

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO DE LA
PIEDRA DE BARICHARA Y CENIZA COMO AGREGADO EN LA
PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA
ADOQUINES**

YIMER ESTEBAN LAGUADO NUÑEZ

LUIS CARLOS CUENCA RODRIGUEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO - MECÁNICO DE LA
PIEDRA DE BARICHARA Y CENIZA COMO AGREGADO EN LA
PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA
ADOQUINES**

YIMER ESTEBAN LAGUADO NUÑEZ

LUIS CARLOS CUENCA RODRIGUEZ

**Tesis de grado como requisito para optar
Por el título de Ingeniero Civil**

Directora

**MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN
PHD. Ingeniería Civil**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
BUCARAMANGA
2015**

NOTA DE ACEPTACION

Presidente del Jurado

Jurado

Bucaramanga, enero 16 de 2.015

AGRADECIMIENTOS.

Esta tesis de grado, está dedicada a Dios, por haberme concedido la sabiduría y paciencia necesaria para realizar este trabajo, por ser una guía y bendecir mi vida.

A mis padres, a mi hermana, por su gran apoyo e infinito amor y cariño, pues son ellos quienes me han demostrado que en el camino hacia la meta se necesita de la dulce fortaleza para aceptar las derrotas y del sutil coraje para derribar miedos, a ellos quienes han sido mi gran motivación para ser todo un profesional, toda mi gratitud.

A mis estimados maestros de la Universidad Pontificia Bolivariana Bucaramanga de la Facultad de Ingeniería Civil por infundir en mí, conocimientos y enseñanzas, apoyo y motivación a lo largo de estos años.

A la doctora María Fernanda Serrano Guzmán, directora de mi tesis de grado, por su orientación y colaboración para la realización del presente trabajo.

Al personal del laboratorio de la universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

Al Ing. Mauricio Cardeñosa, de Ecopetrol y el Instituto Colombiano del Petróleo por el apoyo brindado para la ejecución del estudio en el convenio de Colaboración AC02- 5211508.

Finalmente, a mi compañero Mateo Sarmiento y su familia en Villanueva – Santander, quienes aportaron un gran apoyo y parte de sus conocimientos para la realización de este proyecto. Por otra parte quiero agradecer aquellas personas que de una u otra forma participaron en esta investigación, mi más sincero agradecimiento.

YIMER ESTEBAN LAGUADO NUÑEZ

Agradezco a Dios por haberme guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi refugio en momentos de debilidad y por brindarme la sabiduría necesaria para culminar este ciclo de mi vida.

A mis padres Alirio Cuenca y Luz Dare Cuenca agradezco su apoyo constante y el esfuerzo realizado para que yo obtuviera una excelente educación, a mi hermano por ser parte de mi vida y muy especialmente a mi segunda madre Gilma Rodríguez que desde el cielo cuida mis pasos y celebra este nuevo triunfo.

A mi directora de tesis María Fernanda Serrano y profesores, ejes de mi proceso educativo, gracias por su amistad y el apoyo brindado, por ultimo agradezco a mis amigos por haber hecho de mi vida universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidaré.

Al Ing. Mauricio Cardeñosa, de Ecopetrol y el Instituto Colombiano del Petróleo por el apoyo brindado para la ejecución del estudio en el convenio de Colaboración AC02- 5211508.

LUIS CARLOS CUENCA RODRIGUEZ

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN.....	18
2.	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	19
2.1.	JUSTIFICACIÓN.....	20
2.2.	OBJETIVOS.....	21
2.2.1.	Objetivo General.....	21
2.2.2.	Objetivos específicos.....	21
2.3.	ALCANCE.....	22
2.4.	ESTADO DEL ARTE.....	23
3.	MARCO TEORICO.....	25
3.1.	TEORIA DEL CONCRETO.....	25
3.1.1.	Concreto.....	25
3.1.2.	Cemento.....	26
3.1.3.	Agua.....	27
3.1.4.	Mortero.....	28
3.1.5.	Aditivo Sikaf fluid.....	28
3.2.	AGREGADOS FINOS Y GRUESOS.....	28
3.2.1.	Granulometría.....	29
3.3.	DETERMINACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGREGADOS PARA CONCRETO.....	30
3.3.1.	Propósito del muestreo.....	30
3.3.2.	Tipo de muestra.....	30
3.4.	CARACTERIZACION.....	31
3.4.1.	Ensayos exigidos por INVIAS Y NTC a materiales granulares.....	31

3.4.2.	Ensayos exigidos por INVIAS al material cementante... 39
3.5.	CENIZA..... 46
3.5.1.	Clasificación de las cenizas volantes..... 47
3.6.	ADOQUINES 48
3.6.1.	Clasificación y uso 49
4.	METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN 50
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS..... 50
4.2.	MATERIALES GRANULARES..... 50
4.3.	CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN..... 51
4.3.1.	Agregado fino 51
4.3.2.	Agregado grueso 51
4.3.3.	Piedra Barichara 52
4.4.	INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INV) – MATERIAL CEMENTANTE 53
4.4.1.	Cemento 53
4.5.	CENIZA..... 53
4.6.	VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO PREPARADO CON CEMENTO HIDRÁULICO (INV. E-410)..... 54
4.7.	Aditivo sikafluid 55
4.8.	NORMA TÉCNICA COLOMBIA (NTC -2017) – ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS... 56
4.8.1.	Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura (Mr).... 57
4.8.2.	Resistencia a la abrasión..... 57
4.8.3.	Absorción de agua y densidad..... 57

4.9.	DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA TESTIGO	58
4.9.1.	Selección del asentamiento	58
4.9.2.	Selección del tamaño máximo de agregado	60
4.9.3.	Estimación de los contenidos de agua y aire	60
4.9.4.	Determinación de la resistencia de diseño	61
4.9.5.	Selección de la relación agua-cemento y contenido de cemento.	62
4.9.6.	Estimación del contenido de agregado grueso y fino.....	63
4.9.7.	Ajuste por humedad de los agregados.	64
4.10.	PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO.....	64
4.11.	PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LOS ADOQUINES	69
5.	RESULTADOS.....	74
5.1.	CARACTERIZACION MATERIALES GRANULARES ...	74
5.1.1.	Granulometría de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E-213).....	74
5.1.2.	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos (I.N.V.E 222-07)	78
5.1.3.	Gravedad Específica Y Absorción De Agregados Gruesos (I.N.V.E 223-07).....	80
5.1.4.	Resistencia al Desgaste de los Agregados de Tamaños menores de 37,5 Mm (1 1/2”) por medio de la Máquina de los Ángeles (I.N.V.E 218-07).	81
5.1.5.	Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos (I.N.V.E 133-07)	82
5.1.6.	Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E 217-07).	83

5.1.7.	Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos (I.N.V. E 212-07)	84
5.1.8.	Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (I.N.V.E 230-07)	85
5.1.9.	Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados (I.N.V.E 227-07)	86
5.1.10.	Humedad natural de los agregados gruesos y finos	87
5.2.	CARACTERIZACION MATERIAL CEMENTANTE	87
5.2.1.	Densidad del Cemento Hidráulico (I.N.V.E 307-07)	87
5.2.2.	Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico, Método del Aparato de Vicat (I.N.V.E 305-07)	88
5.2.3.	Consistencia Normal del Cemento (I.N.V. E 310-07)	90
5.3.	RESULTADOS DOSIFICACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA CONCRETO	91
5.4.	RESULTADOS RESISTENCIA MECANICA DE ADOQUINES	98
6.	ANALISIS DE RESULTADOS	102
6.1.	CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES GRANULARES	102
6.1.1.	Granulometría de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E-213-07)	102
6.1.2.	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos (I.N.V.E 222-07)	106
6.1.3.	Gravedad Específica y Absorción de Agregados Gruesos (I.N.V.E 223-07)	106
6.1.4.	Resistencia al Degaste de los Agregados de Tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la Máquina de los Ángeles (I.N.V.E 218-07).	107
6.1.5.	Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos (I.N.V.E 133-07)	107

6.1.6.	Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E 217-07).....	107
6.1.7.	Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos (I.N.V. E 212-07)	108
6.1.8.	Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (I.N.V.E 230-07).....	108
6.1.9.	Humedad natural de los agregados gruesos y finos	108
6.2.	CARACTERIZACION MATERIAL CEMENTANTE	109
6.2.1.	Densidad del cemento hidráulico (I.N.V.E 307-07)	109
6.2.2.	Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico Método del Aparato De Vicat (I.N.V.E 305-07)	109
6.2.3.	Consistencia Normal del Cemento (I.N.V. E 310-07) ..	110
6.3.	RESULTADOS DOSIFICACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA CONCRETO	110
6.4.	RESULTADOS RESISTENCIA MECANICA DE ADOQUINES	113
6.4.1.	Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura (mr) ..	113
6.4.2.	Resistencia a la abrasión.....	114
6.4.3.	Absorción de agua y densidad.....	114
6.4.4.	Comparación Económica de la Producción de un Adoquín	114
7.	CONCLUSIONES	116
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Cemento	26
Figura 2. Agua	27
Figura 3. Granulometría agregado grueso	30
Figura 4. Granulometría agregado fino	32
Figura 5. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV. E-223).....	33
Figura 6. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (NTC-92).....	35
Figura 7. Resistencia al desgaste de agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218) ..	37
Figura 8. Tiempo de fraguado del cemento hidráulico método del aparato de Vicat.....	40
Figura 9. Resistencia a la flexotracción (Mr)	44
Figura 10. Absorción de agua y densidad.....	45
Figura 11. Cenizas Volantes.....	47
Figura 12. Adoquines.....	48
Figura 13. Aditivo sikafluid	56
Figura 14. Resistencia promedio de diseño	62
Figura 15. Moldes cilíndricos para concreto	65
Figura 16. Mezcla de concreto.....	66
Figura 17. Proceso de elaboración de los especímenes	67
Figura 18. Resistencia a la compresión	68
Figura 19. Resistencia a la compresión dosificación 3	69
Figura 20. Molde para especímenes de un adoquín.....	71
Figura 21. Mezcla de concreto fluida	71

Figura 22.Elaboración adoquines de concreto.....	72
Figura 23.Especímenes de concreto	72
Figura 24. Resistencia a la flexo-tracción – Modulo de rotura (Mr).....	73
Figura 25.Resistencia a la abrasión.....	73
Figura 26.Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico Método del Aparato de Vicat	88
Figura 27. Tiempo de Fraguado del Cemento con 5% de Ceniza	89
Figura 28. Tiempo de Fraguado del Cemento con 10% de Ceniza	89
Figura 29. Tiempo de Fraguado del Cemento con 15% de Ceniza	90
Figura 30. Granulométrica del Agregado Fino	103
Figura 31. Granulométrica del Agregado Convencional 60% - Barichara 40%:.....	104
Figura 32. Granulométrica del Agregado Convencional 75% - Barichara 25%:.....	105
Figura 33. Tiempo de fraguado del cemento 5%, 10 %, 16 %de ceniza	110
Figura 34. Resistencia a la compresión dosificación-1(60%-40%)	112
Figura 35. Resistencia a la compresión dosificación-2(75%-25%)	112
Figura 36. Resistencia a la compresión dosificación-3(75%-25%) con aditivo presente	113

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de C y K para varios cementos tipo I colombianos	55
Tabla 2. Requisitos de resistencia a la flexotracción	57
Tabla 3. Asentamiento recomendado para concretos.....	59
Tabla 4. Agua en kg por metro cubico de concreto.....	60
Tabla 5. Coeficiente de variación para diferentes controles	61
Tabla 6. Porcentajes de agregado grueso y fino para el ensayo de masa Unitaria seca y compuesta (MUSCC)	63
Tabla 7. Dosificación 1 - Contenido de una mezcla de concreto hidráulico	65
Tabla 8. Dosificación 2 - Contenido de una mezcla de concreto hidráulico	67
Tabla 9. Dosificación 3 - Contenido de una mezcla fluida de concreto hidráulico	68
Tabla 10. Dosificación de una mezcla de concreto para adoquines	70
Tabla 11. Granulometría del Agregado Grueso	75
Tabla 12. Granulometría del Agregado Fino	75
Tabla 13. Granulometría del Agregado Convencional 60% - Barichara 40%	77
Tabla 14. Granulometría Agregado Fino 75%-25%	78
Tabla 15. Resultados de Gravedad Específica y Absorción de Arena.....	79
Tabla 16. Agregado Fino (60%-40%).....	79
Tabla 17. Agregado Fino (75%-25%).....	80
Tabla 18. Agregado Procedencia Rio	81
Tabla 19. Porcentaje de desgaste de cada material	81
Tabla 20. Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos	82

Tabla 21. Agregado Fino	84
Tabla 22. Agregado Grueso:.....	84
Tabla 23. Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos	85
Tabla 24. Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados .	85
Tabla 25. Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados	86
Tabla 26. Humedad Natural de los Agregados Gruesos y Finos	87
Tabla 27. Consistencia Normal del Cemento + 5% de Ceniza	90
Tabla 28. Consistencia Normal del Cemento + 10% de Ceniza	91
Tabla 29. Consistencia Normal del Cemento + 15% de Ceniza	91
Tabla 30. Dosificación para 1 m ³ concreto.....	91
Tabla 31. Dosificación para Concreto 60% - 40.....	92
Tabla 32. Resistencia Proporción 60%-40%.....	93
Tabla 33. Dosificación para Concreto 75% - 25%.....	94
Tabla 34. Resistencia Proporción 75%-25%.....	95
Tabla 35. Dosificación para Concreto 75% - 25%.....	96
Tabla 36. Resistencia Proporción 75%-25% con Aditivo Presente	97
Tabla 37. Resistencia Proporción 75%-25% sin Aditivo Presente	98
Tabla 38. Menor porcentaje de Vacíos	98
Tabla 39. Dosificación de Concreto 75% - 25% para adoquines	98
Tabla 40. Absorción de Agua y Densidad.....	99
Tabla 41. Adoquín con 10% de Ceniza.....	100
Tabla 42. Módulo de Rotura	100
Tabla 43. RESISTENCIA A LA ABRASION.....	101
Tabla 44. Presupuesto de un adoquín	114

LISTAS DE ECUACIONES

Ecuación 1. Relación de la resistencia a los 7 y 28 días.	54
Ecuación 2. Formula peso específico.	63
Ecuación 3. Porcentaje de vacíos.	64

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO FÍSICO -MECÁNICO DE LA PIEDRA DE BARICHARA Y CENIZA COMO AGREGADO EN LA PREPARACIÓN DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO PARA ADOQUINES.

AUTOR(ES): YIMER ESTEBAN LAGUADO NUÑEZ
LUIS CARLOS CUENCA RODRIGUEZ

FACULTAD: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

RESUMEN

El propósito general del presente Trabajo de Grado fue evaluar el comportamiento físico- mecánico de la piedra de Barichara y ceniza como agregados en la preparación de mezclas de concreto hidráulico para adoquines. Para cumplir dicho propósito se trazaron unos objetivos específicos como comprobar la resistencia mecánica de adoquines mezclados con ceniza y piedra de Barichara con respecto a una mezcla de agregado convencional. En cuanto a la metodología se propuso la verificación de normas de calidad de este material para el aprovechamiento como agregado en la preparación de mezclas de concreto hidráulico para adoquines. Se observó que estos materiales granulares y cementantes pueden ser empleados para concretos mezclando en proporciones del 75% del material convencional, y 25% del material en estudio, (5%,10% y 15%) de ceniza como porcentaje del cemento y agua más una dosificación de aditivo sikafluid. La resistencia a la compresión para concreto de los especímenes preparados con 5% ceniza arrojó valores superando hasta un 5 % la resistencia de diseño (280 kg/cm^2); lo cual indica que es una proporción idónea para formar una mezcla de concreto hidráulico para adoquines; por otra parte los especímenes preparados con 10% de ceniza arrojan valores cercanos a la resistencia de diseño, motivo por el cual se optó por evaluar la resistencia de adoquines para concreto, mientras que en los especímenes del 15% de ceniza los resultados fueron por debajo de la resistencia de diseño. Con respecto al comportamiento de la resistencia de adoquines para concreto en las proporciones del (5% y 10%) de ceniza se puede evidenciar que están dentro de las especificaciones técnicas para la instalación de adoquines de concreto para superficies de tránsito peatonal y vehicular.

PALABRAS CLAVES:

Adoquín, Muestras, Agregados, Ensayos, INVIAS

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: PHYSICAL BEHAVIOR ASSESSMENT · MECHANIC STONE AND ASH AS BARICHARA ADDED INPREPARING FOR BLENDED HYDRAULIC CONCRETE PAVERS

AUTHOR(S): YIMER ESTEBAN LAGUADO NUÑEZ
LUIS CARLOS CUENCA RODRIGUEZ

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: MARIA FERNANDA SERRANO GUZMAN

ABSTRACT

The overall purpose of this work was to evaluate the physical Degree-mechanical behavior of rock and ash as Barichara added in the preparation of blends hydraulic concrete paver. To fulfill this purpose were specific targets were drawn: dosing a concrete mixture made with conventional aggregates, dispensing a mixture of concrete made with aggregates from waste manual operation Barichara stone ash as a percentage of cement and finally verify the mechanical strength of paving stone mixed with Barichara ash and with respect to a mixture of conventional aggregate. In terms of methodology, the verification of quality standards of this material for use as aggregate in the preparation of blends hydraulic concrete paver was proposed. It was observed that these granular materials can be employed for cementitious concrete mixing in proportions of 75% of the conventional material, and 25% of the material under study, (5%, 10% and 15%) ash as a percentage of cement and more water sikafluid additive dosing. The compressive strength of the concrete specimens prepared with 5% of ash returned values up to 5% exceeding the design strength (280 kg / cm²); which indicates a suitable proportion to form a mixture of hydraulic concrete paver; Moreover specimens prepared with 10% of ash shed near the design strength, why it was decided to evaluate the resistance of paving concrete values while in the specimens of the 15% of ash results were below design resistance. With respect to the behavior of the resistance of concrete pavers in the proportions of (5% and 10%) of ash can be evidenced that are within the technical specifications for the installation of concrete pavers for pedestrian areas and traffic.

KEYWORDS:

Cobblestone, Samples, Units, Essays, INVIAS

1. INTRODUCCIÓN.

El concreto es un material de construcción que se diseña dependiendo de su uso. Su resistencia depende de numerosas variables, que va ligada con la procedencia de cada uno de los componentes.

El gran crecimiento de la construcción civil en el mundo y los elevados costos de los materiales en conjunto con la problemática ambiental, que en la actualidad es uno de los temas que genera gran preocupación, se hace referencia a las cenizas producidas por las canteras del ECOPETROL que dadas sus propiedades químicas parecidas a las del cemento es adoptada como solución para reemplazar el material cementante usados en las mezclas.

Por otra parte se va a utilizar agregados provenientes de la explotación manual de la piedra Barichara para suplir en cierta cantidad el agregado fino, dado que se presenta un alto porcentaje de desperdicio en la fabricación de pisos, paredes, esculturas entre otros.

Teniendo en cuenta lo anterior se plantea la presente investigación correspondiente a la evaluación del comportamiento físico-mecánico de la piedra Barichara y ceniza como agregado en la preparación de mezclas de concreto hidráulica para adoquines.

KEY WORDS: Cobblestone, Samples, Units, Essays, INVIAS

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Barichara, municipio ubicado en la provincia Guanentá, ha sido a través del tiempo epicentro turístico por sus inconmensurables matices arquitectónicos que datan del siglo XVIII. Incluso fue declarado patrimonio arquitectónico del país en 1978 por su estilo particular heredado del estilo colonial español que se estableció en esa época. [1]

La materia prima implementada en la mayoría de los procesos de construcción en esta región provienen de la llamada piedra de Barichara, la cual se extrae de grandes canteras donde el personal moldea la piedra artesanalmente hasta obtener las dimensiones para el uso de pisos, enchapes, fachadas o simplemente en muros artesanales de fincas.

