proceso será similar al anterior, pero cuando se realice el llenado del recipiente cilíndrico, se lo debe hacer en 3 capas de igual espesor, cada capa debe ser compactada aplicando 25 golpes de la barra de compactación, una vez compactadas las 3 capas, se retira el material excedente del llenado y se enrasa el molde, para tomar su peso (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Con los datos obtenidos se procede a determinar la masa unitaria con la siguiente expresión:

$$Masa\ unitaria = \frac{B - A}{V}$$

Donde:

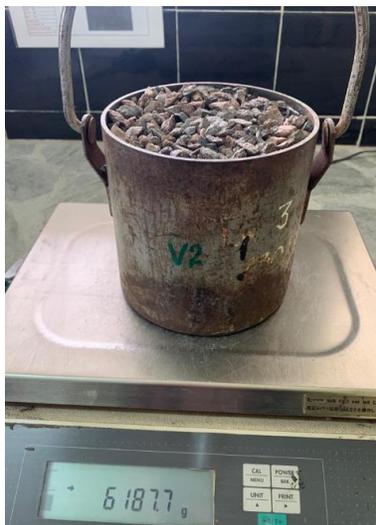
A= Peso del recipiente en gramos

B= Peso del recipiente con material suelto o compactado, en gramos.

V= Volumen del molde, en centímetros cúbicos.

Figura 15

Toma del peso del agregado grueso para el ensayo de Masa unitaria



Nota. La imagen muestra la toma del peso del agregado grueso para empezar con el ensayo de masa unitaria.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado grueso utilizado.

Tabla 10

Determinación de la masa unitaria suelta del agregado grueso

Parámetro	Valor	
Peso del molde (g)	2596,06	2596,06
Peso molde +suelo (g)	5791,40	5791,40
Peso suelo (g)	3194,80	3194,80
Volumen (cm ³)	2818,00	2818,00
Densidad suelta (g/cm ³)	1,13	1,13
Media	1,13	

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos del ensayo de masa unitaria suelta del agregado grueso.

Tabla 11

Determinación de la masa unitaria compactada del agregado grueso

Parámetro	Valor	
Peso del molde (g)	2596,06	2596,06
Peso molde +suelo (g)	6187,70	6187,70
Peso suelo (g)	3591,10	3591,10
Volumen (cm ³)	2818,00	2818,00
Densidad Varillada (g/cm ³)	1,27	1,27
Media	1,27	

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos del ensayo de masa unitaria compactada del agregado grueso.

Densidad y absorción del agregado

Agregado fino

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 856, según esta normativa se debe emplear el siguiente proceso:

La muestra debe estar libre de impurezas y partículas que hayan pasado por el tamiz N° 200, para lo cual es importante lavar la muestra. Además, es fundamental que el material se encuentre en estado de saturación, para garantizar esto se debe tomar una muestra del agregado y sumergirla en agua durante 24 horas (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Cuando el material esté saturado en su totalidad se debe colocarlo en una bandeja, esparciéndolo de manera uniforme, de esta forma se obtendrá un secado óptimo y en el menor tiempo. Posteriormente, para la elaboración de este ensayo se requiere que el agregado este en condición saturada superficialmente seca (SSS), la forma de verificar esta condición es llenando un molde de cono truncado con la muestra, se la compacta de manera uniforme y tomando en consideración que se deben dar 25 golpes en todo el proceso, este proceso se repite hasta llenar el molde con material compactado. Para seguir con el proceso se debe

enraizar el molde y retirar el material que este suelto y repartido alrededor. Finalmente se retira el molde de la superficie verificando que el material se derrumbe ligeramente, si sucede esto se ha llegado al estado necesario (SSS), si el material no se derrumba o lo hace de forma excesiva, se lo debe repetir hasta conseguir la condición necesaria (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

En el momento en el que el material este en condición de (SSS), se deben tomar 500 gramos de arena dentro de un picnómetro de 1000 cm³, del cual se debe conocer el peso, posteriormente se debe llenar el recipiente con agua destilada, llegando a la marca de graduación y se agita para extraer el aire y disminuir los espacios vacíos. Es importante tomar los pesos en este proceso. Finalmente se procede a secar el material durante 24 horas a una temperatura constante de aproximadamente 110 °C, transcurrido este tiempo se pesa el material seco (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Con los datos obtenidos se procede a determinar la gravedad específica y la absorción con las siguientes expresiones:

$$Densidad\ relativa\ (SH) = \frac{A}{(B + S - C)}$$

$$Densidad\ relativa\ (SSS) = \frac{AS}{(B + S - C)}$$

$$Densidad\ relativa\ aparente = \frac{A}{(B + A - C)}$$

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

Donde:

A= Masa de la muestra seca al horno.

B= Masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración.

C= Masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración.

S= Masa de muestra saturada superficialmente seca.

Figura 16

Verificación del agregado fino para el ensayo de gravedad específica



Nota. La imagen muestra la manera de verificar que el material se encuentre en estado Saturado superficialmente seco.

Figura 17

Utilización de la bomba de vacío para el ensayo de gravedad específica



Nota. La figura nos presenta la utilización de la bomba de vacío para una correcta realización del ensayo de gravedad específica.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado fino utilizado.

Tabla 12*Determinación las densidades y la absorción del agregado fino*

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
A	Masa de la muestra saturada con superficie seca	(g)	499,96
C	Masa de la muestra seca al horno	(g)	490,30
D	Masa del picnómetro lleno con agua	(g)	1250,70
E	Masa del picnómetro lleno don muestra y agua	(g)	1555,70
g	peso específico del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	(g/cm ³)	0,99
(C/C+D-E)*g	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	(g/cm ³)	2,64
(A/A+D-E)*g	Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	(g/cm ³)	2,56
(C/A+D-E)*g	Densidad relativa (gravedad específica)	(g/cm ³)	2,51
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	1,97

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos del ensayo de densidades y absorción para el agregado fino.

Agregado grueso

Para ensayar la muestra se siguió la norma NTE INEN 857, según esta normativa se debe emplear el siguiente proceso:

La muestra debe estar libre de impurezas y partículas, para lo cual es importante lavar la muestra. Además, es fundamental que el material se encuentre en estado de saturación, para garantizar esto se debe tomar una muestra del agregado y sumergirla en agua durante 24 horas (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Cuando el material esté saturado en su totalidad se debe colocarlo en una bandeja, esparciéndolo de manera uniforme. Posteriormente, para la elaboración de este ensayo se

requiere que el agregado este en condición saturada superficialmente seca (SSS), la forma de verificar esta condición es poniendo el agregado húmedo sobre una franela y secando las partículas hasta que hayan perdido el brillo característico que les brinda la humedad superficial.

En el momento en el que el agregado este en condición de (SSS), se lo debe pesar. A continuación, se debe tomar el peso sumergido, para esto se coloca el material en una canastilla sujeta de la balanza para así sumergirla en el agua y anotar el peso que se obtiene. Para finalizar se procede a secar el material durante 24 horas a una temperatura constante de aproximadamente 110 °C, transcurrido este tiempo se pesa el material seco (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Con los datos obtenidos se procede a determinar la gravedad específica y la absorción con las siguientes expresiones:

$$D = B - A$$

$$\text{Densidad relativa (SH)} = \frac{E}{(C - D)}$$

$$\text{Densidad relativa (SSS)} = \frac{C}{(C - D)}$$

$$\text{Densidad relativa aparente} = \frac{E}{(E - D)}$$

$$\text{AAbsorción} = \frac{C - E}{E} * 100\%$$

Donde:

A= Masa de canasta sumergida en agua, en gramos.

B= Masa de canasta y material sumergido en agua, en gramos

C= Masa de material en estado SSS, en gramos.

D= Masa del agregado sumergido en agua, en gramos.

E= Masa del agregado seco, en gramos.

Resultados:

En base a la normativa y siguiendo el procedimiento que esta menciona se pudieron determinar las características del agregado grueso utilizado.

Figura 18

Agregado grueso en estado Saturado superficialmente seco



Nota. En la figura se observa la toma de peso del agregado grueso en estado Saturado superficialmente seco.

Tabla 13

Determinación las densidades y la absorción del agregado grueso

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
A	Masa de la muestra saturada con superficie seca en aire	(g)	2069,00
B	Masa aparente saturada en agua	(g)	1209,00

C	Masa de la muestra seca al horno	(g)	1997,10
Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
g	Densidad del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	(g/cm ³)	0,99
(C/C-B)*g	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	(g/cm ³)	2,53
(A/A-B)*g	densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	(g/cm ³)	2,40
(C/A-B)*g	Densidad relativa (gravedad específica)	(g/cm ³)	2,32
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	3,60

Nota. En la tabla se presentan los valores obtenidos del ensayo de densidades y absorción para el agregado grueso.

Caracterización del material cerámico reciclado

El material cerámico reciclado fue obtenido de la fábrica FV S.A (Franz Viegener), ubicado en la vía Sangolquí – Amaguaña, km 25, Barrio El Carmen, en el cantón de Sangolquí, y trasladado a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para su caracterización.

FV S.A. es una empresa dedicada a la fabricación y comercialización de grifería en una amplia gama de productos destinados al baño, la cocina y las instalaciones sanitarias. Hoy es líder indiscutido del mercado latinoamericano (FV, 2019).

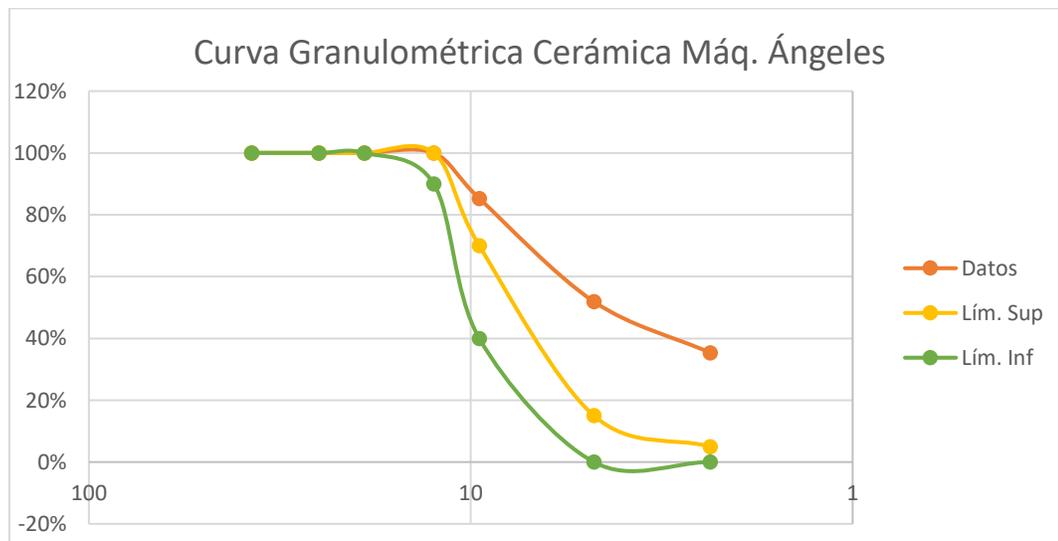
Trituración

Se probaron 4 métodos de trituración, los cuales se describen a continuación:

Máquina de los ángeles. En este método se realizaron 2 tipos de prueba: Sin la incorporación de esferas, y agregando 2 esferas. Se ingresa parte del material cerámico reciclado con las respectivas cantidades de esferas de acero al tambor y se procede a accionar la maquina durante 5 minutos.

Figura 19*Máquina de los ángeles*

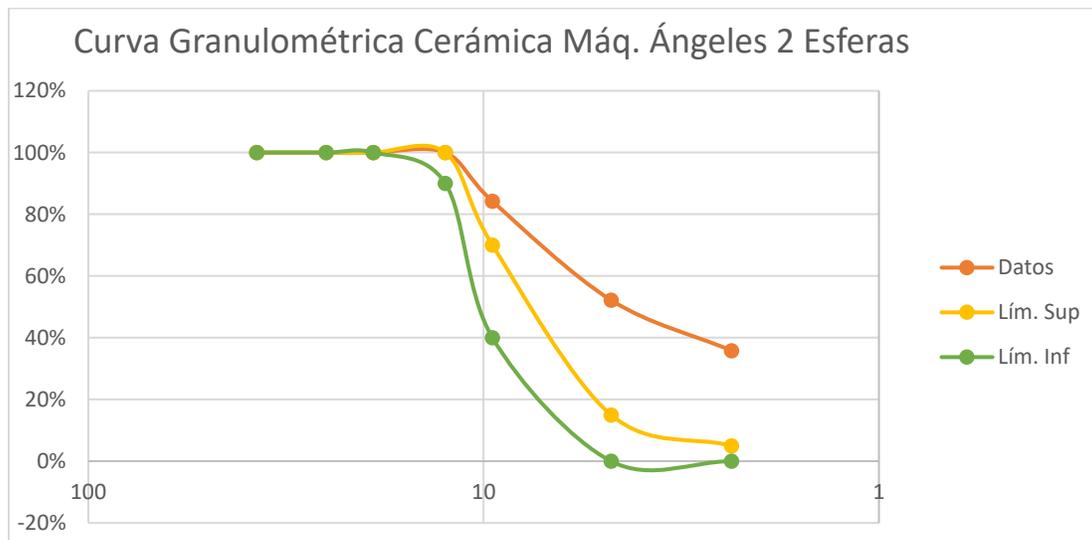
Nota. Máquina de los ángeles usada para el proceso de triturado.

Figura 20*Curva granulométrica de la cerámica triturada por máquina de los ángeles sin esferas*

Nota. La imagen indica la curva granulométrica obtenida por el método de trituración con la máquina de los ángeles sin la adición de esferas.

Figura 21

Curva granulométrica de la cerámica triturada por máquina de los ángeles con 2 esferas.



Nota. La imagen indica la curva granulométrica obtenida por el método de trituración con la máquina de los ángeles con la adición de 2 esferas.

Máquina de compactación Marshall. Se ingresa parte del material cerámico en el cilindro de compactación, y se aplica 25 golpes con el martillo de 10,2 kg, usando la máquina de compactación Marshall.

Figura 22

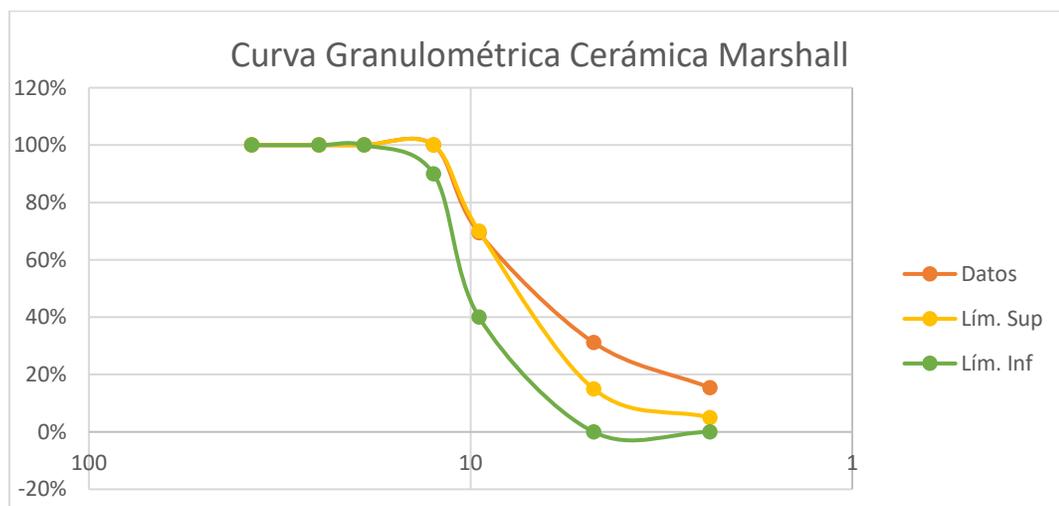
Máquina de compactación Marshall



Nota. Máquina de compactación usada para el proceso de triturado.

