Comportamiento a flexión y compresión del concreto hidráulico elaborado con arena de trituración para pavimentos

Angie Thalia Mera Calvache
Cesar Stiven Gomez Gomez
Santiago Nicolas Meneses Guasmayan

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2023

Comportamiento a flexión y compresión del concreto hidráulico elaborado con arena de trituración para pavimentos

Angie Thalia Mera Calvache
Cesar Stiven Gomez Gomez
Santiago Nicolas Meneses Guasmayan

Informe de investigación para optar al título de: Ingeniero Civil

Mg. Merylin Cristina Ortega Ortega
Asesor
Mg. Edwar Armando Basante Bolaños
Co asesor

Universidad Mariana
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Civil
San Juan de Pasto
2023

Artículo 71: los conceptos, afirmaciones y opiniones emitidos en el Trabajo de Grado son responsabilidad única y exclusiva del (los) Educando (s)

Reglamento de Investigaciones y Publicaciones, 2007
Universidad Mariana

Contenido

1. Resumen del proyecto 14
1.1. Descripción del problema 14
1.1.1. Formulación del problema 15
1.2. Justificación 15
1.3. Objetivos 16
1.3.1. Objetivo general 16
1.3.2. Objetivos específicos 16
1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos 17
1.4.1. Antecedentes 17
1.4.2. Marco teórico 18
1.4.2.1. Cantera. 18
1.4.2.2. Trituradora. 18
1.4.2.3. Concreto. 18
1.4.2.4. Agregado fino. 18
1.4.2.5. Arena. 18
1.4.2.6. Arena gris. 19
1.4.2.7. Arena de trituración. 19
1.4.2.8. Ensayos de laboratorio. 19
1.4.2.8.1. Análisis granulométrico. 19
1.4.2.8.2. Durabilidad. 19
1.4.2.8.3. Limpieza. 19
1.4.2.8.4. Contenido de materia orgánica. 20
1.4.2.8.5. Características químicas. 20
1.4.2.8.6. Dureza. 20

1.4.2.8.7. Geometría de las partículas. 21

1.4.2.8.8. Resistencia a la compresión. 21

1.4.2.8.9. Resistencia a la flexión. 21

1.4.2.9. Tipos de pavimentos. 22

1.4.2.9.1. Pavimento rígido. 22

1.4.3. Marco contextual 22

1.4.4. Marco legal 25

1.5. Metodología 28

1.5.1. Campo de la investigación. 31

1.5.2. Enfoque de investigación 31

1.5.3. Tipo de investigación 31

1.5.4. Hipótesis 31

2. Presentación de resultados 32

2.1. Primer objetivo: ensayos de caracterización de los agregados 32

2.1.1.1. Análisis granulométrico de los agregados. 33

2.1.1.1.1. Agregado fino. 33

2.1.1.1.2. Agregado grueso. 42

2.1.1.2. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables en los agregados. 43

2.1.1.2.1. Agregado fino. 43

2.1.1.2.2. Agregado grueso. 44

2.1.1.3. Presencia de impurezas orgánicas en arenas. 46

2.1.1.3.1. Agregado fino. 46

2.1.1.4. Resistencia de los agregados por medio de la máquina de los ángeles. 48

2.1.1.4.1. Agregado grueso. 48

2.1.1.5. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. 48

2.1.1.5.1. Agregado grueso. 48

2.1.2. Segundo objetivo: diseño de mezcla 49

2.1.2.1. Arena gris 100%. 50

2.1.2.1.1. Selección del asentamiento. 51

2.1.2.1.2. Selección del tamaño máximo nominal del agregado. 52

2.1.2.1.3. Estimación del agua de mezcla. 52

2.1.2.1.4. Resistencia de dosificación de la mezcla (f'cr). 53

2.1.2.1.5. Selección de la relación agua/cemento (A/C). 53

2.1.2.1.6. Cálculo del contenido de cemento. 54

2.1.2.1.7. Agregados. 54

2.1.2.1.8. Estimación de las cantidades de agregados. 55

2.1.2.1.9. Proporciones iniciales. 57

2.1.2.1.10. Cantidades para laboratorio. 60

2.1.2.2. Arena de trituración 100%. 61

2.1.2.2.1. Proporciones iniciales. 62

2.1.2.2.2. Cantidades para laboratorio. 64

2.1.2.3. Arena gris 50% y arena de trituración 50%. 64

2.1.2.3.1. Cantidades de los agregados 64

2.1.2.3.2. Proporciones iniciales 64

2.1.2.3.3. Cantidades para laboratorio. 66

2.1.3. Tercer objetivo ensayos de compresión y flexión 66

2.1.3.1. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. 66

2.1.3.1.1. Ensayo a la compresión 100% arena gris 67

2.1.3.1.2. Ensayo a la compresión 100% arena de trituración 68

2.1.3.1.3. Ensayo a la compresión 50% arena gris y 50% arena de trituración. 70

2.1.3.2. Resistencia a la flexión del concreto. 72

2.1.3.2.1. Ensayo de resistencia a flexión 100% arena gris. 72

2.1.3.2.2. Ensayo de resistencia a flexión 100% arena de trituración.....75

2.1.3.2.3. Ensayo de resistencia a flexión, mezcla 50% AG y 50% AT. 76

2.2. Análisis e interpretación de resultados 79

2.2.1. Ensayos de caracterización a los materiales granulares 79

2.2.1.1. Análisis granulométrico de los agregados. 79

2.2.1.2. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables. 80

2.2.1.3. Presencia de impurezas orgánicas en arenas. 80

2.2.1.4. Resistencia a la degradación de los agregados. 80

2.2.1.5. Índice de aplanamiento y alargamiento. 80

2.2.2. Ensayos de resistencia a la compresión y flexión 80

3. Conclusiones.....83

4. Referencias.....86

Índice de Tablas

Tabla 1 Marco Legal. 25
Tabla 2 Metodología 29
Tabla 3 Granulometría del agregado fino (arena gris) 34
Tabla 4 Granulometría del agregado fino (arena de trituración) 35
Tabla 5 Porcentajes a tomar 38
Tabla 6 Gradaciones ideales, granulometría resultante del ajuste. 39
Tabla 7 Curva granulometría arena de trituración y arena gris 41
Tabla 8 Granulometría del agregado grueso 42
Tabla 9 Datos para el cálculo de terrones de arcilla en agregado grueso 45
Tabla 10 Características del agregado grueso 50
Tabla 11 Características del agregado fino (arena gris) 51
Tabla 12 Proporciones iniciales en masa (masa seca de agregados) 58
Tabla 13 Pesos húmedos de los agregados 59
Tabla 14 Proporciones de los agregados con ajuste de humedad 60
Tabla 15. Dimensiones de los especímenes 60
Tabla 16. Volumen de trabajo 61
Tabla 17. Cantidades de material a utilizar por m^3 de concreto 61
Tabla 18 Ajuste por el método gráfico de Weymouth 62
Tabla 19. Peso seco de los agregados 62
Tabla 20. Proporciones iniciales en masa (masa seca de agregados) 62
Tabla 21 Pesos húmedos de los agregados 63
Tabla 22 Proporciones de los agregados con ajuste de humedad. 63
Tabla 23. Cantidades de material a utilizar por m^3 de concreto 64
Tabla 24 Cantidades de los agregados 64
Tabla 25 Proporciones iniciales en masa (masa seca de agregados) 65
Tabla 26. Pesos húmedos de los agregados. 65
Tabla 27. Proporciones de los agregados con ajuste de humedad. 66
Tabla 28 Cantidades de material a utilizar por m^3 de concreto 66
Tabla 29 Ensayo de resistencia a la compresión a 7 días de curado. 67

Tabla 30 Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días de curado 68
Tabla 31 Ensayo de resistencia a la compresión a 7 días de curado 69
Tabla 32 Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días de curado 69
Tabla 33 Ensayo de compresión a 7 días de curado 70
Tabla 34 Ensayo a compresión a 28 días de curado 71
Tabla 35 Ensayo de resistencia a la flexión a 7 días de curado. 73
Tabla 36 Ensayo de resistencia a la flexión 28 días de curado. 74
Tabla 37 Ensayo de resistencia a flexión a 7 días de curado. 75
Tabla 38. Ensayo de resistencia a flexión a 28 días de curado. 76
Tabla 39 Ensayo a flexión a 7 días de curado. 77
Tabla 40 Ensayo a flexión a 28 días de curado 78

Índice de Figuras

Figura 1 Composición de un pavimento rígido 22
Figura 2 Ubicación del departamento de Nariño y del municipio Pasto 23
Figura 3 Ubicación Cantera San Javier en Pasto 24
Figura 4 Maquina trituradora de cuatro brazos 25
Figura 5 Requisitos del agregado fino 32
Figura 6 Requisitos para el agregado grueso 33
Figura 7 Curva granulométrica del agregado fino (arena gris) 34
Figura 8 Curva granulométrica del agregado fino (arena de trituración) 35
Figura 9 Gradaciones ideales corregidas propuesto por Fuller 36
Figura 10 Gradaciones ideales corregidas propuesto por Weymouth 37
Figura 11 Ajuste granulométrico de la arena de trituración, método gráfico 38
Figura 12 Gradación de los materiales y curvas ideales 40
Figura 13 Curva granulométrica de arena de trituración y arena gris 41
Figura 14 Curva granulométrica del agregado grueso 43
Figura 15 Masas para el cálculo de terrones de arcilla y partículas deleznables 45
Figura 16 Cantidad de materia orgánica en arena gris 47
Figura 17 Cantidad de materia orgánica en arena de trituración 47
Figura 18 Asentamiento recomendados para el diseño de mezcla 51
Figura 19 Cantidad de agua recomendada en kg por m^3 de concreto 52
Figura 20 Valores de resistencia a la compresión 53
Figura 21 Estimación de la relación agua/cemento (A/C) 54
Figura 22 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto 55
Figura 23 Cantidad de agua de mezclado 57
Figura 24 Gráfico de resistencia a la compresión a 7 días de curado 67
Figura 25 Grafico de resistencia a la compresión a 28 días de curado 68
Figura 26 Grafico de resistencia a la compresión a 7 días de curado 69
Figura 27 Gráfico de resistencia a la compresión a 28 días de curado 70
Figura 28 Gráfico de resistencia a la compresión a 7 días de curado 71

Figura 29 Gráfico de resistencia a la compresión a 28 días de curado 72
Figura 30 Gráfico resistencia a flexión a 7 días de curado 73
Figura 31 Gráfico de resistencia a flexión a 28 días de curado 74
Figura 32 Gráfico de resistencia a flexión a 7 días 75
Figura 33 Grafico de resistencia a flexión a 28 días 76
Figura 34 Grafico de resistencia a flexión a 28 días 77
Figura 35 Resistencia a la flexión a 28 días de curado 78
Figura 36 Gráfico de resistencia a compresión de los diferentes diseños de mezcla 82
Figura 37 Gráfico de resistencia a flexión de los diferentes diseños de mezcla 82

Introducción

El concreto es la mejor alternativa para realizar procesos constructivos, es muy importante a la hora de realizar proyectos de infraestructura, debido a su versatilidad y desarrollo de tecnologías, que lo han llevado a limites inimaginables en su desempeño, usos y aplicaciones. Actualmente es el material más ampliamente utilizado en el mundo con una producción de miles de millones de metros cúbicos por año. Las altas capacidades de resistencias del concreto se basan en condiciones de exposición extrema durante su vida útil, gracias a su alta durabilidad y resiliencia, es un material local y de alta disponibilidad que puede ser fabricado en cualquier parte del mundo, lo que ayuda a optimizar los costos y reducir la huella de carbono, además, su propiedad estética permite flexibilidad en su diseño. Para la realización de un concreto con características tan determinantes, se debe contar con un esqueleto pétreo que sea lo más denso posible y una cantidad de agua/cemento que cubra los poros de estos materiales pétreos. Los agregados al formar la mayor parte de volumen en la realización del concreto, se consideran componentes críticos presentando un efecto significativo en el comportamiento de cada estructura.