La transformación de la roca se perfila mediante cincel y porra, lo cual ocasiona un despilfarro considerable de material. Asimismo la extracción de la piedra se hace a cielo abierto en el mismo lugar de explotación, convirtiéndose en una zona desértica de gran impacto visual.

En este orden de ideas, la explotación arcaica, manual y sin técnicas propias genera unos residuos que no representan valor alguno para los artesanos que labran esta piedra. Pero con un proceso idóneo y tecnificado estos residuos pueden adquirir importancia como sustituto de agregados para la preparación de adoquines.

Lo anteriormente descrito refleja el detrimento ambiental en el cual se incurre al desarrollar procedimientos manuales sin técnicas propias e idóneas que generen sostenibilidad para el medio ambiente.

2.1. JUSTIFICACIÓN

Implementar un uso accesorio a los residuos generados en la cadena de extracción de la piedra de Barichara resulta trascendental para el equilibrio ambiental de esta región, debido a que los problemas ambientales que afronta esta zona geográfica tales como su nivel desértico y la alteración del paisaje en que se incurre.

Así mismo, tecnificar y darle un uso genérico a estos residuos como sustituto de agregados para la preparación de adoquines generaría una renta adicional para la economía de los sectores sociales de esta zona geográfica; más cuando la gran parte del desarrollo y crecimiento económico de esta región deriva de la producción agrícola y ganadera.

Adicionalmente, del sector hidrocarburo se genera gran cantidad de residuos por la actividad de explotación del crudo. La ceniza proveniente de desorción térmica es un problema para las empresas, por lo tanto este proyecto se centra en el análisis mecánico de concreto preparado con residuos de la piedra Barichara y ceniza para adoquines.

Bajo estos parámetros, Surge entonces la iniciativa del aprovechamiento de esta piedra en la producción de materiales para la construcción de adoquines.

2.2. OBJETIVOS

2.2.1. Objetivo General

Evaluar el comportamiento físico – mecánico de la piedra de Barichara y ceniza como agregados en la preparación de mezclas de concreto hidráulico para adoquines

2.2.2. Objetivos específicos

- 1) Dosificar una mezcla de concreto preparado con agregados convencionales.
- 2) Dosificar una mezcla de concreto preparado con agregados provenientes de los residuos de la explotación manual de la piedra de Barichara con ceniza como porcentaje del cemento.
- 3) Comprobar la resistencia mecánica de adoquines mezclados con ceniza y piedra de Barichara con respecto a una mezcla de agregado convencional.

2.3. ALCANCE

Mediante este estudio se llevo a cabo la evaluación del comportamiento físico-mecánico de la piedra de Barichara y ceniza como porcentaje del cemento en diferentes proporciones (5%-10% y 15%) , con el fin de dosificar una mezcla adecuada que cumpliera nuestra resistencia de diseño (280 kg/cm^2) para la elaboración de adoquines de concreto.

Posteriormente de haber obtenido la dosificación, se elaboraron los adoquines de forma rectangular donde se verifico previamente su longitud de huella (lh) , absorción de agua , densidad, resistencia a la abrasión y resistencia a la flexotracción o módulo de rotura (Mr) de modo que cumpliera a cabalidad con los requisitos físicos y especificaciones técnicas para la instalación de adoquines de concreto para superficies de tránsito peatonal y vehicular tal como lo establece la norma técnica colombiana (NTC-2017) ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS . De esta forma Se espera ofrecer alternativas de aprovechamiento de estos residuos como materiales en la preparación de mezclas de concreto para adoquines.

2.4. ESTADO DEL ARTE

La fabricación de adoquines en los últimos años ha sido de gran reto para aquellos que eligen este método para pavimentación de vías nuevas o ya existentes, dado que, una de sus mayores complejidades es la de brindar resistencias altas para poder así ofrecer vías más duraderas; esta investigación busca analizar el comportamiento físico mecánico de la ceniza y de la piedra Barichara como agregado en la preparación de mezcla de concreto hidráulico para la utilización en adoquines; por tal razón para llevar a cabo esta investigación se propuso emplear varios porcentajes en la utilización de ceniza que tendrán una representación del 5, 10 y el 15% en peso del cemento, de igual forma sucederá con el componente del agregado grueso el cual se utilizara un 40% de piedra de Barichara y el otro 60% de agregado convencional; por último se estudiará y se analizará los datos arrojados en dicha investigación teniendo en cuenta las normas que nos rigen como lo son la Normas Técnicas Colombianas y los ensayos que indica Instituto Nacional de Vías-INVIAS.

En efecto, estudios realizados por la universidad de SAN CARLOS DE GUATEMALA han evidenciado que las características físico-mecánicas en adoquines de concreto fabricados con arena caliza y arena de rio han demostrado que la arena caliza es de gran beneficio para las propiedades físico mecánicas en la fabricación de adoquines, ya que se obtuvo mejor resistencia a compresión y absorción. Por consiguiente, se quiere analizar como interactúa la ceniza con el cemento como elemento aglomerante, teniendo en cuenta, el porcentaje de la piedra de Barichara como componente de agregado grueso, para que de tal manera se logre verificar su comportamiento físico-mecánico para la preparación de concreto hidráulico para la fabricación de adoquines. [2]

Por otra parte los alumnos Diego Alexander Guerrero Vargas y Didier Alberto Chávez García, realizaron investigaciones en cuanto a la evaluación de las propiedades mecánicas del concreto simple utilizando ceniza como porcentaje del cemento; por lo cual esta investigación arrojó que la ceniza aumentó la resistencia del concreto a los 28 días. [2]

Finalmente, cabe resaltar estudios que han realizados alumnos de la Universidad Pontificia Bolivariana donde se utiliza la ceniza como sustitución en la preparación de mezclas ya sea mortero, concreto o asfalto, uno de ellos es la evaluación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de concreto preparado con altos volúmenes de ceniza proveniente de locaciones petroleras [3] donde se obtuvo como resultado resistencias inferiores a la de diseño pero dando en algunos casos resistencias trabajables, otro trabajo de grado que respalda esta conclusión es la evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza de locaciones petroleras [4] donde se determinó que las ceniza son residuos que resultan viables en la aplicación en morteros. En término de asfalto se realizó un estudio basado en la determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo 2 utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante [5] , donde el resultado de la investigación arrojó que es una viabilidad económica dado a que se presentó una disminución de costos en la producción de un metro cubico de un MCD-2, para una mezcla con adicción del 30% de ceniza y de 4,5% de asfalto, comparándolo con la elaboración de MDC-2 convencional en el mercado colombiano.

3. MARCO TEORICO

3.1. TEORIA DEL CONCRETO

La industria del concreto representa gran desarrollo económico en el mundo, sin embargo; también representa una fuente de contaminación, ya que genera grandes desechos de construcción que son de gran impacto al medio ambiente; por tanto, la innovación e investigación de nuevos productos que cumplan con las especificaciones de construcción y el cuidado de medio ambiente es hoy un meta a corto plazo.

El concreto puede definirse como la mezcla de un material aglutinante (cemento portland hidráulico), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma una masa compacta y es capaz de soportar grandes esfuerzos a compresión. [6]

3.1.1. Concreto

Es un material compuesto formado por un aglomerante al que se añade partículas o fragmentos de un agregado, agua y aditivos específicos. Este material es de uso frecuente en la industria de la construcción, ya que tiene la capacidad de resistir grandes esfuerzos de compresión. Sin embargo, no se desempeña bien ante otros tipos de esfuerzos, como la flexión o la tracción.

El concreto convencional, usado en pavimentos y estructuras, tiene un peso específico que varía de 2.200 hasta 2.400 kg/m³. La densidad del concreto varía dependiendo de la cantidad del agregado suministrado, la cantidad de aire atrapado o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad del

concreto. [7] El concreto tiene otra definición como: mezcla de piedras y mortero conocida también como Hormigón. Es frecuente que al concreto se le añadan diversos aditivos para modificar sus características. Entre estos aditivos es posible mencionar a impermeabilizantes, colorantes y retardadores de fraguado, entre otros. [7]

3.1.2. Cemento

El cemento es un material pulverulento, que mezclado con agua, se convierte en una pasta moldeable con propiedades adherentes, que en pocas horas se endurece tornándose en un material de consistencia pétreo. El cemento consiste esencialmente en silicato cálcico hidratado (S-C-H), se puede apreciar en la figura 1, este compuesto es el principal responsable de sus características adhesivas. Hay varios tipos de cementos, las propiedades de cada uno de ellos están íntimamente asociadas a la composición química de sus componentes iniciales, que se expresa en forma de sus óxidos, y que según cuales sean formaran compuestos resultantes distintos en las reacciones de hidratación. [7]



Figura 1. Cemento

Fuente: Autor

3.1.3. Agua

El agua de amasado interviene en las reacciones de hidratación del cemento. La cantidad de agua debe ser estrictamente la necesaria, pues la sobrante que no interviene en la hidratación del cemento se evaporará y creará huecos en el concreto disminuyendo la resistencia del mismo. Sin embargo una reducción excesiva de agua originaría una mezcla seca, poco manejable y muy difícil de colocar en obra. Por ello es un dato muy importante fijar adecuadamente la cantidad de agua. [8]

Durante el fraguado y primer endurecimiento del concreto se añade el agua de curado para evitar la desecación y mejorar la hidratación del cemento. Tanto el agua destinada al amasado, como la destinada al curado deben ser aptas para cumplir su función.

El agua de curado debe ser apta ya que de no ser así, puede afectar negativamente a las reacciones químicas cuando se está endureciendo el concreto. Normalmente el agua apta suele coincidir con la potable y están normalizados una serie de parámetros que debe cumplir, se puede observar en la figura 2. Así en la normativa está limitado el pH, el contenido en sulfatos, en ion cloro y los hidratos de carbono.



Figura 2. Agua

Fuente: Autor

3.1.4. Mortero

Es una mezcla de conglomerantes inorgánicos, áridos y agua, y posibles aditivos que sirven para pegar elementos de construcción tales como ladrillos, piedras, bloques de *concreto* etc. Además, se usa para rellenar los espacios que quedan entre los bloques y para el relleno de paredes. Los más comunes son los de cemento y están compuestos por cemento, agregado fino y agua. [9]

El mezclado de morteros es distinto al mezclado de concreto ya que al no tener agregado grueso tiene una consistencia. Se puede hacer manual dentro de una artesa con un azadón o de manera mecánica en una morterera.

3.1.5. Aditivo Sikafloid

Aditivo es una sustancia química, generalmente dosificada por debajo del 5% de la masa del cemento, distinta del agua, los agregados, el cemento y los refuerzos de fibra, que se emplea como ingrediente de la pasta, del mortero o del concreto, y se agrega al conjunto antes o durante el proceso de mezclado, con el fin de modificar alguna o algunas de sus propiedades físicas, de tal manera que el material se adapte de una mejor forma a las características de la obra o las necesidades del constructor.

3.2. AGREGADOS FINOS Y GRUESOS

También denominados conglomerados; son fragmentos o granos que constituyen entre un 70% y 85% del peso de la mezcla, cuyas finalidades específicas son abaratar los costos de la mezcla y dotarla de ciertas características favorables dependiendo de la obra que se quiera ejecutar. [10]

Ocupan comúnmente de 60% a 75% del volumen del concreto (70% a 85% en peso), influyen notablemente en las propiedades del concreto recién mezclado y endurecido en las proporciones de la mezcla. [10]

Los agregados finos comúnmente consisten en arena natural o piedra triturada siendo la mayoría de sus partículas menores que 5mm. Los agregados gruesos consisten en una grava o una combinación de grava o agregado triturado cuyas partículas sean predominantemente mayores que 5mm y generalmente entre 9.5 mm y 38mm. El agregado triturado se produce triturando roca de cantera, piedra bola, guijarros, o grava de gran tamaño. La escoria de alto horno enfriada al aire y triturada también se utiliza como agregado grueso o fino. [10]

3.2.1. Granulometría

Consiste en la distribución del tamaño de los granos. Puede ser fina o gruesa. Este método consiste en la determinación por tamices de la distribución del tamaño de las partículas de agregados finos y gruesos. Para una gradación óptima, los agregados se separan mediante el tamizado, en dos o tres grupos de diferentes tamaños para las arenas, y en varios grupos de diferentes tamaños para los gruesos. [11] (Figura 3)



Figura 3. Granulometría agregado grueso

Fuente: Propia

3.3. DETERMINACIÓN DE LAS MUESTRAS DE AGREGADOS PARA CONCRETO.

El muestreo de los materiales es un procedimiento fundamental ya que de este se derivarán las muestras de agregados a las cuales se le harán las pruebas posteriores. En general, hacer un buen muestreo da una idea global del tipo de material que se ha elegido. [11]

3.3.1. Propósito del muestreo

La toma de muestras de los agregados constituye una operación fundamental en el proceso de control de calidad de la producción del concreto. El muestreo puede producirse en el yacimiento, en la planta de beneficio o al pie de obra, según su razón de ser. [11]

3.3.2. Tipo de muestra

Cuando la inspección indica diferencias sustantivas en los materiales, en tamaño, textura o color, deberá ensayarse independientemente cada una de

las muestras que se obtengan, las que se denominan "muestras representativas simples".

Cuando no se observa diferencias en el material, las muestras simples se mezclan debidamente de manera que representen la condición media del agregado, denominándose "muestra representativa compuesta". Para su envío a laboratorio, las muestras representativas pueden reducirse hasta llegar al volumen mínimo adecuado, según los requerimientos de ensayo.

3.4. CARACTERIZACION

3.4.1. Ensayos exigidos por INVIAS Y NTC a materiales granulares

Los ensayos necesarios para caracterizar los agregados pétreos mencionados por el INVIAS son:

3.4.1.1 Granulometría de agregados gruesos y finos (INV. E-213)

Este método de ensayo tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente. Este método también se puede aplicar usando mallas de laboratorio de abertura redonda, y no se empleará para agregados recuperados de mezclas asfálticas. Esta norma no pretende considerar todos los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien la emplee, el establecimiento de prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y la aplicación de limitaciones regulatorias con anterioridad a su uso. (Figura 4)



Figura 4. Granulometría agregado fino

Fuente: Propia

Este método se usa principalmente para determinar la granulometría de los materiales propuestos que serán utilizados como agregados. Los resultados se emplean para determinar el cumplimiento de los requerimientos de las especificaciones que son aplicables y para suministrar los datos necesarios para la producción de diferentes agregados y mezclas que contengan agregados. Los datos pueden también servir para el desarrollo de las relaciones referentes a la porosidad y el empaquetamiento. [12]

3.4.1.2 Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV. E-223)

Esta norma describe el procedimiento que se debe seguir para la determinación de gravedades específicas bulk, bulk saturada y superficialmente seca y aparente, así como la absorción, después que los agregados con tamaño igual o mayor a 4.75 mm que han estado sumergidos en agua durante 15 horas. Este método de ensayo no se debe aplicar a agregados pétreos livianos. Esta norma no pretende considerar los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien

la emplee establecer prácticas apropiadas de seguridad y el determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo. [13] (Figura 5)



Figura 5.Gravedad específica y absorción de agregados gruesos (INV. E-223)

Fuente: Propia

3.4.1.3 Gravedad específica y absorción de los agregados fino (INV. E-222)

Describe el procedimiento de ensayo para la determinación de la gravedad específica aparente. Así como la absorción de una muestra de árido fino a una temperatura establecida de 23/ 23°C (73.4 / 73.4°F), después de 24 horas de sumergidos en agua. La gravedad específica en base al peso de la superficie saturada superficialmente seca de la muestra de ensayo y la absorción.

Los valores establecidos en unidades SI deben ser considerados como la norma Esta norma no pretende considerar los problemas de seguridad asociados con su uso. Es responsabilidad de quien emplee esta norma el

establecer prácticas apropiadas de seguridad y salubridad y el determinar la aplicación de limitaciones regulatorias antes de su empleo. [14]

3.4.1.4 Contenido total de agua evaporable de los agregados por secado (INV. E-216).

Este método de ensayo cubre la determinación del porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado por secado, ya sea la humedad superficial y la humedad en los poros del agregado. Algunos agregados pueden contener agua que está químicamente combinada con los minerales del agregado. Dicha cantidad de agua no es evaporable y no está incluida en el porcentaje determinado por este método. Las partículas de agregado grueso especialmente aquellas que son más grandes que 50 mm pueden requerir grandes periodos de tiempo para que la humedad que se encuentre dentro del agregado, salga a la superficie del mismo. [15]

Este método es suficientemente exacto para los propósitos normales, tales como el ajuste del peso de batchadas, durante la preparación de mezclas de concreto. Generalmente, con él se mide la humedad en la muestra de ensayo. En raras ocasiones, cuando el agregado mismo es afectado por la acción del calor, o cuando se necesitan medidas más refinadas, el ensayo se debe realizar empleando un horno ventilador de temperatura controlada.

Las partículas más grandes de los agregados gruesos, especialmente las mayores de 50 mm, requerirán de tiempos más prolongados para que el agua viaje del interior de la partícula hasta la superficie. El usuario del método deberá determinar por tanteos, si existen formas más rápidas y confiables para ejecutar este ensayo cuando se sequen partículas de gran tamaño. [15]

3.4.1.5 Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (NTC-92).

Esta norma determina la masa unitaria en condición compactada o suelta y el cálculo de los vacíos entre las partículas de agregados finos, gruesos o mezclados. Esta norma se aplica a agregados que no exceden los 150 mm de tamaño máximo nominal. La masa unitaria es el término usado tradicionalmente para describir la propiedad determinada en esta norma. Aunque algunos consideran que los términos peso unitario, densidad o densidad volumétrica resultan más apropiados, no existe aún un acuerdo general sobre el tema.

Esta norma establece definiciones, aparatos, muestra de ensayo, calibración del molde, selección del procedimiento, procedimiento de apisonamiento, por golpeteo del molde y por paleo, cálculos, informe, precisión y sesgo. [16] (Figura 6).

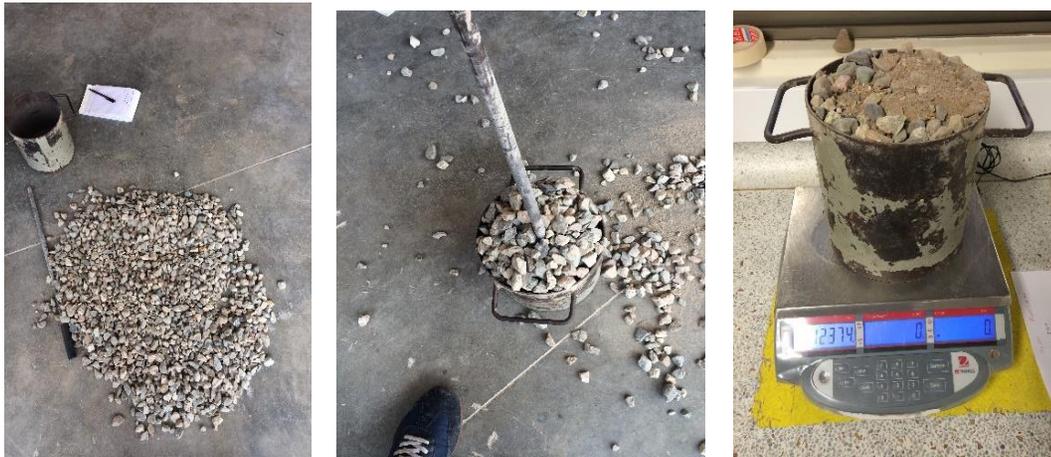


Figura 6. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (NTC-92).

Fuente: Propia

3.4.1.6 Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218)

Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles.

El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva. Para evaluar la resistencia al desgaste de los agregados gruesos, de tamaños mayores de 19 mm (¾"), por medio de la máquina de Los Ángeles, deberá utilizarse la norma INV E – 219.

Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura.

Los límites de las especificaciones deben ser asignados con extrema precaución, considerando los tipos de agregados disponibles y su comportamiento histórico en aplicaciones finales específicas. [17]

3.4.1.7 Resistencia al desgaste de agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218)

Este método se refiere al procedimiento que se debe seguir para realizar el ensayo de desgaste de los agregados gruesos hasta de 37.5 mm (1½") por medio de la máquina de Los Ángeles. El método se emplea para determinar la resistencia al desgaste de agregados naturales o triturados, empleando la citada máquina con una carga abrasiva. Este ensayo ha sido ampliamente usado como un indicador de la calidad relativa o la competencia de diferentes fuentes de agregados pétreos de similares composiciones mineralógicas. Los resultados no brindan automáticamente

comparaciones válidas entre fuentes marcadamente diferentes en origen, composición o estructura. [18] (Figura 7)



Figura 7. Resistencia al desgaste de agregados tamaños menores de 1 ½” por medio de la máquina de los ángeles (INV. E-218)

Fuente: Propia

3.4.1.8 Módulo de finura. Método de finura por medio del aparato Blaine (INV.E.302).

Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la finura del cemento Portland por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire. Dicha finura se da en términos de superficie específica expresada como área total en centímetros cuadrados por g de cemento. A pesar de que este método haya sido usado para determinaciones de la finura de otros materiales, debe entenderse que, en general, se obtiene un valor de finura relativo en lugar de uno absoluto.

Se conoce que este método de ensayo trabaja bien para cemento. Sin embargo, el usuario debe desarrollar su criterio para determinar la confiabilidad del método en la medición de finura de cementos con densidad

o porosidad diferentes de aquellas asignadas al material de referencia estándar No. 114 del National Institute of Standards and Technology –NIST. Los valores establecidos en unidades SI deben ser considerados como la norma.

Esta norma no involucra las debidas precauciones de seguridad que se deben tomar para la manipulación de materiales y equipos aquí descritos, ni establece pautas al respecto para el desarrollo de cada proceso en términos de riesgo y seguridad industrial.

Consiste en hacer pasar una cantidad determinada de aire a través de una capa de cemento de porosidad definida. La cantidad y el tamaño de los poros existentes en dicha capa, son función del tamaño de las partículas y determinan el gasto del aire a través de la capa. [19]

3.4.1.9 Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (I.N.V.E 230–07)

Esta norma describe el procedimiento que se deben seguir, para la determinación de los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción de carreteras.

Esta norma se aplica a los agregados de origen natural o artificial, incluyendo los agregados ligeros y no es aplicable a los tamaños de partículas menores de 6.3mm (1/4”) o mayores de 63 (2 1/2”).

El ensayo de índice de aplanamiento consiste en dos operaciones sucesivas de tamizado. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones di/Di. Cuando no se disponga de tamices de barras paralelas se pueden utilizar el calibrador tradicional de espesor, para separar las partículas planas.

El ensayo de índice de alargamiento consiste en dos operaciones sucesivas. En primer lugar, mediante el uso de tamices, se divide la muestra en fracciones di/Di. Cada fracción se analiza utilizando el calibrador de alargamiento, para separar las partículas largas.

3.4.1.10 Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados (I.N.V.E 227-07)

Esta norma describe el procedimiento para determinar el porcentaje, en masa o por conteo de una muestra de agregado grueso compuesta por partículas fracturadas que cumplen con los requisitos específicos. Los valores deben expresarse en unidades SI. [20]

Algunas especificaciones contienen requisitos relacionados a un porcentaje de partículas fracturadas en agregados gruesos. Uno de los propósitos de este requisito es incrementar la resistencia al corte incrementando la fricción entre partículas en mezclas de agregado ligadas o no ligadas. Otro propósito es dar estabilidad a los agregados usados en tratamientos superficiales y proporcionar mayor fricción y textura para agregados usados en capas superficiales de pavimento. Este método proporciona un procedimiento estandarizado para determinar la aceptabilidad de los agregados gruesos con respecto a esos requisitos.

Las especificaciones difieren en el número de caras fracturadas requeridas en una partícula fracturada, y también difieren en cual criterio utilizar, si el porcentaje en peso o el porcentaje por conteo de partículas. Si la especificación no lo define con claridad, utilice el criterio de al menos una cara fracturada y calcule el porcentaje en peso. [20]

3.4.2. Ensayos exigidos por INVIAS al material cementante.

Los ensayos necesarios para caracterizar el cemento mencionados por el INVIAS son:

3.4.2.1 Densidad del cemento hidráulico (INV.E-307)

Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico. Su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de las mezclas de concreto.

La densidad del cemento hidráulico está definida como la masa de un volumen unitario de los sólidos. La determinación de la densidad de cemento hidráulico consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier. [21]

3.4.2.2 Tiempo de fraguado del cemento hidráulico método del aparato de Vicat (INV.E-305).

Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat. Los valores dados en unidades SI deben ser considerados como la norma, los valores en paréntesis son informativos. (Figura 8)



Figura 8. Tiempo de fraguado del cemento hidráulico método del aparato de Vicat

Fuente: Propia

Se presentan dos métodos de prueba; Método A es el método de ensayo de referencia usando el aparato de Vicat normalizado, operado manualmente, mientras que el método B, permite el uso de una máquina automática de Vicat, que tiene que demostrar características aceptables, de acuerdo con los requisitos de calificación de este método.

Este método de ensayo proporciona un medio para determinar el cumplimiento con un límite especificado para tiempo de fraguado Vicat. El tiempo de fraguado medido por este método no necesariamente proporciona los mismos resultados que el tiempo de fraguado de la pasta de cemento hidráulico medido por otros métodos, o el tiempo de fraguado del mortero u hormigón. [21]

3.4.2.3 Consistencia normal del cemento (INV.E-310).

Esta norma tiene por objeto establecer el método de ensayo para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico mediante el aparato de Vicat o determinar la cantidad de agua requerida para preparar pastas de cemento hidráulico, de consistencia normal, para su posterior ensayo.

La consistencia se refiere a la movilidad relativa de una pasta de cemento o mortero recién mezclado o bien a su capacidad de fluir. Durante el ensayo de cemento, se mezclan pastas de consistencia normal, misma que se define por una penetración de 10 ± 1 mm de la aguja de Vicat, mientras se mezclan morteros para obtener ya sea una relación agua-cemento fija o para producir una cierta fluidez dentro de un rango dado. La fluidez se determina en una mesa de fluidez tal como se describe en la norma ASTM C 230. Ambos métodos, el de consistencia normal y el de la prueba de fluidez sirven para regular los contenidos de agua de las pastas y morteros respectivamente, que serán empleados en pruebas subsecuentes. Ambos permiten comparar distintos ingredientes con la misma penetración o fluidez. [23]

3.4.2.4 Verificación de la resistencia mecánica del concreto preparado con cemento hidráulico (INV.E-410)

Este ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tanto cilindros moldeados como núcleos extraídos y se limita a concretos con un peso unitario superior a 800 kg/m³ (50 lb/pie³). El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados o a núcleos, a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de éste.

Los resultados de este ensayo se pueden usar como base para el control de calidad de las operaciones de dosificación, mezclado y colocación del concreto; para el cumplimiento de especificaciones y como control para evaluar la efectividad de aditivos y otros usos similares.

Se debe tener cuidado en la interpretación del significado de las determinaciones de la resistencia a la compresión mediante este método de ensayo, por cuanto la resistencia no es una propiedad intrínseca fundamental del concreto elaborado con determinados materiales. Los valores obtenidos dependen del tamaño y forma del espécimen, de los procedimientos de mezclado, de los métodos de muestreo, moldes y fabricación, así como de la edad, temperatura y condiciones de humedad durante el curado. [22]

Las variables que afectan la resistencia a la compresión del concreto son [22]:

- ❖ Calidad y cantidad de los materiales componentes del concreto (cemento, agregados y agua).
- ❖ Método de elaboración, colocación y curado del concreto.

- ❖ Acción del medio ambiente (temperatura, humedad y agentes químicos).
- ❖ Edad del concreto.
- ❖ Método de ensayo (forma y dimensiones de la probeta, velocidad de carga, etc.)

3.4.2.5 Norma Técnica Colombia (NTC -2017) – Adoquines de Concreto para Pavimentos

Esta norma establece los requisitos para adoquines de concreto, no reforzados, y sus piezas complementarias, aptos para construir pavimentos de adoquines de concreto para: tráfico peatonal, tráfico vehicular sobre llanta neumática (incluyendo patios de puertos y de terminales de carga, aeropuertos, terminales de transporte, estaciones de servicio, bodegas, etc.), y cargas estáticas distribuidas (de almacenamiento a granel).

3.4.2.6 Resistencia a la flexo tracción (módulo de rotura) (NTC -2017)

Los resultados del ensayo se obtendrán usando una prensa con una capacidad de carga de 20 kN, la carga se debe aplicar a una velocidad tal que produzca un aumento en el esfuerzo cercano a 0,5 MPa/s, o sea a un tiempo de ejecución del ensayo de 10 s para 5 MPa. Las muestras a ensayar estaban húmedas en equilibrio con el ambiente, recomendándose un periodo de almacenamiento de no más de 4 días en laboratorio, con circulación natural de aire alrededor de las probetas. (Figura 9)

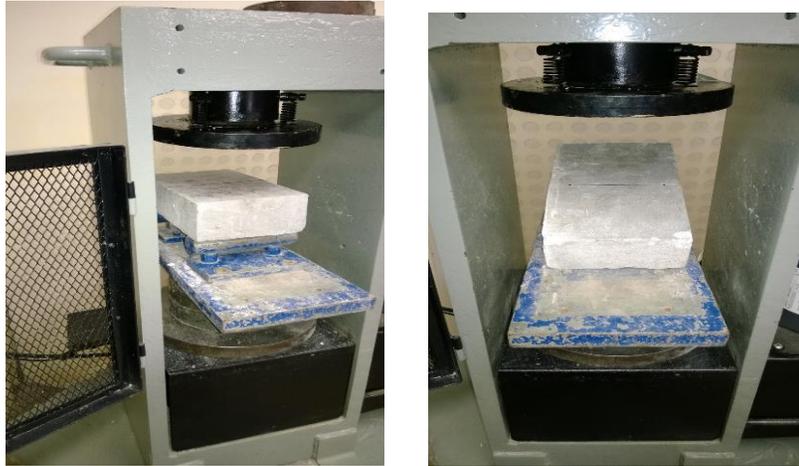


Figura 9. Resistencia a la flexotracción (M_r)

Fuente: Autor

Previo al ensayo es necesario tener determinada el área total y el área neta de cada adoquín. Se define como área neta aquella que queda comprendida entre los chaflanes. La probeta se ubica en la máquina de manera que su cara de desgaste quede en un plano horizontal y que sus ejes principales coincidan con las placas de la prensa.

La carga se aplica sin impactos y de manera uniforme hasta el límite en que la carga no pueda ser sostenida. La máxima lectura se anota en el registro. La resistencia a la compresión de cada unidad se calcula dividiendo la carga máxima anotada por el área neta del adoquín.

3.4.2.7 Absorción de agua y densidad (NTC -2017)

Los especímenes de la muestra se deben secar simultáneamente en un horno ventilado a una temperatura entre 100 °C y 115°C, Hasta obtener una masa seca (M_s) constante. Una vez obtenida su masa seca (M_s) los especímenes se deben retirar del horno y dejar enfriar a temperatura ambiente, para someterlos al proceso de saturación. El proceso de

saturación consiste en sumergir los especímenes durante $24 \text{ h} \pm 2\text{h}$ dentro de un recipiente de agua a una temperatura entre $15 \text{ }^\circ\text{C}$ y 27°C , de manera que quede una altura de agua sobre su volumen, entre 25 mm y 50 mm. (Figura 10)



Figura 10.Absorción de agua y densidad

Fuente: Propia

Luego de este periodo de saturación se deben pesar los especímenes sumergidos en agua suspendidos mediante un alambre para obtener su masa inmersa en agua y suspendida (M_a). Luego se debe retirar del agua y dejar escurrir por un minuto, colocándolos en una malla metálica. Se debe secar el agua superficial con un paño seco y pesar inmediatamente para obtener su masa saturada (húmeda) (M_h).

La absorción de agua (A_a) del total de espécimen se calcula dividiendo la diferencia entre la masa saturada (M_h) y la masa seca (M_s) entre su masa seca (M_s), multiplicando por cien. Con una aproximación de 0,1 por ciento.

La densidad (D) del espécimen seco se calcula dividiendo la masa seca (M_s) entre la diferencia de la masa saturada (M_h) y su masa inmersa en agua y suspendida (M_a) multiplicando por mil.

3.4.2.8 Resistencia a la abrasión (NTC -5147)

La resistencia por desgaste se usó un equipo especial de chorro de arena capaz de entregar una presión controlada de 7 kg/cm^2 , provisto de una pistola terminada en una boquilla de $6.35 \pm 0.02 \text{ mm}$ de diámetro interior. Como abrasivo se utiliza arena de sílice de tamaño comprendido entre 0.85 y 0.60 mm .

Las muestras se ensayan en condición saturada y seca superficialmente. El ensayo se realiza aplicando el chorro de arena perpendicular a la superficie de la muestra, a una distancia de $76 \pm 2.5 \text{ mm}$ de la boquilla, con una presión de aire de $60 \pm 1 \text{ lb/pl}^2$; el flujo de abrasivo debe ser de $600 \pm 25 \text{ g/min}$ y la duración del ensayo de 1 minuto.

El ensayo se repite en un mínimo de 8 puntos diferentes de la superficie. La determinación del volumen del material extraído se hace llenando las cavidades con arcilla para modelar de densidad conocida. El resultado se expresa como el volumen de material extraído por unidad de superficie, aproximado a $0.01 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$.

3.5. CENIZA

Las cenizas volantes son los residuos sólidos que se obtienen por precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases de combustión de los quemadores de centrales termoeléctricas alimentadas por carbones pulverizados. Se utilizan como adiciones para concreto. (Figura 11)



Figura 11.Cenizas Volantes

Fuente: Propia

Por ser las cenizas volantes un subproducto industrial, debe tenerse especial cuidado en comprobar su regularidad, mediante el oportuno control de recepción de los diferentes suministros, a fin de comprobar que las posibles variaciones de su composición no afecten al hormigón fabricado con ellas. [24]

3.5.1. Clasificación de las cenizas volantes

La clasificación de las cenizas volantes, se determina con base a la composición química que está adquiriera dependiendo del tipo de carbón quemado para producirse. [24]

Las cenizas volantes se clasifican en: Clase N, Clase F, Clase C.

Clase N: Puzolanas naturales, calcinadas o crudas, que cumple con los requisitos indicados en la norma NTC 3493, de origen geotérmico, ígneo-volcánico como las puzolanas clásicas italianas, portuguesas y españolas.

Clase F: normalmente producidas por la quema del carbón antracítico o bituminoso, esta clase de cenizas volantes consta de propiedades puzolánicas y cumple con las especificaciones de la NTC 3493.

Clase C: es producida a partir de carbón lignítico o sub bituminoso, y además de poseer propiedades puzolánicas, cuenta con algunas propiedades cementantes. Algunas cenizas volantes de la clase C pueden tener contenidos de cal, mayores al 10%.

3.6. ADOQUINES

Los adoquines de concreto son elementos prefabricados macizos, elaborados con una mezcla de arena, piedra, agua y cemento a través de un proceso industrial de vibro-compresión en moldes. Las formas y colores de estos productos pueden ser muy diferentes; se utilizan como capa de rodadura en todo tipo de pavimentos. [10] (figura 12)



Figura 12. Adoquines

Fuente: Propia

3.6.1. Clasificación y uso

La clasificación se realiza por la resistencia a la flexión, de la siguiente forma:

Clase A: Uso industrial y tránsito pesado: se usa en zonas sometidas a grandes cargas de tránsito pesado como puertos, aeropuertos, patios de maniobras en zonas industriales, terminales de autobuses, calles o avenidas principales.

Clase B. Uso en tránsito liviano: Para uso en calles secundarias con tránsito vehicular liviano.

Clase C. Uso peatonal: Para uso exclusivo de zonas peatonales, espacios públicos.

4. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La investigación propone la verificación de normas de calidad de este material para el aprovechamiento como agregado en la preparación de mezclas de concreto hidráulico para adoquines.

Con el propósito de cumplir los objetivos propuestos es necesaria la aplicación de una metodología en etapas descrita a continuación:

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES EMPLEADOS

Se describen los ensayos que fueron ejecutados para llevar a cabo la caracterización mecánica de los distintos materiales que fueron empleados, conjuntamente para la verificación de la mezcla de concreto finalmente preparada.

4.2. MATERIALES GRANULARES

Los recursos para la obtención de los diferentes materiales que fueron requeridos para efectuar este proyecto, fueron suministrados por el proyecto de Investigación del grupo DECOR de la facultad de ingeniería Civil de la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, proyecto radicado en la Dirección General de Investigaciones de esta institución. Con cofinanciación de Ecopetrol, ICP bajo el acta de cooperación. N°2 del convenio macro 5211508.

4.3. CLASIFICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

En el proceso de investigación se realizó los ensayos mediante la resolución del año 2007 exigidos por el instituto nacional de vías (INVIAS), a materiales granulares y la norma técnica colombiana (NTC) adoquines de concreto para pavimentos.

Los ensayos necesarios para la caracterizar los agregados pétreos y la verificación de la resistencia mecánica de adoquines se mencionan a continuación:

4.3.1. Agregado fino

- ❖ Granulometría de agregados gruesos y finos (INV.E-213-07).
- ❖ Gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV.E-222-07).
- ❖ Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (NTC-92).
- ❖ Equivalente de arena de suelos y agregados finos - (INV-E-133-07)
- ❖ Contenido aproximado de materia orgánica en arenas usadas en la preparación de morteros o concreto-(INV.E-212-07).

4.3.2. Agregado grueso

- ❖ Granulometría de agregados gruesos y finos (INV.E-213-07).
- ❖ Gravedad específica y absorción de los agregados gruesos (INV. E- 223-07).
- ❖ Resistencia al desgaste de los agregados tamaños menores de 1 ½" por medio de la máquina de los ángeles (INV.E -218-07)
- ❖ Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (INV.E-230-07).

- ❖ Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados (INV.E -227-07)

4.3.3. Piedra Barichara

- ❖ Granulometría de agregados gruesos y finos (INV.E -213-07).
- ❖ Gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV.E-222-07).
- ❖ Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (NTC-92).
- ❖ Módulo de finura. Método de finura por medio del aparato Blaine (INV.E-302-07).

Teniendo en cuenta el comportamiento físico – mecánico de la piedra de Barichara como aprovechamiento del agregado grueso proveniente de las canteras de Villa Nueva, fue descartado por cuanto el desgaste de la máquina de los ángeles arrojó valores por encima del 35 %, superando los rangos permitidos por la norma INVIAS (INV.E-218-07).

Para cumplir los requisitos de gradación exigidos por la norma NTC 174 Para agregados finos se ha demostrado que los porcentajes 60%,75% - 40%,25% de material convencional - piedra Barichara, cumplen los requisitos para mezclas de concreto. Sin embargo, se harán los siguientes ensayos: [25]

Agregado fino convencional (60%,70%) – piedra Barichara (40%,25%)

- ❖ Granulometría de agregados gruesos y finos (INV. E - 213)
- ❖ Gravedad específica y absorción de los agregados finos (INV. E-222).

- ❖ Equivalente de arena de suelos y agregados finos - (INV-E-133-07)

4.4. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (INV) – MATERIAL CEMENTANTE

Un Concreto dosificado, especialmente diseñado con una relación agua/material cementante especificada debe cumplir con las siguientes recomendaciones técnicas y normas vigentes, así durante su vida útil aportara mayor durabilidad a la estructura.