Figura 23

Curva granulométrica de la cerámica triturada por máquina de compactación Marshall

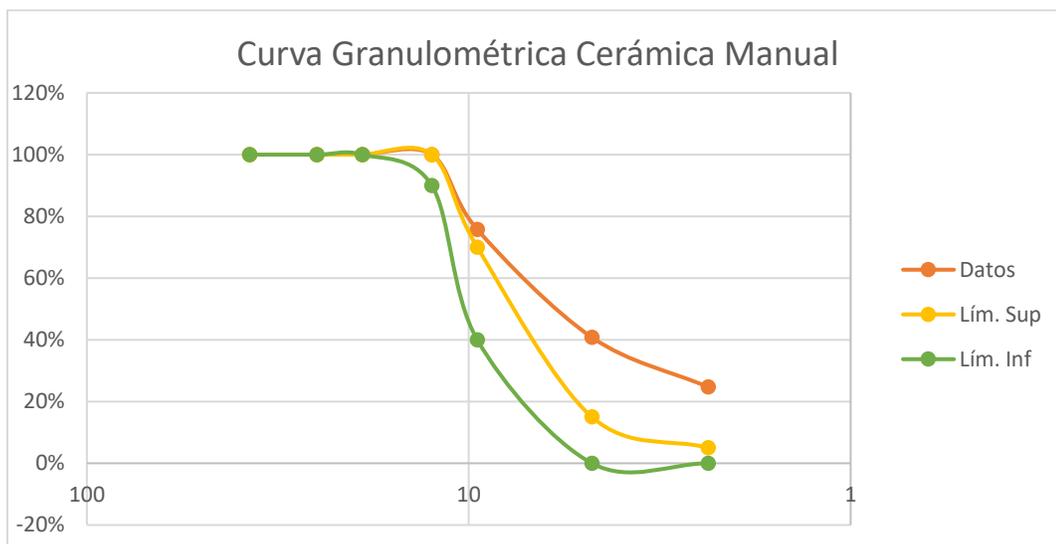


Nota. El gráfico indica la curva granulométrica producida por el método de la máquina de compactación Marshall.

Método manual con martillo Marshall. Se utilizó el cilindro y el martillo de la máquina de compactación Marshall de manera manual, llenando el cilindro con parte del material y golpeando este con 25 golpes con el martillo de manera de manual. Al no obtener un buen triturado, se pensó en realizar el método antes mencionado.

Figura 24

Curva granulométrica de la cerámica triturada manualmente



Nota. El gráfico indica la curva granulométrica producida por el método de triturado manual con el martillo de compactación Marshall.

Para el presente trabajo de titulación, se escoge el método por la máquina de compactación Marshall para triturar el material cerámico, ya que presenta mejores resultados, entrega un material con aristas definidas y menor cantidad de finos. Por el contrario, los métodos realizados con la máquina de los ángeles, entregan un material con aristas redondeadas y mayor cantidad de finos, conforme aumenta la cantidad de esferas de acero en el ensayo, aumenta la cantidad de finos, dicho material no es de utilidad para el diseño y dosificación de hormigones.

Figura 25

Material tamizado de los métodos de trituración



(a)

(b)

(c)

Nota. a) Tamizado sin esferas. b) Tamizado 2 esferas. c) Tamizado maquina compactación.

Análisis granulométrico

El análisis granulométrico para el material cerámico triturado se lo realizo para una curva granulométrica ideal de áridos para hormigón de un tamaño nominal máximo de $\frac{1}{2}$ ", según norma INEN 872 (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Tabla 14

Requisitos de gradación para áridos gruesos

Número de tamaño	Tamaño nominal (mm)	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz				
		19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm
7	de 12,5 a 4,75	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5

Nota. La presente tabla indica los límites de porcentaje acumulado máximo y mínimo que debe pasar por cada tamiz para árido con tamaño nominal de 12,5 a 4,75 mm. *Adaptado de INEN 872* (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011)

Se preparó 105 kg de material cerámico triturado, dispuesto en las siguientes proporciones:

Tabla 15

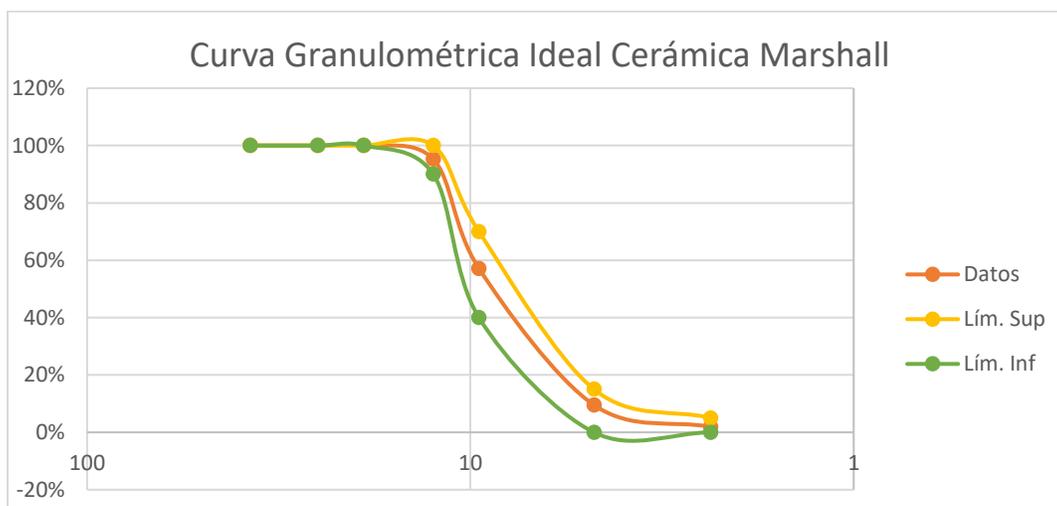
Cantidad de material cerámico triturado por tamaño de árido

Tamiz	Retenido (g)	Peso Retenido Acumulado	%Retenido Acumulado	%Acumulado que pasó	Límite Superior	Límite Inferior
1/2	12,5	5000	5000	5%	95%	100%
3/8"	9,5	40000	45000	43%	57%	70%
N.4	4,76	50000	95000	90%	10%	15%
N.8	2,36	8000	103000	98%	2%	5%
Pasante		2000	105000	100%	0%	0%
		105000				

Nota. Esta tabla indica las cantidades tomadas para cada tamiz, para obtener una curva granulométrica ideal.

Figura 26

Curva granulométrica ideal de la cerámica triturada



Nota. Se escogieron cantidad específicas de material cerámico triturado en los diferentes tamaños de tamices, para poder obtener una curva granulométrica ideal de áridos para hormigón.

Gravedad específica

La densidad relativa (gravedad específica) del material cerámico triturado se lo obtuvo basado en la norma INEN 857. Para lo cual se secó al horno una muestra de 2 kg del material

cerámico triturado, para luego de enfriado el material cerámico ser sumergido en agua por 24 horas. Luego de esto se procede a secar con un paño absorbente superficialmente hasta que la muestra adquiera la condición de saturada superficialmente seca y se registra su masa en aire. Inmediatamente se determina su masa aparente en agua, se remueve el aire atrapado agitando el recipiente mientras se lo sumerge. Utilizando los valores de masa obtenidos, mediante fórmulas descritas en la norma antes mencionada, se calcula la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).

Tabla 16

Resultados de laboratorio para gravedad específica del material cerámico

Nomenclatura	Parámetro	Unidad	Valor
A	Masa de la muestra saturada con superficie seca en aire	(g)	2000,8
B	Masa aparente saturada en agua	(g)	1148,0
C	Masa de la muestra seca al horno	(g)	1998,8
g	Densidad del agua a la temperatura que se realizó el ensayo	(g/cm ³)	0,99868
(C/C-B)*g	Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente) (sss)	(g/cm ³)	2,346
(A/A-B)*g	Densidad relativa (gravedad específica) (sss)	(g/cm ³)	2,343
(C/A-B)*g	Densidad relativa (gravedad específica) (sh)	(g/cm ³)	2,341
(A-C/C)*100	Absorción de agua	(%)	0,10

Nota. La tabla indica los resultados de laboratorio para gravedad específica y absorción de agua.

Humedad

El contenido de humedad del material cerámico triturado se lo obtuvo basado en la norma INEN 862. Para lo cual 2 muestras del material triturado fueron secadas en el horno por 24 horas a 110 °C hasta eliminar la humedad del material cerámico triturado. La cantidad de agua evaporada expresada en porcentaje respecto de la masa seca, es la humedad que tenía la cerámica. Tomar en cuenta que este ensayo no determina las variaciones de humedad que

puede presentar el material en el depósito por efectos del clima (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Tabla 17

Resultados de laboratorio para contenido de humedad del material cerámico

Parámetro	Valor	
Recipiente	25a	26a
Peso del recipiente (g)	118,20	120,00
Peso del recipiente + muestra húmeda (g)	270,00	277,50
Peso del recipiente + muestra seca (g)	269,80	277,40
Peso del agua (g)	0,20	0,10
Peso seco (g)	151,60	157,40
% Agua	0,13	0,06
% Agua media	0,10	

Nota. La tabla muestra el bajo contenido de humedad de la cerámica, por lo cual este material absorberá muy poca agua en la fabricación de hormigones.

Masa Unitaria

La masa unitaria o peso volumétrico del material cerámico triturado se lo obtuvo basado en la norma INEN 858. Para lo cual se coloca el material cerámico triturado en un molde suficientemente rígido para mantener su forma bajo condiciones agresivas de uso, no sin antes tomar el peso y las medidas del mismo para calcular su volumen. El material cerámico debe ser aplicado en 3 capas, y cada una de estas debe ser compacta mediante varillado con 25 golpes por capa, distribuidos uniformemente sobre la superficie. Por último, se nivela la superficie y se pesa el molde con su contenido. Se calcula la masa unitaria (peso volumétrico) del material cerámico y el contenido de vacíos mediante fórmulas indicadas en la norma antes mencionada (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).

Tabla 18

*Resultados de laboratorio de masa unitaria del material
cerámico por el método de varillado.*

Parámetro	Valor
Molde No.	1
Peso del molde (g)	2596,3
Peso del molde + cerámica (g)	6319,8
Peso de la cerámica (g)	3723,5
Volumen (cm ³)	2813,0
Densidad Varillada (g/cm ³)	1,324

Nota. La tabla indica los resultados de laboratorio obtenido para masa unitaria del material cerámico.

Tabla 19

*Resultados de laboratorio del porcentaje de vacíos del material
cerámico*

Parámetro	Valor	Unidad
Densidad Volumétrica cerámica	1,324	g/cm ³
Gravedad específica cerámica	2,341	
Densidad del Agua	0,998	g/cm ³
%Vacíos =	10,09	%

Nota. La tabla indica los resultados de laboratorio obtenido para porcentaje de vacíos del material cerámico.

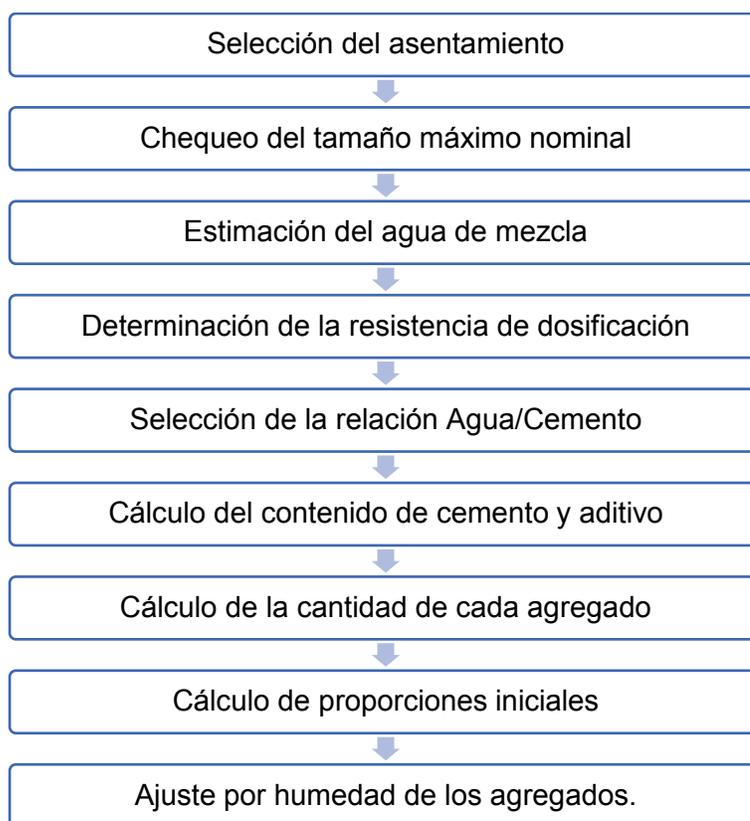
Dosificación de la mezcla

El diseño de mezclas de hormigón tiene por objeto determinar las proporciones de los materiales a emplear para producir un hormigón que posea determinadas características de trabajabilidad, consistencia y de conformidad con los requisitos de resistencia.

La Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ASOCRETO, 2010) señala que, previo a la dosificación se deben establecer las propiedades de los materiales disponibles, sustentadas en ensayos de laboratorio, entre las cuales detalla:

- Granulometría
- Módulo de finura de la arena
- Tamaño máximo de la grava
- Densidad aparente de la grava y de la arena
- Absorción de la grava y de la arena
- Masa unitaria compacta de la grava
- Humedad de los agregados inmediatamente antes de hacer las mezclas
- Densidad del cemento

El método desarrollado por el comité ACI 211 es un método empírico cuyos resultados han sido confirmados por una amplia información experimental, el cual propone una serie de nueve pasos (figura 27) para obtener el peso y volumen de cada uno de los componentes en un 1 m³ de hormigón.

Figura 27 *Proceso de dosificación según ACI 211.1*

Nota. Elaborado en función de lo señalado por Rivera, 2013.

Dosificación Hormigón

En base a los ensayos de laboratorio descritos en el apartado anterior se presenta el resumen de las propiedades de los agregados:

Tabla 20

Resumen de las propiedades de los agregados pétreos.

Parámetro	Unidad	Agregados	
		Grueso	Fino
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Kg/m ³	2529,74	2639,36
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	Kg/m ³	2401,70	2558,01
Densidad relativa (gravedad específica) (SH)	Kg/m ³	2318,24	2508,59
Absorción de agua	%	3,60	1,97
Módulo de finura			3,13

Parámetro	Unidad	Agregados	
		Grueso	Fino
Tamaño máximo nominal		0,50	
Humedad natural	%	4,94	4,76
Peso vol. Suelto	Kg/m ³	1133,84	1556,52
Peso vol. Compacto	Kg/m ³	1274,49	1553,96

Nota. La tabla presenta el resumen de los resultados obtenidos en laboratorio acerca de las propiedades de los agregados pétreos.

Selección del asentamiento

Considerando que la finalidad del proyecto es la elaboración de adoquines se selecciona un asentamiento de 0 a 1 cm.

Tabla 21

Valores de asentamiento del hormigón recomendados según su finalidad.

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 – 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaletas.
2,0 – 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica.
3,5 – 5,0	Semiseca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5,0 – 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10,0 – 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
			compactarlo con demasiada vibración

Nota. En esta tabla se puede identificar los valores de asentamiento según requerimientos constructivos del hormigón, los valores de asentamiento presentado corresponden al método de compactación por vibración, en caso de considerarse otro método se deberá incrementar 2,5 cm a estos valores. Tomado de *Tecnología del concreto. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas. Tomo 1.* (p.187), por ASOCRETO, 2010.

Chequeo de tamaño nominal

El tamaño nominal está limitado por las dimensiones del elemento a diseñar dado esto, la normativa INEN 1488 señala que el tamaño máximo nominal del árido no deberá ser mayor a 1/4 del espesor del adoquín, razón por la cual para un adoquín de 6 cm de espesor se optó como tamaño nominal $\frac{1}{2}$ pulgada o 12,7 mm.

Estimación del agua de la mezcla

Si bien la trabajabilidad, adherencia y asentamiento de la mezcla dependen en gran medida de la cantidad de agua que se incorpore, estas también están ligadas a otras características como el tamaño máximo del agregado, la forma y textura de las partículas, así como de la gradación de los agregados (ASOCRETO, 2010).