Por otra parte, el agregado fino es un material de gran importancia en la producción de un concreto de buena calidad, de manera empírica, para conocer las propiedades de una arena, basta tomar un puñado de la pila y apretarla con la mano; si se apoya en la piel es prueba de que tiene propiedades adherentes; si al frotar la mano queda relativamente limpia, la arena no tiene exceso de humedad ni finos perjudiciales. Esta prueba no sustituye a los ensayos hechos en laboratorio, pero si cumple la prueba física, cumplirá la caracterización por normativa. Generalmente el agregado fino debe cumplir condiciones de limpieza, debe estar libre de elementos orgánicos, cumplir con una buena resistencia y acceder a cambios de temperatura sin que su volumen aumente excesivamente.

Comúnmente en el campo constructivo se utiliza como agregado fino la arena gris, sin embargo, existen otros materiales que pueden suplir las características de la misma, por ejemplo, la arena de trituración, la cual es obtenida mediante un proceso mecánico de la roca triturada a un tamaño especifico, por lo general contiene un mayor porcentaje de partículas finas y tiene una textura más

gruesa en comparación con la arena gris. La arena de trituración se puede producir con una gradación específica para cumplir con las especificaciones deseadas. La distribución del tamaño de partícula se puede controlar durante el proceso de trituración, lo que da como resultado un tamaño de partícula más uniforme y consistente.

Según la Norma INVIAS capítulo 5 Art. 500-13. "El porcentaje de arena de trituración no podrá constituir más de treinta por ciento (30%) de la masa del agregado fino" (Herrera, 2018), por esta razón se opta por realizar una investigación con respecto a la arena de trituración, analizando principalmente su uso en el concreto, esto mediante la caracterización de los dos tipos de arena, el diseño de mezcla correspondiente para un concreto hidráulico optimo y finalmente ensayos de compresión y flexión que se realicen en la máquina universal de la Universidad Mariana sede Alvernia, esto con el fin de determinar su resistencia y escoger otro tipo de material que sea técnicamente más adecuado en la construcción de pavimentos.

1. Resumen del proyecto

A continuación, se puede evidenciar el proceso investigativo que se va a realizar enfatizando todos los aspectos relacionados en la elaboración de un concreto simple, desde el análisis del comportamiento de los agregados pétreos hasta la determinación de la resistencia a flexión y compresión del concreto con distintos porcentajes de agregados, de la misma manera, determinar el comportamiento del uso de la arena de trituración en la elaboración de un concreto para pavimentos, tomando como referencia de estudio la Cantera San Javier, ubicada en el sur occidente de Nariño, entre la vía Pasto-Genoy.

Para cumplir con los objetivos de la investigación se pretende realizar ensayos de laboratorio a las muestras obtenidas de arena gris y principalmente a las muestras de arena de trituración comparando y concluyendo que tipo de material muestra mayor beneficio respecto a su composición, durabilidad, limpieza, contenido de materia orgánica y resistencia; a los especímenes de concreto serán elaborados con tres tipos de diseño de mezcla, cada uno usando diferentes porcentajes de agregados pétreos, 100% con arena gris, 100% con arena de trituración y una última mezcla con 50% de arena gris y 50% de arena de trituración. Las muestras elaboradas serán sometidas a pruebas de laboratorio tanto de flexión y compresión, esto con el fin de que se puedan comparar resultados con las muestras de concreto diseñados con arena gris, de esta manera concluir acerca del comportamiento de la arena de trituración en el concreto.

Palabras clave: arena de trituración, concreto rígido, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, ensayos.

1.1. Descripción del problema

El concreto es el material mayormente usado en obras civiles, debido a su gran resistencia a la compresión, además de su larga vida útil e infinidad de modelamiento en comparación con otro tipo de materiales. es muy importante conocer los materiales para poder manejar el concreto

correctamente. El diseño de mezcla se enfoca en determinar la participación específica de cada agregado para obtener óptimos resultados.

Simultáneamente la degradación ambiental producto del exceso de explotación mineral producida por las canteras y el desconocimiento de la innovación en materiales utilizados para obtener nuevos concretos, son el principal enfoque de esta investigación, en este caso se opta por la implementación de la arena de trituración en la producción del concreto generando un flujo más eficiente de agregados y la optimización de las propiedades del concreto, todo a su vez regido sobre los parámetros de calidad establecidos por la normativa de construcción de carreteras 2022 INVIAS.

Los agregados ocupan entre el 60% y el 75% del volumen del concreto, al ocupar un porcentaje tan alto es muy relevante en la mezcla ya que los agregados deben contar con características detalladas para lograr las propiedades mecánicas requeridas para hacer parte del concreto, cuando la mezcla cambia de estado plástico ha endurecido, el cemento presenta comportamientos químicos sobre los agregados pétreos al estar en contacto con el agua por esta razón se debe contar con un buen diseño de mezcla con el fin de controlar los cambios volumétricos de la pasta, evitando agrietamientos.

1.1.1. Formulación del problema

¿Qué efectos tiene el uso de la arena de trituración en la elaboración de un concreto para un pavimento rígido?

1.2. Justificación

Para la fabricación del concreto en pavimentos se recomienda usar cemento con un contenido de Aluminato Tricálcico (C3A o Celita) no mayor al 8% para tener un bajo calor de hidratación con el fin de evitar retracciones, además, se pueden reemplazar agregados aluviales por los agregados triturados, también se debe tener en cuenta, la arena con micro textura, es decir, arenas con alto

contenido de sílice en las partículas de mayor tamaño para aportar a la resistencia del concreto al derrapa miento, que para esta propuesta de investigación, se toma como muestra de ensayo la arena de trituración, de acuerdo con las especificaciones de diseño dadas, el sistema de colocación y las condiciones de temperatura y medio ambiente. (Asociación Colombiana de Productores de Concreto, 2020).

Es fácil especular que el concreto es tan básico como cualquier cosa, pero según los análisis realizados se puede evidenciar que el concreto cumple diferentes tareas y objetivos. Un apropiado ensayo sobre este compuesto puede ofrecer cualidades que se desempeñen en muchas clases de obras. (Estupiñan, 2020). El concreto se convirtió en el material más usado en el mundo debido a su resistencia a la compresión, a la flexión, versatilidad, durabilidad y economía.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar el comportamiento de un concreto hidráulico elaborado con arena de trituración para pavimentos.

1.3.2. Objetivos específicos

- Realizar ensayos de caracterización a los materiales granulares según normativa para determinar si las propiedades físicas cumplen con los parámetros requeridos.

- Elaborar diseños de mezcla con arena gris y arena de trituración con el fin de implementarlos en la fabricación del concreto.

- Hacer ensayo de compresión y flexión al concreto elaborado con los dos tipos de arena y analizar su comportamiento respecto a estas dos variables.

1.4. Marco referencial o fundamentos teóricos

1.4.1. Antecedentes

Tema: Propiedades de contracción del hormigón de arena compactado utilizado en pavimentos.
Autores: Euch Khay, Neji, & Luolizi

Se analizaron tres mezclas diferentes de concreto, dos de ellas se realizaron con arena triturada de dos canteras diferentes mientras que la tercera se hizo con arena de trituración y arena del desierto, se observaron resultados alentadores de fatiga, así como costos iniciales aceptables de construcción. Debido a este estudio se valida el uso de concreto con arena compactada. (Euch Khay, Neji, & Luolizi, 2010).

Tema: Influencia de las características de la arena fabricada en la fuerza y la resistencia a la abrasión del concreto de cemento para pavimentos.
Autores: Li beixing, Ke Guoju, Zhou Mingkai

Este proyecto presenta los resultados de un estudio de laboratorio sobre la influencia de las características de la arena manufacturada, como el contenido de microfina de roca, la rugosidad de la superficie, el valor de aplastamiento y los tipos de roca en la fuerza y la resistencia a la abrasión del concreto para pavimentos. Los resultados muestran que la cantidad de microfinas de la piedra aumenta la resistencia a la compresión y a la flexión mejorando además la resistencia a la abrasión. (Beixing, Guoju , & Mingkai, 2011)

Tema: Uso de granito fino triturado como sustituto de la arena de rio en el concreto.
Autor: Manasseh JOEL

En esta investigación se estudia la idoneidad del granito fino triturado para sustituir a la arena de rio en la producción de concreto para su uso en pavimentos rígidos. Se realizaron ensayos de asentamiento, compresión y tracción indirecta en concreto fresco y endurecido. Los valores

máximos de resistencia a la compresión y a la tracción indirecta fueron de 40.70 N/mm^2 y 2.30N/mm^2 respectivamente. Con la sustitución parcial de la arena de rio en un 20% de granito fino triturado, se recomienda el uso en la producción de concreto para su uso en pavimentos rígidos. La conservación de la arena de rio y la mejora de la eliminación de los residuos de las canteras son algunas de las ventajas de utilizar granito fino triturado. (JOEL, 2010)

1.4.2. Marco teórico

1.4.2.1. Cantera. Es un lugar de explotación minera la cual se realiza generalmente a cielo abierto, en ella se obtienen rocas industriales, ornamentales o áridos.

1.4.2.2. Trituradora. Es una maquina utilizada para procesar materiales con la finalidad de obtener fracciones más pequeñas de los mismos. El proceso se denomina trituración o triturado.

1.4.2.3. Concreto. El concreto se forma a partir de la unión de materiales como agregados finos, agregados gruesos y cemento que se endurecen al incorporar agua, se crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua, adquiriendo consistencia pétrea. Su uso está generalizado en el sector civil. (Anonimo, 2018).