4.4.1. Cemento

- ❖ densidad del cemento hidráulico (INV. E -307)
- ❖ tiempo de fraguado del cemento hidráulico método del aparato de vicat (INV. E-305)
- ❖ consistencia normal del cemento (INV. E -310)

Adicionalmente al cemento se le agregó ciertas proporciones de ceniza (5%, 10%, y 15%) para evaluar su calidad cumpliendo con las normas existentes anterior mente mencionadas.

4.5. CENIZA

Las cenizas utilizadas fueron suministradas de las locaciones petroleras, exactamente de la refinería de ECOPETROL, Fue suministrada a la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga para realizar los correspondientes estudios e identificar posibles usos para estos residuos. Se busca con este trabajo aportar alternativas para la disminución del impacto ambiental generado en el entorno por una inadecuada disposición así como también disminuir el costo en el uso del cemento al reemplazar porcentajes de cemento por ceniza. [26]

4.6. VERIFICACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL CONCRETO PREPARADO CON CEMENTO HIDRÁULICO (INV. E-410)

El ensayo consiste en aplicar una carga axial a la compresión a cilindros moldeados o a núcleos, a una velocidad de carga prescrita hasta que se presente la falla. La resistencia a la compresión del espécimen se determina dividiendo la carga aplicada durante el ensayo por la sección transversal de este. Los especímenes se prueban a los 7 días, 14 días y 28 días. [26]

Por otra parte, respecto a la relación que hay entre las siguientes resistencias a los 7 y 28 días, se utilizará la siguiente fórmula, teniendo en cuenta que es una relación aproximada, para determinar edades tempranas.

Ecuación 1. Relación de la resistencia a los 7 y 28 días.

$$R_{28} = C + KR_7$$

R_{28} = Resistencia a la compresión a los 28 días de edad en kg/cm^2

R_7 = Resistencia a la compresión a los 7 días de edad en kg/cm^2

C, K = Constantes que dependen del tipo de cemento.

Los valores de C y K para cementos tipo I colombianos se encuentran en la siguiente tabla (1):

Tabla 1. Valores de C y K para varios cementos tipo I colombianos

<i>Cemento</i>	<i>C</i>	<i>K</i>
<i>Argos</i>	36,34	1,36
<i>Boyacá</i>	39,70	1,40
<i>Cairo</i>	32,49	1,31
<i>Caldas</i>	26,51	1,43
<i>Caribe</i>	31,48	1,29
<i>Diamante B/manga</i>	15,75	1,59
<i>Diamante Cúcuta</i>	17,83	1,38
<i>Diamante Tolima</i>	45,28	1,35
<i>Nare</i>	6,03	1,50
<i>Paz del Río</i>	59,38	1,28
<i>Samper Sta. Rosa</i>	10,35	1,44
<i>Samper Siberia</i>	41,23	1,34
<i>Valle</i>	29,22	1,50

Fuente: DE GUZMAN, DIEGO AUTOR SANCHEZ. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana, 2001.

4.7. Aditivo sikafluid

Es un aditivo líquido para concreto, color café, que permite la obtención de mezclas fluidas sin el empleo de agua en exceso, además mejora las resistencias a todas las edades y disminuye la permeabilidad.

Para las mezclas de concreto utilizaremos una Dosificación: 500 gr. por bulto de cemento de 50 kg. Para un concreto fluido. (Figura 13)



Figura 13.Aditivo sikafluid

Fuente: Autor

4.8. NORMA TÉCNICA COLOMBIA (NTC -2017) – ADOQUINES DE CONCRETO PARA PAVIMENTOS

Los adoquines son elementos, de concreto prefabricado utilizados como material de acabado para la construcción de superficies para tránsito peatonal y pavimentos de tráfico vehicular sobre llanta neumática.

Estos adoquines no están diseñados para pavimentos que requieran soportar cargas puntuales (estáticas o dinámicas), tráfico de vehículos con llantas metálicas, orugas, llantas con cadenas o taches, u otros tipos de tráfico altamente abrasivos.

La clasificación, aplicación y requisitos físicos de los adoquines se hará de acuerdo a lo establecido en los siguientes ensayos.

Para el muestreo se preparan 5 especímenes de (25 cm * 15 cm * 7 cm) para cada ensayo según la norma técnica colombiana (NTC -2017). Tabla (12)

4.8.1. Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura (Mr))

Los adoquines de concreto deberán cumplir los requisitos a la flexo tracción o módulo de rotura (Mr) establecidos en la tabla (2).

Tabla 2. Requisitos de resistencia a la flexotracción

Módulo de rotura (Mr) a los 28 días mínimo (MPa)		Longitud de la huella (lh) Máximo mm
Promedio de 5 adoquines	Individual	Promedio de 5 adoquines
5,0	4,2	-
4,2	3,8	23

Fuente: Tomado: http://app.idu.gov.co/espec_tecnicas/Capitulo_7/701-11.pdf

El módulo de rotura (Mr) se ha especificado a los 28 días. No es recomendable utilizar los adoquines antes de alcanzar la resistencia.

4.8.2. Resistencia a la abrasión.

El valor promedio de la longitud de la huella de cinco especímenes no podrá ser superior a 23 mm. Para el muestreo se tomaran cinco muestras donde se deben evaluar los siguientes parámetros: apariencia, mediciones, absorción de agua (Aa%), densidad (D), longitud de huella (lh) y módulo de rotura (Mr).

4.8.3. Absorción de agua y densidad

Los adoquines deben tener una absorción de agua (Aa%) no superior al 7 por ciento como valor promedio para los especímenes de la muestra.

4.9. DOSIFICACIÓN DE LA MEZCLA TESTIGO

Se trabajó con una dosificación de concreto hidráulico con relación Agua/Cemento A/C de 0.38. Las dosificaciones de piedra Barichara se ajustan de acuerdo al porcentaje de finos.

Los pasos generales que se siguieron para la dosificación de la mezcla son los que se mencionan a continuación.

4.9.1. Selección del asentamiento

Para la selección del asentamiento se tuvo en cuenta la consistencia semi seca y el tipo de estructura (pavimento con vibradores normales, fundaciones de concreto simple. Construcciones en masa voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración) para la dosificación de mezcla para concreto, se trabajó con un asentamiento de 3,5 cm como muestra la tabla (7) de asentamiento recomendado para concreto de diferentes grados de manejabilidad del ICPC.

Tabla 3.Asentamiento recomendado para concretos

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de Compactación
Muy Seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación.	Con vibradores de formaleta; concretos de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
Semi-Seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple. Losas poco reforzadas	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas con vibración
Media (plástica)	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones	Colocación manual	Secciones simplemente reforzadas con vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos o muy reforzados	Bombeo	Secciones bastante reforzadas con vibración
Muy Húmeda	150-200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo embudo tremie	Secciones altamente reforzadas sin vibración
Super Fluida	Más de 200	Elementos muy esbeltos	Autonivelante, autocompactante	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuadas para vibrarse

Fuente: RIVERA, Gerardo Antonio. Concreto Simple. *Editorial Universidad del Cauca*, 1992.

4.9.2. Selección del tamaño máximo de agregado

El tamaño máximo para la dosificación de la mezcla, se obtuvo de la granulometría realizada al agregado grueso convencional. Se trabajó con un tamaño máximo nominal de 1" (25,4 mm).

4.9.3. Estimación de los contenidos de agua y aire

La estimación de contenido de agua y aire se obtuvo de la tabla (8) (agua en kilogramo por metro cubico de concreto para los tamaños máximos de agregados indicados del ICPC) y el criterio para seleccionar de manera adecuada, estuvo en función del TMN del agregado y del asentamiento.

Tabla 4. Agua en kg por metro cubico de concreto

Asentamiento (cm)	CONCRETOS SIN AIRE INCLUIDO						
	Tamaños maximos nominales (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0,0 - 2,5	185	180	165	160	140	135	125
3,2 - 5,0	205	200	185	180	160	155	145
5,5 - 7,5	215	21	190	185	170	165	155
8,0 - 10,0	225	215	200	195	175	170	165
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	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3

Asentamiento (cm)	CONCRETOS CON AIRE INCLUIDO						
	Tamaños maximos nominales (mm)						
	10	13	19	25	38	50	75
0,0 - 2,5	175	170	155	150	135	130	120
3,2 - 5,0	180	175	165	160	145	140	135
5,5 - 7,5	190	185	175	170	155	150	145
8,0 - 10,0	200	190	180	175	165	155	150
10,5 - 15,0	210	195	185	180	170	160	155
15, 5 - 18,0	215	205	190	185	175	165	160
% Contenido de aire	8	7	6	5	4.5	4	3.5

Fuente: RIVERA, Gerardo Antonio. Concreto Simple. *Editorial Universidad del Cauca*, 1992.

El valor seleccionado del contenido de agua de mezclado para un asentamiento de 3,5cm y un tamaño máximo del agregado de 1" sin aire incluido fue de 181,69 kg/m³.

4.9.4. Determinación de la resistencia de diseño

Para poder calcular la resistencia de diseño se tuvo en cuenta la tabla (9) (coeficiente de variación para diferentes controles del ICPC) para poder determinar el grado de control (bueno) y la clase de operación (laboratorio) y de esta misma forma con la figura (19) del ICPC (resistencia promedio de diseño para diferentes valores de $f'c$ y v) se obtuvo el valor de 312 kg/cm².

Tabla 5. Coeficiente de variación para diferentes controles

CLASE DE OPERACIÓN	GRADO DE CONTROL			
	Excelente	Bueno	Regular	Pobre
Construcción en general	10	15-20	15-20	20
Laboratorio	5	5-7	7-10	10

Fuente: DE GUZMAN, DIEGO AUTOR SANCHEZ. Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana, 2001.

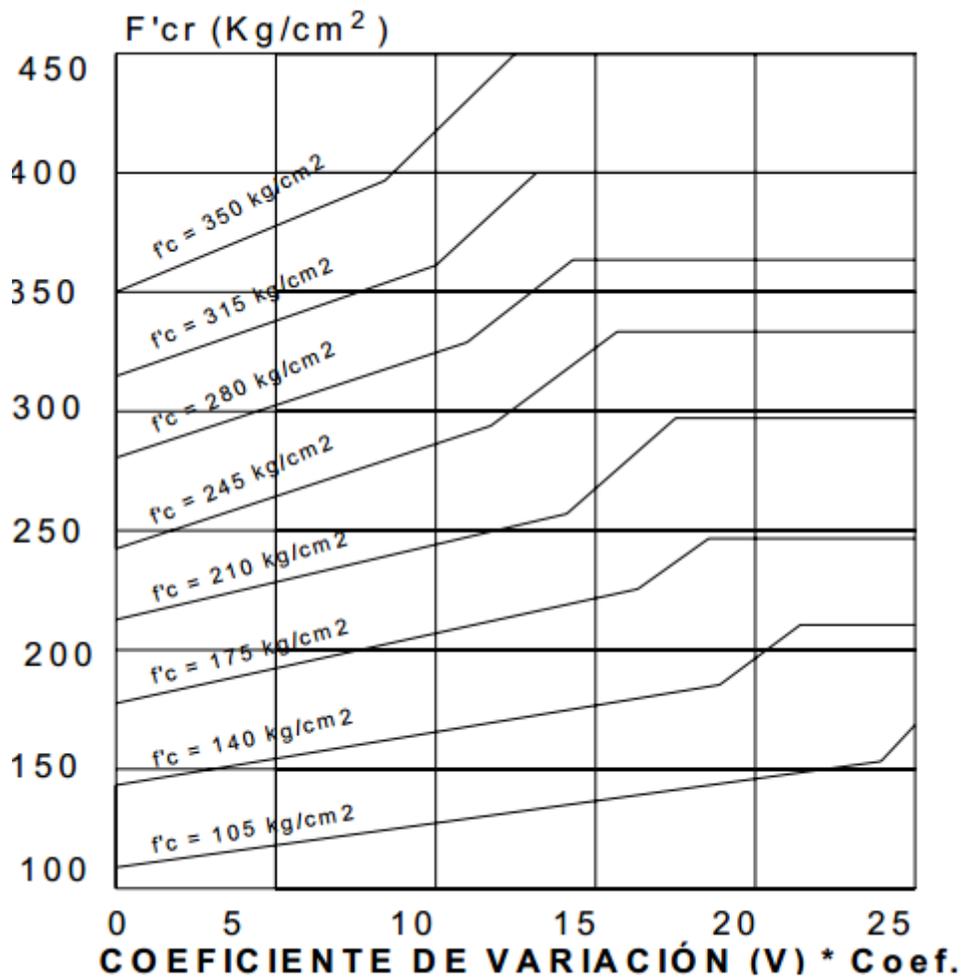


Figura 14. Resistencia promedio de diseño

Fuente: RIVERA, G. A. (1992). Concreto Simple. Editorial Universidad del Cauca.

4.9.5. Selección de la relación agua-cemento y contenido de cemento.

Para calcular el contenido de cemento de la mezcla, fue necesario determinar antes, la relación agua/cemento, determinada básicamente por los requisitos de resistencia y la relación agua/ cemento máxima permisible de concreto sin incluir aire.

Se seleccionó una relación agua/cemento de 0.3851 relación absoluta por peso. Una vez obtenida dicha relación A/C y el contenido de agua de mezclado, se procedió a calcular el contenido de cemento por metro cúbico (m³) de concreto, dividiendo el contenido de agua entre la relación A/C.

4.9.6. Estimación del contenido de agregado grueso y fino.

Para seleccionar la proporción de agregados se llevó a cabo en el laboratorio el ensayo de masa unitaria seca y compuesta (MUSCC) para diferentes porcentajes de agregado grueso y fino, esto debidamente combinado en proporciones como lo demuestra la siguiente tabla (6).

Tabla 6. Porcentajes de agregado grueso y fino para el ensayo de masa Unitaria seca y compuesta (MUSCC)

Mezcla	M1	M2	M3	M4	M5
Agregado grueso (%)	70	60	45	40	30
Agregado fino (%)	30	40	55	60	70

Fuente: Propia

Una vez tomados los datos se siguió con el cálculo del peso específico compuesto (PE_C), el cual se detalla en la siguiente fórmula:

Ecuación 2. Fórmula peso específico.

$$PE_C = \frac{\%T \cdot PE_T + \%A \cdot PE_A + \%C \cdot PE_C}{100\%}$$

Dónde:

$\%T$ = Porcentaje de agregado grueso

PE_T = Peso específico del agregado grueso

$\%A$ = Porcentaje de agregado fino

PE_A = Peso específico del agregado fino

$\%C$ = Porcentaje de ceniza

PE_C = Peso específico de la ceniza

Finalmente con el peso específico compuesto (PE_C) y con la masa unitaria seca compacta y compuesta ($MUSC_C$) de cada una de las mezclas de agregados se halla el porcentaje de vacíos como se muestra en la ecuación (3). Una vez obtenidos los valores se procede escoger la mezcla con menor % de vacíos.

Ecuación 3. Porcentaje de vacíos.

$$\% \text{ Vacíos} = \frac{PE_C - MUSC_C}{PE_C}$$

4.9.7. Ajuste por humedad de los agregados.

Hay que tener en cuenta la humedad de los agregados para pesarlos correctamente. Generalmente los agregados están húmedos y a su peso seco debe sumarse el peso del agua que contienen, tanto absorbida como superficial.

EL agua que va a agregarse a la mezcla de prueba debe reducirse en una cantidad igual a la humedad libre que contiene el agregado, esto es, humedad total menos absorción.

4.10. PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS DE CONCRETO

Para llevar a cabo los objetivos de la investigación con los resultados obtenidos del análisis completo de los agregados. Se trabajó con una dosificación de concreto hidráulico con relación Agua/Cemento A/C de 0.38.

Por lo tanto, se realizarán 24 muestras de forma cilíndrica que se describen a continuación tabla (7), representando el porcentaje de su contenido para formar una mezcla de concreto hidráulico, para así obtener una verificación de su resistencia a la compresión a los 28 días.

Tabla 7.Dosificación 1 - Contenido de una mezcla de concreto hidráulico

DOSIFICACIÓN 1 (50% 40%)						
MUESTRA	Cemento	Ceniza	Piedra Barichara	Arena natural	Triturado	# Cilindros
Testigo	100%	0%	0%	100%	100%	6
M1	95%	5%	40%	60%	100%	6
M2	90%	10%	40%	60%	100%	6
M3	85%	15%	40%	60%	100%	6
						24

Fuente: Propia

Se procede a pesar las cantidades de material requeridas para cada una de las dosificaciones, los materiales a utilizar en este procedimiento son 24 moldes de 15cm de diámetro y 30cm de altura Figura (15). Una pala, palustre, probeta, bandeja de mezcla, agua, varilla compactadora. Se deposita primeramente en la zona de mezcla el agregado fino y se le hace una abertura donde se le agrega el cemento con los porcentajes de ceniza y se empieza a mezclar para luego vaciar el agregado hasta obtener una mezcla homogénea, por último se adiciona el agua y se mezcla hasta tener un concreto en estado plástico adecuado. Figura (16)



Figura 15.Moldes cilíndricos para concreto

Fuente: Propia



Figura 16.Mezcla de concreto

Fuente: Propia

Los moldes son cubiertos en su interior con ACPM, mediante una brocha para que cuando se adicione el concreto este no se pegue cuando se endurezca. El concreto se coloca en tres capas en los moldes usando el método de apisonado, cada una de las capas se empareja y se apisona con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente evitando que la varilla golpee el fondo y al apisonar las capas superiores se aplica la fuerza necesaria para que la varilla solamente atraviese la respectiva capa figura (17). Una vez colmado el molde se golpea a los lados cinco veces, y se enrasa con la varilla. Se dejan los moldes en un lugar seco a temperatura ambiente para el curado del concreto. Después de 24 horas se dispone a desencofrar y sumergir los especímenes en agua durante los 7, 14 y 28 días para posteriormente ser fallados mediante el ensayo de verificación de la resistencia mecánica del concreto preparado con cemento hidráulico.