Tabla 22

Cantidad de agua recomendada en kg/m³ de concreto

Asentamiento (cm)	Concretos sin aire incluido						
	Tamaños máximos nominales (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0 – 2,5	185	180	165	160	140	135	125
3,0 – 5,0	205	200	185	180	160	155	145
5,5 – 7,0	215	210	190	185	170	165	155
8,0 – 10,0	225	215	200	195	175	170	165

Asentamiento (cm)	Concretos sin aire incluido						
	Tamaños máximos nominales (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
10,5 – 15,0	235	225	205	200	180	175	170
15,5 – 18,0	240	230	210	205	185	180	175
% Contenido de Aire	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,5	0,3

Nota. La tabla muestra la cantidad de agua recomendada en kg/m³ de concreto, para los tamaños máximos nominales del agregado según el valor del asentamiento deseado, los valores son considerados para concretos sin aire incluido. Tomado de *Concreto Simple*. (p.176), por Gerardo Rivera, 2013.

De acuerdo con la tabla 22, se considera 180kg/m³ de agua por metro cubico de hormigón para el asentamiento definido en el apartado previo.

Determinación de la resistencia de dosificación

Debido a la falta de un registro adecuado con más de 30 ensayos de condiciones y materiales similares para el cálculo de la desviación estándar, por lo cual la resistencia promedio a la compresión requerida f'_{cr} se obtendrá según el numeral 5.3.2.2 de la ACI 318S.

Tabla 23

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada a la compresión, MPa	Resistencia promedio requerida a la compresión, MPa
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c < 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.3$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.10 f'_c + 5.0$

Nota. La tabla presenta las ecuaciones para la resistencia promedio requerida a la compresión según la resistencia a la compresión especificada. Tomado de ACI 318S.

De la tabla 23 de acuerdo a la resistencia especificada de 400 Kg/cm², la resistencia promedio requerida a la compresión se obtendrá de tal manera:

$$f'_{cr} = 1,10f'_c + 5.0$$

$$f'_{cr} = 1,10(39,2266) + 5.0$$

$$f'_{cr} = 48,1493 \text{ MPA}$$

$$f'_{cr} = 490,99 \text{ Kg/cm}^2$$

Selección de la relación Agua/Cemento

La relación agua/cemento es el valor característico más importante del diseño de mezclas de hormigón ya que tiene influencia sobre la resistencia, la durabilidad y la retracción del hormigón. ASOCRETO (2010), establece una serie de relaciones agua cemento en función de la resistencia a la compresión a los 28 días.

Tabla 24

Relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c.

Resistencia a la compresión a los 28 días (Kg/cm²)	Concreto sin incluso de aire Relación absoluta por peso
175	0,65
210	0,58
245	0,52
280	0,47
315	0,43
350	0,40

Nota. En la tabla se presentan las relaciones agua/ cemento para concretos sin inductor de aire.

Tomado de *Tecnología del concreto. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas. Tomo 1.*

(p.201), por ASOCRETO, 2010.

Debido a que se espera una resistencia a la compresión a los 28 días de 491 Kg/cm² la relación agua cemento, se establece extrapolando considerando los siguientes valores:

Tabla 25

Extrapolación de relación agua/cemento para $f'c=491\text{Kg/cm}^2$.

Resistencia a la compresión a los 28 días (Kg/cm²)	Concreto sin incluso de aire Relación absoluta por peso
315	0,43
350	0,40
491	x

Nota. En la tabla se presentan los valores a utilizarse para extrapolar la relación agua/ cemento para un $f'c=491\text{Kg/cm}^2$.

Así se fijó una relación agua/cemento de 0,28 para un $f'c=491\text{Kg/cm}^2$, correspondiente a la siguiente ecuación:

$$x = 0,43 + (491 - 315) \cdot \frac{0,4 - 0,43}{350 - 315} = 0,279$$

Cálculo del contenido de cemento y aditivo

Una vez establecidos los valores de contenido de agua y la relación agua/cemento la estimación del contenido de cemento por metro cubico resulta de la siguiente ecuación:

$$a/c = \frac{\text{Contenido de agua}}{\text{Contenido de cemento}}$$

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Contenido de agua}}{a/c}$$

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{180 \text{ Kg}}{0,279} = 642,86 \text{ Kg}$$

Cálculo de la cantidad de cada agregado

Estimación del contenido de agregado grueso

El cálculo consiste en hallar el volumen de agregado grueso por metro cubico de hormigón, a través del volumen unitario de concreto expresado por la relación b/b_0 presentada

en la tabla 26 en función del máximo tamaño nominal de agregados y el módulo de finura (ASOCRETO, 2010).

Tabla 26

Volumen de grava por unidad de volumen de concreto (b/b_o).

Máximo tamaño nominal de agregados		Volumen de grava por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
		Módulo de finura			
Pulgadas	mm	2,40	2,60	2,80	3,00
3/8	9,51	0,50	0,48	0,46	0,44
1/2	12,50	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4	19,10	0,66	0,64	0,62	0,60
1	25,40	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2	38,10	0,75	0,73	0,71	0,69
2	50,80	0,78	0,76	0,74	0,72
3	76,10	0,82	0,80	0,78	0,76
6	152,40	0,87	0,85	0,83	0,81

Nota. La tabla presenta la relación de volumen de grava por unidad de volumen de concreto.

Tomado de *Tecnología del concreto. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas. Tomo 1.*

(p.204), por ASOCRETO, 2010.

Dado que no hay valores para el módulo de finura del proyecto, se debe realizar una extrapolación para obtener la relación b/b_o para el módulo de finura de 3,13, considerando los siguientes valores:

Tabla 27

Extrapolación de relación b/b_o para tamaño nominal de 13 mm.

Módulo de finura	Relación b/b_o
2,80	0,55
3,00	0,53
3,13	x

Nota. En la tabla se presentan los valores a utilizarse para extrapolar la relación b/b_o para módulo de finura de 3,13.

Por lo que para un módulo de finura de 3,13 se establece una relación b/b_o igual a 0,517, correspondiente a la siguiente ecuación:

$$x = 0,55 + (3,13 - 2,8) \cdot \frac{0,53 - 0,55}{3 - 2,8} = 0,517$$

El volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso se consigue de la relación de masa unitaria compactada y la densidad aparente de la grava:

$$b_{or} = \frac{\text{Masa unitaria compactada}}{\text{densidad aparente de la grava}}$$

Del resumen se conoce como propiedad del agregado grueso un valor de masa unitaria compactada de 1274,49 kg/m³ y densidad aparente de 2401,70 kg/m³, siendo así:

$$b_{or} = \frac{1274,49}{2401,70} = 0,531$$

De tal manera el volumen de agregado grueso es de 0,284 en un metro cubico de hormigón, valor alcanzado de la siguiente ecuación:

$$b = \frac{b}{b_o} \cdot b_{or}$$

$$b = 0,517 \cdot 0,531 = 0,284$$

Estimación del contenido de agregado fino

Una vez conseguido el peso de agregado grueso, cemento y agua por unidad de volumen de hormigón se resta del mismo los componentes conocidos para obtener el volumen requerido de agregado fino, el volumen de cada componente del hormigón es igual a su peso entre la densidad de cada componente, de tal manera:

Tabla 28

Proporciones de los componentes conocidos de la mezcla en peso y en volumen para un metro cubico de hormigón.

Material	Peso (kg)	Densidad aparente (kg/m³)	Volumen (m³)
Agua	180	1000	0,18
Cemento	642,86	3140	0,20

Nota. En la tabla se presentan los valores de peso, densidad aparente y volumen de los componentes conocidos de la mezcla de hormigón.

Con estos valores para un metro cubico de hormigón se calcula un porcentaje de agregados igual a 0,62, correspondiente a la siguiente expresión:

$$Ck = \text{Volumen de hormigón} - \text{volumen de cemento} - \text{volumen de agua}$$

$$Ck = 1 \text{ m}^3 - 0,20\text{m}^3 - 0,18\text{m}^3 = 0,62$$

Con este valor se obtiene un porcentaje de agregado fino en la dosificación de 53,83%, calculado con la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{Ck - b}{Ck} \cdot 100$$

$$\phi = \frac{0,62 - 0,284}{0,62} \cdot 100 = 53,83\%$$

Cálculo de proporciones iniciales

Las proporciones de la mezcla pueden ser expresadas en forma de relaciones por masa de agua, cemento y agregados, tomado como unidad el cemento y serán expresadas en orden ascendente de tamaño (Rivera, 2013).

Este método realiza la estimación en función del factor k, relación entre el volumen de agregados y la masa del cemento, expresado en la siguiente ecuación:

$$k = \frac{Ck}{\text{Masa de cemento}}$$

El factor k es de 0,9571 para un volumen de agregados de 0,62 m³ o 0,615,27 dm³ y una masa de cemento de 642,86 kg, datos obtenidos en incisos anteriores.

$$k = \frac{615,27}{642,86} = 0,9571$$

La proporción de agregado fino (f) y agregado grueso (g) viene dada por las siguientes expresiones, donde d es la densidad aparente del agregado según corresponda:

$$f = \frac{k * \emptyset}{100} * d$$

$$g = \frac{k(100 - \emptyset)}{100} * d$$

La proporción de agregado fino es 1,32 y para el agregado grueso es de 1,06, valores correspondientes a las siguientes expresiones

$$f = \frac{0,9571 * 53,83}{100} * 2,558 = 1,32$$

$$g = \frac{0,9571(100 - 53,83)}{100} * 2,402 = 1,06$$

Por lo cual las proporciones iniciales en masa seca de agregados es:

$$0,28 : 1 : 1,32 : 1,06$$

Diseño de mezcla para probetas

Una vez establecidas las proporciones iniciales es necesario calcular el peso de cada agregado en función del volumen, en tales circunstancias se consideraron 7 probetas de 10 cm de diámetro y 20 centímetros de altura, además se pensó un desperdicio del 20%, obteniendo un volumen de 0,0132.

Tabla 29*Cálculo del volumen en m³.*

Probeta	Número de cilindros	Diámetro (m³)	Altura (m³)	Volumen (m³)
Cilindros	7	10	20	0,011
		Desperdicio		20%
		Volumen total		0,0132

Nota. En la tabla se presentan los valores de volumen a fundir según las probetas utilizadas.

Con ello el peso seco de cada agregado, se presenta en la tabla 30:

Tabla 30

Peso seco de componentes para probetas conformadas por 100% grava.

Material	Proporción	Masa seca	Unidad
Agua	0,28	0,67	gal
Cemento	1	8,48	kg
Arena	1,32	11,18	kg
Ripio	1,06	9,00	kg

Nota. La tabla presenta el peso seco de cada material, omitiendo la humedad natural y porcentaje de absorción de los áridos.

Ajuste por humedad de los áridos

Al trabajar con agregados bajo condiciones naturales para realizar una dosificación real durante la elaboración de la mezcla, se debe considerar la humedad y absorción de los agregados en exceso o defecto, para ello se considera la siguiente formula:

$$A = M(H - Abs)$$

Donde:

A = Agua en exceso o defecto kg.

M = Peso de la muestra seca kg.

H = Humedad del agregado en tanto por uno.

Abs = Absorción del agregado en tanto por uno.

Dado una humedad de 4,8% y absorción de 2,0% para el agregado fino, 4,9% de humedad y 3,6% de absorción para el agregado grueso, el agua retirada para el uso de agregados en condiciones naturales se presenta en la 31.

Tabla 31

Agua retirada para peso húmedo de áridos en kg.

Árido	Agua retirada	Unidad
Arena	0,312	kg
Ripio	0,121	kg
Total	0,433	kg

Nota. La tabla presenta el peso de agua en exceso al trabajar con áridos en condiciones naturales.

Para condiciones naturales se requieren 2,08 kg de agua, 8,48 kg de cemento y para los agregados el peso considerando el contenido de humedad es de 11,71 kg de árido fino y 9,45 kg de árido grueso.

Tabla 32

Pesos húmedos de cada componente pr.

Material	Peso húmedo	Unidad
Agua	2,08	kg
Cemento	8,48	kg
Arena	11,71	kg
Ripio	9,45	kg

Nota. La tabla especifica los pesos de cada material, considerando que estos valores incluyen el contenido de humedad de los agregados.

Tabla 33*Resumen de diseño de probetas de hormigón.*

Parámetro	Unidad	Valor	
Asentamiento	cm	0-1	
Tamaño nominal	in	0,50	
Resistencia de diseño - fcr	kg/cm ²	491,00	
Relación agua cemento - a/c		0,28	
Proposición	C	1,00	
	A	1,32	
	R	1,06	
Peso seco	Agua	L	2,52
	Cemento	kg	8,48
	Arena	kg	11,18
	Ripio	kg	9,00
Peso húmedo	Agua	L	2,08
	Cemento	kg	8,48
	Arena	kg	11,71
	Ripio	kg	9,45

Nota. La tabla detalla los parámetros analizados para el diseño de probetas de hormigón de resistencia de 400 kg/cm².

Dosificación de hormigón con árido grueso compuesto por 50% grava y 50% cerámica

El procedimiento de diseño de probetas con contenido de cerámica, se realiza de igual manera que las probetas hormigón, sin embargo, al considerarse un agregado grueso compuesto al 50% de grava y 50% de cerámica, las propiedades del mismo equivaldrán a la media entre ambos, de tal manera:

Tabla 34

Resumen de las propiedades de los agregados pétreos y cerámicos.

Parámetro	Unidad	Agregados			
		Grava	Grueso Cerámica	Media	Fino
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Kg/m ³	2529,74	2346,22	2437,98	2639,36
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	Kg/m ³	2401,7	2343,06	2372,38	2558,01
Densidad relativa (gravedad específica) (SH)	Kg/m ³	2318,24	2340,71	2329,48	2508,59
Absorción de agua	%	3,6	0,10		1,97
Módulo de finura					3,13
Tamaño máximo nominal		0,5	0,50	0,50	
Humedad natural	%	4,94	0,10		4,76
Peso vol. Suelto	Kg/m ³	1133,84	1154,64	1144,24	1556,52
Peso vol. Compacto	Kg/m ³	1274,49	1323,68	1299,08	1553,96

Nota. La tabla presenta el resumen de los resultados obtenidos en laboratorio acerca de las propiedades de los agregados, además se muestra la media de las propiedades de la grava y cerámica.

Una vez especificadas las propiedades de diseño a continuación se presenta el proceso de dosificación para probetas con contenido de cerámica correspondiente al 50% del agregado grueso.

Selección del asentamiento

Como se mencionó en la sección anterior el asentamiento seleccionado es de 0-1 cm según lo dispuesto en la 21.

Chequeo del tamaño máximo nominal

Dadas las características del proyecto, especificadas en el apartado previo, el tamaño máximo nominal del agregado es de ½" (12,70 mm).

Estimación del agua de mezcla

De la tabla 22 para un asentamiento de 1 cm y un tamaño máximo nominal de 12,7 mm el agua de mezclado es 180 kg por metro cubico de hormigón.

Determinación de la resistencia de dosificación

De la tabla 23 para la resistencia especificada de 400 Kg/cm², la resistencia promedio requerida a la compresión es de 491 Kg/cm².

Selección de la relación Agua/Cemento

Dado que se presentan las mismas especificaciones de diseño, resistencia de diseño de 491 Kg/cm², utilizaremos una relación agua/cemento igual a 0,274.

Cálculo del contenido de cemento y aditivo

Asimismo, el contenido de cemento bajo las mismas consideraciones de diseño se mantiene en 642,86 kg por metro cubico de hormigón.

Cálculo de la cantidad de cada agregado

Estimación de contenido de árido grueso

El cálculo del contenido de árido grueso se basa en el volumen unitario de concreto expresado por la relación b/b_0 presentada en la tabla 28 en función del módulo de finura y del tamaño máximo nominal, puesto que estas propiedades se conservan el valor de la relación b/b_0 de 0,517 igualmente.

El volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso se consigue de la relación de masa unitaria compactada y la densidad aparente de la grava:

$$b_{or} = \frac{\text{Masa unitaria compactada}}{\text{densidad aparente del agregado grueso}}$$

Del resumen se conoce como propiedad del agregado grueso un valor de masa unitaria compactada de 1299,08 kg/m³ y densidad aparente de 2372,38 kg/m³, siendo así:

$$b_{or} = \frac{1299,08}{2372,38} = 0,548$$

De tal manera el volumen de agregado grueso es de 0,288 en un metro cubico de hormigón, valor alcanzado de la siguiente ecuación:

$$b = \frac{b}{b_o} \cdot b_{or}$$

Estimación de contenido de agregado fino

De la tabla 28 se conoce que el porcentaje de agregados por metros cubico (Ck) es igual a 0,615, con este valor se obtiene un porcentaje de agregado fino en la dosificación de 53,17%, calculado con la siguiente ecuación:

$$\emptyset = \frac{Ck - b}{Ck} \cdot 100$$

$$\emptyset = \frac{0,615 - 0,288}{0,615} \cdot 100 = 53,17\%$$

Cálculo de proporciones iniciales

El factor k conserva un valor de 0,9571 ya que se conserva un volumen de agregados 0,615,27 dm³ y una masa de cemento de 642,86 kg.

La proporción de agregado fino es 1,3 y para el agregado grueso es de 1,06, valores correspondientes a las siguientes expresiones:

$$f = \frac{k * \emptyset}{100} * d$$

$$f = \frac{0,9571 * 53,17}{100} * 2,558 = 1,30$$

$$g = \frac{k(100 - \phi)}{100} * d$$

$$g = \frac{0,9571(100 - 53,17)}{100} * 2,372 = 1,06$$

Por lo cual las proporciones iniciales en masa seca de agregados es:

$$0,28 : 1 : 1,30 : 1,06$$

Diseño de mezcla para probetas

Una vez establecidas las proporciones iniciales es necesario calcular el peso de cada agregado en función del volumen, en tales circunstancias se consideraron 6 probetas de 10 cm de diámetro y 20 centímetros de altura y una probeta de 15 cm de diámetro y altura 30 cm, además se pensó un desperdicio del 20%, obteniendo un volumen de 0,0177.

Tabla 35

Cálculo del volumen en m³.

Probeta	Número de cilindros	Diámetro (m ³)	Altura (m ³)	Volumen (m ³)
Cilindros Pequeños	6	10	20	0,00942
Cilindros Grandes	1	15	30	0,00530
		Volumen		0,01473
		Desperdicio		20%
		Volumen total		0,0177

Nota. En la tabla se presentan los valores de volumen a fundir según las probetas utilizadas.

Para una dosificación 0,28 : 1 : 1,30 : 1,06 en un volumen de 0,0177 m³ se requiere de 3,37 L de agua, 11,36 kg de cemento, 14,79 kg de agregado fino, y 12,06 kg de agregado compuesto por 6,04 kg de grava y 6,04 kg de cerámica triturada.

Tabla 36

*Peso seco de componentes para probetas conformadas por
50% cerámica 50% grava.*

Material	Proporción	Masa seca	Unidad
Agua	0,28	0,89	gal
Cemento	1	11,36	kg
Ag. Fino	1,30	14,79	kg
Ag. Grueso	1,06	12,06	kg

Nota. La tabla presenta el peso seco de cada material, omitiendo la humedad natural y porcentaje de absorción de los áridos.

Ajuste por humedad de los áridos

Al trabajar con agregados bajo condiciones naturales, se debe considerar la humedad y absorción de los agregados, para ello se considera la siguiente formula:

$$A = M(H - Abs)$$

Dado una humedad de 4,8% y absorción de 2,0% para el agregado fino, 4,9% de humedad y 3,6% de absorción para el ripio, 0,10% de humedad y 0,10% de absorción para la cerámica, el agua retirada para el uso de agregados en condiciones naturales se presenta en la tabla 37.

Tabla 37

Agua retirada para peso húmedo de áridos en kg.

Árido	Agua retirada	Unidad
Arena	0,413	kg
Ripio	0,081	kg
Cerámica	0	
Total	0,494	kg

Nota. La tabla presenta el peso de agua en exceso al trabajar con áridos en condiciones naturales.

Para condiciones naturales se requieren 2,88 kg de agua, 11,36 kg de cemento y para los agregados el peso considerando el contenido de humedad es de 15,49 kg de árido fino, 6,34 kg de ripio y 6,05 kg de cerámica.

Tabla 38

Pesos húmedos de cada componente para probetas conformadas por 50% cerámica 50% grava.

Material	Peso húmedo	Unidad
Agua	2,88	kg
Cemento	11,36	kg
Arena	15,49	kg
Ripio	6,34	kg
Cerámica	6,05	kg

Nota: La tabla especifica los pesos de cada material, considerando que estos valores incluyen el contenido de humedad de los agregados.

Tabla 39

Resumen de diseño de probetas conformadas por 50% cerámica 50% grava.

Parámetro	Unidad	Valor	
Asentamiento	cm	0-1	
Tamaño nominal	in	0,50	
Resistencia de diseño - fcr	kg/cm ²	491,00	
Relación agua cemento - a/c		0,28	
	C	1,00	
Proposición	A	1,30	
	R	1,06	
	Agua	L	3,37
Peso seco	Cemento	kg	11,36

	Parámetro	Unidad	Valor
	Arena	kg	14,79
	Ripio	kg	6,04
	Cerámica	kg	6,04
	Agua	L	2,88
	Cemento	kg	11,36
Peso húmedo	Arena	kg	15,49
	Ripio	kg	6,34
	Cerámica	kg	6,05

Nota. La tabla detalla los parámetros analizados para el diseño de probetas de hormigón de resistencia de 400 kg/cm².

Dosificación de hormigón con árido grueso 100% cerámica

El procedimiento de diseño de probetas con contenido de cerámica, se realiza de igual manera que las probetas hormigón, a partir de los ensayos de laboratorio elaborados se presenta el resumen de las propiedades de los agregados:

Tabla 40

Resumen de las propiedades de los agregados pétreos y cerámicos.

Parámetro	Unidad	Agregados	
		Cerámica	Fino
Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente)	Kg/m ³	2346,22	2639,36
Densidad relativa (gravedad específica) (SSS)	Kg/m ³	2343,06	2558,01
Densidad relativa (gravedad específica) (SH)	Kg/m ³	2340,71	2508,59
Absorción de agua	%	0,10	1,97
Módulo de finura			3,13
Tamaño máximo nominal		0,50	
Humedad natural	%	0,10	4,76
Peso vol. Suelto	Kg/m ³	1154,64	1556,52

Parámetro	Unidad	Agregados	
		Cerámica	Fino
Peso vol. Compacto	Kg/m ³	1323,68	1553,96

Nota. La tabla presenta el resumen de los resultados obtenidos en laboratorio acerca de las propiedades de los agregados finos y cerámicos.

Puesto que se presentan las mismas especificaciones de diseño que el de probetas de hormigón el asentamiento, tamaño nominal, agua de mezcla, resistencia de diseño, relación agua/cemento, contenido de cemento se mantienen sin ninguna variación.

Cálculo de la cantidad de cada agregado

Estimación de contenido de árido grueso

El cálculo del contenido de árido grueso se basa en el volumen unitario de concreto expresado por la relación b/b_o presentada en la tabla 28, puesto que estas propiedades se conservan el valor de la relación b/b_o de 0,517 igualmente.

El volumen de partículas de agregado grueso por metro cubico de agregado grueso se consigue de la relación de masa unitaria compactada y la densidad aparente de la grava:

$$b_{or} = \frac{\text{Masa unitaria compactada}}{\text{densidad aparente del agregado grueso}}$$

Del resumen se conoce como propiedad de la cerámica un valor de masa unitaria compactada de 1323,68 kg/m³ y densidad aparente de 2343,06kg/m³, siendo así:

$$b_{or} = \frac{1323,68}{2343,06} = 0,565$$

De tal manera el volumen de agregado grueso es de 0,292 en un metro cubico de hormigón, valor alcanzado de la siguiente ecuación:

$$b = \frac{b}{b_o} \cdot b_{or}$$

Estimación de contenido de agregado fino

De la tabla 28 se conoce que el porcentaje de agregados por metros cubico (Ck) es igual a 0,62, con el cual se logra un porcentaje de agregado fino en la dosificación de 54,35%, calculado con la siguiente ecuación:

$$\phi = \frac{Ck - b}{Ck} \cdot 100$$

$$\phi = \frac{0,615 - 0,288}{0,615} \cdot 100 = 52,51 \%$$

Cálculo de proporciones iniciales

El factor k conserva un valor de 0,9571 ya que se conserva un volumen de agregados 0,615,27 dm³ y una masa de cemento de 642,86 kg.

La proporción de agregado fino es 1,29 y para el agregado grueso es de 1,07, valores correspondientes a las siguientes expresiones:

$$f = \frac{k * \phi}{100} * d$$

$$f = \frac{0,9571 * 52,51}{100} * 2,558 = 1,29$$

$$g = \frac{k(100 - \phi)}{100} * d$$

$$g = \frac{0,9571(100 - 52,51)}{100} * 2,343 = 1,07$$

Por lo cual las proporciones iniciales en masa seca de agregados es:

$$0,28 : 1 : 1,29 : 1,07$$

Diseño de mezcla para probetas

Una vez establecidas las proporciones iniciales es necesario calcular el peso de cada agregado en función del volumen, en tales circunstancias se consideraron 6 probetas de 10 cm de diámetro y 20 centímetros de altura y una probeta de 15 cm de diámetro y altura 30 cm, además se pensó un desperdicio del 20%, obteniendo un volumen de 0,0177 según lo presentado en la tabla 35.

Para una dosificación 0,28 : 1 : 1,29 : 1,07 en un volumen de 0,0177 m³ se requiere de 3,37 L de agua, 11,36 kg de cemento, 14,60 kg de agregado fino, y 12,010 kg de cerámica.

Tabla 1

Peso seco de componentes para probetas conformadas por 100% cerámica.

Material	Proporción	Masa seca	Unidad
Agua	0,28	0,89	gal
Cemento	1	11,36	kg
Ag. Fino	1,29	14,60	kg
Cerámica	1,07	12,10	kg

Nota. La tabla presenta el peso seco de cada material, omitiendo la humedad natural y porcentaje de absorción de los áridos.

Ajuste por humedad de los áridos

Al trabajar con agregados bajo condiciones naturales, se debe considerar la humedad y absorción de los agregados, para ello se considera la siguiente fórmula:

$$A = M(H - Abs)$$

Dado una humedad de 4,8% y absorción de 2,0% para el agregado fino, 0,10% de humedad y 0,10% de absorción para la cerámica, el agua retirada para el uso de agregados en condiciones naturales se presenta en la tabla 41.

Tabla 41

Agua retirada para peso húmedo de áridos en kg.

Árido	Agua retirada	Unidad
Arena	0,408	kg
Cerámica	0	
Total	0,408	kg

Nota. La tabla presenta el peso de agua en exceso al trabajar con áridos en condiciones naturales.

Para condiciones naturales se requieren 2,96 kg de agua, 11,36 kg de cemento y para los agregados el peso considerando el contenido de humedad es de 15,30 kg de árido fino y 12,11 kg de cerámica.

Tabla 42

Pesos húmedos de cada componente para probetas conformadas por 100% cerámica.

Material	Peso húmedo	Unidad
Agua	2,96	kg
Cemento	11,36	kg
Arena	15,30	kg
Cerámica	12,11	kg

Nota. La tabla especifica los pesos de cada material, considerando que estos valores incluyen el contenido de humedad de los agregados.

Tabla 43

Resumen de diseño de probetas conformadas por 100% cerámica.

Parámetro	Unidad	Valor
Asentamiento	cm	0-1
Tamaño nominal	in	0,50
Resistencia de diseño - fcr	kg/cm ²	491,00

Parámetro	Unidad	Valor	
Relación agua cemento - a/c		0,28	
Proposición	C	1,00	
	A	1,29	
	R	1,07	
Peso seco	Agua	L	3,37
	Cemento	kg	11,36
	Arena	kg	14,60
	Cerámica	kg	12,10
Peso húmedo	Agua	L	2,96
	Cemento	kg	11,36
	Arena	kg	15,30
	Cerámica	kg	12,11

Nota. La tabla detalla los parámetros analizados para el diseño de probetas de hormigón con árido grueso cerámico de resistencia de 400 kg/cm².

Elaboración de cilindros

Los cilindros fueron preparados para las diferentes dosificaciones tomando en cuenta la Norma INEN 1578 para el asentamiento de mezclas de hormigón y la INEN 1576 para la elaboración y curado de los cilindros propiamente dichos. Después de realizar las respectivas mezclas en la concreteira, se procede a hacer el vaciado del contenido en una carretilla y se remezcla este en la misma para uniformizar las muestras que vamos a tomar. Antes de transcurrir 5 minutos desde el vertido, realizar la prueba de asentamiento según las normas indicadas anteriormente.

Para la prueba de asentamiento llenar con la mezcla en 3 capas el cono truncado de Abrams y compactar cada capa con 25 golpes distribuidos uniformemente sobre su área, utilizando la varilla de compactación. Recordar que cada uno de estos instrumentos esta

normalizado (remitirse a las normas mencionadas). Luego de llenar la capa superior, enrasar la superficie rodando la varilla de compactación, para luego levantar cuidadosamente el cono de Abrams en dirección vertical, sin movimientos laterales ni de torsión. Medir el asentamiento determinando la diferencia de altura entre la parte superior del cono de Abrams y la superficie superior desplazada del contenido (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).

Figura 28

Cono de Abrams en prueba de asentamiento



Nota. La imagen muestra la toma del asentamiento de una mezcla. El asentamiento máximo obtenido de las mezclas fue de 10 mm.

Para la elaboración de los cilindros se usó:

- 8 cilindros de 4" para la mezcla sin contenido de cerámica
- 6 cilindros de 4" y 1 de 6" para la mezcla con el 50% de contenido de cerámica
- 6 cilindros de 4" y 1 de 6" para la mezcla con el 100% de contenido de cerámica

Inmediatamente después de realizado el ensayo de asentamiento, se procede a la elaboración de los especímenes cilíndricos de hormigón, estos se deben iniciar a preparar antes de los 15 min después del vertido del hormigón en la carretilla, previamente los moldes deben estar cubiertos con una película de aceite en sus paredes internas, así como su base,

para facilitar la remoción de los cilindros de hormigón de sus moldes. Al tener como resultado del ensayo de asentamiento un valor menor a 25 mm la norma nos indica que el método de compactación debe ser el vibrado, y a su vez los moldes deben ser llenado en 2 capas. Para los cilindros de 6" se debe hacer 2 inserciones del vibrador por capa, mientras para los de 4" solo 1 inserción. Golpear los moldes con un mazo de goma de 600 gr de masa después del vibrado de cada capa. Finalmente realizar el enrazado produciendo una superficie plana, nivelada con el borde superior del molde, sin depresiones o proyecciones.

Desmoldar los cilindros a las 24 horas, identificar los mismo e inmediatamente introducirlos en el tanque de curado (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

Figura 29

Proceso de elaboración de cilindros de hormigón



Nota. a) Mezclado de los materiales en la concretera. b) Vertido de la última capa en cilindro de 4". c) Terminado final de cilindros de hormigón.

Elaboración de adoquines

La elaboración de los adoquines se realizó en la empresa GALARAMI, ubicada en el Valle de los Chillos, vía al Tingo, calle Los Cines Lote 24 y Mirlos. Para posteriormente ser trasladados a las instalaciones de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, para el respectivo curado de los mismos. GALARAMI CIA. LTDA. es una empresa dedicada a la

fabricación de adoquines y bloques, cumpliendo todas las normas INEN. Teniendo una trayectoria de más de 39 años al servicio del país (GALARAMI, s.f.).

Los adoquines fueron elaborados para las diferentes dosificaciones en dimensiones de 20x10x6 cm, para ello se vertió el material previamente pesado, respectivamente de cada dosificación, en el tambor de mezclado. Después de obtener una mezcla homogénea, vaciar el contenido en una carretilla y llevar a la máquina de vibro-compactación, donde se pondrá el tablero y el molde para las dimensiones de los adoquines seleccionados, se agregará la mezcla dentro del molde y se procederá a la compactación y vibración de los adoquines por unos 10 segundos. Sacar los adoquines de la máquina y verificar aspectos visuales. Inmediatamente identificarlos, después de 24 horas introducirlos en el tanque de curado.