1.4.2.4. Agregado fino. Los finos consisten en arenas naturales o de la trituración de rocas, gravas, escorias u otro producto que resulte adecuado con tamaños de partícula que van desde, 0.075 milímetros (mm) hasta 10 milímetros (mm).

1.4.2.5. Arena. Son fragmentos sueltos de rocas o minerales, se encuentran en ríos, lagos o depósitos volcánicos y el tamaño de sus partículas esta entre 0.074mm y 4.75mm. Se utiliza para la preparación de concreto, mortero, mezclas asfálticas, bases de adoquines, prefabricados, trabajos de albañilería y mampostería. (Ramos, 2019)**.**

1.4.2.6. Arena gris. Existen diferentes tipos de arena, entre ellas se encuentran las arenas naturales, de mina, de río y volcánicas, principalmente caracterizadas por su tamaño y su porcentaje pasante y retenido por el tamizado.

1.4.2.7. Arena de trituración. La arena de trituración se obtiene a partir de la fragmentación de materiales pétreos que por su gran tamaño son enviados a la máquina trituradora donde se generan partículas finas con alto contenido de fracciones de rocas fracturadas que garantiza una mayor calidad del agregado. (M&S Ingenieria y equipos, 2021)

1.4.2.8. Ensayos de laboratorio. Tienen como propósito determinar las características tanto físicas como químicas de los materiales granulares y dan cumplimiento a las especificaciones establecidas por el INSTITUTO NACIONAL DE VIAS.

1.4.2.8.1. Análisis granulométrico. La granulometría es la composición en porcentaje de los diversos tamaños de agregado de una muestra. Es uno de los factores más importantes ya que afecta las proporciones en los diseños de mezcla, así como los requisitos de agua y cemento, impactando en la resistencia, trabajabilidad, capacidad de bombeo, economía y durabilidad del concreto.

1.4.2.8.2. Durabilidad. Esta característica determina la resistencia de los agregados pétreos bajo la acción de agentes atmosféricos, este ensayo se lo realiza bajo la norma INV E 220.

1.4.2.8.3. Limpieza. En la elaboración de una mezcla de concreto, es necesario contemplar todo tipo de aspecto que pueda alterar la resistencia, adherencia o comportamiento que altere directamente la mezcla, por esta razón se emplea el ensayo INV E 211 para conocer si el material se encuentra en condiciones óptimas para su implementación en la elaboración de un concreto.

1.4.2.8.4. Contenido de materia orgánica. Según Matallana Rodríguez (2019) las impurezas orgánicas en los agregados generalmente provienen de la descomposición de material vegetal (ácido tánico), manifestándose en forma de humus o margas orgánicas, acompañado normalmente de olor desagradable.

> El problema de su presencia en los agregados es la interferencia durante el proceso de hidratación del cemento, pues alteran el fraguado, reducen las resistencias mecánicas y afectan la durabilidad, dado que se forman compuestos pobres de hidratación. (pág. 81)

1.4.2.8.5. Características químicas. Este ensayo se refiere a la resistencia que tiene el concreto bajo la adición de sulfatos; se lo determina mediante el método descrito en la norma INV E 233 que consiste en dejar reposar los agregados saturados en una solución de sulfatos.

Para Matallana Rodríguez (2019) los sulfatos de sodio, potasio y magnesio son sales que pueden estar presentes en los suelos y las aguas alcalinas, tales como el agua de mar y los suelos costeros. El ataque por sulfatos constituye otra forma de deterioro del concreto, toda vez que reaccionan químicamente con la cal y el aluminato de calcio hidratado, en la pasta de cemento ya endurecida, para formar sulfato de calcio y sulfoaluminato de calcio. Tales reacciones generan una expansión que ocasionan esfuerzos de tensión internos, con el consecuente agrietamiento y rotura de la masa de concreto. (pág. 127)

1.4.2.8.6. Dureza. Según Matallana Rodríguez (2019) esta característica se la realiza únicamente al agregado grueso mediante la máquina de los ángeles bajo la norma INV E 218. “La resistencia a la abrasión, desgaste o dureza de un agregado, es una propiedad importante cuando se emplea en la elaboración de concretos sometidos a esfuerzos de abrasión o roce permanente, como en los pisos industriales o los pavimentos rígidos” (pág. 78).

1.4.2.8.7. Geometría de las partículas. (Rivera)

La presencia de partículas alargadas o aplanadas puede afectar la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad de las mezclas, porque tienden a orientarse en un solo plano lo cual dificulta la manejabilidad; además, debajo de las partículas se forman huecos de aire y se acumula agua perjudicando las propiedades de la mezcla endurecida.

Por otro lado, la textura superficial de las partículas del agregado influye en la manejabilidad y la adherencia entre la pasta y el agregado, por lo tanto, afecta la resistencia (en especial la resistencia a la flexión). (pág. 54)

1.4.2.8.8. Resistencia a la compresión. Matallana Rodríguez (2019)

La resistencia de un material se puede definir como la habilidad para resistir esfuerzos sin que falle. En el caso del concreto, la resistencia está relacionada al esfuerzo requerido para causar fractura, es decir, cuando el esfuerzo aplicado alcanza su máximo valor. El concreto es muy resistente a los esfuerzos de compresión y por lo general esta es la propiedad con la que se diseña y se hace el control de calidad". (pág. 116).

1.4.2.8.9. Resistencia a la flexión. (Rivera)

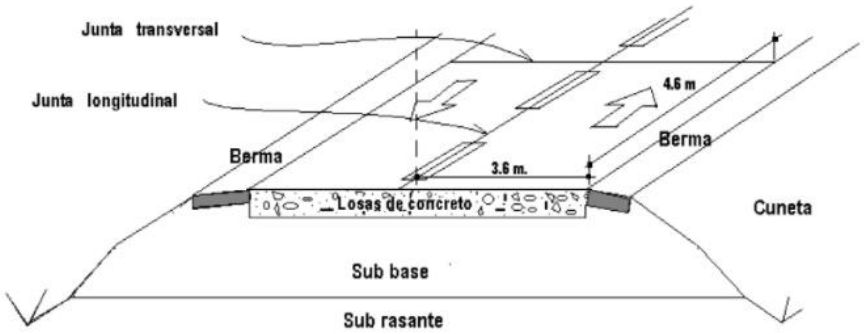
Este parámetro es aplicado en estructuras tales como pavimentos rígidos; debido a que los esfuerzos de compresión que resultan en la superficie de contacto entre las llantas de un vehículo y el pavimento son aproximadamente iguales a la presión de inflado de las mismas, la cual en el peor de los casos puede llegar a ser de 5 o 6 kg/cm^2; este esfuerzo de compresión sobre un pavimento de concreto hidráulico resulta sumamente bajo con relación a la resistencia a la compresión del concreto que normalmente varía entre 150 y 350 kg/cm^2 en nuestro medio. Por lo tanto, no es la resistencia a la compresión el factor determinante de la calidad del concreto para pavimentos, sino la resistencia a la flexión, por el paso de los vehículos. (pág. 133).

1.4.2.9. Tipos de pavimentos. Un pavimento es una estructura constituida por una serie de capas superpuestas, que se diseñan teniendo en cuenta diferentes métodos, normas y especificaciones técnicas para materiales apropiados. Estos se someten a diferentes procesos y estudios con el fin de obtener una superficie apta que presente rigidez y durabilidad en el trabajo empleado. (Mocondino, 2020).

1.4.2.9.1. Pavimento rígido. Los pavimentos rígidos se componen por dos capas, una superior de concreto de cemento portland que se apoya en una capa de base, constituida por grava; esta capa descansa en una capa de suelo compactado, llamada subrasante; en determinadas circunstancias y dependiendo de la capacidad de soporte de la subrasante existente se puede encontrar una tercera capa de subbase. (Mocondino, 2020). (Ver Figura 1).

Figura 1

Composición de un pavimento rígido



Nota: Configuración de un pavimento rígido. Fuente: Noticias Construyored

1.4.3. Marco contextual

La trituración artificial de las rocas produce arena, dicha trituración se produce por medio de aparatos mecánicos como molinos y pueden ser de quijadas, de martillo o rotatorios. (CEMENTOS CIBAO, 2017).

La explotación de recursos minerales se ha incrementado significativamente en el transcurso del tiempo, de esta manera surgen distintas fuentes de extracción mineral. En términos locales existen varias canteras activas, en este caso se tiene en cuenta como fuente de estudio La Cantera San Javier ubicada en Colombia, al Sur-Occidente del departamento de Nariño, (Ver Figura 2) en el tramo vial entre Pasto-Genoy, (figura 3).

Figura 2

Ubicación del departamento de Nariño y del municipio Pasto

Nota: Ubicación de la cantera San Javier en el departamento de Nariño. Fuente: de Wikipedia – Provincia de Pasto Nariño.

Figura 3

Ubicación Cantera San Javier en Pasto

Nota: Ubicación de la cantera San Javier en la ciudad de Pasto. Fuente: Google Earth.

Actualmente la cantera San Javier presta sus servicios al sector civil constructivo ya que es una empresa mediante la cual se explotan recursos minerales, extrayendo materiales (roca) que son seleccionados mediante maquinaria pesada, posterior a la trituración de la roca, se obtienen diferentes tipos de agregados finos y gruesos. (Ver Figura 4)

Figura 4

Maquina trituradora de cuatro brazos

Nota: Trituradora de la roca inerte que produce la arena de trituración. Fuente: Cantera San Javier.

1.4.4. Marco legal

El marco legal que abarca esta investigación está basado principalmente en las (especificaciones generales de construcción de carreteras del INVIAS y las normas de ensayo para materiales.), las cuales actualmente están vigentes, rigen los procedimientos y especificaciones con respecto al agregado fino, que por ende incluye la arena de trituración. (Ver Tabla 1)

Tabla 1

Marco Legal.

Norma	Titulo	Objetivo y descripción
ARTÍCULO 500	Pavimentos de concreto hidráulico	Especifica el procedimiento para la correcta construcción del pavimento de concreto hidráulico
		Procedimiento mediante el cual se determina el tamaño de

INV E-123	Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos.	las partículas del suelo, mediante porcentajes de pasante para pavimentos de concreto hidráulico.
INV E-220	Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio.	Describe el procedimiento a seguir para determinar la resistencia de los agregados pétreos cuando deben soportar la intemperie en concretos y otras aplicaciones.
INV E-125 y 126	Índice de plasticidad (%)	Determina el límite líquido de los suelos
INV E-133	Equivalente de arena de suelos y agregados finos.	Este ensayo tiene por objeto determinar la proporción relativa del contenido de polvo nocivo, o material arcilloso, en los suelos o agregados finos.
INV E-211	Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables en los agregados	Este método se refiere a la determinación aproximada de los terrones de arcilla y de las partículas deleznables (friables) en los agregados.
INV E- 221	Cantidad de partículas livianas en un agregado pétreo.	Describe un procedimiento para determinar el porcentaje de partículas livianas en los agregados pétreos, mediante su separación por suspensión en un líquido de gravedad específica elevada.