Figura 17.Proceso de elaboración de los especímenes

Fuente: Propia

Los resultados de la resistencia a la compresión de las muestras a los 28 días presentaron resistencias inferiores a la de diseño (280 kg/cm^2). Por lo cual se procedió a utilizar una nueva dosificación - 2 (75% material convencional - 25% material de Barichara) tabla (8), pero los resultados a la compresión fueron nuevamente inferiores a la de diseño (280 kg/cm^2). Figura (18)

Tabla 8.Dosificación 2 - Contenido de una mezcla de concreto hidráulico

DOSIFICACIÓN 2 (75% 25%)						
MUESTRA	Cemento	Ceniza	Piedra Barichara	Arena natural	Triturado	# Cilindros
Testigo	100%	0%	0%	100%	100%	6
M1	95%	5%	25%	75%	100%	6
M2	90%	10%	25%	75%	100%	6
M3	85%	15%	25%	75%	100%	6
						24

Fuente: Propia



Figura 18. Resistencia a la compresión

Fuente: Propia

Con el fin de aumentar la resistencia se procederá a utilizar una nueva dosificación - 3 (75% material convencional - 25% material de Barichara), agregando un aditivo líquido para concreto “Sikafluid” que por cada bulto de cemento se debe tomar una dosis de 250 gr reduciendo la cantidad de agua que permite la obtención de mezclas fluidas a edades tempranas aumentado su resistencia a la compresión. Tabla (9)

Tabla 9. Dosificación 3 - Contenido de una mezcla fluida de concreto hidráulico

DOSIFICACIÓN 3 (75% 25%)							
MUESTRA	Cemento	Ceniza	Piedra Barichara	Arena natural	Triturado	Aditivo (MI)	# Cilindros
Testigo	100%	0%	0%	100%	100%	0	6
M1	95%	5%	25%	75%	100%	2,7	6
M2	90%	10%	25%	75%	100%	2,7	6
M3	85%	15%	25%	75%	100%	2,7	6
							24

Fuente: Propia

Una vez obtenido los resultados de los ensayos a compresión se obtuvo para la muestra (M1) valores superiores de la resistencia de diseño, mientras que la muestra (M2) arrojó valores cercanos y la muestra (M3) arrojó valores inferiores. Debido a lo anterior se procede a la preparación de los adoquines para la dosificación - 3 (75 %- 25%) para las siguientes muestras (M1 y M2) que contiene el 5%, 10 % de ceniza como porcentaje del cemento y 270 ml de aditivo líquido. Figura (19)

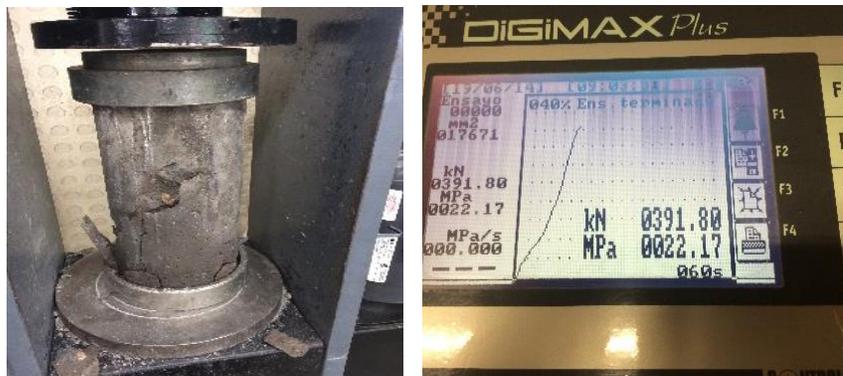


Figura 19. Resistencia a la compresión dosificación 3

Fuente: Propia

4.11. PROCEDIMIENTO PARA LA PREPARACIÓN DE LOS ADOQUINES

En este estudio se elaboraron dos tipos de mezclas (M1 y M2) como se muestra en la tabla (10), utilizando arena de río y material proveniente de la explotación de la piedra de Barichara. En ambos casos, se hace necesaria la verificación de normas de calidad de este material para el aprovechamiento en el sector constructivo.

Tabla 10.Dosificación de una mezcla de concreto para adoquines

Dosificación para (5) adoquines por muestra							
muestra	cemento (Kg)	triturado (Kg)	arena (Kg)	arena Barichara (Kg)	agua (Kg)	ceniza (Kg)	aditivo (Kg)
M1 - 5%	25,89	38,59	36,92	12,31	8,92	1,36	2,6
M2 - 10%	24,53	38,44	36,77	12,26	8,93	2,73	2,5

Fuente: Propia

Una vez realizado los ensayos de caracterización del material en estudio y la dosificación de mezcla se procedió a pesar las cantidades requeridas de cada material en estudio, arena de rio, residuos del material provenientes de la piedra de Barichara, agua, aditivo, cemento y los porcentajes de ceniza. Para evaluar la dosificación propuesta se obtuvieron 20 especímenes para cada tipo muestra.

Para ello se siguió la norma colombiana NTC - 2017, preparando adoquines con una relación agua-cemento de 0.38, los cuales son desencofrados de sus moldes y colocados en una pileta para curado por inmersión.

Para la preparación de la mezcla se prosiguió a utilizar un molde de madera figura (20) de 25cm x 15cm x 7cm, palustre, probeta, bandeja de mezcla, agua y varilla compactadora para morteros. Se deposita primeramente en la bandeja de mezcla el agregado fino, grueso y cemento con los porcentajes de ceniza, se mezclan hasta lograr homogeneidad en la mezcla, por último se adiciona el agua y el aditivo sikafluid hasta lograr un concreto en estado plástico adecuado. Figura (21)



Figura 20. Molde para especímenes de un adoquín

Fuente: Propia



Figura 21. Mezcla de concreto fluida

Fuente: Propia

El concreto se coloca en tres capas en los moldes usando el método de apisonado, cada una de las capas se empareja y se apisona con 25 golpes suaves de varilla distribuidos uniformemente evitando que la varilla golpee el fondo Figura (22). Una vez colmado el molde se golpea a los lados cinco veces suavemente y se enrasa con el palustre. Se dejan los moldes en un lugar seco a temperatura ambiente para el curado del concreto figura (23). Después de 24 horas se dispone a desencofrar y sumergir los especímenes en agua durante las 24hs, 28 días para posteriormente ser fallados mediante

los ensayos módulo de rotura (M_r) Figura (23), Resistencia a la abrasión Figura (24), Absorción de agua y densidad. Arrogando valores que cumplen lo establecido en la NTC -2017 y con las especificaciones técnicas para la instalación de adoquines de concreto para superficies de tránsito peatonal y vehicular.



Figura 22.Elaboración adoquines de concreto

Fuente: propia



Figura 23.Especímenes de concreto

Fuente: Propia



Figura 24. Resistencia a la flexo-tracción – Modulo de rotura (M_r)

Fuente: Propia



Figura 25. Resistencia a la abrasión

Fuente: Propia

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZACION MATERIALES GRANULARES

De acuerdo con la metodología establecida en este estudio el material seleccionado está conformado por agregado grueso, agregado fino 60% y 75% convencional , 40% y 25 % por agregado fino proveniente de talleres de explotación de la piedra Barichara y 5%,10% y 15% como porcentajes del cemento.

Se hace necesaria la verificación de normas de calidad de estos materiales para el aprovechamiento del tallado de la piedra de Barichara en la industria de la construcción.

5.1.1. Granulometría de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E-213)

Con el fin de realizar el análisis granulométrico requerido en la norma del INVIAS, se obtuvo la clasificación de los agregados de acuerdo al tamaño de las partículas para clasificar los materiales gruesos y finos usados para las dosificaciones de mezcla de concreto.

Para ello se realizó granulometría al material agregado grueso, Agregado Fino y sus proporciones (60 - 40%, 75% - 25%) agregado convencional – piedra de Barichara. Dichas granulometrías se muestran en las tablas (11, 12,13 y 14)

Tabla 11. Granulometría del Agregado Gueso

Agregado Gueso	
Muestra (g)	8222
Tamaño Máximo Nominal	1"

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Error	Peso Retenido Corregido	% Corregido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
1	25,0	0,00	0,00	0,11	0,00	0,00	0,00	100
¾	19,0	1718,00	20,90		1721,13	20,93	20,93	79,07
½	12,5	4257,80	51,79		4260,93	51,82	72,76	27,24
3/8	9,50	1715,20	20,86		1718,33	20,90	93,66	6,34
4	4,75	483,60	5,88		483,60	5,88	99,54	0,46

Fuente: Propia

Tabla 12. Granulometría del Agregado Fino

Agregado Fino	
Muestra (g)	3157,4
Módulo de Finura	2,85

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,75	189,20	5,99	5,99	94,01
8	2,36	378,00	11,97	17,96	82,04
10	1,18	93,00	2,95	20,91	79,09
30	0,60	1109,60	35,14	56,05	43,95
50	0,30	1006,20	31,87	87,92	12,08
100	0,15	247,40	7,84	95,76	4,24
200	0,075	105,60	3,34	99,10	0,90
Pasa 200		28,49	0,90	100,00	0,00
Suma		3157,40			

Fuente: Propia

En la tabla 13 se encuentra la Granulometría del Agregado convencional 60% - Barichara 40%. En la Tabla 14 podemos citar la Granulometría Agregado convencional 75% - Barichara 25%.

Tabla 13. Granulometría del Agregado Convencional 60% - Barichara 40%

Agregado	
Muestra Convencional (g)	1800
Muestra Barichara (g)	1200
Total Muestra (g)	3000
Módulo de Finura	2,25

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,75	83,00	2,77	2,77	97,24
8	2,36	385,60	12,85	15,62	84,39
10	1,18	330,80	11,03	26,65	73,36
30	0,60	295,40	9,85	36,50	63,51
50	0,30	616,20	20,54	57,04	42,97
100	0,15	878,00	29,27	86,31	13,70
200	0,075	325,60	10,85	97,16	2,85
Pasa 200		85,40	2,85	100,01	0,00
Suma		3000			

Fuente: Propia

Tabla 14. Granulometría Agregado Fino 75%-25%

Tamiz	Diámetro (mm)	Peso Retenido (g)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa
4	4,75	114,4	3,58	3,58	96,43
8	2,36	454,2	14,19	17,77	82,23
16	1,18	435	13,59	31,36	68,64
30	0,60	440,4	13,76	45,13	54,88
50	0,30	876,2	27,37	72,51	27,49
100	0,15	466,4	14,58	87,08	12,92
200	0,075	333,3	10,42	97,50	2,50
Pasa 200		80,1	2,50	100,00	0,00
Suma		3200			

Fuente: Propia

5.1.2. Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos (I.N.V.E 222-07)

Los resultados de Gravedad específica y absorción de la arena de los Agregados Finos están indicados en las Tablas (15 ,16 y 17). Aquí se practicaron 3 ensayos, los resultados de cada uno se exponen a continuación:

Tabla 15. Resultados de Gravedad Específica y Absorción de Arena

Agregado	Fino
Ensayo N°.	1
Peso frasco seco y limpio (g)	146,60
Peso arena en condición SSS (g)	500,00
Peso Frasco + Arena + Agua (g)	942,20
Peso seco de la Arena (g)	490,80
Gravedad Especifica de la arena	2,50
Porcentaje de absorción	1,87%
Densidad Aparente	2,55

Fuente: Propia

Tabla 16. Agregado Fino (60%-40%).

Agregado	60% Convencional – 40% Barichara
Ensayo N°.	2
Peso frasco seco y limpio (g)	144,80
Peso arena en condición SSS (g)	500,00
Peso Frasco + Arena + Agua (g)	926,60
Peso seco de la Arena (g)	480,40
Gravedad Especifica de la arena	2,27
Porcentaje de absorción	4,00%
Densidad Aparente	2,36

Fuente: Propia

Tabla 17. Agregado Fino (75%-25%).

Agregado	Fino (75%-25%)
Ensayo N°.	3
Peso frasco seco y limpio (g)	145
Peso arena en condición SSS (g)	462,6
Peso Frasco + Arena + Agua (g)	918
Peso seco de la Arena (g)	449,6
Gravedad Especifica de la arena	2,46
Porcentaje de absorción	3%
Densidad Aparente	2,53

Fuente: Propia

5.1.3. Gravedad Específica Y Absorción De Agregados Gruesos (I.N.V.E 223-07)

Los resultados de Gravedad específica y absorción de la arena de los Agregados Gruesos están indicados en la Tabla 18. Aquí se practicó 1 ensayo, los resultados se exponen a continuación:

Tabla 18. Agregado Procedencia Rio

Agregado	Procedencia Rio
Ensayo N°.	1
Peso grava en condición SSS (g)	4050,4
Peso grava sumergida (g)	2523
Peso seco de la grava (g)	4018,2
Gravedad Especifica de la grava	2,63
Porcentaje de absorción	0,80
Densidad Aparente	2,69

Fuente: Propia

5.1.4. Resistencia al Desgaste de los Agregados de Tamaños menores de 37,5 Mm (1 1/2") por medio de la Máquina de los Ángeles (I.N.V.E 218-07).

Para el desarrollo del ensayo se utilizó la granulometría tipo A, se utilizaron 11 esferas, una muestra de 5000 gramos y se empleó una gradación tipo B. Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Porcentaje de desgaste de cada material

Gradación Tipo B	
N° Esferas	11
Muestra (g)	5000

Tamiz	Masa (g)
½	2500
3/8	2500
Total Muestra	5000

Tamiz	Muestra	% de Degaste
N° 12	4014,4	19,712 %

Fuente: Propia

5.1.5. Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos (I.N.V.E 133-07)

Los resultados del equivalente de arena de suelos y agregados finos se encuentran en la Tabla 20, la cual se cita a continuación:

Tabla 20. **Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos**

Agregado Fino	
Arena	3
Arcilla	4,05
Equivalente de Arena	
E. A	74,07
E. A (Redondeado)	75

Agregado (60% Finos - 40% Barichara)	
Arena	2
Arcilla	4,4
Equivalente de Arena	
E. A	45,45
E. A (Redondeado)	46
Agregado (75% Finos - 25% Barichara)	
Arena	2,4
Arcilla	4,26
Equivalente de Arena	
E. A	56,34
E. A (Redondeado)	57

Fuente: Propia

5.1.6. Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E 217-07).

La masa unitaria y el porcentaje de vacíos de agregados finos se citan en la Tabla 21 y el porcentaje de agregados gruesos en la tabla 22; que encontramos a continuación:

Tabla 21. Agregado Fino

Masa Unitaria Suelta		Masa Unitaria Compactada	
Muestra 1 (g)	7420,20	Muestra 1 (g)	8172,20
Muestra 2 (g)	7459,20	Muestra 2 (g)	8263,20
Muestra 3 (g)	7479,20	Muestra 3 (g)	8384,20
Promedio (g)	7452,87	Promedio (g)	8273,20
Masa Unitaria Suelta (g/cm³)	1,31	Masa Unitaria Compactada (g/cm³)	1,46
Aumento de Masa Unitaria 10%			

Fuente: Propia

Tabla 22. Agregado Grueso:

Masa Unitaria Suelta		Masa Unitaria Compactada	
Muestra 1 (g)	7229,20	Muestra 1 (g)	7826,20
Muestra 2 (g)	7155,2	Muestra 2 (g)	7757,20
Muestra 3 (g)	7230,2	Muestra 3 (g)	7808,20
Promedio (g)	7204,87	Promedio (g)	7797,20
Masa Unitaria Suelta (g/cm³)	1,27	Masa Unitaria Compactada (g/cm³)	1,38
Aumento de Masa Unitaria 8%			

Fuente: Propia

5.1.7. Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos (I.N.V. E 212-07)

Los resultados de la prueba de contenido de materia orgánica (I.N.V. E 212-07) se hallan en la Tabla 23, que está a continuación:

Tabla 23. Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos

Muestra (g)	600
Material que pasa por el tamiz N° 4. (g)	568

Fuente: Propia

5.1.8. Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (I.N.V.E 230-07)

En la Tabla 24 se presentan los resultados obtenidos de ensayo según la norma INVIAS (I.N.V.E -230-07) para determinar el índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados.

Tabla 24. Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados

Pasa (Pulg.)	Retenido (Pulg.)	% Retenido Granulometría	Masa Inicial (g)	Índice Aplanamiento	Índice Alargamiento
$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	20,93	4260,93	322,60	18,80
$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	51,82	1718,33	666,40	392,20
$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	20,90	483,60	229,60	327,20
$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	5,70	468,80	46,40	161,60

Índice de Aplanamiento			
$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	$\frac{1}{4}$ "
8%	39%	47%	10%

Índice de Alargamiento			
$\frac{3}{4}$ "	$\frac{1}{2}$ "	$\frac{3}{8}$ "	$\frac{1}{4}$ "
0,4%	23%	70%	34%

Promedio Ponderado (Índices)	
% Alargamiento	26,53
% Aplanamiento	31,61

Fuente: Propia

5.1.9. Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados (I.N.V.E 227-07)

Los resultados del Porcentaje de caras fracturadas en los agregados, del ensayo (I.N.V.E 227-07), se encuentran en la Tabla 25 que se encuentra a continuación.

Tabla 25. Porcentaje de Caras Fracturadas en los Agregados

Cara fracturada de agregados gruesos				
Tamaño Máximo Nominal		Peso de la Muestra (g)	Peso Con material cara fracturadas (g)	Porcentaje retenido de la gradación original (%)
(mm)	(Pulg.)			
19,05	$\frac{3}{4}$	1721,13	1620,13	94,13
12,70	$\frac{1}{2}$	4260,93	3902,33	91,58
9,53	03-ago	1718,30	1581,73	92,05
6,35	$\frac{1}{4}$	468,80	434,20	92,62
Total		8169,16	7538,39	370,38

Fuente: Propia

5.1.10. Humedad natural de los agregados gruesos y finos

Los resultados de la prueba de humedad natural de los agregados gruesos y finos, se hallan en la Tabla 26 que se encuentra a continuación:

Tabla 26. Humedad Natural de los Agregados Gruesos y Finos

Humedad natural de agregado grueso	
Recipiente + Material en estado natural (g)	1343,0
Recipiente + Material seco (g)	1339,6
Recipiente (g)	288,4
Masa muestra en estado natural (g)	1054,6
Masa muestra seca (g)	1051,2
Humedad Natural (%)	0,32

Fuente: Propia

5.2. CARACTERIZACION MATERIAL CEMENTANTE

De acuerdo a la metodología establecida en este estudio se realizaron los ensayos exigidos por la norma INVIAS para el material cementante utilizado para la preparación de mezclas de concreto hidráulico.

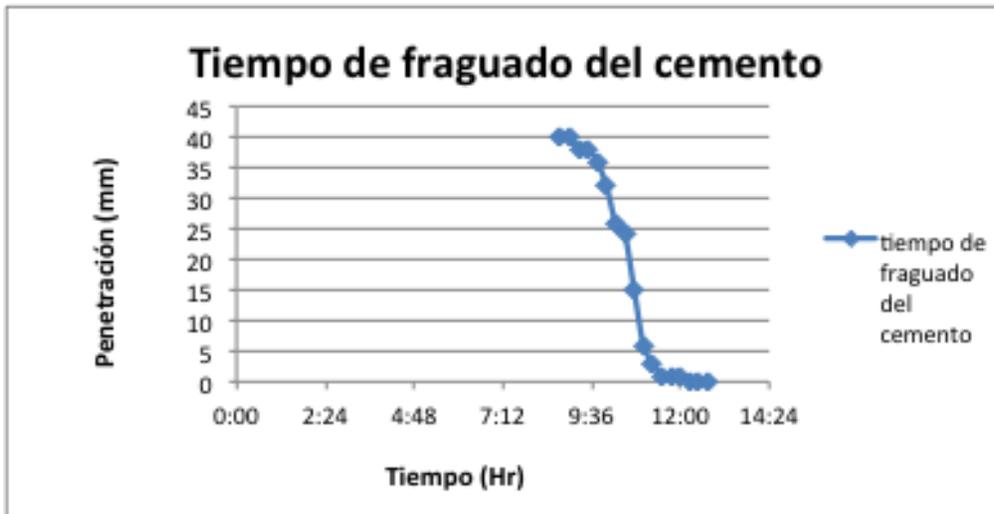
5.2.1. Densidad del Cemento Hidráulico (I.N.V.E 307-07)

La densidad del cemento fue calculada según la norma INVIAS 307, este valor es necesario ya que se utiliza en la dosificación de las mezclas de concreto. Para lograr esto se verifico que todos los bultos pertenecieran al mismo lote de cemento, se seleccionó una pequeña cantidad de uno de los bultos y se realizó el ensayo. El promedio de la densidad específica del cemento $2,90 \text{ g/cm}^3$

5.2.2. Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico, Método del Aparato de Vicat (I.N.V.E 305-07)

En la figura (26, 27, 28 y 29) se presentan los resultados obtenidos del ensayo según la norma INVIAS 305 para determinar el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.