Figura 30

Proceso de elaboración de cilindros de hormigón



Nota. a) Mezclado de los materiales en el tambor de mezclado. b) Máquina de vibro-compactación, colocación de mezcla en el molde seleccionado. c) Terminado final de adoquines.

Capítulo IV: Análisis de Resultados

Cilindros de hormigón

Resistencia a la compresión

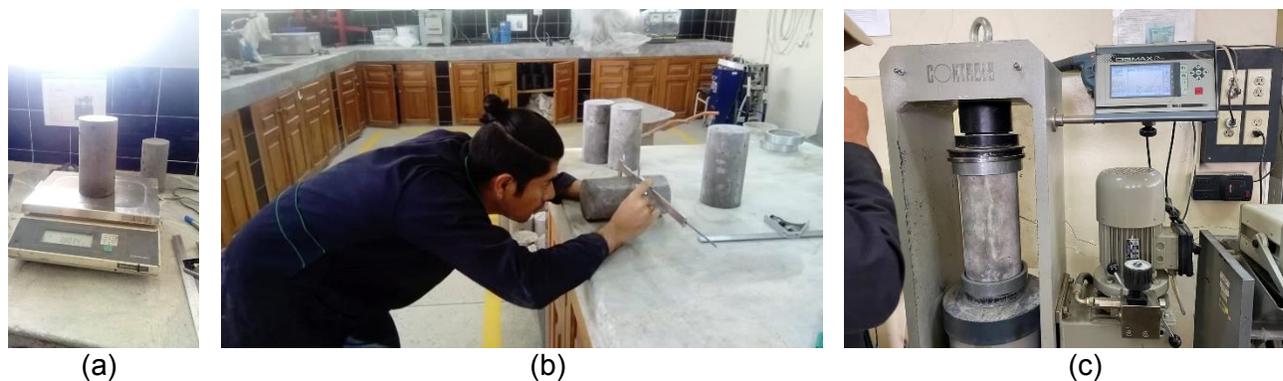
Los ensayos de compresión de los especímenes cilíndricos de las diferentes dosificaciones antes mencionadas (sin cerámica, 50% de cerámica, 100% de cerámica) fueron realizados en cantidades de 2 cilindros para 7, 14 y 28 días respectivamente, en el laboratorio de “Asfaltos, Suelos y Hormigones” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, basados en la norma INEN 1573. Para lo cual después de retirado los cilindros a ensayar del tanque de curado, se seca el exceso de agua superficial e inmediatamente se procede al pesado del mismo, así como la medición tanto de su diámetro, como de su altura.

Luego se ingresa estos datos en la máquina de compresión, se limpia las superficies de los bloques de carga de la máquina. Se coloca en el espécimen cilíndrico los “paps” de neopreno, tanto en su cara superior como inferior, estos ayudan a distribuir uniformemente los esfuerzos producidos por los bloques de carga de la máquina de compresión.

Seguidamente se coloca todo este conjunto sobre el bloque de carga inferior de la máquina, alineando el eje del espécimen con el centro del bloque de carga superior y se procede a dar inicio al ensayo. El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros, a una velocidad de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s hasta que ocurra la falla del espécimen. Anotar la carga máxima soportada y tipo de modelo de fractura (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2010).

Figura 31

Ensayo de resistencia a la compresión



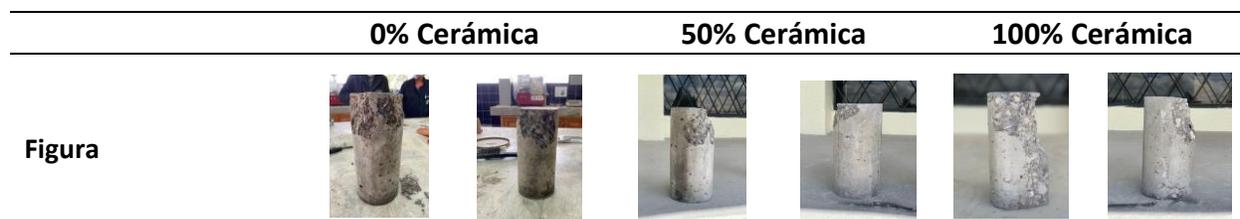
Nota. a) Pesado de cilindro. b) Medida de diámetro del cilindro. c) Máquina de compresión, ensayando cilindro.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 44

Resultados de ensayo a compresión a los 7 días

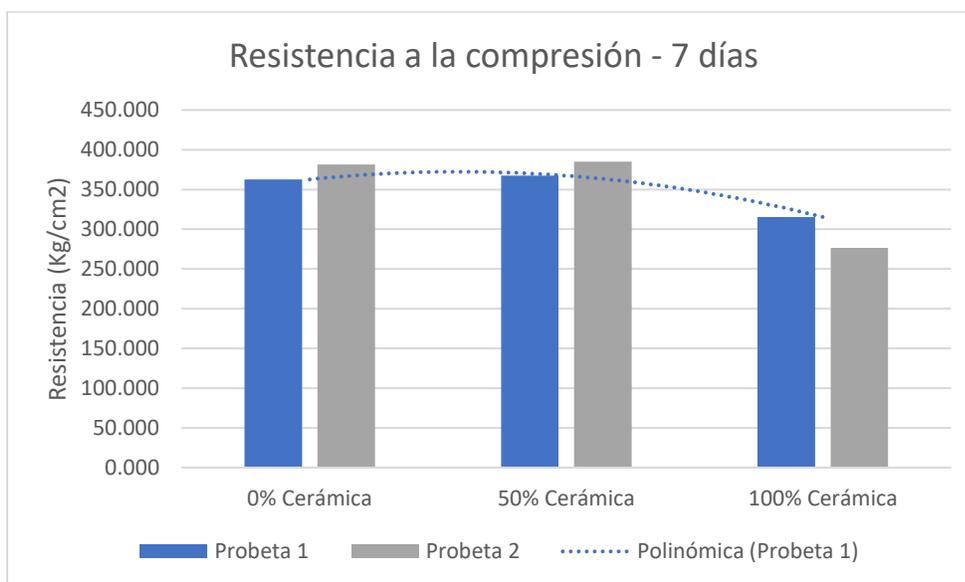
	0% Cerámica		50% Cerámica		100% Cerámica	
Muestra #	1H	2H	1B	2B	1A	2A
Fecha de Elaboración	15/7/2022	15/7/2022	11/7/2022	11/7/2022	11/7/2022	11/7/2022
Fecha de Rotura	22/7/2022	22/7/2022	18/7/2022	18/7/2022	18/7/2022	18/7/2022
Edad (Días)	7	7	7	7	7	7
Altura (cm)	20,1	20,3	20,05	19,2	19,97	20,5
Diámetro (cm)	10,24	10,31	10,25	9,4	10,24	10,22
Peso (Kg)	3,684	3,776	3,673	3,05	3,62	3,714
Área (cm ²)	82,355	83,485	82,516	69,398	82,355	82,034
Carga (Kg)	29873	31837	30314	26723	25976	22670
Resistencia (Kg/cm ²)	362,735	381,351	367,372	385,070	315,415	276,350
Resistencia promedio (Kg/cm²)	372,043		376,221		315,415	
Tipo de falla	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 3: Fisura vertical, tipo cónica y dividida	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior



Nota. La tabla muestra las resistencias obtenidas a los 7 días para las distintas dosificaciones.

Figura 32

Curva de resistencia a los 7 días



Nota. La gráfica muestra la curva de resistencia a la compresión en función de las dosificaciones para los cilindros ensayados a los 7 días.

Para los resultados obtenidos mediante los ensayos a compresión para el 7mo día podemos apreciar que se obtiene la mayor resistencia a la compresión con una mezcla con el 50% de cerámica, teniendo esta una magnitud de $376,22 \text{ kg/cm}^2$, la misma que presenta un aumento porcentual de la resistencia del 1,12% con respecto al hormigón sin adición de cerámica. Mientras que por el contrario para una mezcla con el 100% de material cerámico presenta una disminución de la resistencia en un valor porcentual de -15,22% con respecto al hormigón sin adición de cerámica.

Tabla 45

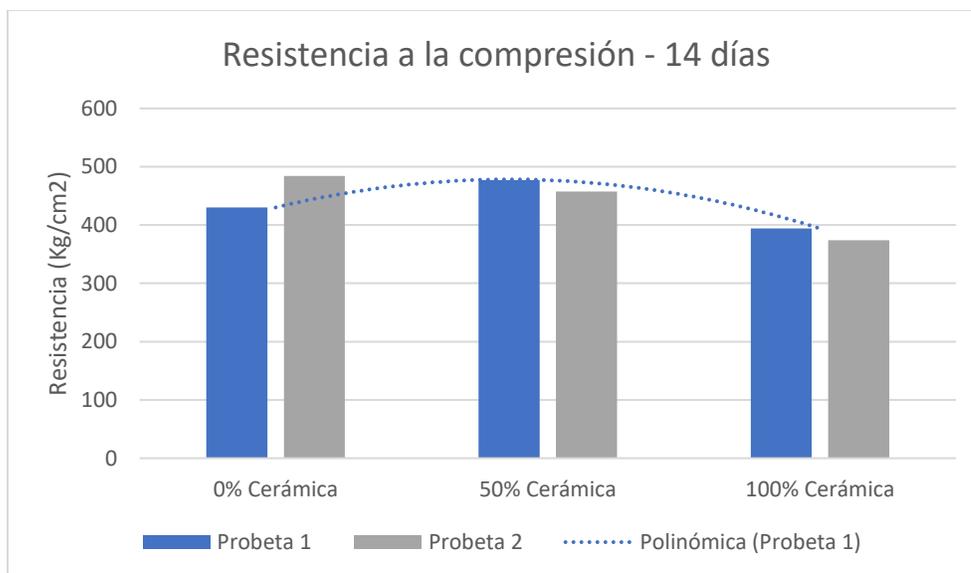
Resultados de ensayo a compresión a los 14 días

	0% Cerámica		50% Cerámica		100% Cerámica	
Muestra #	3H	4H	3B	4B	3A	4A
Fecha de Elaboración	15/7/2022	15/7/2022	11/7/2022	11/7/2022	11/7/2022	11/7/2022
Fecha de Rotura	29/7/2022	29/7/2022	25/7/2022	25/7/2022	25/7/2022	25/7/2022
Edad (Días)	14	14	14	14	14	14
Altura (cm)	20,45	20,3	20,45	20,3	20,2	20,2
Diámetro (cm)	10,27	10,27	10,26	10,29	10,27	10,18
Peso (Kg)	3,801	3,78	3,787	3,799	3,731	3,679
Área (cm²)	82,838	82,838	82,677	83,161	82,838	81,393
Carga (Kg)	35640	40114	39437	38029	32639	30424
Resistencia (Kg/cm²)	430,236	484,245	477,001	457,293	394,009	373,793
Resistencia promedio (Kg/cm²)	457,241		467,147		394,009	
Tipo de falla	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior			
Figura						

Nota. La tabla muestra las resistencias obtenidas a los 14 días para las distintas dosificaciones.

Figura 33

Curva de resistencia a los 14 días



Nota. La gráfica muestra la curva de resistencia a la compresión en función de las dosificaciones para los cilindros ensayados a los 14 días.

Para los resultados obtenidos mediante los ensayos a compresión para el 14vo día podemos apreciar que también se obtiene la mayor resistencia a la compresión con una mezcla con el 50% de cerámica, teniendo esta una magnitud de 467,15 kg/cm², la misma que presenta un aumento porcentual de la resistencia del 2,17% con respecto al hormigón sin adición de cerámica. Mientras que por el contrario para una mezcla con el 100% de material cerámico presenta una disminución de la resistencia en un valor porcentual de -13,83% con respecto al hormigón sin adición de cerámica.

Tabla 46

Resultados de ensayo a compresión a los 28 días

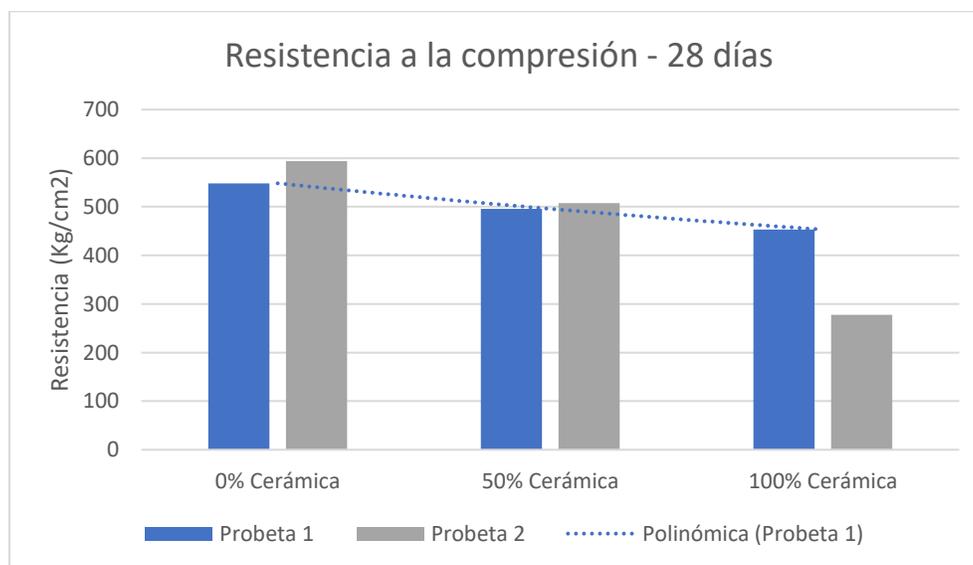
	0% Cerámica		50% Cerámica		100% Cerámica	
Muestra #	5H	6H	5B	6B	5A	6A
Fecha de Elaboración	15/7/2022	15/7/2022	11/7/2022	11/7/2022	11/7/2022	11/7/2022
Fecha de Rotura	12/8/2022	12/8/2022	8/8/2022	8/8/2022	8/8/2022	8/8/2022

	0% Cerámica		50% Cerámica		100% Cerámica	
Edad (Días)	28	28	28	28	28	28
Altura (cm)	20,35	20,5	20,3	30,15	20,55	29,75
Diámetro (cm)	10,275	10,26	10,27	15,165	10,27	15,163
Peso (Kg)	3,8035	3,8164	3,792	12,2033	3,728	11,9248
Área (cm²)	82,919	82,677	82,838	180,624	82,838	180,576
Carga (Kg)	45460	49104	41069	91633	22993	81831
Resistencia (Kg/cm²)	548,247	593,926	495,774	507,314	277,565	453,166
Resistencia promedio (Kg/cm²)	571,086		501,544		453,166	
Tipo de falla	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 5: Fracturas a los lados en el extremo superior	Tipo 3: Fisura vertical, tipo cónica y dividida	Tipo 2: Cono bien formado, fisuras verticales
Figura						

Nota. La tabla muestra las resistencias obtenidas a los 28 días para las distintas dosificaciones.