INV E-214	Determinación de la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 µm (No. 200) en los agregados pétreos mediante lavado.	Esta norma se refiere al procedimiento para determinar la cantidad de material que pasa por el tamiz No. 200 en un agregado. Durante el ensayo se separan de la superficie del agregado, por lavado, las partículas que pasan el tamiz No. 200, tales como limo, arcilla, polvo de los agregados y materiales solubles en el agua.
INV E-212	Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para la preparación de morteros o concretos.	Describe dos procedimientos para determinar, de manera aproximada, la presencia de impurezas orgánicas nocivas en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos de cemento hidráulico.
INV E-222	Densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del agregado fino.	Esta norma muestra el procedimiento que se debe seguir para determinar la densidad promedio de una cantidad de partículas de agregado fino (sin incluir los vacíos entre ellas), la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del agregado fino.

INV E-233	Determinación del contenido de azufre en los agregados pétreos.	Este método de ensayo brinda un procedimiento para la determinación cuantitativa del azufre presente en los agregados para concretos.
INV E-414	Resistencia a la flexión del concreto usando una viga simplemente apoyada y cargada en los tercios de la luz libre.	Esta norma de ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la flexión del concreto, empleando una viga simplemente soportada, cargada en los tercios de la luz libre.
INV E-410	Resistencia a la compresión de cilindros de concreto.	El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, a una velocidad de carga prescrita.

Nota: normas de ensayo para la caracterización física y mecánica de los agregados pétreos. Fuente: Normas y especificaciones 2012 INVIAS

1.5. Metodología

El camino que se trazará para dar respuesta a los objetivos planteados dentro de esta investigación experimental se basa inicialmente en realizar ensayos de caracterización a los materiales granulares según normativa para determinar si las propiedades físicas cumplen con los parámetros requeridos con el fin de fabricar un concreto que incluya en su diseño de mezcla tres tipos de proporciones de agregado fino.

En primer lugar, se estima un espécimen que contenga un 50% de arena de trituración y un 50% de arena gris del total de agregado fino, otro espécimen que incluya un 100% de arena gris y

finalmente un espécimen con un 100% de arena de trituración, finalmente se realizan pruebas de compresión y flexión a los especímenes elaborados con el fin de evaluar su comportamiento, teniendo en cuenta parámetros de resistencia y durabilidad. (Ver Tabla 2)

Tabla 2

Metodología

TITULO DE LA INVESTIGACION				
Comportamiento a flexión y compresión del concreto hidráulico elaborado con arena de trituración para pavimentos.				
OBJETIVO GENERAL				
Analizar el comportamiento de un concreto hidráulico elaborado con arena de trituración para pavimentos.				
ESQUEMA METODOLOGICO				
OBJETIVOS ESPECIFIOS	***META***	***ESTRATEGIA DE TRABAJO***	***ACTIVIDAD***	***PRODUCTOS ESPERADOS***
Realizar ensayos de caracterización a los materiales granulares según normativa para determinar si las propiedades físicas cumplen con los parámetros requeridos.	Verificar el cumplimiento de los parámetros físicos requeridos por la normativa para los materiales granulares.	Mediante los laboratorios de la sede Alvernia de la Universidad Mariana, desarrollar ensayos que permitan caracterizar las propiedades físicas de tres tipos de muestras con	*****Granulometría. *Módulo de finura. *Solidez de los agregados frente a la acción de soluciones de sulfato de sodio o de magnesio. *Presencia de impurezas orgánicas en arenas usadas para la preparación de	*Propiedades físicas óptimas de la arena. *Granulometría ajustada por el método de Fuller - Weymouth y módulo de finura.

		diferentes porcentajes de arena.	morteros o concretos.	
Elaborar diseños de mezcla con arena gris y arena de trituración con el fin de implementarlos en la fabricación del concreto.	Obtener especímenes que resistan fuerzas a flexión y compresión, según parámetros requeridos por normativa.	Programar una memoria de cálculo mediante el software Microsoft Excel, para modificar el diseño de mezcla cuando se requiera.	*Diseño de mezcla. *Especificaciones de los agregados para concreto.	*Diseño de mezcla con especímenes de arena gris al 100%, arena de trituración al 100% y especímenes con arena gris al 50% y arena de trituración al 50%.
Hacer ensayos de compresión y flexión al concreto elaborado con los dos tipos de arena y analizar su comportamiento respecto a estas dos variables.	Verificar que el concreto elaborado con arena de trituración cumpla con los requisitos requeridos mediante ensayos de flexión y compresión.	Realizar ensayos de compresión con la máquina universal y comparar resultados de resistencia.	*Ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto. *Método de ensayo para determinar la resistencia del concreto a la flexión.	*Resistencia a la compresión de 21 Mpa. *Resistencia a la flexión de 3.8 Mpa.

Nota: metodología del paso a paso de la investigación.

1.5.1. Campo de la investigación.

La propuesta de trabajo se especifica en el campo físico y químico, debido a que se deben realizar ensayos de caracterización del agregado fino, los cuales abarcan propiedades físicas y químicas, entre ellas, tamaño del agregado, peso específico, módulo de finura, densidad, presencia de impurezas orgánicas, entre otras, que serán fundamentales en el momento de determinar el cumplimiento de las normas y por consiguiente una buena alternativa en el sector civil.

1.5.2. Enfoque de investigación

Según el tipo de datos que se pretende obtener, esta investigación es de tipo cuantitativo, ya que se tendrá en cuenta los resultados de los ensayos realizados al agregado fino como: granulometría, módulo de finura, peso específico, cálculos y métodos de diseño de mezcla para tres especímenes con diferentes porcentajes de arena, además de analizar su comportamiento para pavimentos rígidos.

1.5.3. Tipo de investigación

La investigación es de tipo analítica-experimental, debido a que se va a realizar un análisis respecto al comportamiento de la arena de trituración, cumpliendo con parámetros de resistencia a la flexión y a la compresión según normativa.

1.5.4. Hipótesis

Se afirma que el uso de arena de trituración es viable para crear un concreto aplicable a un pavimento rígido, esto se realiza con el fin de utilizar otro tipo de recurso y beneficiar específicamente al sector civil.

2. Presentación de resultados

2.1. Primer objetivo: ensayos de caracterización de los agregados

En esta sección se encuentran los ensayos detallados que se realizaron para la presente investigación. El agregado fino debe cumplir los requisitos que se indican en la figura 5 y el agregado grueso debe cumplir los requisitos que se indican en la figura 6 de las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022.

Figura 5

Requisitos del agregado fino

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Composición		
Granulometría: - Análisis granulométrico de los agregados finos - Material que pasa tamiz de 0,075 mm (nro.200)	 E-213 E-214	Ver Tabla 630 — 2
Módulo de finura (Nota 1)	E-213	2,3 — 3,1
Durabilidad (O)		
Pérdidas en el ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota 2): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	 10 15
Limpieza (F)		
Terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%). (Nota 3)	E-211	3
Partículas livianas, máximo (%): - Cuando la apariencia superficial del concreto sea de importancia, máximo (%) - Todos los demás concretos, máximo (%)	E-221	 0,5 1,0
Contenido de materia orgánica (F)		
Color más oscuro permisible	E-212	Igual al color de referencia o de la placa orgánica nro. 3
Características químicas (O)		
Contenido de sulfatos, expresado como $SO_4^{=}$, máximo (%)	E-233	1,2

Nota: Requisitos para el agregado fino planteados por las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022 INVIAS. Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, INVIAS

Figura 6

Requisitos para el agregado grueso

Característica	Norma de ensayo INV	Requisito
Dureza (O)		
Desgaste en la máquina de Los Ángeles, máximo (%): - En seco, 500 revoluciones, máximo (%) - En seco, 100 revoluciones, máximo (%)	E-218	 40 8
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfatos, máximo (%). (Nota 1): - Sulfato de sodio - Sulfato de magnesio	E-220	 12 18
Limpieza (F)		
Terrones de arcilla y partículas deleznables, máximo (%). (Nota 2)	E-211	3
Partículas livianas, máximo (%)	E-221	0,5
Geometría de las partículas (F)		
Índice de alargamiento, máximo (%)	E-230	25
Índice de aplanamiento, máximo (%)	E-230	25
Características químicas (O)		
Contenido de sulfatos, expresado como $SO_4^{=}$, máximo (%)	E-233	1,0

Nota: Requisitos para el agregado grueso planteados por las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022 INVIAS. Fuente: Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, INVIAS

2.1.1.1. Análisis granulométrico de los agregados. La norma empleada para el desarrollo de esta característica fue la INV E 213, esta característica tiene como objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de los agregados de un material. Los resultados del ensayo (véase Anexo A) fueron los siguientes:

2.1.1.1.1. Agregado fino. De acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado fino debe cumplir los requisitos de granulometría y módulo de finura especificados en el Art. 630. (figura 5).

Tabla 3

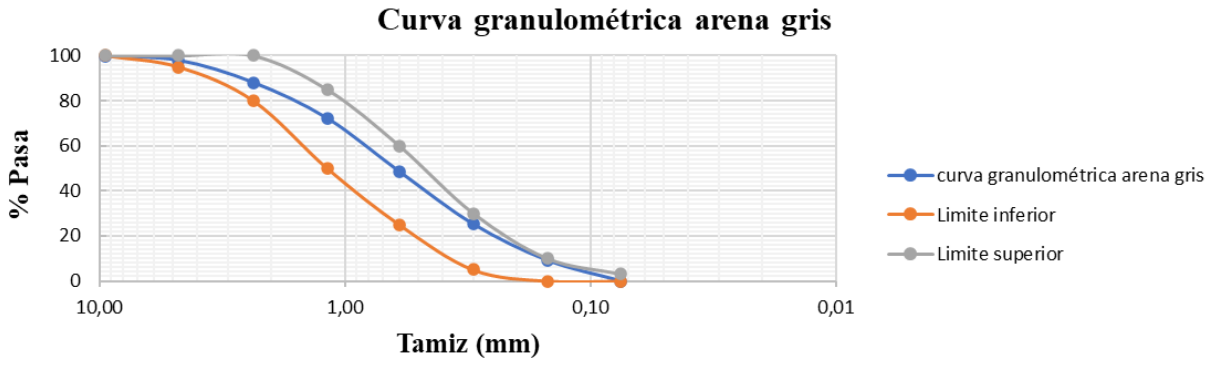
Granulometría del agregado fino (arena gris)

Granulometría Arena Gris							
						%Pasa	
Tamiz (in)	***Tamiz (mm)***	***Masa retenida***	***%Retenido***	***%Retenido acumulado***	***%Pasa***	***Lim. Inf.***	***Lim. Sup.***
3/8	9,5	4	0,23	0,23	100	100	100
#4	4,75	31	1,79	2,02	98	95	100
#8	2,36	171	9,87	11,89	88	80	100
#16	1,18	275	15,87	27,76	72	50	85
#30	0,600	410	23,66	51,41	49	25	60
#50	0,300	404	23,31	74,73	25	5	30
#100	0,150	278	16,04	90,77	9	0	10
#200	0,075	160	9,23	100,00	0	0	3
TOTAL		1733	100,00				
	Módulo de finura				2,6		

Nota: granulometría de la arena gris.