Figura 26. Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico Método del Aparato de Vicat



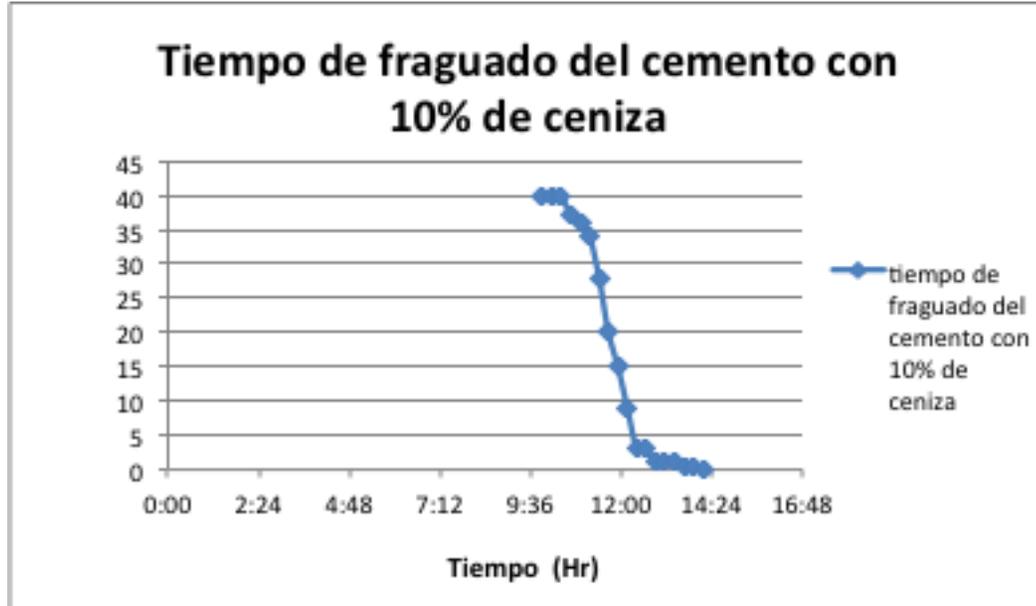
Fuente: Propia

Figura 27. Tiempo de Fraguado del Cemento con 5% de Ceniza



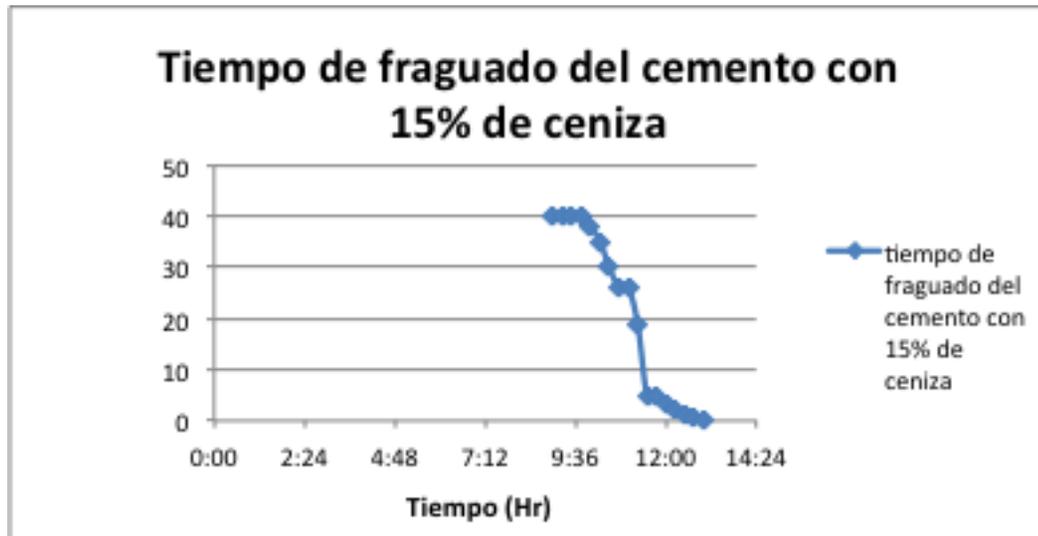
Fuente: Propia

Figura 28. Tiempo de Fraguado del Cemento con 10% de Ceniza



Fuente: Propia

Figura 29. Tiempo de Fraguado del Cemento con 15% de Ceniza



Fuente: Propia

5.2.3. Consistencia Normal del Cemento (I.N.V. E 310-07)

Los resultados del ensayo de Consistencia normal del cemento se encuentran referenciados en las tablas (27, 28 y 29) que se encuentran a continuación:

Tabla 27. Consistencia Normal del Cemento + 5% de Ceniza

Cemento + 5% de Ceniza	
Agua (ml)	Penetración (mm)
135	13
130	7
133	10

Fuente: Propia

Tabla 28. Consistencia Normal del Cemento + 10% de Ceniza

Cemento + 10% de Ceniza	
Agua (ml)	Penetración (mm)
128	10
127	8
129	11

Fuente: Propia

Tabla 29. Consistencia Normal del Cemento + 15% de Ceniza

Cemento + 15% Ceniza	
Agua (ml)	Penetración (mm)
124	9
124	8
122	10

Fuente: Propia

5.3. RESULTADOS DOSIFICACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA CONCRETO

Los datos iniciales para la preparación de la mezcla de concreto se muestran en la tabla (30) que se cita a continuación:

Tabla 30. Dosificación para 1 m³ concreto

Dosificación para 1 m³ concreto							
muestra	cemento (Kg)	triturado (Kg)	arena (Kg)	arena Barichara (Kg)	agua (Kg)	ceniza (Kg)	aditivo (Kg)
testigo	519,19	736,54	939,52	0	169,95	0	52
5%	493,23	735,11	703,27	234,42	169,98	25,96	49,4
10%	467,27	732,18	700,47	233,49	170,02	51,92	46,7
15%	441,31	725,29	693,88	231,29	170,13	77,89	44,1

Fuente: propia

La cantidad de material para las dosificaciones de las muestras y los resultados de la resistencia proporción 60%-40% se exponen en las Tablas (31 y 32) que se presenta a continuación:

Tabla 31. Dosificación para Concreto 60% - 40

Dosificación para 6 Cilindros por muestra (h =30 , r =15)						
muestra	cemento (Kg)	triturado (Kg)	arena (Kg)	arena Barichara (Kg)	agua (Kg)	ceniza (Kg)
testigo	18,77	26,81	41,80	0,00	7,07	0,00
5%	17,83	23,38	17,90	11,93	5,41	0,94
10%	16,89	23,29	17,82	11,88	5,41	1,88
15%	15,95	23,07	17,66	11,77	5,41	2,81

Fuente: propia

Tabla 32. Resistencia Proporción 60%-40%

Muestra	Diametro (m)	Altura (m)	Area (m ²)	Carga (N)	Esfuerzo (N/m ²)	R7- (MPa)	R7- (kg/cm ²)	C	K	R28- (Kg/cm ²)	R-esperada (kg/cm ²)
Testigo	0,153	0,305	0,0184	377240	2,1E+07	20,52	205,185	15,75	1,59	341,994	280
Testigo	0,154	0,3	0,0186	294540	1,6E+07	15,81	158,13	15,75	1,59	267,176	280
Testigo	0,154	0,303	0,0186	344380	1,8E+07	18,49	184,887	15,75	1,59	309,72	280
Testigo	0,155	0,303	0,0189	399280	2,1E+07	21,16	211,604	15,75	1,59	352,201	280
5%-ceniza	0,147	0,294	0,0170	194590	1,1E+07	11,47	114,656	15,75	1,59	198,053	280
5%-ceniza	0,15	0,303	0,0177	211370	1,2E+07	11,96	119,611	15,75	1,59	205,931	280
5%-ceniza	0,157	0,296	0,0194	255640	1,3E+07	13,21	132,05	15,75	1,59	225,71	280
5%-ceniza	0,155	0,304	0,0189	268480	1,4E+07	14,23	142,285	15,75	1,59	241,983	280
5%-ceniza	0,152	0,303	0,0181	231060	1,3E+07	12,73	127,335	15,75	1,59	218,213	280
10%-ceniza	0,158	0,297	0,0196	223910	1,1E+07	11,42	114,201	15,75	1,59	197,329	280
10%-ceniza	0,152	0,302	0,0181	194020	1,1E+07	10,69	106,923	15,75	1,59	185,757	280
10%-ceniza	0,153	0,305	0,0184	198690	1,1E+07	10,81	108,07	15,75	1,59	187,581	280
10%-ceniza	0,152	0,305	0,0181	162210	8939239	8,94	89,3924	15,75	1,59	157,884	280
10%-ceniza	0,15	0,303	0,0177	229130	1,3E+07	12,97	129,661	15,75	1,59	221,911	280
15%-ceniza	0,152	0,303	0,0181	129410	7131662	7,13	71,3166	15,75	1,59	129,143	280
15%-ceniza	0,154	0,302	0,0186	138230	7421146	7,42	74,2115	15,75	1,59	133,746	280
15%-ceniza	0,148	0,292	0,0172	123660	7188130	7,19	71,8813	15,75	1,59	130,041	280
15%-ceniza	0,15	0,294	0,0177	111130	6288672	6,29	62,8867	15,75	1,59	115,74	280
15%-ceniza	0,146	0,292	0,0167	111370	6652312	6,65	66,5231	15,75	1,59	121,522	280

Fuente: propia

La cantidad de material para las dosificaciones de las muestras y los resultados de la resistencia proporción 75%-25% se exponen en las Tablas (33 y 34) que se presenta a continuación:

Tabla 33. Dosificación para Concreto 75% - 25%

Dosificación para 6 Cilindros por muestra (h =30 , r =15)						
muestra	cemento (Kg)	triturado (Kg)	arena (Kg)	arena Barichara (Kg)	agua (Kg)	ceniza (Kg)
testigo	16,51	23,43	29,88	0,00	5,41	0,00
5%	15,69	23,38	22,37	7,46	5,41	0,83
10%	14,86	23,29	22,28	7,43	5,41	1,65
15%	14,04	23,07	22,07	7,36	5,41	2,48

Fuente: propia

Tabla 34. Resistencia Proporción 75%-25%

Muestra	Diametro (m)	Altura (m)	Area (m ²)	Carga (N)	Esfuerzo (N/m ²)	R7- (MPa)	R7- (kg/cm ²)	C	K	R28- (Kg/cm ²)	R- esperada (kg/cm ²)
Testigo	0,153	0,305	0,0184	300230	1,6E+07	16,33	163,298	15,75	1,59	275,394	280
Testigo	0,151	0,305	0,0179	213230	1,2E+07	11,91	119,071	15,75	1,59	205,072	280
Testigo	0,152	0,303	0,0181	270360	1,5E+07	14,90	148,993	15,75	1,59	252,649	280
Testigo	0,151	0,304	0,0179	280360	1,6E+07	15,66	156,557	15,75	1,59	264,676	280
Testigo	0,151	0,304	0,0179	265020	1,5E+07	14,80	147,991	15,75	1,59	251,055	280
5%-ceniza	0,15	0,294	0,0177	193150	1,1E+07	10,93	109,301	15,75	1,59	189,538	280
5%-ceniza	0,152	0,305	0,0181	237770	1,3E+07	13,10	131,033	15,75	1,59	224,092	280
5%-ceniza	0,151	0,303	0,0179	233520	1,3E+07	13,04	130,401	15,75	1,59	223,087	280
5%-ceniza	0,151	0,305	0,0179	200310	1,1E+07	11,19	111,856	15,75	1,59	193,601	280
5%-ceniza	0,152	0,305	0,0181	265590	1,5E+07	14,64	146,364	15,75	1,59	248,469	280
10%-ceniza	0,15	0,304	0,0177	139630	7901442	7,90	79,0144	15,75	1,59	141,383	280
10%-ceniza	0,151	0,304	0,0179	139610	7796017	7,80	77,9602	15,75	1,59	139,707	280
10%-ceniza	0,152	0,302	0,0181	187100	1E+07	10,31	103,109	15,75	1,59	179,693	280
10%-ceniza	0,15	0,29	0,0177	167530	9480259	9,48	94,8026	15,75	1,59	166,486	280
10%-ceniza	0,148	0,29	0,0172	147020	8546004	8,55	85,46	15,75	1,59	151,631	280
15%-ceniza	0,152	0,302	0,0181	155020	8543005	8,54	85,4301	15,75	1,59	151,584	280
15%-ceniza	0,15	0,29	0,0177	119430	6758356	6,76	67,5836	15,75	1,59	123,208	280
15%-ceniza	0,15	0,301	0,0177	123760	7003383	7,00	70,0338	15,75	1,59	127,104	280
15%-ceniza	0,15	0,293	0,0177	134850	7630949	7,63	76,3095	15,75	1,59	137,082	280
15%-ceniza	0,151	0,3	0,0179	114670	6403332	6,40	64,0333	15,75	1,59	117,563	280

Fuente: propia

La cantidad de material para las dosificaciones de las muestras y los resultados de la resistencia proporción 75%-25% con aditivo presente se exponen en las Tablas (35 y 36) que se presenta a continuación:

Tabla 35. Dosificación para Concreto 75% - 25%

Dosificación para 6 Cilindros por muestra (h =30 , r =15)							
muestra	cemento (Kg)	triturado (Kg)	arena (Kg)	arena Barichara (Kg)	agua (Kg)	ceniza (Kg)	aditivo (Kg)
testigo	16,51	23,43	29,88	0,00	5,41	0,00	1,70
5%	15,69	23,38	22,37	7,46	5,41	0,83	1,56
10%	14,86	23,29	22,28	7,43	5,41	1,65	1,48
15%	14,04	23,07	22,07	7,36	5,41	2,48	1,40

Fuente: propia

Tabla 36. Resistencia Proporción 75%-25% con Aditivo Presente

muestra	Diametro (m)	Altura (m)	Area (m ²)	Carga (N)	Esfuerzo (N/m ²)	R7- (MPa)	R7- (kg/cm ²)	C	K	R28- (Kg/cm ²)	R- esperada (kg/cm ²)
Testigo	0,151	0,304	0,0179	391800	2,2E+07	21,88	218,787	15,75	1,59	363,621	280
Testigo	0,15	0,305	0,0177	413880	2,3E+07	23,42	234,208	15,75	1,59	388,141	280
Testigo	0,15	0,297	0,0177	315810	1,8E+07	17,87	178,712	15,75	1,59	299,902	280
Testigo	0,154	0,298	0,0186	399930	2,1E+07	21,47	214,71	15,75	1,59	357,139	280
Testigo	0,152	0,305	0,0181	374760	2,1E+07	20,65	206,527	15,75	1,59	344,127	280
5%-ceniza	0,156	0,299	0,0191	324220	1,7E+07	16,96	169,629	15,75	1,59	285,46	280
5%-ceniza	0,153	0,301	0,0184	337720	1,8E+07	18,37	183,689	15,75	1,59	307,816	280
5%-ceniza	0,154	0,301	0,0186	345990	1,9E+07	18,58	185,751	15,75	1,59	311,095	280
5%-ceniza	0,153	0,305	0,0184	347010	1,9E+07	18,87	188,742	15,75	1,59	315,85	280
5%-ceniza	0,15	0,301	0,0177	312370	1,8E+07	17,68	176,765	15,75	1,59	296,807	280
10%-ceniza	0,15	0,296	0,0177	265370	1,5E+07	15,02	150,169	15,75	1,59	254,518	280
10%-ceniza	0,154	0,305	0,0186	258070	1,4E+07	13,85	138,55	15,75	1,59	236,044	280
10%-ceniza	0,149	0,296	0,0174	274840	1,6E+07	15,76	157,622	15,75	1,59	266,369	280
10%-ceniza	0,15	0,296	0,0177	241620	1,4E+07	13,67	136,729	15,75	1,59	233,149	280
10%-ceniza	0,15	0,296	0,0177	214820	1,2E+07	12,16	121,563	15,75	1,59	209,036	280
15%-ceniza	0,149	0,295	0,0174	191310	1,1E+07	10,97	109,717	15,75	1,59	190,201	280
15%-ceniza	0,15	0,294	0,0177	204850	1,2E+07	11,59	115,921	15,75	1,59	200,065	280
15%-ceniza	0,154	0,303	0,0186	221920	1,2E+07	11,91	119,142	15,75	1,59	205,186	280
15%-ceniza	0,154	0,305	0,0186	205780	1,1E+07	11,05	110,477	15,75	1,59	191,408	280
15%-ceniza	0,152	0,305	0,0181	212250	1,2E+07	11,70	116,969	15,75	1,59	201,731	280

Fuente: propia

Los resultados de la resistencia proporción 75%-25% sin aditivo presente se exponen en la Tabla (37) que se presenta a continuación:

Tabla 37. Resistencia Proporción 75%-25% sin Aditivo Presente

muestra	Diámetro (m)	Altura (m)	Área (m ²)	Carga (N)	Esfuerzo (N/m ²)	R7- (MPa)	R7- (kg/cm ²)	C	K	R28- (Kg/cm ²)	R-esperada (kg/cm ²)
Testigo	0,152	0,303	0,0181	288380	1,6E+07	15,89	158,923	15,75	1,59	268,438	280
Testigo	0,153	0,302	0,0184	316350	1,7E+07	17,21	172,066	15,75	1,59	289,335	280
Testigo	0,152	0,305	0,0181	340370	1,9E+07	18,76	187,575	15,75	1,59	313,994	280
Testigo	0,152	0,306	0,0181	318990	1,8E+07	17,58	175,792	15,75	1,59	295,26	280
Testigo	0,155	0,304	0,0189	321740	1,7E+07	17,05	170,511	15,75	1,59	286,862	280

Tabla 38. Menor porcentaje de Vacíos

MENOR % VACIOS					
Muestra	MUSCc	Arena	Triturado	PEC	% Vacíos
Mp1	1994,29704	50	50	2,575	0,22551571
MP2	2007,30099	60	40	2,552	0,21344005
MP3	2024,32679	55	45	2,5635	0,21032698
MP4	1988,73349	40	60	2,598	0,23451367
MP5	1977,6064	30	70	2,621	0,24547638
MP6	1902,80015	70	30	2,529	0,24760769

Fuente: propia

5.4. RESULTADOS RESISTENCIA MECANICA DE ADOQUINES

La cantidad de material que contienen las dosificaciones de las muestras para la elaboración de adoquines se exponen en la Tabla (39) que se presenta a continuación:

Tabla 39. Dosificación de Concreto 75% - 25% para adoquines

Dosificación para (5) adoquines por muestra							
muestra	cemento (Kg)	triturado (Kg)	arena (Kg)	arena Barichara (Kg)	agua (Kg)	ceniza (Kg)	aditivo (Kg)
5%	25,89	38,59	36,92	12,31	8,92	1,36	2,6
10%	24,53	38,44	36,77	12,26	8,93	2,73	2,5

Los resultados de la prueba de Absorción de agua y densidad se encuentran en la Tabla (40), que se presenta a continuación:

Tabla 40. Absorción de Agua y Densidad

adoquín con 5% de ceniza						
espécimen	Ma (kg)	Mh (kg)	Ms (kg)	Aa (kg/m ³)	Aa%	D (kg/m ³)
muestra 1	3,58	6,29	5,96	122,37	5,56	2202,59
muestra 2	3,11	5,61	5,25	144,63	6,90	2096,68
muestra 3	3,58	6,18	5,86	122,95	5,45	2257,08
muestra 4	3,75	6,44	6,11	123,47	5,45	2265,48
muestra 5	3,42	5,89	5,63	105,14	4,62	2276,59

Fuente: propia

Los resultados de la prueba de Absorción de agua y densidad para el Adoquín con 10% de ceniza se encuentran en la Tabla (41), que se presenta a continuación:

Tabla 41. Adoquín con 10% de Ceniza

adoquín con 10 % de ceniza						
espécimen	Ma (g)	Mh (g)	Ms (kg)	Aa (kg/m ³)	Aa%	D (kg/m ³)
muestra 1	3180,00	5780,00	5,46	2220,98	5,90	2100,50
muestra 2	3380,00	6030,00	5,72	2273,32	5,51	2159,86
muestra 3	3480,00	6200,00	5,88	2277,25	5,38	2160,97
muestra 4	3500,00	6180,00	5,88	2303,78	5,24	2186,83
muestra 5	3370,00	6020,00	5,67	2269,56	5,12	2142,75

Fuente: propia

Los resultados de la prueba de módulo de Rotura para el Adoquín se encuentran en la Tabla (42), que se presenta a continuación:

Tabla 42. Módulo de Rotura

muestra	C max (N)	Li (mm)	ar (mm)	ai (mm)	er (mm)	Mr
5% ceniza	6170	249,5	150	150	76	5,10971
5% ceniza	6670	248,5	150	150	69	6,35922
5% ceniza	7120	249	150	150	69	4,98591
5% ceniza	6600	248	151,5	151,5	73	5,98591
5% ceniza	11470	249,5	151	151	72	5,43124
10% ceniza	4900	250	150	150	71,5	5,37180
10% ceniza	5450	253	151	151	73	5,93736
10% ceniza	6010	248,5	150	150	71	5,70230
10% ceniza	5000	248,5	150	150	74,5	5,05559
10% ceniza	5660	248,5	150	150	71,5	5,83290

Fuente: propia

Los resultados de la prueba de resistencia a la abrasión para el Adoquín se encuentran en la Tabla (43).