Figura 34

Curva de resistencia a los 28 días



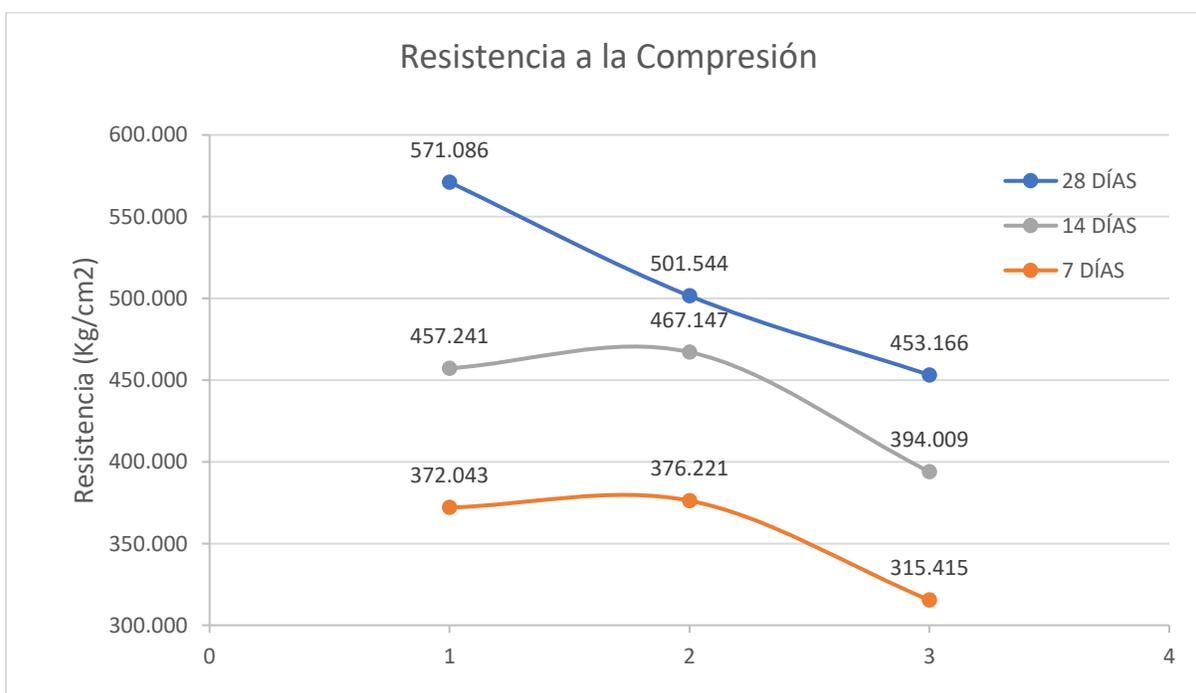
Nota. La gráfica muestra la curva de resistencia a la compresión en función de las dosificaciones para los cilindros ensayados a los 28 días.

Para los resultados obtenidos a los 28 días podemos apreciar que se tiene una recesión del aumento de la resistencia a compresión de la mezcla con 50% de material cerámico, el hormigón sin adición de cerámica presenta un aumento muy considerable en la resistencia a la compresión, teniendo el valor de resistencia más alto en esta etapa, con una magnitud de 594,67 kg/cm². Por lo tanto, la mezcla con el 50% de cerámica presenta una disminución de la resistencia de -15,66% con respecto al hormigón sin adición de cerámica, mientras que por su parte la mezcla con el 100% de cerámica presenta una disminución de -23,79%.

A partir de los ensayos realizados, se puede determinar que la mezcla con material cerámico al 50% presenta resistencias altas a edades tempranas, pero al final el hormigón sin adición de cerámica termina adquiriendo resistencias más elevadas a sus 28 días de curado.

Figura 35

Curvas de resistencia a la compresión por edades.



Nota. La gráfica nos muestra que la dosificación con 50% de cerámica tiene mayores resistencias a edades tempranas, pero a los 28 días el hormigón convencional es superior.

Se presenta a continuación una tabla resumen de las resistencias obtenidas para cada dosificación correspondiente.

Tabla 47

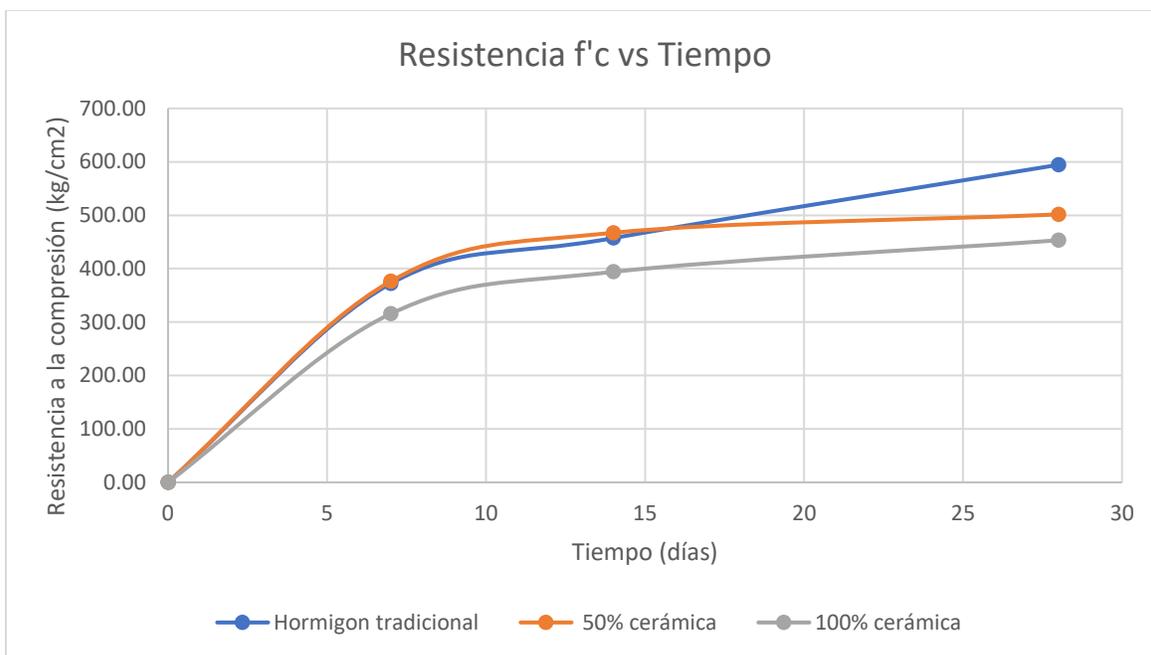
Resumen de resultados de la resistencia a la compresión

Días	Resistencia a la compresión (kg/cm²)		
	0% Cerámica	50% Cerámica	100% Cerámica
0	0,00	0,00	0,00
7	372,04	376,22	315,42
14	457,24	467,15	394,01
28	594,42	501,54	453,17

Nota. La tabla permite apreciar de manera más simple la resistencia a la compresión obtenida para cada dosificación en función del tiempo de curado.

Figura 36

Curvas de resistencia a la compresión por dosificaciones.



Nota. La gráfica nos indica el aumento de la resistencia a compresión de las diferentes dosificaciones en función del tiempo.

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de los especímenes fue determinado bajo los parámetros determinados en la “Norma ASTM C469-94”, misma que facilita un método de ensayo que proporciona una relación esfuerzo a deformación (Modulo de Young) y una relación de deformación lateral a longitudinal (coeficiente de Poisson).

Para determinar el módulo de elasticidad, se colocaron galgas extensiométricas en sentido vertical y horizontal, cerca de la mitad de la altura del espécimen, las mismas que fueron acopladas a un deformímetro, el cual medirá las deformaciones del cilindro en el transcurso del ensayo.

Siguiendo el método mencionado, se procedió a determinar los esfuerzos axiales σ_1 y σ_2 , así como la deformación ε_2 cargando los especímenes de prueba hasta el 40% de su máxima resistencia.

La determinación del módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson se consiguió utilizando las siguientes formulas respectivamente (American Society for Testing and Materials, 2010) :

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0,00005}$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última.

σ_2 = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitario longitudinal, ε_1 , de 0,000050.

ε_2 = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo σ_2 .

$$u = \frac{\varepsilon_{t2} - \varepsilon_{t1}}{\varepsilon_2 - 0,00005}$$

ε_2 = Deformación unitaria transversal en la altura media producida por el esfuerzo σ_2 .

Especimen conformado por hormigón sin adición de cerámica

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el cilindro 5H y el cálculo del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Tabla 48

Datos de cilindro 5H conformado por hormigón sin adición de cerámica.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro	(cm)	10,18
Área	(cm ²)	81,31
Esfuerzo de ruptura	(kg/cm ²)	594,83
Esfuerzo al 40%	(kg/cm ²)	237,93

Nota. Se presentan las características geométricas y detalle de esfuerzos del cilindro 5H, espécimen conformado por hormigón sin adición de cerámica.

Tabla 49

Coefficiente de Poisson y Esfuerzo para cilindro de hormigón sin adición de cerámica.

Carga (kg)	ϵ Vertical	ϵ Horizontal	Esfuerzo (MPa)	Coefficiente de Poisson
500	0	0	0,602	0,000
1000	0,000021	0	1,205	0,000
1500	0,00003	0	1,807	0,000
2000	0,00004	0,000001	2,409	0,025
2500	0,000049	0,000002	3,011	0,041
3000	0,000058	0,000005	3,614	0,086
3500	0,000067	0,000006	4,216	0,090
4000	0,000077	0,000008	4,818	0,104
4500	0,000088	0,00001	5,420	0,114
5000	0,000097	0,000012	6,023	0,124
5500	0,000107	0,000013	6,625	0,121
6000	0,000117	0,000016	7,227	0,137
7000	0,00014	0,00002	8,432	0,143
8000	0,00017	0,000026	9,636	0,153
9000	0,000186	0,00003	10,841	0,161
10000	0,000197	0,000033	12,045	0,168
11000	0,000222	0,000039	13,250	0,176
12000	0,000258	0,000044	14,454	0,171
13000	0,000264	0,000048	15,659	0,182
14000	0,000295	0,000054	16,863	0,183

Carga (kg)	ϵ Vertical	ϵ Horizontal	Esfuerzo (MPa)	Coefficiente de Poisson
15000	0,000326	0,000059	18,068	0,181
16000	0,000358	0,000066	19,272	0,184
17000	0,000387	0,000071	20,477	0,183
18000	0,000415	0,000077	21,681	0,186
19000	0,0004430	0,0000830	22,886	0,187
20000	0,0004710	0,0000890	24,090	0,189

Nota. En la tabla se presenta el resultado de esfuerzos y coeficientes de Poisson.

Para determinar el módulo de elasticidad se requiere conocer el esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ϵ_1 , de 0,000050, para ello se realizará una interpolación considerando los siguientes valores:

Tabla 50

Interpolación de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ϵ_1 , de 0,000050

ϵ Vertical	Esfuerzo (MPa)
0,000049	3,011
0,000050	x
0,000058	3,614

Nota. En la tabla se presentan los valores a utilizarse para interpolar el valor de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ϵ_1 , de 0,000050.

Por lo que para una deformación unitaria longitudinal ϵ_1 , de 0,000050 se establece un esfuerzo igual a 3,08, correspondiente a la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = 3,011 + (0,00005 - 0,000049) \cdot \frac{3,614 - 3,011}{0,000058 - 0,000049} = 3,08$$

De igual manera, para un esfuerzo σ_2 de 23,33, la deformación longitudinal deformación longitudinal es de 0,00045, valor evidenciado en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_1 = 0,0004430 + (23,33 - 22,908) \cdot \frac{0,000471 - 0,000443}{24,114 - 22,908} = 0,00045$$

Una vez determinados estos factores el módulo de elasticidad es de 50272,52 Mpa, según la siguiente ecuación:

$$E = \frac{23,327 - 3,081}{0,00045 - 0,00005} = 50272,52 \text{ MPa}$$

Asimismo, para determinar el coeficiente de Poisson, se realizará una interpolación considerando los siguientes valores:

Tabla 51

Valores para interpolación del coeficiente de Poisson.

Esfuerzo (MPa)	Coficiente de Poisson
22,886	0,187
23,327	x
24,090	0,189

Nota. Se presentan los valores a considerarse en la interpolación del módulo de Poisson al 40% del esfuerzo de rotura.

$$u = 0,187 + (23,327 - 22,886) \cdot \frac{0,189 - 0,187}{24,090 - 22,886} = 0,188$$

Espécimen hormigón composición de agregado grueso 50% grava 50% cerámica.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para el cilindro 6B y el cálculo del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

Tabla 52

Datos de cilindro 5H conformado por 50% cerámica y 50% grava.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro	(cm)	15,17
Área	(cm ²)	180,63
Esfuerzo de ruptura	(kg/cm ²)	506,98

Parámetro	Unidad	Valor
Esfuerzo al 40%	(kg/cm ²)	202,79

Nota. Se presentan las características geométricas y detalle de esfuerzos del cilindro 6B, espécimen conformado por hormigón tradicional.

Tabla 53

Coefficiente de Poisson y Esfuerzo para cilindro de hormigón con árido grueso compuesto por 50% de grava y 50% cerámica.

Carga (kg)	ϵ Vertical	ϵ Horizontal	Esfuerzo (MPa)	Coefficiente de Poisson
409	0,0000000	0,0000000	0,222	0,000
1000	0,0000040	0,0000010	0,543	0,250
2000	0,0000170	0,0000040	1,086	0,235
3000	0,0000280	0,0000070	1,628	0,250
4000	0,0000370	0,0000080	2,171	0,216
5000	0,0000450	0,0000100	2,714	0,222
6000	0,0000550	0,0000110	3,257	0,200
7000	0,0000650	0,0000130	3,799	0,200
8000	0,0000740	0,0000160	4,342	0,216
9000	0,0000840	0,0000170	4,885	0,202
10000	0,0000970	0,0000200	5,428	0,206
12000	0,0001240	0,0000260	6,513	0,210
14000	0,0001550	0,0000320	7,599	0,206
16000	0,0001860	0,0000410	8,685	0,220
18000	0,0002090	0,0000450	9,770	0,215
20000	0,0002440	0,0000520	10,856	0,213
22000	0,0002750	0,0000580	11,941	0,211
24000	0,0003050	0,0000650	13,027	0,213
26000	0,0003360	0,0000710	14,112	0,211
28000	0,0003750	0,0000810	15,198	0,216
30000	0,0004050	0,0000870	16,283	0,215
32000	0,0004330	0,0000930	17,369	0,215
34000	0,0004630	0,0001010	18,455	0,218
36000	0,0004970	0,0001080	19,540	0,217
38000	0,0005310	0,0001150	20,626	0,217

Nota. En la tabla se presenta el resultado de esfuerzos y coeficientes de Poisson.

Para determinar el módulo de elasticidad se requiere conocer el esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ε_1 , de 0,000050, para ello se realizará una interpolación considerando los siguientes valores:

Tabla 54

Interpolación de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ε_1 , de 0,000050

ε Vertical	Esfuerzo (MPa)
0,000045	2,714
0,000050	x
0,000055	3,257

Nota. En la tabla se presentan los valores a utilizarse para interpolar el valor de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ε_1 , de 0,000050.

Por lo que para una deformación unitaria longitudinal ε_1 , de 0,000050 se establece un esfuerzo igual a 2,99, correspondiente a la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = 2,714 + (0,00005 - 0,000045) \cdot \frac{3,257 - 2,714}{0,000055 - 0,000045} = 2,985$$

De igual manera, para un esfuerzo σ_2 de 19,882, la deformación longitudinal es de 0,00051, valor evidenciado en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_1 = 0,00045 + (19,882 - 19,540) \cdot \frac{0,000531 - 0,000497}{20,626 - 19,540} = 0,00051$$

Una vez determinados estos factores el módulo de elasticidad es de 36916,11 Mpa, según la siguiente ecuación:

$$E = \frac{19,882 - 2,985}{0,00051 - 0,00005} = 36916,11 \text{ MPa}$$

Asimismo, para determinar el coeficiente de Poisson, se realizará una interpolación considerando los siguientes valores:

Tabla 55

Valores para interpolación del coeficiente de Poisson.

Esfuerzo (MPa)	Coeficiente de Poisson
19,540	0,217
19,882	x
20,626	0,217

Nota. Se presentan los valores a considerarse en la interpolación del módulo de Poisson al 40% del esfuerzo de rotura.

$$u1 = 0,217 + (19,882 - 19,540) \cdot \frac{2,17 - 2,17}{20,626 - 19,540} = 0,217$$

Espécimen hormigón composición de agregado grueso 100% cerámica.

Continuando con la metodología, los resultados obtenidos para el cilindro 6A referente a el módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson son los siguientes.

Tabla 56

Datos de cilindro 6A conformado por 100% de cerámica.

Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro	(cm)	15,163
Área	(cm ²)	180,58
Esfuerzo de ruptura	(kg/cm ²)	453,35
Esfuerzo al 40%	(kg/cm ²)	181,34

Nota. Se presentan las características geométricas y detalle de esfuerzos del cilindro 6A, elemento conformado por hormigón con 100% cerámica como árido grueso.

Tabla 57

Coefficiente de Poisson y Esfuerzo para cilindro de hormigón conformado por árido grueso 100% de cerámica.