Figura 7

Curva granulométrica del agregado fino (arena gris)



Nota: Curva granulométrica de la arena gris dentro de los limites dados por las especificaciones generales de construcción.

Tabla 4

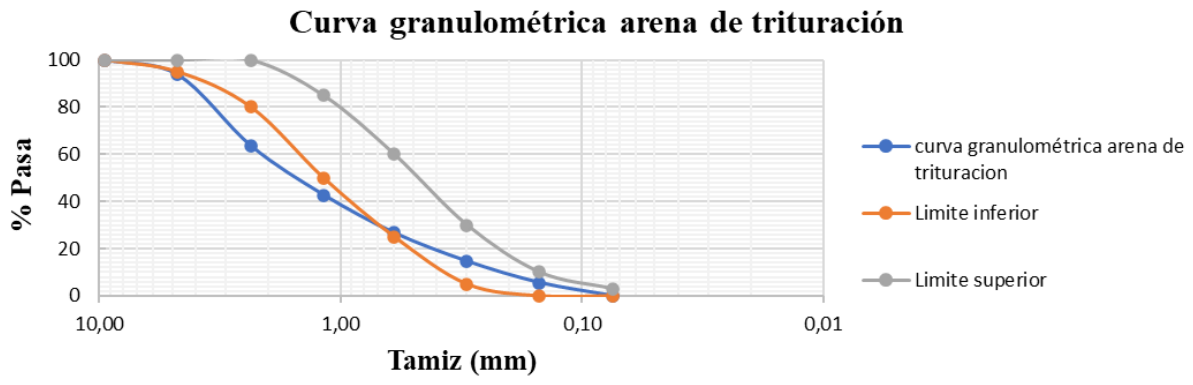
Granulometría del agregado fino (arena de trituración)

Granulometría Arena de trituración							
Tamiz (in)	***Tamiz (mm)***	***Masa retenida***	***%Retenido***	***%Retenido acumulado***	***%Pasa***	***%Pasa***	
						Lim. Inf	***Lim. Sup.***
3/8	9,5	0	0,00	0,00	100	100	100
#4	4,75	108	6,30	6,30	94	95	100
#8	2,36	517	30,15	36,44	64	80	100
#16	1,18	357	20,82	57,26	43	50	85
#30	0,600	276	16,09	73,35	27	25	60
#50	0,300	206	12,01	85,36	15	5	30
#100	0,150	156	9,10	94,46	6	0	10
#200	0,075	95	5,54	100,00	0	0	3
TOTAL		1715	100,00				
	Módulo de finura				3,5		

Nota: granulometría de la arena de trituración.

Figura 8

Curva granulométrica del agregado fino (arena de trituración)



Nota: Curva granulométrica de la arena de trituración con sus respectivos límites.

La figura 8 da un resumen de la granulometría de la arena de trituración, arrojando una mala degradación dado que se encuentra fuera de los límites establecidos por las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, por lo tanto, se optó por realizar optimizaciones granulométricas mediante los métodos propuestos por FULLER o WEYMOUTH.

Figura 9

Gradaciones ideales corregidas propuesto por Fuller

MALLA	FULLER				
	TAMAÑO MAXIMO (mm)				
Pulg.	76,1	50,8	38,1	25,4	19,1
3"	100,0				
2"	81,0	100,0			
1 ½"	69,8	86,1	100,0		
1"	56,5	69,6	80,8	100,0	
¾"	48,5	59,7	69,4	85,8	100,0
3/8"	33,4	41,1	47,8	59,0	68,8
No. 4	22,7	27,9	32,5	40,1	46,8
No. 8	15,2	18,6	21,6	26,7	31,2
No. 16	9,8	12,0	14,0	17,1	20,1
No. 30	6,0	7,3	8,6	10,5	12,4
No. 50	3,3	4,1	4,7	5,7	6,8
No. 100	1,4	1,7	2,0	2,4	2,8

Nota: Gradaciones ideales corregidas propuesta por Fuller. Fuente: concreto simple ING. GERARDO A. RIVERA L.

Figura 10

Gradaciones ideales corregidas propuesto por Weymouth

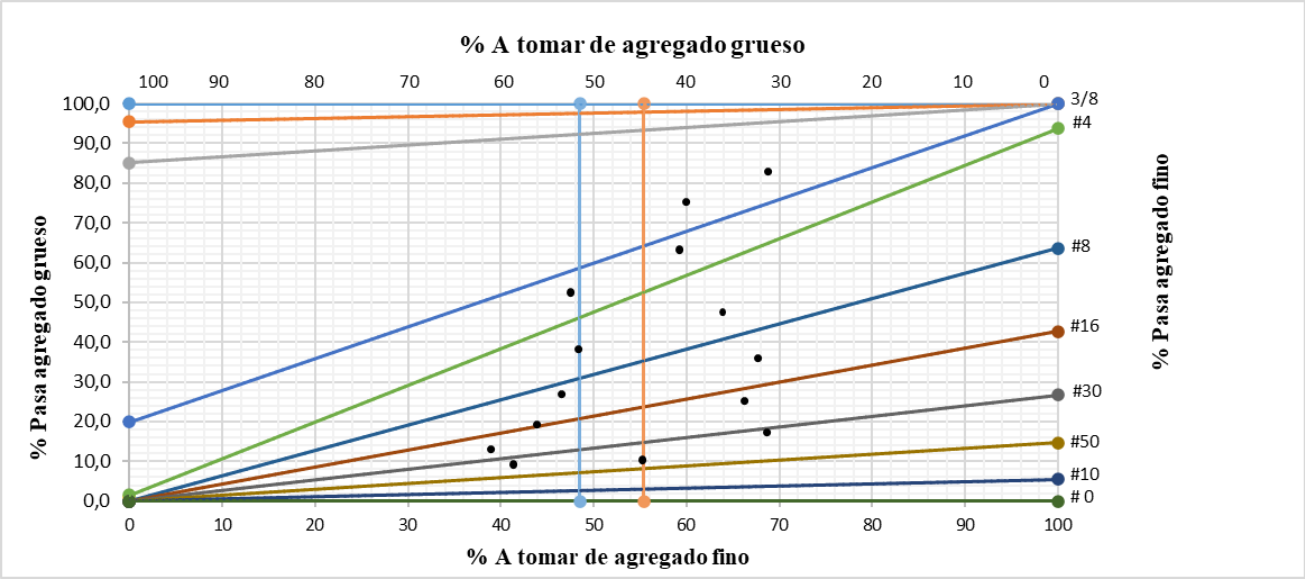
MALLA	WEYMOUTH				
	TAMAÑO MAXIMO (mm)				
Pulg.	76,1	50,8	38,1	25,4	19,1
3"	100,0				
2"	---	100,0			
1 ½"	80,5	91,2	100,0		
1"	---	---	---	100,0	
¾"	61,7	70,9	78,1	89,8	100,0
3/8"	46,0	53,2	59,0	68,2	76,2
No. 4	34,3	39,5	43,9	51,1	57,0
No. 8	25,0	28,9	31,9	37,0	41,2
No. 16	17,3	20,0	22,2	25,8	28,6
No. 30	11,2	12,9	14,2	16,6	18,4
No. 50	6,2	7,0	7,9	9,3	10,0
No. 100	2,1	2,4	2,7	3,1	3,4

Nota: Gradaciones ideales corregidas propuesta por Weymouth. Fuente: concreto simple ING. GERARDO A. RIVERA L.

Para determinar lo porcentajes, en que se deben combinar los agregados, con el fin de ajustar a las gradaciones ideales, se empleará el método gráfico, que consiste en utilizar las gradaciones para una curva ideal propuestas por Fuller y Weymouth (ver figura 9 y 10)

Figura 11

Ajuste granulométrico de la arena de trituración, método gráfico



Nota: Ajuste granulométrico de la arena de trituración empleando el método grafico propuesto por Fuller y Weymouth.

Tabla 5

Porcentajes a tomar

FULLER		**WEYMOUTH**	
Ag. Fino	0,49	Ag. Fino	0,55
Ag. Grueso	0,52	Ag. Grueso	0,45

Nota: porcentajes obtenidos mediante el método de Fuller y Weymouth.

Tabla 6

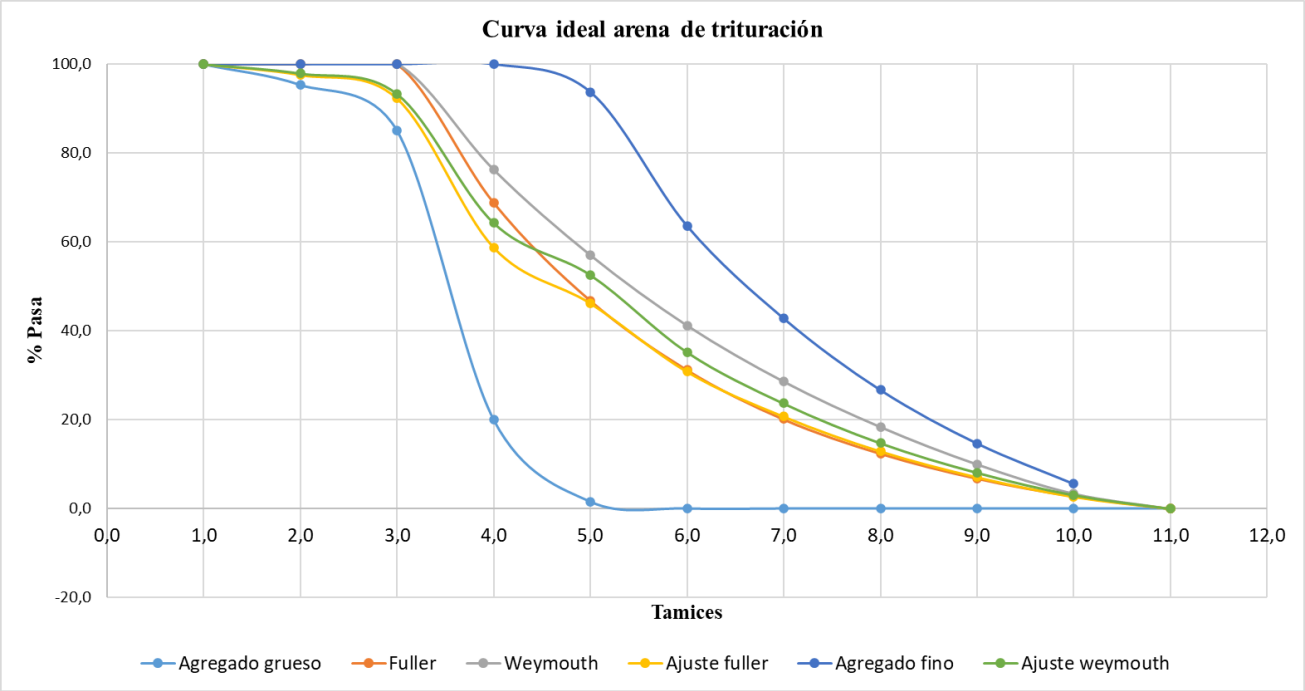
Gradaciones ideales, granulometría resultante del ajuste.