Tabla 43. RESISTENCIA A LA ABRASION

$\text{longitud de huella, } lh = \text{AB} + (20, Fc)$

5 % ceniza			
espécimen	lh (mm)	Fc (mm)	AB (mm)
muestra 1	21	19,8	21
muestra 2	16	19,8	16
muestra 3	24	19,8	24
muestra 4	15	19,8	15
muestra 5	23	19,8	23

lh	longitud de la huella resultante
Fc	factor de calibración
AB	longitud de huella medida

10% ceniza			
espécimen	lh (mm)	Fc (mm)	AB (mm)
muestra 1	23	19,8	23
muestra 2	17	19,8	17
muestra 3	21	19,8	21
muestra 4	23	19,8	23
muestra 5	16	19,8	16

Fuente: propia

6. ANALISIS DE RESULTADOS

6.1. CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES GRANULARES

La caracterización granulométrica del material en estudio fue determinada por tamizado utilizando la serie de tamices normal exigidos en la norma INVIAS-213, considerando como agregado grueso el material retenido en los tamices 1 ½", 1", ¾", ½", 3/8", y como agregado fino el material retenido en los tamices N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200 y fondo.

6.1.1. Granulometría de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E-213-07)

Se debe tener en cuenta que una buena granulometría es aquella que está constituida por partícula de todos los tamaños, de tal forma que los vacíos dejados por partículas de gran tamaño sean llenados por partículas de menor tamaño. Se puede analizar que en el tamiz de ½ se retuvo la mayor cantidad de material esto para la granulometría de agregado grueso, y en la granulometría de agregado fino y el combinado, fue el No. 30 y el No. 50 respectivamente. La granulometría para el agregados fino se muestran en la figura (30).

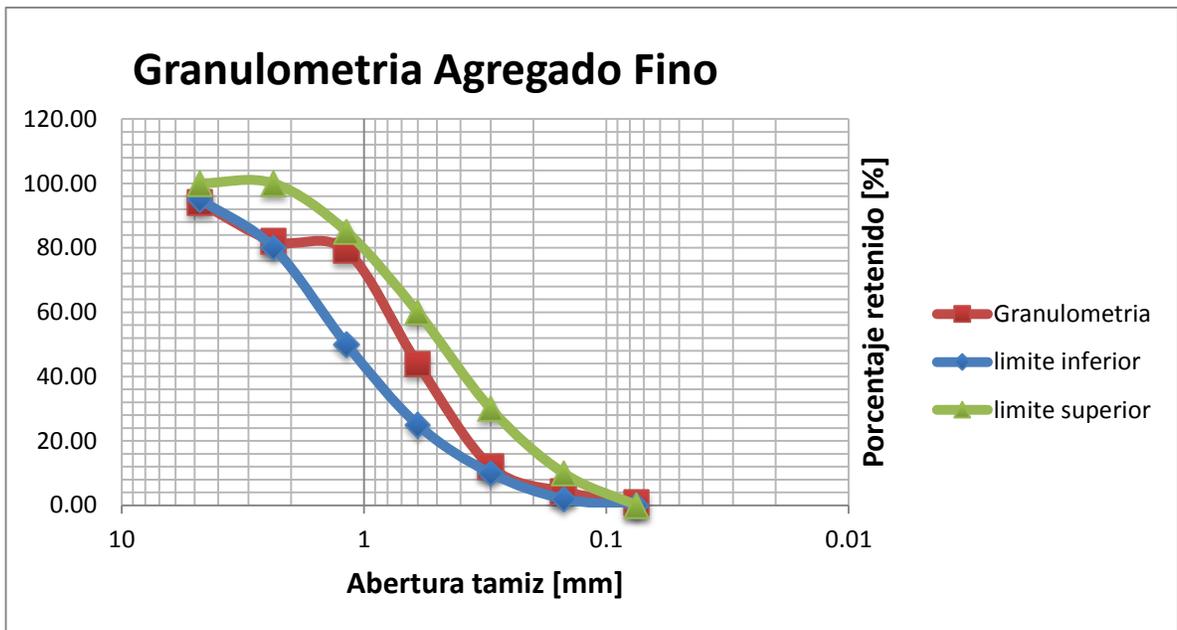


Figura 30. Granulométrica del Agregado Fino

Fuente: Propia

La granulometría del agregado fino cumple con las especificaciones de la Norma técnica colombiana NTC 174.

Al realizar los cálculos del módulo de finura se obtuvieron unos resultados de 2,85 este para el agregado fino lo que indica que es un buen material dado a que se encuentra entre los límites establecidos que varían de 2,3 a 3,1. Para el agregado fino combinado (75%-25%) el módulo de finura fue de 2,57 lo que indica que también es un material adecuado para diseñar una buena mezcla de concreto. El tamaño máximo nominal obtenido fue de 1" que en término de partículas de agregados es el tamaño promedio.

La granulometría para agregado fino en sus proporciones (60-40%, 75%-25%) agregado convencional – piedra de Barichara se muestran en las figuras (31 y 32).

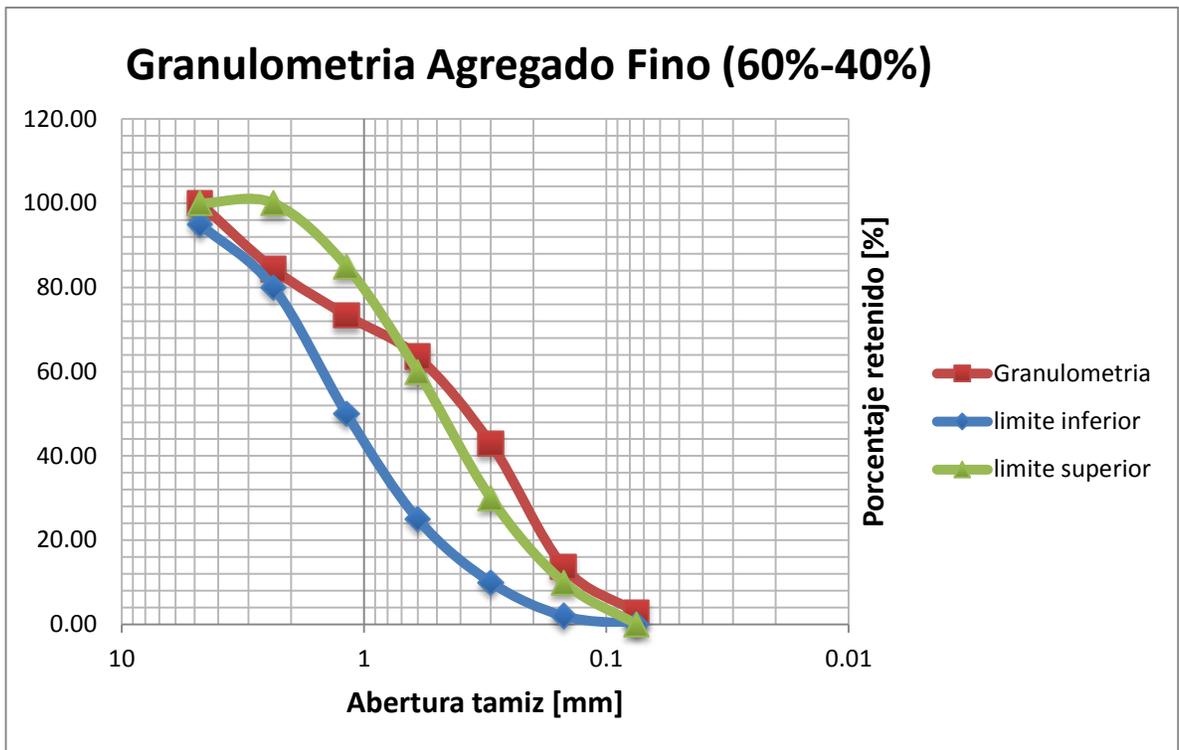


Figura 31. Granulométrica del Agregado Convencional 60% - Barichara 40%:

Fuente: Propia

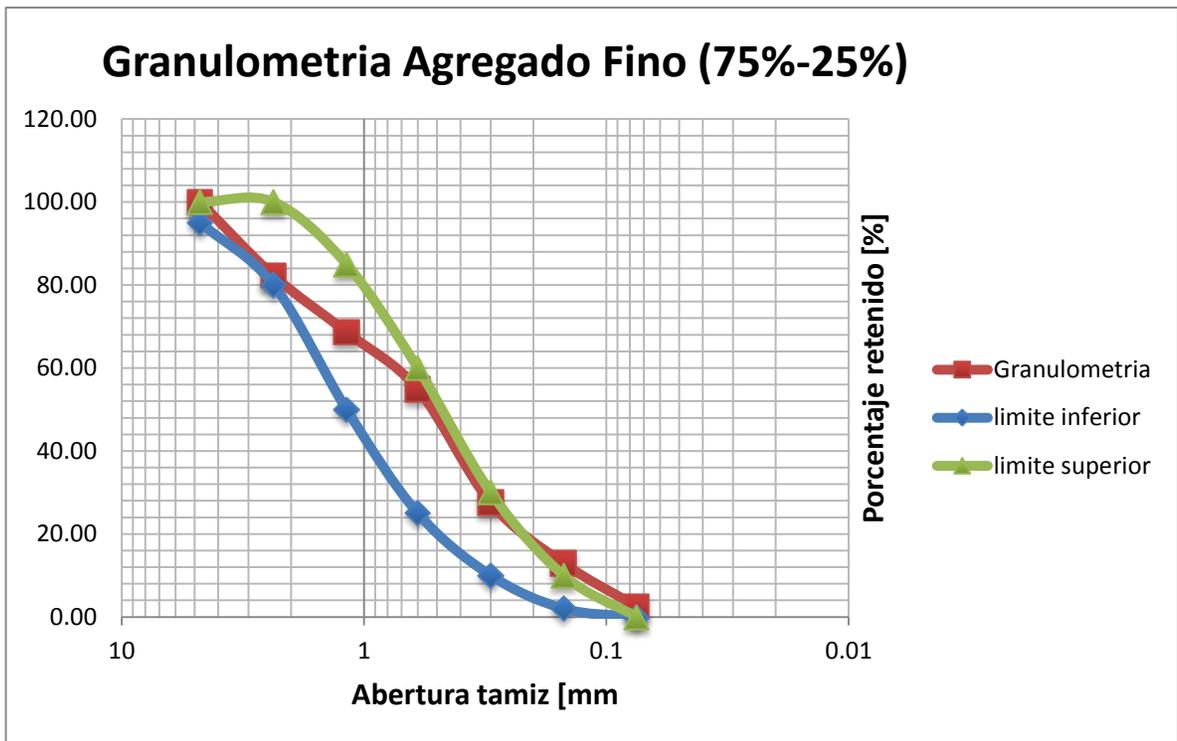


Figura 32. Granulométrica del Agregado Convencional 75% - Barichara 25%:

Fuente: Autor.

Se puede observar que la gráfica granulométrica del agregado fino (60%-40%) sobresale del límite superior de la curva establecida en la norma NTC174, por lo tanto es un material no recomendable para el diseño de mezcla; a diferencia del agregado fino (75%-25%) si cumple con las especificaciones establecidas en la norma técnica colombiana NTC174, lo que dice que si es un buen agregado para la elaboración del concreto.

Se decidió incluir las dos graficas de granulometría (60%, 40%) y (75%, 25%), para obtener un análisis granulométrico para determinar cuál porcentaje es más viable al momento de la preparación de una mezcla de concreto.

6.1.2. Gravedad Específica y Absorción de Agregados Finos (I.N.V.E 222-07)

Al analizar las muestras obtenidas se puede observar que el agregado combinado (60-40%, 75%-25%) presenta una gravedad específica de 2,29, 2,46 y el del agregado fino una gravedad específica de 2,50, que están por dentro de los rangos permitidos cuyos límites son de 2,21 a 2,67. Se puede observar que el material a utilizar está en el límite de aceptación por lo que se recomienda utilizarlo en la mezcla de concreto.

La densidad aparente para el agregado combinado (60-40%, 75%-25%) es 2,37, 2,53 y la del agregado fino de 2,55. Estos datos definen que tan poroso es el material ya que cuanto más alto sea la densidad aparente menor será los vacíos presentes en el agregado.

6.1.3. Gravedad Específica y Absorción de Agregados Gruesos (I.N.V.E 223-07)

Se puede observar que la gravedad específica obtenida fue de 2,63 que está dentro de los rangos establecidos cuyos límites van de 2,33 a 2,75, indicando que son agregados aptos para cualquier tipo de concretos en términos de su resistencia.

La densidad aparente indica cuán poroso es el material en este caso fue de 2,69. La absorción que presentaron estos agregados tanto como el combinado y el fino fueron de 4% y 1,87% respectivamente, lo que indica que los agregados están en el rango de aceptación cuyos límites varían del 0% hasta el 5%.

6.1.4. Resistencia al Degaste de los Agregados de Tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2") por medio de la Máquina de los Ángeles (I.N.V.E 218-07).

Este ensayo se hizo con el fin de obtener la resistencia al desgaste. El material utilizado proviene de la trituración de cantera. El material tuvo una gradación tipo B, la cual presentó una resistencia al degaste buena con un porcentaje de 19,17%. Dado estos resultados se concluye que el material puede ser utilizado como agregado para concreto por su buena resistencia al desgaste.

6.1.5. Equivalente de Arena de Suelos y Agregados Finos (I.N.V.E 133-07)

Después de haber realizado los cálculos, se concluye que el material que corresponde solo al agregado fino presenta un equivalente de arena del 75%, lo que es un material excelente para ser utilizado en la preparación de concreto dado a su grado alto de limpieza. Por otra parte el material combinado que contiene un (60%, 75%) de agregado fino y un (40%, 25%) de agregado de Barichara, presentan un equivalente de arena del 46%,57% que son muy bajos y podrían afectar negativamente tanto a la resistencia del concreto como a su durabilidad.

6.1.6. Masa Unitaria y Porcentaje de Vacíos de Agregados Gruesos y Finos (I.N.V.E 217-07).

Al ser compactado el material la densidad de la masa unitaria compactada aumentó, debido al proceso de compactación realizado en el material. Se puede observar que hubo un aumento de densidad o masa unitaria compactada del 10%.

El material de agregado grueso presentó un aumento en su densidad del 8% debido a que el material pasó por un proceso de compactación, lo cual causó una reducción del volumen de los vacíos.

Comparando dichos resultados se observa que los volúmenes de los vacíos de los agregados finos son menores que los de los agregados gruesos debido a que este material presenta una forma, textura y un tamaño diferente.

6.1.7. Contenido Aproximado de Materia Orgánica en Arenas Usadas en la Preparación de Morteros o Concretos (I.N.V. E 212-07)

El material presentó un nivel muy bajo de contenido orgánico, por lo que cabe resaltar que el material puede ser utilizado en la preparación de concretos hidráulicos.

6.1.8. Índice de Aplanamiento y de Alargamiento de los Agregados (I.N.V.E 230-07)

Después de haber realizado los cálculos pertinentes, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

El índice de alargamiento presentó un porcentaje del 26,53%, y el índice de aplanamiento un porcentaje del 31,61% por lo que demuestra que el agregado grueso ensayado presentó una proporción mayor de partículas aplanadas. En conclusión se puede decir que ambas partículas tanto aplanadas como alargadas están en proporciones pequeñas en el agregado por lo que no va haber problemas al momento de compactar.

6.1.9. Humedad natural de los agregados gruesos y finos

Después de haber hecho todos los cálculos pertinentes, se puede observar que el material de agregado grueso presentó un porcentaje de humedad muy baja, debido a que sus poros estaban parcialmente secos. Caso contrario ocurrió con el agregado fino debido a que presentó un porcentaje de humedad natural del 4,70%. Se concluye que al momento de hacer la mezcla, el agregado fino va aportar una cantidad representativa de agua debido a su alto porcentaje de humedad.

6.2. CARACTERIZACION MATERIAL CEMENTANTE

6.2.1. Densidad del cemento hidráulico (I.N.V.E 307-07)

El cemento utilizado tiene un porcentaje de adición de ceniza del 5, 10 y 15% respectivamente. Después de haber realizado los cálculos, se obtuvieron unos resultados para las densidades de 2,88 gr/cm³, 2,84 gr/cm³ y 2,75 gr/cm³. Por lo que se concluye que las densidades encontradas están por debajo de la teórica consultada que comúnmente es de 3gr/cm³. Esto puede deberse a la presencia de ceniza como porcentaje de adición ya que este ensayo permite entrever que entre más ceniza añadida menos será la densidad del cemento.

No obstante las densidades halladas están muy cerca a la densidad teórica por lo que es bueno para un diseño de mezcla.

6.2.2. Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico Método del Aparato De Vicat (I.N.V.E 305-07)

El fraguado es la pérdida de elasticidad que padece la pasta del cemento en un tiempo determinado después de haber sido hidratada con agua, no obstante hay muchos factores que determina el tiempo de fraguado como lo es la temperatura, la finura del cemento en otros; Para nuestro ensayo hay un factor que puede incidir en el tiempo de fraguado y es la presencia de ceniza como porcentaje del cemento que se aprecian en las siguientes figura (33).

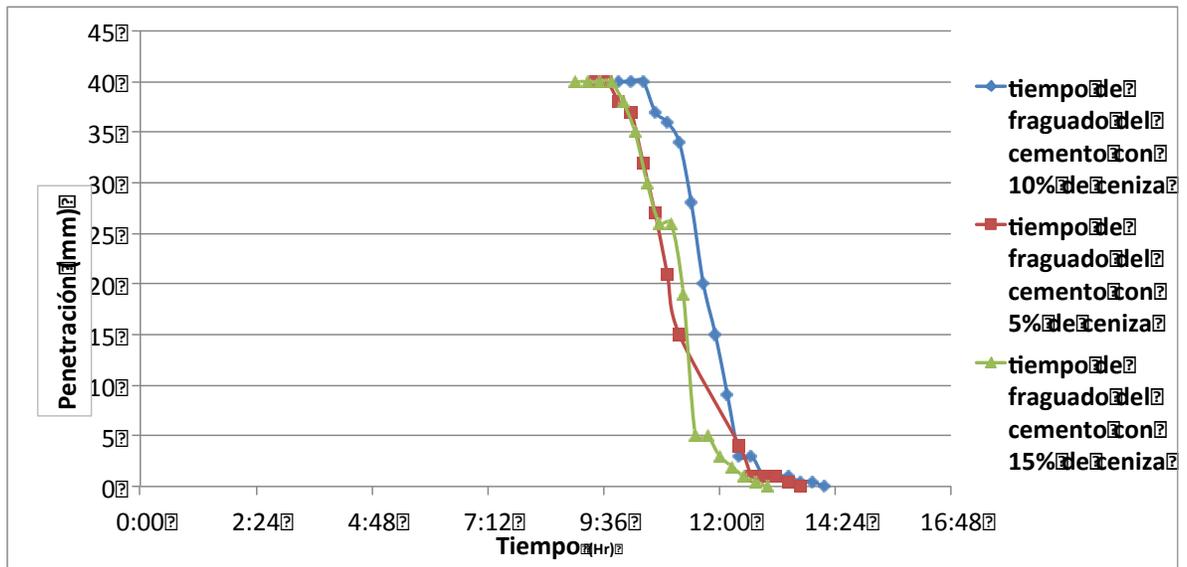


Figura 33. Tiempo de fraguado del cemento 5%, 10 %, 16 %de ceniza

Fuente: Propia

6.2.3. Consistencia Normal del Cemento (I.N.V. E 310-07)

Para la realización de este ensayo hay muchos factores a tener en cuenta como las condiciones ambientales, el tiempo empleado en la preparación de la mezcla y la presencia de ceniza como porcentaje del cemento.