Carga (kg)	ϵ Vertical	ϵ Horizontal	Esfuerzo (MPa)	Coefficiente de Poisson
424	0	0	0,230	0,000
1000	0,000080	0,000001	0,543	0,125
2000	0,000022	0,000005	1,086	0,227
3000	0,000036	0,000008	1,629	0,222
4000	0,000048	0,00001	2,172	0,208
5000	0,000059	0,000012	2,715	0,203
6000	0,000072	0,000014	3,258	0,194
7000	0,000085	0,000017	3,800	0,200
8000	0,000097	0,00002	4,343	0,206
9000	0,00011	0,000022	4,886	0,200
10000	0,000127	0,000026	5,429	0,205
12000	0,000162	0,000033	6,515	0,204
14000	0,000203	0,000041	7,601	0,202
16000	0,000243	0,000053	8,687	0,218
18000	0,000274	0,000058	9,773	0,212
20000	0,000319	0,000067	10,858	0,210
22000	0,00036	0,000076	11,944	0,211
24000	0,0004	0,000085	13,030	0,213
26000	0,00044	0,000093	14,116	0,211
28000	0,000491	0,000105	15,202	0,214
30000	0,000531	0,000114	16,288	0,215
32000	0,000567	0,000122	17,374	0,215
34000	0,000607	0,000132	18,459	0,217
36000	0,000651	0,000141	19,545	0,217

Nota. La tabla se presenta el resultado obtenido de esfuerzos y coeficiente de Poisson.

Para determinar el módulo de elasticidad se requiere conocer el esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ϵ_1 , de 50 millonésimas (0,000050), para ello se realizará un proceso de interpolación entre los siguientes valores:

Tabla 58

*Interpolación de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ε_1 ,
de 0,000050*

ε Vertical	Esfuerzo (MPa)
0,000048	2,172
0,000050	x
0,000059	2,715

Nota. En la tabla se presentan los valores a utilizarse para interpolar el valor de σ_1 para deformación unitaria longitudinal ε_1 , de 0,000050.

Por lo que para una deformación unitaria longitudinal ε_1 , de 0,000050 se establece un esfuerzo igual a 2,27, correspondiente a la siguiente ecuación:

$$\sigma_1 = 2,172 + (0,00005 - 0,000048) \cdot \frac{2,715 - 2,172}{0,000059 - 0,000048} = 2,270$$

De igual manera, para un esfuerzo σ_2 de 17,78, la deformación longitudinal es igual a 0,00058, valor evidenciado en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_1 = 0,000607 + (17,783 - 17,374) \cdot \frac{0,000607 - 0,000567}{18,459 - 17,374} = 0,00058$$

Una vez determinados estos factores el módulo de elasticidad es de 29155,17 Mpa, según la siguiente ecuación:

$$E = \frac{17,783 - 2,270}{0,00058 - 0,00005} = 29155,167 \text{ MPa}$$

Respecto al coeficiente de Poisson, se realizará una interpolación considerando los siguientes valores:

Tabla 59

Valores para interpolación del coeficiente de Poisson.

Esfuerzo (MPa)	Coefficiente de Poisson
17,374	0,215
17,783	x
18,459	0,217

Nota. Se presentan los valores a considerarse en la interpolación del módulo de Poisson al 40% del esfuerzo de rotura.

$$u1 = 0,215 + (17,374 - 18,459) \cdot \frac{0,217 - 0,215}{18,459 - 17,374} = 0,216$$

El coeficiente de Poisson correspondiente al 40% del esfuerzo de rotura es 0,216, considerando que generalmente el concreto utilizado en la construcción tiene un coeficiente de Poisson de 0,2 (Kosmatka et al., 2004) por lo que se observa son valores similares.

Resultado del módulo de elasticidad para diferentes dosificaciones:

Tabla 60

Análisis comparativo de módulos de elasticidad experimentales versus teóricos.

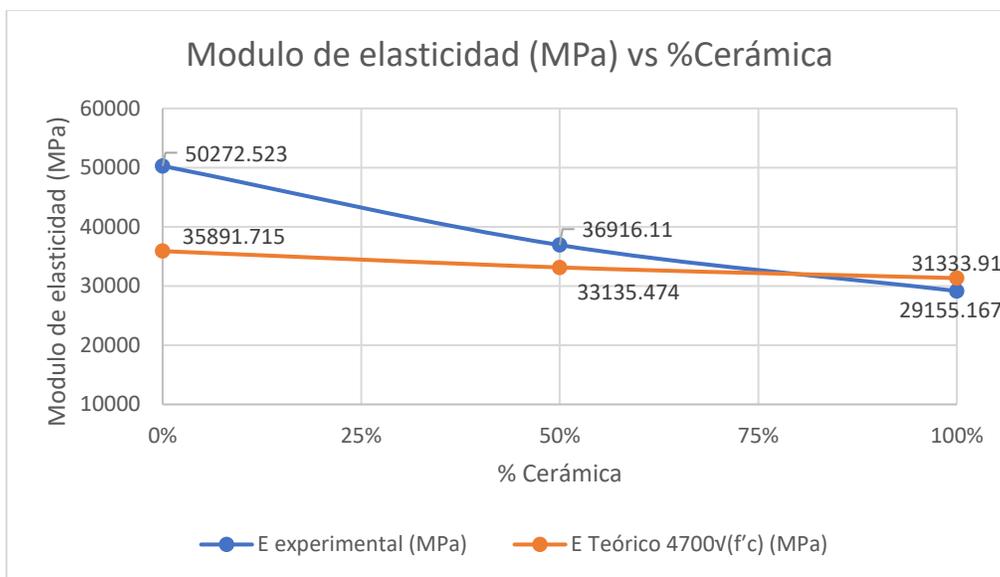
% Cerámica	Resistencia (MPa)	E experimental (MPa)	E Teórico $4700\sqrt{f'c}$ (MPa)
0%	58,317	50272,523	35891,71
50%	49,704	36916,110	33135,47
100%	44,446	29155,167	31333,910

Nota. Se presenta el resumen de resultados del módulo experimental vs teóricos para las diferentes composiciones hormigón analizadas.

El módulo de elasticidad de hormigón tradicional con 0% de cerámica incorporada a la mezcla, difiere ampliamente del valor calculado por las fórmulas presentados por ACI 318, mientras para las mezclas con 50% y 100% de cerámica presentan módulos más próximos a los valores teóricos.

Figura 37

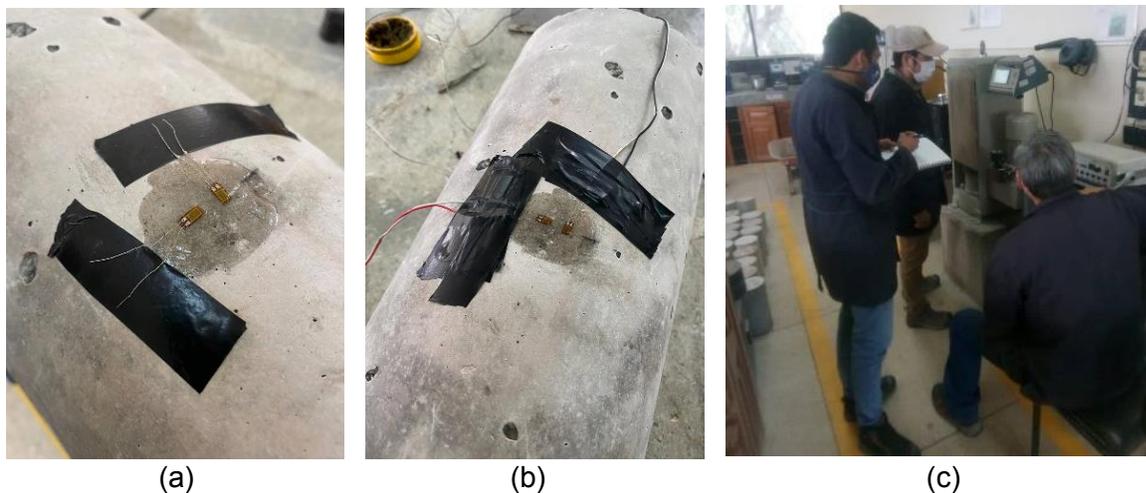
Valores experimentales versus teóricos módulo de elasticidad



Nota. En la gráfica se presentan los valores de módulo de elasticidad teórico y práctico para las diferentes dosificaciones realizadas.

Figura 38

Ensayo de módulo de elasticidad



Nota. a) Galgas extensiométricas adheridas con epóxico. b) Galgas extensiométricas soldadas a cables. c) Toma de datos de deformaciones del espécimen.

Adoquines

Resistencia a la abrasión

Los ensayos de resistencia a la abrasión de las probetas de adoquín fueron realizados en cantidades 3 adoquines para cada dosificación (sin cerámica, 50% de cerámica, 100% de cerámica), en el laboratorio de “Asfaltos, Suelos y Hormigones” de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, basados en la norma INEN 3040 ANEXO F.

Para esto antes de ser colocado en la tolva de almacenamiento, se pasa el material abrasivo (corindón) por el tamiz N° 50 y así eliminar cualquier resto de material de ensayos anteriores. Luego se procede a preparar las probetas, eliminando asperezas de la cara vista para después pintar la misma. Se coloca la probeta en el carro portaprobetas de la máquina de abrasión, se pone la probeta en contacto con la rueda de abrasión, se abre la válvula de control de la tolva que contiene el material abrasivo, logrando un flujo de 2,5 l/min o más, al mismo tiempo encender la máquina, la rueda de abrasión alcanzará 75 revoluciones en 1 minuto.

Al terminar, dibujar los límites longitudinales externos de la huella producida y tomar 3 medidas del ancho de esta, 2 en sus extremos y 1 en su parte central. El resultado del ensayo es la media de estas 3 medidas, corregida por el factor de calibración y redondeada al 0,5 mm más cercano. La diferencia aritmética entre 20 y 20,3 que es el valor de calibración de esta máquina en particular, será el factor de calibración a usar (0,3). El criterio de conformidad es una longitud cuerda máxima de huella de 23 mm (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016).

Tabla 61

Resultados del ensayo de resistencia a la abrasión

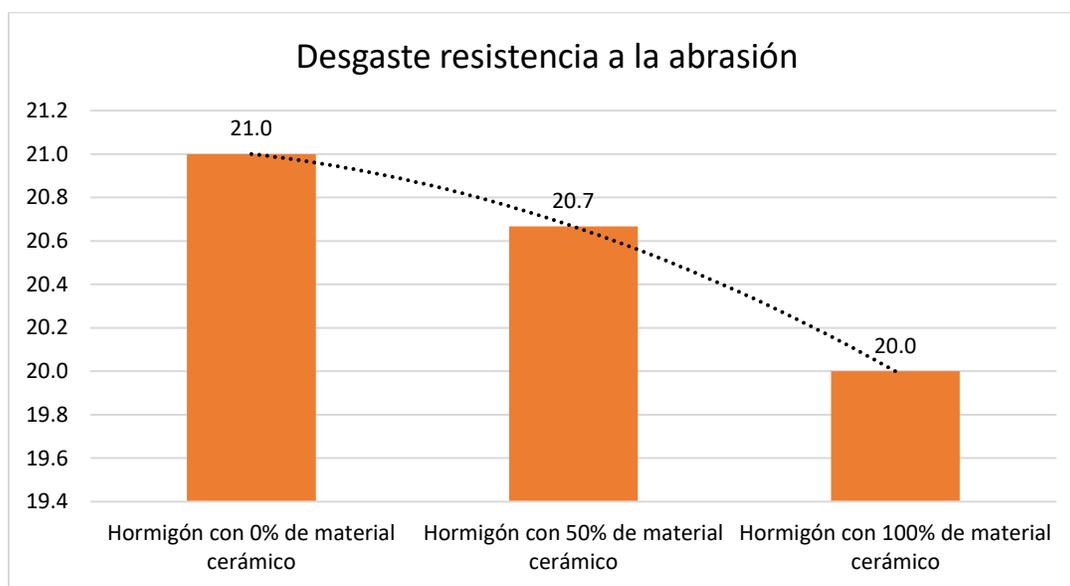
Tipo de Mezcla	Adoquín	Long. Huella [mm]	Long. Huella corregido [mm]	Long. Huella Redond. [mm]	Promedio Long. Huella [mm]
-----------------------	----------------	--------------------------	------------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------

Hormigón con 0% de material cerámico	1-H	22,4	22,1	22,0	21,0
	2-H	20,5	20,2	20,0	
	3-H	21,2	20,9	21,0	
Hormigón con 50% de material cerámico	1-C50	20,7	20,4	20,0	20,7
	2-C50	23,5	23,2	23,0	
	3-C50	19,0	18,7	19,0	
Hormigón con 100% de material cerámico	1-C100	20,1	19,8	20,0	20,0
	2-C100	21,0	20,7	21,0	
	3-C100	19,7	19,4	19,0	

Nota: Esta tabla muestra las longitudes de las huellas para las diferentes dosificaciones.

Figura 39

Curva de la resistencia a la abrasión



Nota: La gráfica indica el promedio de la longitud de huella producida por el ensayo de resistencia a la abrasión para las diferentes dosificaciones estudiadas.

Para los resultados obtenidos mediante los ensayos de resistencia a la abrasión se puede decir que todas las dosificaciones cumplen los parámetros exigidos por la norma. La adición de cerámica parece mejorar la resistencia a la abrasión, ya que conforme se aumenta el porcentaje de contenido de material cerámico, la longitud de huella disminuye. Para la

mezcla con 50% de cerámica se tiene una disminución de la longitud de huella del 1,43%, mientras que para la mezcla con 100% de cerámica se tiene una disminución del 4,76%.

Tracción indirecta

Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta fueron realizados en 8 adoquines por dosificación, basados en la norma INEN 3040 ANEXO E. Para lo cual se colocaron 2 varillas lisas de 16 mm de diámetro y 220 mm de longitud, a lo largo del eje de la mayor sección del adoquín, tanto en su cara vista, como en la de apoyo, para luego ser colocada en la máquina de compresión. Se procede a dar carga a la máquina de compresión suave y progresivamente hasta que el adoquín falle. Se registra la carga con la que falló el adoquín.

Calculamos el área de tracción indirecta con la siguiente ecuación:

$$S = l \times t$$

Donde:

S = Superficie de tracción indirecta.

l = Longitud de tracción indirecta.

t = Media de 3 medidas del espesor del adoquín de la sección de tracción indirecta, 2 en los extremos y 1 en el medio.

Calculamos la resistencia a la tracción indirecta con la siguiente ecuación:

$$T = 0,637 \times k \times \frac{P}{S}$$

Donde:

T = Resistencia a la tracción indirecta.

P = Carga de tracción indirecta

k = Factor de corrección para el espesor del adoquín.

Tabla 62

Factor de corrección k

t (mm)	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140
k	0,71	0,79	0,87	0,94	1,00	1,06	1,11	1,15	1,19	1,23	1,25

Nota: Esta tabla muestra los valores de k para espesores de adoquín menor a 140 mm.

Adaptado de INEN 3040 ANEXO E (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016).

Calculamos la carga de tracción indirecta por unidad de longitud con la siguiente ecuación:

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

La desviación estándar se calculará, usando la fórmula:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (f_i - f_m)^2}{n - 1}}$$

Donde:

S = Desviación estándar.

f_i = Resistencia a la compresión de cada una de las probetas.

f_m = Promedio de las resistencias a compresión.

La resistencia característica se determinará con la fórmula:

$$fk = (f_m - 1,64 S)$$

Donde:

1,64 es el valor del factor de probabilidad.

El criterio de conformidad es que la resistencia a la tracción indirecta debe ser $\geq 3,6$ MPa. Ningún adoquín debe poseer una resistencia a la tracción indirecta $< 2,9$ MPa y ninguna carga de tracción indirecta de ser < 260 N/mm (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2016).