ASOCRETO							
Abertura (mm)	Tamiz	Agregado grueso % pasa	Agregado fino % pasa	Weymouth % pasa	curva ajustada (Weymouth) % pasa	Fuller % pasa	Curva ajustada (Fuller) % pasa
50,0	2"	100,0	100,0	**100**	100	**100**	100
25,0	1"	95,4	100,0	**100**	98	**100**	98
19,0	3/4"	85,0	100,0	**100**	93	**100**	92
9,5	3/8"	19,9	100,0	**76,20**	64	**68,80**	59
4,8	N°4	1,5	93,7	**57**	53	**46,8**	46
2,36	N°8	0,0	63,6	**41,2**	35	**31,2**	31
1,18	N°16	0	42,7	**28,6**	24	**20,1**	21
0,6	N°30	0	26,6	**18,4**	15	**12,4**	13
0,3	N°50	0	14,6	**10**	8	**6,8**	7
0,15	N°100	0	5,5	**3,4**	3	**2,8**	3
0,075	N°200	0	0,0	**0**	0	**0**	0

Nota: porcentajes granulométricos ideales planteados por ASOCRETO.

Figura 12

Gradación de los materiales y curvas ideales



Nota: Ajuste granulométrico utilizando las granulometrías para una curva ideal planteadas por Fuller y Weymouth.

El porcentaje de dosificación de agregado fino y grueso a utilizar de acuerdo con el ajuste granulométrico realizado por el método gráfico es el arrojado por la curva ajustada de Weymouth. Ver ANEXO A. (tabla 7).

En las siguientes tablas granulométricas se analiza el resumen de las granulometrías obtenidas por cada arena en este caso 50% arena gris y 50% arena de trituración, se observa que los datos granulométricos corresponden a la curva dentro de los límites establecidos. (Figura 13)

Tabla 7

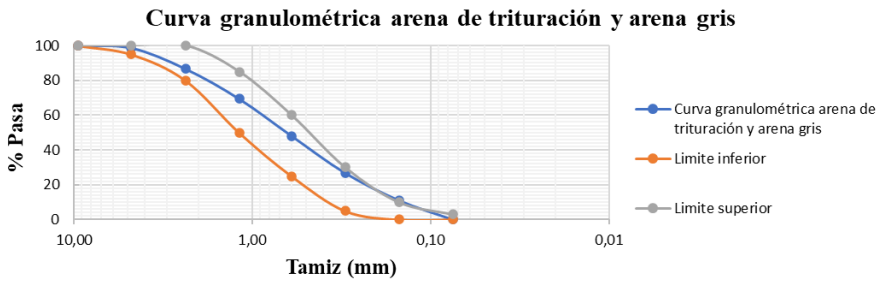
Curva granulometría arena de trituración y arena gris

Granulometría Arena de trituración y arena gris							
Tamiz (in)	***Tamiz (mm)***	***Masa retenida***	***%Retenido***	***%Retenido acumulado***	***%Pasa***	***%Pasa***	
						Lim. Inf	***Lim. Sup.***
3/8	9,5	0	0,00	0,00	100	100	100
#4	4,75	27	1,46	1,46	99	95	100
#8	2,36	222	11,97	13,42	87	80	100
#16	1,18	320	17,25	30,67	69	50	85
#30	0,600	395	21,29	51,97	48	25	60
#50	0,300	395	21,29	73,26	27	5	30
#100	0,150	291	15,69	88,95	11	0	10
#200	0,075	205	11,05	100,00	0	0	3
TOTAL	-	1855	100,00	-	-		
Módulo de finura						2,60	

Nota: Gradaciones ideales para el 50% arena gris y 50% arena de trituración.

Figura 13

Curva granulométrica de arena de trituración y arena gris



Nota: la figura presenta la granulometría del agregado fino (arena gris y arena de trituración) esta granulometría cumple con una curva ideal lo cual es apta para el diseño de mezcla 50% arena gris y 50% arena de trituración.

2.1.1.1.2. Agregado grueso. De acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado grueso debe cumplir los requisitos de granulometría especificados en el Art. 630. (figura 5).

Tabla 8

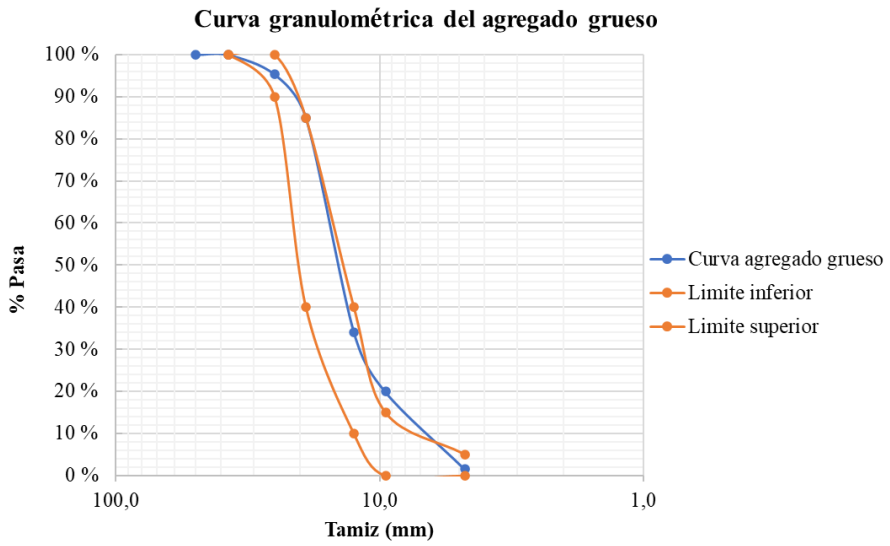
Granulometría del agregado grueso

Granulometría agregado grueso							
Peso inicial (g)						**5640**	
Tamiz (in)	***Tamiz (mm)***	***Masa retenida***	***%Retenido***	***%Retenido acumulado***	***%Pasa***	***%Pasa***	
						Lim. Inf	***Lim. Sup.***
2"	50,0	0	0,0	0,00	100,0	100	100
1 1/2"	37,5	0	0,0	0,00	100,0		
1"	25,0	261	4,63	4,63	95,4	100	95
3/4"	19,0	583	10,3	14,97	85,0		
1/2"	12,5	2873	50,9	65,92	34,1	60	25
3/8"	9,5	799	14,2	80,09	19,9		
#4	4,75	1037	18,4	98,47	1,5	0	10
BASE		86	1,53	100,00	0,0		
TOTAL		5639	100				

Nota: Granulometría del agregado grueso dentro de los limites dados por las especificaciones de la construcción INVIAS.

Figura 14

Curva granulométrica del agregado grueso



Nota: Granulométrica de las partículas del agregado grueso con sus respectivos límites.

2.1.1.2. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables en los agregados. La norma empleada en este apartado fue la INV E 211, esta característica tiene como objeto determinar el porcentaje de partículas livianas en los agregados pétreos. Los resultados del ensayo (véase Anexo B) empleado fueron los siguientes:

2.1.1.2.1. Agregado fino. De acuerdo con las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado fino debe cumplir los requisitos de limpieza especificados en el Art. 630. (figura 5)

Cálculo del porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznables de la arena gris:

$$p = \frac{M - R}{M} * 100\ \%$$

Donde:

P: Porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznables.

M: Masa de la muestra de ensayo. Para los agregados finos, corresponde a la masa de la porción más gruesa que el tamiz N°16, para los agregados gruesos, corresponde a la masa de la fracción respectiva.

R: Masa de las partículas retenidas sobre el tamiz designado para remover el residuo.

$$p = \frac{50 - 48.6}{50} * 100\ \%$$

$$p = \ 2.8\ \%$$

Cálculo del porcentaje de terrones de arcilla y partículas deleznables de la arena de trituración:

$$p = \frac{M - R}{M} * 100$$

$$p = \frac{50 - 49.2}{50} * 100$$

$$p = \ 1.6\%$$

2.1.1.2.2. Agregado grueso. Conforme las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado grueso debe cumplir los requisitos de limpieza especificados en el Art. 630. (figura 6).

Figura 15

Masas para el cálculo de terrones de arcilla y partículas deleznables

TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS ENTRE LOS TAMICES DE	MASA MÍNIMA DE LA MUESTRA DE ENSAYO, g
4.75 - 9.5 mm (No. 4 - 3/8")	1000
9.5 - 19.0 mm (3/8" - 3/4")	2000
19.0 - 37.5 mm (3/4" - 1½")	3000
Mayores de 37.5 mm (1½")	5000

Nota: masa mínima de la muestra para la determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables. Fuente: Instituto Nacional de Vías, normas de ensayo de materiales para carretera

Tabla 9

Datos para el cálculo de terrones de arcilla en agregado grueso

Tamiz	Masa inicial (g)	Masa de las partículas retenidas (g)
3/8"	1000	993
3/4"	2000	1989
$1^{1/2"}$	3000	2986

Nota: Datos tomados del laboratorio para el ensayo de porcentaje de terrones de arcilla.

$$p = \frac{M - R}{M} * 100\ \%$$

$$p\ (3/8") = \frac{1000 - 993}{1000} * 100\ \%$$

$$p = \ 0.7\%$$

$$p\ (3/4") = \frac{2000 - 1989}{2000} * 100$$

$$p = 0.6\%$$

$$p\ (1^{1/2"}) = \frac{3000 - 2986}{3000} * 100$$

$$p = \ 0.5\%$$

El porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznables, deberá ser un promedio en el porcentaje de terrones de arcilla y de partículas deleznables en cada fracción.

$$p = \frac{0.7 + 0.6 + 0.5}{3}$$

$$p = \ 0.6\ \%$$

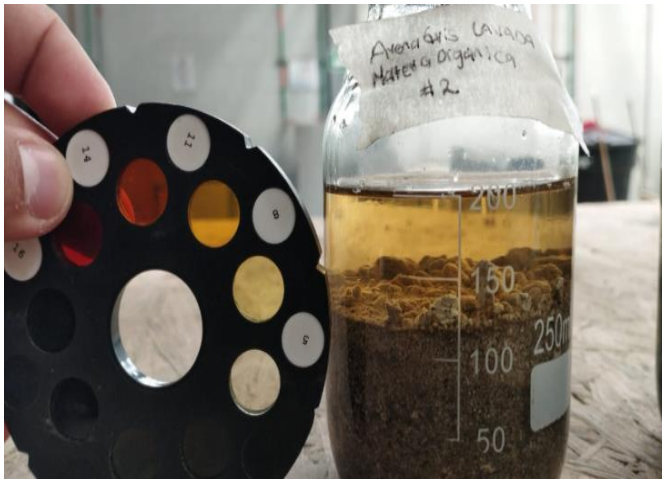
2.1.1.3. Presencia de impurezas orgánicas en arenas. Esta característica se la llevo a cabo bajo las pautas y guías de la norma INV E 212, que tiene como objeto determinar la presencia de impurezas orgánicas nocivas en arenas usadas en la preparación de morteros o concretos de cemento hidráulico. Los resultados del ensayo (véase Anexo C) empleado fueron los siguientes:

2.1.1.3.1. Agregado fino. Teniendo en cuenta las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado fino debe cumplir los requisitos de contenido de materia orgánica especificados en el Art. 630. (Figura 5)

Mediante la elaboración del ensayo de cantidad de materia orgánica a la muestra de arena gris y arena de trituración, se obtuvo como resultado dos tipos de referencias según las placas de vidrio, como se muestra la Figura 16 y Figura 17.