Por otra parte se puede observar que la pasta con un 15% de ceniza solo necesitó de 122 ml de agua para llegar a la penetración de 10 mm. Esta cantidad de agua aumenta en un 5% y 9% para las muestra con presencia de ceniza del 10% y 5% respectivamente.

6.3. RESULTADOS DOSIFICACIÓN PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA CONCRETO

Para obtener el diseño de mezcla, se optó por hacerla en dos partes. La primera parte se hizo de acuerdo el método ICPC la cual se hizo hasta el paso 6 (cálculo del contenido del cemento), y el resto del diseño se hizo por

el método de porcentaje de vacíos. Este cambio se debe que al momento de sacar la cantidad de agregados por el módulo de finura, estaba por fuera de los límites establecidos por el ICPC Para la proporción 60% arena convencional y 40% Barichara. Con los porcentajes 75% arena convencional y 25% Barichara no presento este problema, pero se procede a seguir por el este método de vacíos ya que brinda más seguridad.

Se hizo un primer diseño de mezcla con una relación agua / cemento de 0.38 para un concreto que contenía un agregado fino que estaba compuesto por el 60% material convencional y 40% Barichara, y un segundo diseño para un concreto que contenía un agregado fino que estaba compuesto por el 75% material convencional y 25% Barichara.

El método de los vacíos consiste en hacer el ensayo de masa unitaria seca compactada a una mezcla que contiene agregado grueso y fino en diferentes porcentajes. En total se hicieron seis ensayos, y posteriormente se tomó el peso específico del agregado grueso y del agregado fino y según el porcentaje de mezcla se pasó a determinar el menor porcentaje de vacíos. Para este caso, en la mezcla de concreto que contenía el 60% de agregado convencional y 40% de Barichara fue de 60% fino y 40% grueso por otra parte para el diseño de mezcla de concreto que contenía un 75% de convencional y un 25% Barichara el porcentaje ideal que dio el menor porcentaje de vacíos fue de 55% fino y 45% grueso el cual fue utilizado para el diseño de mezcla.

Los resultados que se demuestran en las siguientes figuras (34 y 35) nos indican que al adicionar materiales no convencionales en las mezclas de concreto, generan resultados no favorables ya que su resistencia a la compresión esta por debajo de la resistencia de diseño 280 (Kg/Cm²) .

Por lo cual se procedió a utilizar un aditivo líquido para concreto “Sikafluid” que permite la obtención de mezclas fluidas aumentado su resistencia a la

compresión con el fin de obtener una dosificación idónea para formar una mezcla de concreto hidráulico para adoquines Figura (36). Las siguientes graficas representan la verificación de la resistencia a la compresión.

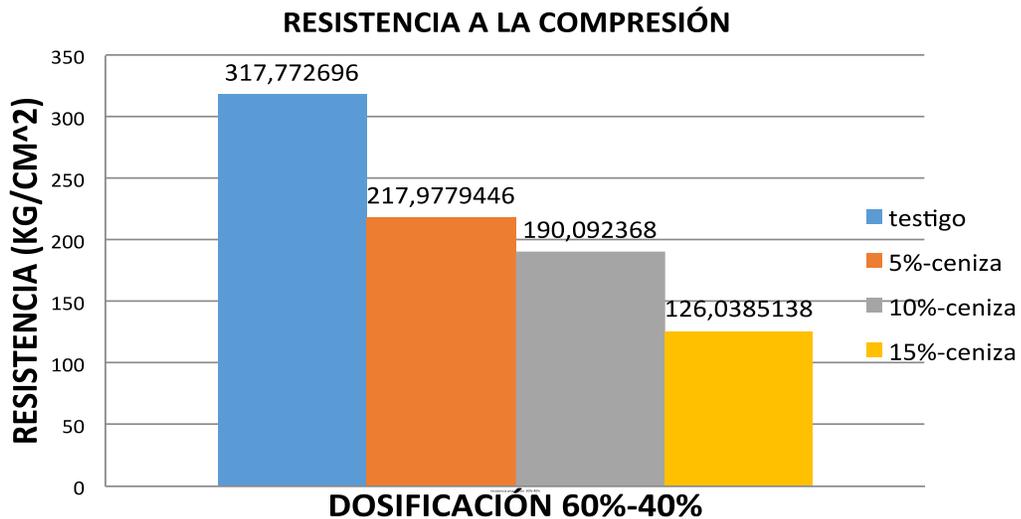


Figura 34. Resistencia a la compresión dosificación-1(60%-40%)

Fuente: Propia

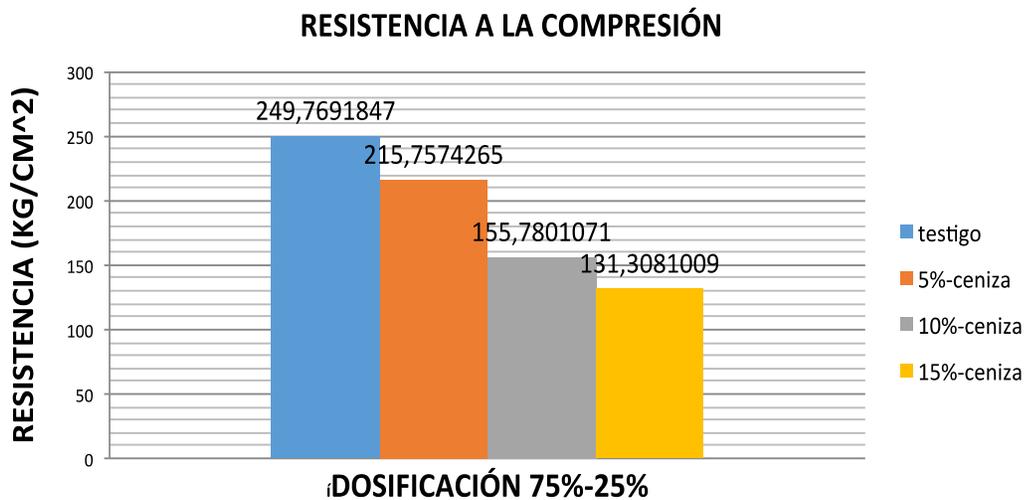


Figura 35. Resistencia a la compresión dosificación-2(75%-25%)

Fuente: Propia

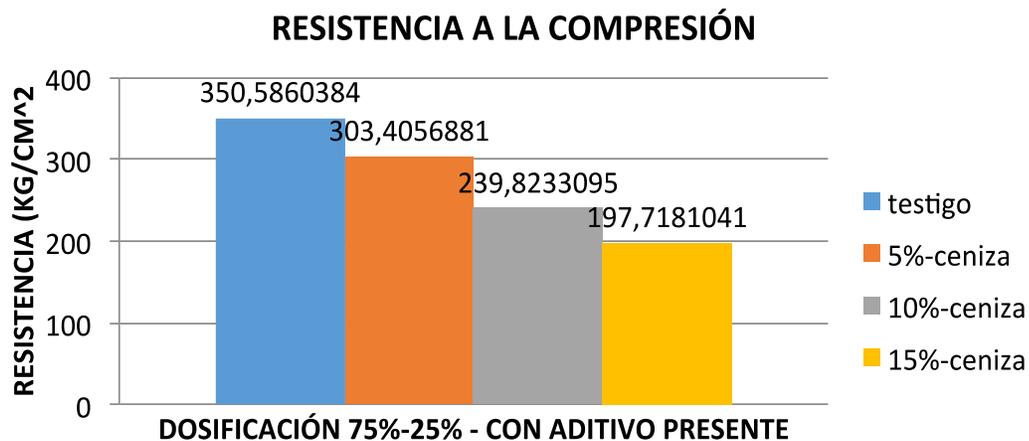


Figura 36. Resistencia a la compresión dosificación-3(75%-25%) con aditivo presente

Fuente: Propia

Las mezclas de concreto preparadas con una relación agua/cemento 0,38 con sus proporciones del 75% material convencional y el 25 % residuos de la piedra de Barichara de agregado fino, 5 % de ceniza como porcentaje del cemento y 250 ml de aditivo líquido. Finalmente, los resultados de la resistencia a la compresión están por encima de la resistencia diseño 280 (kg/cm²) ; por lo cual dan un aporte viable para que los materiales puedan ser aprovechados en el sector de la construcción. De esta forma, los residuos del tallado de la piedra de Barichara que no tiene valor alguno empezarán a tener un valor comercial en la producción de concreto.

6.4. RESULTADOS RESISTENCIA MECANICA DE ADOQUINES

6.4.1. Resistencia a la flexotracción (módulo de rotura (mr))

Los requisitos para la resistencia a la flexotracción en (MPa). Indica que para un módulo de rotura con edad de 28 días de un lote promedio de 5 especímenes se debe tener una resistencia de 5 a 4,2 (MPa), que para los

adoquines preparados con presencia de ceniza en un 5% y 10% respecto al volumen de cemento fue de 5, 67 y 5, 58 (MPa) respectivamente, cumpliendo las especificaciones de la norma colombiana NTC 2017.

6.4.2. Resistencia a la abrasión

El valor promedio de la longitud de la huella (lh) de cinco especímenes para las muestras con un 5% y 10% de ceniza sometido al ensayo de resistencia a la abrasión no fue superior a 23 mm como lo establece la NTC 5147.

6.4.3. Absorción de agua y densidad

La absorción de agua promedio por muestra fue (5,6 % ≤ 7.0 %) siendo inferior al valor promedio para los especímenes de concreto que rige la NTC 2017 .

6.4.4. Comparación Económica de la Producción de un Adoquín

La siguiente tabla (44) representa en costo (\$) pesos colombianos el valor de la preparación de un adoquín convencional y sus proporciones de ceniza del (5% y 10%).

Tabla 44. Presupuesto de un adoquín

Valor de un adoquín convencional y sus proporciones de ceniza del (5%,10%)								
muestra	cemento	triturado	arena	arena Barichara	agua	ceniza	aditivo	Valor Total
testigo	\$ 474	\$ 102	\$ 0,68	\$ -	\$ 0,08	\$ -	\$ -	\$ 577
5%	\$ 450	\$ 102	\$ 0,55	\$ 0,06	\$ 0,075	0,00	\$ 0,57	\$ 553
10%	\$ 431	\$ 102	\$ 0,55	\$ 0,06	\$ 0,07	0,00	\$ 0,52	\$ 534

Fuente: Propia

Con respecto al costo en la preparación de adoquines se puede decir que para las muestra 5% y 10% de ceniza como porcentaje del cemento y una proporción 75% agregado fino , 25% material Barichara reduce el costo entre un (6% y 10 %) respectivamente al convencional.

7. CONCLUSIONES

Este Trabajo de Grado resume el alcance de los objetivos específicos planteados inicialmente con el fin de evaluar el comportamiento físico-mecánico de la piedra de Barichara y ceniza como agregado en la preparación de mezclas de concreto hidráulico.

Para lograr los objetivos trazados se preparó una mezcla de concreto con agregados provenientes de los residuos de la piedra de Barichara y se le agregó ceniza. Para evaluar la mezcla propuesta, se prepararon especímenes y se realizaron diferentes ensayos cuya normatividad la maneja el INVIAS Y NTC.

Con respecto a la evaluación del comportamiento físico mecánico de la piedra Barichara y ceniza, tenemos:

- ❖ Los porcentajes de agregados fino inicialmente fueron de 60% arena convencional (rio) y un 40% de material Barichara, por lo que se optó cambiarlos, dado a que no cumplía con algunos requisitos que son necesarios para elaborar un buen concreto de alta resistencia; Uno de estos ensayos es el de granulometría de agregados finos y gruesos de la norma Invias.
- ❖ Al final se decidió utilizar los porcentajes del 75% arena convencional (rio) y un 25% de material Baricharara, al cual se realizó su caracterización, lo que nos arrojó que es un material bueno para preparar un concreto de buena calidad.

- ❖ El material estudiado reportó un nivel muy bajo de contenido orgánico, por lo que cabe resaltar que el material puede ser utilizado en la preparación de concretos hidráulicos.
- ❖ La muestra de agregado grueso cumple con los parámetros establecidos para este tipo de material en concretos.

Con respecto a la Caracterización del Material Cementante:

- ❖ La densidad disminuyó a mayor presencia de ceniza.
- ❖ La consistencia demostró que para mayor presencia de ceniza, menor cantidad de agua a utilizar, puesto que la ceniza utilizada tiene una finura baja necesita una menor cantidad de agua para el mezclado, por tanto al utilizar las cenizas como adición al concreto este disminuye la consistencia obligando a utilizar menor cantidad de agua.
- ❖ En el tiempo de fraguado es muy difícil precisar una conclusión, dado a que todas las mezclas con presencia de ceniza (5, 10, y 15%) respecto al cemento, tuvieron un tiempo aproximado de 4 horas para fraguar. Sin embargo la mezcla con el 15% su tiempo fraguado inicial fue menor.

Con respecto a la Preparación de las Mezclas para el concreto:

- ❖ Se hizo un primer diseño de mezcla con una relación agua – cemento 0.38 para un concreto que contenía un agregado fino que estaba compuesto por un 60% convencional y un 40% Barichara, y un segundo diseño con la misma relación para un concreto que contenía un agregado fino que estaba compuesto por un 75% convencional y un 25% Barichara. Respectivamente el segundo diseño obtuvo el menor porcentaje de vacíos lo cual la mezcla fue más compacta y se logró aumentar la resistencia del concreto.

- ❖ Mediante el comportamiento mecánico de las mezclas se confirmó que proporciones del 25 % de agregado fino, 100% agregado grueso , 5 % de ceniza como porcentaje del cemento y 250 ML de aditivo Sikafluid presentan resistencias superiores hasta de un 5 % a la resistencia de diseño esperada (280 kg/cm²).

Con respecto a la Resistencia Mecánica de Adoquines se concluye que:

- ❖ Carga de rotura promedio por muestra fluctúa entre (5,67 , 5.58) y la Absorción de agua promedio por muestra (5,6 , 5,6 ≤ 7.0 %). Con respecto a la resistencia mecánica para adoquines de concreto se puede concluir que cumple con los requisitos físicos y especificaciones técnicas para la instalación de adoquines de concreto para superficies de tránsito peatonal y vehicular.

Es importante destacar que la alternativa del uso de la piedra de Barichara como una proporción del 25 % del agregado fino y la ceniza como porcentaje del cemento para la preparación de una mezcla de concreto , reducirían los impactos negativos generados por el inadecuado manejo de los residuos o material de desecho producido por el sector industrial.

El aprovechamiento de los residuos del tallado de la piedra de Barichara y la ceniza como porcentaje del cemento contribuyen un aporte viable en el sector de la construcción reduciendo hasta un 10 % el costo de un concreto convencional para adoquines.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] <http://www.barichara-santander.gov.co/>, información _ general, 4 febrero de 2013, [Accesado 14 de febrero del 2014]
- [2] GUERRERO VARGAS, DIEGO ALEXANDER. CHÁVEZ GARCÍA, DIDIER ALBERTO. Evaluación de las propiedades mecánicas del concreto simple (3000psi) utilizando ceniza como porcentaje del cemento. Proyecto de grado para obtener el título de ingeniería civil, Universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga [Fecha de consulta 17/02/2014]
- [3] GÓMEZ GALVIS, FREDY ALEJANDRO. MORALES, WILMER MAURICIO. Evaluación de las propiedades mecánicas y la durabilidad de concreto preparado con altos volúmenes de ceniza proveniente de locaciones petroleras. Proyecto de grado para obtener el título de ingeniería civil, Universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga [Fecha de consulta 17/02/2014]
- [4] SARMIENTO GARCÉS, CARLOS ORLANDO. ARENAS DÍAZ, JULIÁN FELIPE. Evaluación del comportamiento mecánico de morteros modificados con ceniza de locaciones petroleras. Proyecto de grado para obtener el título de ingeniería civil, Universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga [Fecha de consulta 17/02/2014]
- [5] AGUILAR PEDROZO, LUIS ALEJANDRO. AYALA ROBAYO, EDWARD ANDRÉS. Determinación de las propiedades mecánicas de una mezcla densa en caliente tipo dos utilizando ceniza como una proporción del agregado fino y como llenante. Proyecto de grado para obtener el título de ingeniería civil, Universidad pontificia bolivariana seccional Bucaramanga [Fecha de consulta 17/02/2014]

- [6] SÁNCHEZ DE GUZMÁN, DIEGO. Ingeniero civil. Tecnología del concreto y del mortero. 2001. [Fecha de consulta 17/06/2014]
- [7] ARREDONDO, F. Estudio de materiales: V.-Hormigones. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. 2001. [Fecha de consulta 01/07/2014]
- [8] JIMÉNEZ, PABLO Hormigón Armado Tomo I. Barcelona: Editorial Gustavo Gili. 1987. [Fecha de consulta 12/07/2014]
- [9] JOAQUÍN PORRERO, CARLOS. “Manual del Concreto Estructural”. Primera Edición – Caracas. 2004. [Fecha de consulta 11/07/2014]
- [10] LUCIO, ARMIJO; FRANCISCO, XAVIER. MANUAL DE ENSAYOS DE MECÁNICA DE SUELOS Y PAVIMENTOS PARA EL LABORATORIO DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO. 2012.
- [11] JUAN SEBASTIÁN, FERREIRA DÍAZ, Aprovechamiento de escombros como agregados no convencionales en mezclas de concreto, Proyecto de Grado para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga. [Fecha de consulta 02/07/2014]
- [12] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos. I.N.V.E-213-07.
- [13] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. I.N.V.E-223-07.
- [14] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Gravedad específica y absorción de agregados finos. I.N.V.E-222-07.
- [15] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Contenido total de agua evaporable de los agregados por secado. I.N.V.E-216-07.
- [16] Icontec internacional. Norma técnica colombiana NTC 92. Ingeniería civil y arquitectura. Determinación de la masa unitaria y los vacíos entre partículas de agregados (1995).

- [17] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Resistencia al desgaste de los agregados de tamaño menores de 37.5mm (1 ½") por medio de la máquina de los ángeles. I.N.V.E-218-07.
- [18] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Finura del cemento portland método del aparato de Blaine. I.N.V.E-302-07.
- [19] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Porcentaje de caras fracturadas en los agregados. I.N.V.E-227-07.
- [20] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Densidad del cemento hidráulico. I.N.V.E-307-07.
- [21] Instituto Nacional de Vías. Ingeniería civil. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. I.N.V.E-410-07.
- [22] Sánchez de guzmán, Diego. Ingeniero civil, MIC, MScIS. Tecnología del concreto y del mortero. Universidad pontificia Javeriana. Facultad de ingeniería civil. Bogota.1987
- [23] A. JARRIGE. "Las cenizas volantes: propiedades, aplicaciones industriales"(2002). [Fecha de consulta 10/07/2014]
- [24] SERRANO GUZMÁN, MARÍA FERNANDA. PÉREZ, DIEGO DARÍO. Concreto Preparado con Residuos Industriales: Resultado De Alianza Empresa Universidad. 2011. [Fecha de consulta 10/07/2014]
- [25] TOLOZA VELASCO, CRISTIAN ALEXANDER. Evaluación del comportamiento físico-mecánico de la piedra barichara como agregado en la preparación de mezcla de concreto. Proyecto de grado para obtener el título de ingeniería civil, Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.[Fecha de consulta 17/03/2014].