Tabla 63

Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para probetas con 50% de cerámica

#	l [mm]	t [mm]	S [mm ²]	P [T]	P [N]	K	T [Mpa]	F [N/mm]
1	205,00	63,00	12915,00	10,746	105382,26	0,89	4,6	514,06
2	202,00	60,00	12120,00	9,005	88308,883	0,87	4,0	437,17
3	204,00	64,30	13117,20	9,068	88926,702	0,90	3,9	435,92
4	202,00	64,70	13069,40	10,903	106921,9	0,90	4,7	529,32
5	201,00	59,70	11999,70	9,987	97939,014	0,87	4,5	487,26
6	202,00	65,00	13130,00	9,057	88818,829	0,91	3,9	439,70
7	202,00	61,33	12388,66	11,552	113286,42	0,88	5,1	560,82
8	202,00	59,00	11918,00	9,565	93800,607	0,86	4,3	464,36

Tabla 64

Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para probetas con 100% de cerámica

#	l [mm]	t [mm]	S [mm ²]	P [T]	P [N]	K	T [Mpa]	F [N/mm]
1	201,50	60,67	12225,01	7,202	70627,493	0,87	3,2	350,51
2	201,00	61,30	12321,30	8,915	87426,285	0,88	4,0	434,96
3	204,00	60,33	12307,32	8,551	83856,664	0,87	3,8	411,06
4	203,50	63,33	12887,66	8,405	82424,893	0,89	3,6	405,04
5	203,00	60,83	12348,49	8,420	82571,993	0,88	3,7	406,76
6	203,00	61,00	12383,00	9,724	95359,865	0,88	4,3	469,75
7	203,00	59,50	12078,50	9,921	97291,775	0,87	4,4	479,27

8	203,50	60,17	12244,60	8,376	82140,500	0,87	3,7	403,64
---	--------	-------	----------	-------	-----------	------	-----	--------

Tabla 65

Resultados de resistencia y carga de tracción indirecta para probetas de hormigón con 0% de cerámica.

#	l [mm]	t [mm]	S [mm ²]	T [T]	P [N]	K	T [Mpa]	F
1	202,00	64,70	13069,40	10,937	107255,33	0,90	4,7	530,97
2	202,00	68,00	13736,00	9,396	92143,283	0,93	4,0	456,15
3	202,50	65,30	13223,25	9,377	91956,957	0,91	4,0	454,11
4	200,50	63,33	12697,67	10,083	98880,452	0,89	4,4	493,17
5	203,00	62,00	12586,00	9,219	90407,506	0,88	4,0	445,36
6	202,50	63,00	12757,50	9,495	93114,142	0,89	4,1	459,82
7	203,00	66,00	13398,00	11,956	117248,31	0,91	5,1	577,58
8	204,00	65,50	13362,00	11,376	111560,45	0,91	4,8	546,86

Tabla 66

Resultados del ensayo de resistencia a la tracción indirecta

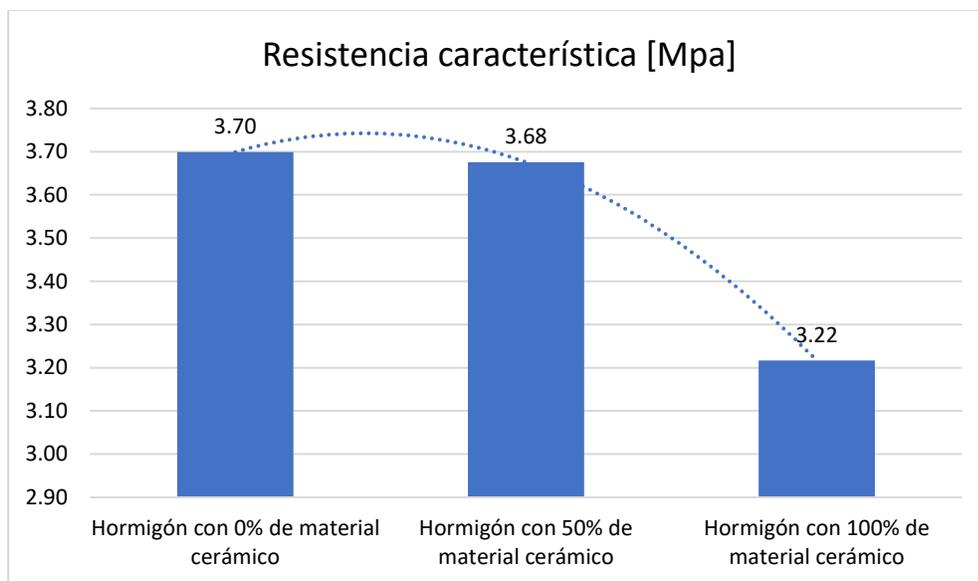
Tipo de Mezcla	Resistencia promedio [Mpa]	Desviación Estándar	Resistencia característica [Mpa]
Hormigón con 0% de material cerámico	4,4	0,43	3,70
Hormigón con 50% de material cerámico	4,4	0,44	3,68
Hormigón con 100% de material cerámico	3,9	0,39	3,22

Nota: La tabla muestra las resistencias características obtenidas para las diferentes

dosificaciones.

Figura 40

Curva de la resistencia característica.



Nota: La gráfica compara las resistencias características de las diferentes dosificaciones presentadas.

De los resultados obtenidos de resistencia a la tracción indirecta podemos decir que la mezcla con el 100% de cerámica no cumple los requisitos de abrasión exigidos por la norma, ya que presenta un valor de resistencia característica de 3,22 MPa, menor a los 3,6 MPa que se exige. Por el contrario, la mezcla con 50% de cerámica y el hormigón convencional presentan resultados aceptables, siendo el hormigón convencional el que presente el mejor valor, con una magnitud de 3,70 MPa para su resistencia característica. Mientras que para la mezcla con 50% de cerámica su valor es de 3,68 MPa, siendo este un valor bastante cercano al del hormigón convencional, con una diferencia menor al 1%.

Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

- Una vez que los datos fueron procesados y se analizaron los resultados, se concluye que al comparar la dosificación de hormigón con 0% de material cerámico de $f'c=400$ kg/cm² con las dosificaciones en las que se reemplaza el 50% y el 100% de agregado grueso por cerámica, se obtiene una disminución de la resistencia a la compresión en 15,63% y 23,76% a los 28 días, respectivamente.
- Al comparar las curvas de resistencia a la compresión de las tres dosificaciones se observa que, el desarrollo de estas para los hormigones con 0% y con 50% de cerámica presenta cambios muy pequeños en los primeros 14 días, sin embargo, después de este tiempo y hasta llegar a los 28 días de edad el hormigón elaborado con 0% de cerámica muestra una mayor tendencia a incrementar. Por otro lado, se logra identificar que la curva de resistencia a la compresión para el hormigón con 100% de cerámica tiene la misma tendencia de crecimiento que la de hormigón con 50% de cerámica, pero con valores menores.
- Al determinar el módulo de elasticidad de cada una de las dosificaciones, en base a la Norma ASTM C469-94, se puede notar que la incorporación de un mayor porcentaje de material cerámico desencadena en la reducción del módulo elástico en el hormigón, esto tras identificar que en el hormigón con 0% de cerámica se tiene un módulo de 50272,52 MPa y para las dosificaciones con 50% y 100% de cerámica triturada el valor disminuye en 26,57% y 42,01% respectivamente. Gracias a este análisis se puede concluir que cuando la incorporación de material cerámico es mayor, la rigidez del hormigón también incrementa, además de que el módulo de elasticidad se relaciona directamente con el valor de la resistencia a la compresión que presenta cada una de las dosificaciones.

- En cuanto a los valores obtenidos para el coeficiente de Poisson, en cada una de las dosificaciones, se pudo observar que este valor varía entre 0,19 y 0,22, tomando en consideración que dicho coeficiente, en concretos normales, es generalmente de 0,20 se puede concluir que los resultados obtenidos se encuentran dentro de un rango aceptable.
- Para los adoquines fabricados, respecto al ensayo de resistencia a la abrasión, se obtuvo un valor promedio de huella de 21mm para los adoquines realizados con la mezcla de hormigón sin material cerámico agregado, 21mm para los adoquines con incorporación de 50% de material cerámico como agregado grueso, y 20mm de huella promedio para los adoquines con 100% de material cerámico, por lo que se puede concluir que el porcentaje de cerámica reciclada incorporada a la dosificación no es un factor que afecta directamente a la resistencia a la abrasión, sin embargo, se recomendaría verificar esta tendencia mediante un mayor número de ensayos.
Adicionalmente, la normativa NTE INEN 3040 dispone como requisito una longitud de cuerda no mayor a 23mm por lo que, tanto los adoquines con incorporación de 50% de material cerámico y 100% de material cerámico son aptos para su uso según este criterio de conformidad.
- En referencia al ensayo de resistencia a la tracción indirecta, se pudo observar que la incorporación de material cerámico reciclado mayor a 50% tiene un efecto negativo sobre este parámetro, ya que se presenta una reducción del 13% de la resistencia del adoquín con 100% de material cerámico adicionado como agregado grueso, respecto a la resistencia obtenida con la mezcla de hormigón sin material cerámico, siendo estas 3,70 MPa y 3,22 MPa respectivamente. Para los especímenes elaborados con una incorporación de 50% de cerámica se obtuvo una reducción del 0.54% de la resistencia respecto al hormigón sin cerámica agregada. La normativa NTE INEN 3040 señala que la resistencia característica a la tracción indirecta debe ser igual o mayor a 3,6 MPa, por

lo que sólo los adoquines compuestos por 50% de cerámica reciclada y 50% de material pétreo serían aptos para su utilización en base a este criterio.

- En base a la serie de resultados obtenidos y según los criterios de conformidad se concluye que la utilización de material cerámico reciclado no aporta una mejora a las propiedades del hormigón convencional sin cerámica incorporada, sin embargo, la dosificación realizada con el 50% del material cerámico y 50% de material pétreo presenta resultados cercanos a la del hormigón sin cerámica agregada, cumpliendo de manera satisfactoria todos los criterios de conformidad de la normativa ecuatoriana vigente, por lo que se recomienda su uso, ya que al ser un material reciclado, se estaría reduciendo los desechos de cerámica sanitaria al ser utilizada como materia prima, de esta manera se puede disminuir el volumen de material pétreo grueso utilizado y extraído de las canteras, además, esta propuesta brindaría un aumento la vida útil del material cerámico.

Recomendaciones

- Implementar una instalación de producción de material triturado compuesto únicamente por residuos cerámicos sanitarios que optimice el proceso de trituración y cribado desplegado en el presente estudio.
- Complementar el estudio con el diseño de mezclas de hormigón con árido grueso conformado por el 10%, 25%, 75% y 90% de agregado cerámico que permita detallar de una manera más precisa la influencia del mismo en la mezcla.
- Evaluar la influencia del uso del residuo cerámico como agregado fino en las propiedades funcionales y estéticas de los adoquines de concreto.
- Elaborar un análisis económico a fin de plantear un valor parcial que determine la viabilidad del aprovechamiento del residuo a nivel industrial.
- Continuar líneas de investigación hacia la búsqueda de alternativas sostenibles que sustituyan el uso de agregados pétreos en la elaboración de mezclas de hormigón.

Referencias

- American Society for Testing and Materials. (2010). ASTM C469. West Conshohocken, United States.
- Área Andina F.V. (2014). *Manual FV Área Andina S.A. División Grifería, División Sanitarios, División Comercial, División Industrial*. Quito: F.V.
- Asocreto, Sanchez, D., & Gomez, J. (1998). *Tecnología y propiedades*. Bogotá: Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Retrieved from <https://isbn.cloud/9789589670910/tecnologia-y-propiedades/>
- BOLTEC. (n.d.). *Máquina automática MBP 4*. Retrieved from Máquinas para bloques y adoquines MBP 4: <http://boltec.com.bo/project/maquinas-para-bloques-y-adoquines-mbp-4/>
- Castro Solano, E. (2020). Estudio de la sustitución parcial de cemento de alta resistencia inicial por puzolana de ceniza volcánica en el diseño de hormigón. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Cayo, R., Padilla, M., Pantoja, S., & Pinto, I. (2021). *Dosificación de un hormigón para una resistencia de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, con la inclusión de ceniza volcánica sin el uso de aditivos*. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Civil.
- Cerámicas Gala S.A. (2018). *Declaración Ambiental de Producto. Porcelana Saitaria*. Retrieved from <https://www.gala.es/site/files/fichero/descargas/gala-declaracion-ambiental-de-producto-porcelana-sanitaria.pdf>
- Chaluiza, A. (2012). *RELACIONES DE COMPRESIÓN Y TENSIÓN EN ADOQUINES FABRICADOS CON MATERIALES PROCEDENTES DE LA CANTERA DE PESILLO,*

- UBICADA EN EL CANTÓN CAYAMBE, PROVINCIA DE PICHINCHA.* Retrieved from Repositorio Digital Universidad Central del Ecuador:
<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/386/1/T-UCE-0011-19.pdf>
- Chauveinc, J. (2011). *Estudio Experimental de Propiedades Mecánicas de Hormigones con Áridos Reciclados Mediante la Modificación del Método de la Elaboración del Hormigón.* Retrieved from Repositorio Digital Universidad de Chile:
<https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104206>
- Chicaiza, P. (2018). Uso de residuos cerámicos como sustituto del cemento para fabricación de morteros. *CIENCIA*, 20(1), 35-44. doi:<http://dx.doi.org/10.24133/ciencia.v20i1.554>
- EMASEO. (2012). *Consultoría para la realización de un estudio de caracterización de residuos sólidos urbanos domésticos y asimilables a domésticos para el Distrito Metropolitano de Quito.* Retrieved from
http://www.emaseo.gob.ec/documentos/pdf/Caracterizacion_residuos.pdf
- FV. (2019). *La empresa.* Retrieved from FV Grifería de alta tecnología: <https://fvsa.com/la-empresa/>
- GALARAMI. (n.d.). *GALARAMI Adoquines.* Retrieved from Inicio: <https://galarami.com.ec/>
- Hidalgo, D., & Poveda, R. (2013). *Obtencion de adoquines fabricados con vidrio como agregado.* Retrieved from Repositorio Digital:
<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/6104/1/CD-4795.pdf>
- INEN 1 483. (1986). *Adoquines. Terminología y clasificación.*
- INEN 1 488. (1986). *Adoquines. Requisitos.*
- Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. (2013). *Manual de diseño de pavimentos de adoquines de hormigón.* Santiago de Chile: Grafica LOM.

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). INEN 1573. In *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico* (1era. ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). INEN 1578. In *Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento* (1era. ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). INEN 857. In d. r. Áridos. Determinación de la densidad. Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). INEN 858. In *Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos* (1era. ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 1576. In *Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo* (1era. ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 696. In *Áridos. Análisis granulométrico en los áridos fino y grueso* (1era edición ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 856. In *Árido. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino* . Quito.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 857. In *Árido. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 858. In *Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso volumetrico) y el porcentaje de vacios*. Quito.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 862. In *Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de hormigón* (1era. ed.). Quito, Ecuador.

- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 862. In *Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad* (1era edición ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). INEN 872. In *Áridos para hormigón. Requisitos* (1era. ed.). Quito, Ecuador.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2016). INEN 3040. In *Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*. Quito, Ecuador.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Panarese, W. (2004). *Diseño y Control de mezclas de concreto*. Illinois: Portland Cement Association PCA.
- Lafuerza, A. (2014). *Análisis de las propiedades de hormigones de alta resistencia fabricados con residuos mixtos y cerámicos*. Barcelona.
- Medina, C., Juan, A., Frías, M., Sanches de Rojas, M., Morán, J., & Guerra, M. (2011, septiembre 12). Caracterización de los hormigones realizados con áridos reciclados procedentes de la industria de cerámica sanitaria. *Materiales de construcción*, 533-546. doi:10.3989/mc.2011.59710
- Morales, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Madrid: Díaz de Santos, S.A.
- NTE INEN 152. (2010). *Cemento Portland. Requisitos* .
- NTE INEN 3040. (2016). *Adoquines de Hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*.
- Pinto, A. (2011). *Materiales y Materias primas. Cerámicos*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Prefabricados de la Jara. (2019). *Historia de los adoquines. La evolución del pavimento*.
- Vázquez, E. (2005). *Materiales cerámicos: propiedades, aplicaciones y elaboración*. México, D.F.: DR.

Yugsi. (2018). *Análisis de las propiedades mecánicas de adoquines elaborados con hormigón y polvillo de caucho de neumáticos reciclados y su correlación con adoquines convencionales*. Retrieved from Repositorio digital:

<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/386/1/T-UCE-0011-19.pdf>