Figura 16

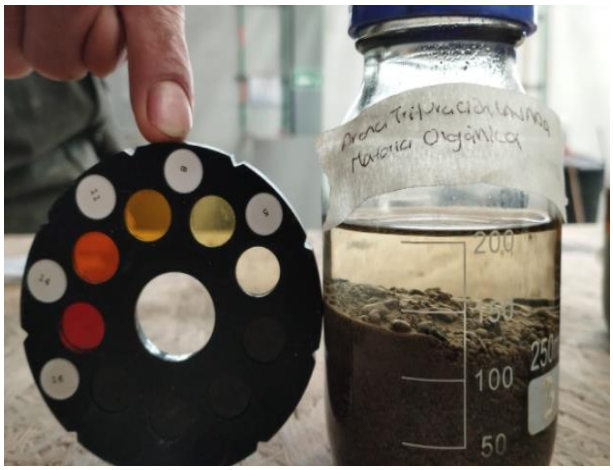
Cantidad de materia orgánica en arena gris



Nota: Comparación visual de color más oscuro permisible entre la muestra y la paleta de vidrios de referencia en la arena gris.

Figura 17

Cantidad de materia orgánica en arena de trituración



Nota: Comparación visual de color más oscuro permisible entre la muestra y la paleta de vidrios de referencia en la arena de trituración.

2.1.1.4. Resistencia de los agregados por medio de la máquina de los ángeles. Esta característica tiene como objeto medir la resistencia a la degradación de los agregados gruesos, las especificaciones del procedimiento están sujetas bajo la norma INV E 218 Los resultados del ensayo (véase Anexo D) empleado fueron los siguientes:

2.1.1.4.1. Agregado grueso. según indican las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado grueso debe cumplir los requisitos de dureza especificados en el Art. 630. (Figura 6)

$$\%\, pérdidas = \frac{P_1 - P_2}{P_1} * 100\ \%$$

Donde:

P1: Masa de la muestra seca antes del ensayo, g.

P2: Masa de la muestra seca después del ensayo, previo lavado sobre tamiz No. 12), g.

$$\%\, pérdidas = \frac{5000 - 3725}{5000} * 100\ \%$$

$$\%\, pérdidas = 25.5\ \%$$

2.1.1.5. Índice de aplanamiento y de alargamiento de los agregados para carreteras. La norma a utilizar fue la INV E 230, esta característica tiene como objeto determinar el índice de aplanamiento y alargamiento del agregado grueso. Los resultados del ensayo (véase Anexo E) empleado fueron los siguientes:

2.1.1.5.1. Agregado grueso. Según las especificaciones generales de construcción de carreteras 2022, el agregado grueso debe cumplir los requisitos de la geometría de las partículas especificados en el Art. 630. (Figura 6)

Índice de alargamiento global

$$IL = \frac{M_3}{M_1 \; o \; M_2} * 100 \; \%$$

M11 o M12: Masa total de la muestra empleada en la determinación del índice de alargamiento, g.

M13: Masa de todas las partículas que quedaron retenidas en las barras del calibrador de alargamiento, g.

$$IL = \frac{724}{5000} * 100 \; \%$$

$$IL = \; 14\%$$

Índice de aplanamiento global

$$IA = \frac{M_3}{M_1 \; o \; M_2} * 100$$

$$IA = \frac{864}{5000} * 100$$

$$IA = \; 17\%$$

2.1.2. Segundo objetivo: diseño de mezcla

El concreto está compuesto por cemento, agregados, agua y aditivos, de los cuales se pretende determinar sus cantidades para producir un concreto con el grado requerido de manejabilidad y resistencia, que, para este caso la resistencia a flexión que se quiere lograr es de 38 kg/cm^2 y la resistencia a la compresión de 210 kg/cm^2.

En esta investigación se consideraron tres diseños de mezcla, el primer diseño se desarrolla con el 100% de arena gris, el segundo diseño se desarrolla con el 100% de arena de trituración y el tercer diseño con el 50% de arena gris y el 50% arena de trituración.

El procedimiento para los diseños de mezcla es guiado de acuerdo a las especificaciones dadas del libro (Tecnología del concreto y del mortero, Diego Sánchez de Guzmán)

2.1.2.1. Arena gris 100%. para encontrar las proporciones más apropiadas para el diseño de mezcla se las calcula acorde a las propiedades de los materiales, los resultados del diseño de mezcla (véase Anexo F) empleado fueron los siguientes:

Tabla 10

Características del agregado grueso

Agregado grueso		
Densidad aparente seca	(Gg)	2350 kg/m^3
Tamaño máximo	(TM)	3/4"
Tamaño máximo nominal	(TMN)	1/2"
Porcentaje de absorción	(%ABSg)	2.7%
Masa unitaria suelta	(MUSg)	1900 kg/m^3
Masa unitaria compacta	(MUC)	1960 kg/m^3

Nota: Propiedades del agregado grueso para el diseño de mezcla.

Las características dadas del agregado grueso fueron tomadas para la elaboración de los tres diseños de mezcla.

Tabla 11

Características del agregado fino (arena gris)

Agregado fino arena gris		
Densidad aparente seca	(Gf)	2662 kg/m^3
Módulo de finura	(MF)	2.6
Porcentaje de absorción	(%ABSg)	2.9%
Masa unitaria suelta	(MUSg)	1075 kg/m^3
Masa unitaria compacta	(MUC)	1190 kg/m^3

Nota: Propiedades del agregado fino (arena gris).

2.1.2.1.1. Selección del asentamiento. Con base a la Figura 18, al ser el tipo de construcción un pavimento considera una consistencia semi seca con asentamiento entre 3,5 y 5,0 (cm), así, el asentamiento escogido fue de 5,0 cm.

Figura 18

Asentamiento recomendados para el diseño de mezcla

Tabla 11.3 **Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación (11.20)**

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 proyección neumática (lanzado)	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	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Pavimentos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración. (Normalmente no adecuados para vibrarse)

Nota: asentamientos recomendados para diferentes tipos de construcciones y sistemas de colocación y compactación. Fuente: Tecnología del concreto y mortero. Diego Sánchez de Guzmán.

2.1.2.1.2. Selección del tamaño máximo nominal del agregado. El agregado escogido tiene un tamaño máximo nominal de 12,5 mm (1/2”) y un tamaño máximo de 19 mm (3/4”) según su granulometría, (Ver tabla 10).

2.1.2.1.3. Estimación del agua de mezcla. Teniendo en cuenta que el agregado grueso es de forma angular y textura rugosa, que su contenido de aire es despreciable y que su asentamiento es de 5,0 cm se tiene un agua de mezclado de 199 Kg/m^3 de concreto según, Figura 16.

Figura 19

Cantidad de agua recomendada en kg por m^3 de concreto

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1½"	50.8 2"	64.0 2½"	76.1 3"
mm	pulg	Agua de mezclado, en Kg/m³ de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Nota: Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido. Fuente: Tecnología del concreto y mortero. Diego Sánchez de Guzmán

La cantidad de agua estimada fue escogida para los tres tipos de mezcla ya que las características del agregado grueso, el asentamiento y el contenido de aire serán los mismos en todos los diseños.

2.1.2.1.4. Resistencia de dosificación de la mezcla (f'cr). De acuerdo con la Norma Colombiana Sismo Resistente NSR 10, el concreto debe diseñarse para asegurar una resistencia promedio (f'cr) que esté por encima de la resistencia a la compresión especificada del concreto (f'c) con el fin de minimizar el riesgo de no cumplir la especificación de resistencia.

La resistencia promedio requerida f'cr se la puede obtener utilizando una desviación estándar o mediante lo especificado en la Figura 17. Para nuestro propósito se utilizará la Figura 17 ya que no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.

Figura 20

Valores de resistencia a la compresión

Resistencia especificada a la compresión f'c (kg/cm²)	Resistencia promedio requerida a la compresión f'_{cr} (kg/cm²)
Menos de 210 kg/cm²	f'_c + 70 kg/cm²
de 210 a 350 kg/cm²	f'_c + 85 kg/cm²
más de 350 kg/cm²	f'_c + 100 kg/cm²

Nota: resistencia promedio requerida a la compresión cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar. Fuente: Tecnología del concreto y mortero. Diego Sánchez de Guzmán.

La resistencia especificada a la compresión f'c es de 210 kg/cm^2 y su resistencia promedio requerida f'cr será de 295 kg/cm^2, esta resistencia será la misma para todos los especímenes cilíndricos y prismáticos obtenidos por los tres diseños de mezcla.

2.1.2.1.5. Selección de la relación agua/cemento (A/C). Tomando la resistencia de diseño f'cr=295 kg/cm^2 obtenida en el paso anterior e interpolando en la línea media de la Figura 18, se obtiene una relación agua cemento A/C = 0.46.

Figura 21

Estimación de la relación agua/cemento (A/C)

Resistencia a la compresión kg/cm²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.70	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.40	0.38

Nota: Estimación de la relación agua/cemento de acuerdo a la resistencia a la compresión. Fuente: Tecnología del concreto y mortero. Diego Sánchez de Guzmán.

2.1.2.1.6. Cálculo del contenido de cemento. El contenido de cemento es una relación entre la cantidad de agua a utilizar y la estimación de la relación agua cemento. El contenido requerido es:

$$Wcemento = \frac{Wagua}{A/C}$$

$$Wcemento = \frac{199}{0.46}$$

$$Wcemento = 430\frac{kg}{m^3}$$

2.1.2.1.7. Agregados. El volumen del cemento será calculado con el peso y la densidad específica del cemento, la densidad específica del cemento es equivalente a 3100 kg/m^3.

$$Vcemento = \frac{Wcemento}{\rho_E} * 1000 = \frac{430}{3100} * 1000 = 139\ L$$

Las cantidades obtenidas en los pasos anteriores serán las mismas para los tres tipos de mezcla.

2.1.2.1.8. Estimación de las cantidades de agregados. Estas proporciones varían según el tipo y el porcentaje de agregado fino que se desee emplear.

Para calcular la cantidad de agregado grueso que se necesita, esta depende, de la cantidad de masa unitaria suelta del agregado grueso por volumen unitario de concreto (b/b_o), dado en la Figura 19, del módulo de finura de la arena gris y del tamaño máximo nominal.

Figura 22

Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto

Volumen de agregado grueso, seco y compactado con varilla (a), por volumen de concreto para diferentes módulos de finura de la arena (b)

Tamaño máximo nominal del agregado		Módulo de finura de la arena			
mm	pulg	2.40	2.60	2.80	3.00
9.51	⅜"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.7	½	0.59	0.57	0.55	0.53
19.0	¾	0.66	0.64	0.62	0.60
25.4	1	0.71	0.69	0.67	0.65
38.1	1½	0.75	0.73	0.71	0.69
50.8	2	0.78	0.76	0.74	0.72
76.1	3	0.82	0.80	0.78	0.76
152.0	6	0.87	0.85	0.83	0.81

Nota: Volumen del agregado grueso a partir del tamaño máximo nominal del agregado. Fuente: Tecnología del concreto y mortero. Diego Sánchez de Guzmán.

Para un módulo de finura de arena gris de 2.6 y un tamaño máximo nominal de 12,5 mm (1/2”), el valor de b/b_o, mediante interpolación es igual a 0,60 m^3 de agregado grueso por metro cubico de concreto. Por lo tanto, el peso seco del agregado grueso será:

El valor del peso del agregado grueso se obtiene mediante la multiplicación del factor b/b_o que es el volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto por la masa unitaria compacta, Tabla 10.

$$Wgrueso = \frac{b}{b_o} * masa\ unitaria\ compacta$$

$$Wgrueso = 0.60 * 1960\ kg/m^3 = 1167\ kg/m^3$$

Y su volumen absoluto será, el peso seco del agregado grueso dividido por el valor de su densidad aparente seca, tabla 10.

$$Vgrueso = \frac{peso\ absluto\ del\ agregado\ grueso}{Densidad\ aparente\ seca} = \ 497\ L/m^3$$

$$Vgrueso = \frac{1167\ kg/m^3}{2350\ kg/m^3} * 1000 = \ 497\ L/m^3$$

La determinación del contenido de arena se hará con base en los volúmenes absolutos de la cantidad de agua de mezclado, contenido de cemento y contenido de agregado grueso. Dichas cantidades deben completar un metro cubico (1000 L) de concreto, el material restante para completar el metro cubico será de la arena gris.

El contenido de agua se lo estima de acuerdo al tamaño máximo del agregado y el asentamiento. Ver figura 23.

Figura 23

Cantidad de agua de mezclado

Tabla 11.7 **Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido (11.8)**

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9.51 ¾"	12.7 ½"	19.0 ¾"	25.4 1"	38.1 1½"	50.8 2"	64.0 2½"	76.1 3"
mm	pulg	Agua de mezclado, en Kg/m³ de concreto							
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Nota: Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado. Fuente: Tecnología del concreto y mortero. Diego Sánchez de Guzmán.

$$Vfino = Vtotal - Vagua - Vcemento - Vgrueso = Vfino$$

$$Vfino = 1000\ L - 199\ L - 139\ L - 497\ L = 166\ L$$

Para calcular su peso de debe multiplicar su densidad aparente seca del agregado fino, (tabla 11) por el volumen del agregado fino en m^3.

$$Wfino = 2662\frac{kg}{m^3} * 0.166 = 441\ kg/m^3$$

2.1.2.1.9. Proporciones iniciales.

Tabla 12

Proporciones iniciales en masa (masa seca de agregados)

Componentes	***Peso (kg/m³)***	***Volumen (L)***
Cemento	430	139
Agua	199	199
Aire	0	0
Agregado grueso	1167	497
Agregado fino	441	166
Total	**2237**	**1000**

Nota: proporciones iniciales del diseño de mezcla con arena gris.

Por lo general los agregados tienen un porcentaje de humedad y a su peso seco se debe aumentar o disminuir el porcentaje de agua que contengan para que el agua de diseño no se vea afectado. Cuando el porcentaje de humedad es mayor al porcentaje de absorción, el agregado esta aportando agua adicional a la mezcla por lo que se debe sustraer el exceso de agua, y cuando el porcentaje de absorción es mayor al porcentaje de humedad, el agregado requiere de agua adicional para su saturación, en este caso se debe aumentar el agua de mezclado.

Para el agregado grueso el porcentaje de absorción es mayor al porcentaje de humedad por lo tanto el agregado requiere de agua adicional, mientras que al agregado fino se le debe sustraer el exceso de agua debido a que el porcentaje de humedad es mayor al porcentaje de absorción.

$$Aa = PS\ \frac{(H - CA)}{100}$$

Donde:

PS = peso seco del agregado

H = humedad natural del agregado

CA = Absorción del agregado

$$Agrueso = 1167\ kg/m^3 \frac{(1 - 2.7)}{100}$$

$$Agrueso = -20\ kg/m^3$$

$$Afino = 441\ kg/m^3 \frac{(3 - 2.9)}{100}$$

$$Afino = 0.5\ kg/m^3$$

El peso húmedo de los agregados se los calcula con la humedad natural que presenta cada agregado. Ver Tabla 15.

Tabla 13

Pesos húmedos de los agregados

Pesos húmedos de los agregados	
Peso húmedo A $_{grueso}$ (kg/m^3)	1179
Peso humedo A$_{fino}$ (kg/m^3)	454

Aporte de humedad de los agregados	
A $_{grueso}$	-20
A$_{fino}$	0,5
Total	**19**

Agua efectiva	
W $_{agua\ ajuste}$ (kg/m^3)	218
V $_{agua\ ajuste}$ (l)	218

Nota: peso húmedo y aporte de humedad del agregado grueso y agregado fino (arena gris).

En la tabla 16 se presentan las proporciones iniciales corregidos por humedad de los agregados para diseño de mezcla al 100% arena gris.

Tabla 14

Proporciones de los agregados con ajuste de humedad

Componentes	***Peso seco (kg/m³)***	***Ajuste por humedad (kg/m³)***	***Volumen (L)***
Cemento	430	430	139
Agua	199	218	218
Aire	0	0	0
Agregado grueso	1167	1179	497
Agregado fino	441	454	166
Total	**2237**	**2281**	**1019**

Nota: proporciones iniciales con ajuste de agua.

Para cada muestra se elaboraron Seis (6) vigas prismáticas para ensayos de resistencia a flexión de las cuales se fallan dos (2) vigas a siete días, dos (2) a veintiocho días y dos (2) destinadas como testigos, también se elaboraron seis (6) cilindros para ensayos de resistencia a compresión de los cuales se fallan dos (2) cilindros a siete días, dos (2) a veintiocho días y dos (2) destinadas como testigos, luego de ser sometidos al tiempo de curado.

2.1.2.1.10. Cantidades para laboratorio.

Tabla 15.

Dimensiones de los especímenes

		m	***cm***	***dm***
Cilindro	***Altura***	0,3	30	3
	Diámetro	0,15	15	1,5
Viga	***Base***	0,15	15	1,5
	Altura	0,15	15	1,5
	Longitud	0,545	54,5	5,45

Nota: dimensiones de las formaletas a utilizar.

Tabla 16.

Volumen de trabajo

Elemento	Cantidad	Volumen recipiente (dm^3)	Volumen de trabajo (dm^3)	Desperdicio (5%)	Volumen final (dm^3)	
Viga	6	12,3	73,6	3,7	**77**	**111**
Cilindro	6	5,3	31,8	1,6	**33**	

Nota: Volúmenes de trabajo.

Los volúmenes de trabajo dados por las dimensiones de los especímenes cilíndricos y prismáticos son iguales para los tres diseños de mezcla.

Tabla 17.

Cantidades de material a utilizar por m^3 de concreto

	kg	***Relación***
Cemento	48	1,00
Agua	24	0,51
Agregado grueso	130	2,74
Agregado fino	50	1,06

Nota: cantidades para el diseño de mezcla con arena gris.

2.1.2.2. Arena de trituración 100%. Del ajuste granulométrico, tratando de obtener las gradaciones ideales de Fuller o Weymouth (véase Anexo G) se obtuvo:

Tabla 18

Ajuste por el método gráfico de Weymouth

Método gráfico Fuller y Weymouth	
Agregado fino (%)	55
Agregado Grueso (%)	45

Nota: Porcentajes de agregado para el diseño de mezcla de la arena de trituración.

Tabla 19.

Peso seco de los agregados

Masa total de los agregados (kg/m^3)	**1683,23**
Masa del agregado fino (kg/m^3)	932,51
Masa del agregado grueso (kg/m^3)	750,72

Nota: cantidades de agregado grueso y fino calculado con los resultados del método gráfico de Weymouth dados en la tabla 20.

2.1.2.2.1. Proporciones iniciales.

Tabla 20.

Proporciones iniciales en masa (masa seca de agregados)

Componentes	***Peso (kg/m^3)***	***Volumen (L)***
Cemento	430	139
Agua	199	199
Aire	0	0
Agregado grueso	751	319
Agregado fino	933	343
Total	**2312**	**1000**

Tabla 21

Pesos húmedos de los agregados

Pesos húmedos de los agregados	
Peso húmedo A $_{grueso}$ (kg/m^3)	758
Peso húmedo A$_{fino}$ (kg/m^3)	960

Aporte de humedad de los agregados	
A $_{grueso}$	-13
A$_{fino}$	10.5
	2
Agua efectiva	
W $_{agua\ ajuste}$ (kg/m^3)	201
V$_{aguaajuste}$ (l)	201

Nota: peso húmedo y aporte de humedad del agregado grueso y agregado fino (arena de trituración).

Tabla 22

Proporciones de los agregados con ajuste de humedad.

Componentes	***Peso seco (kg/m^3)***	***Ajuste por humedad (kg/m^3)***	***Volumen (L)***
Cemento	430	430	139
Agua	199	201	201
Aire	0	0	0
Agregado grueso	751	758	319
Agregado fino	933	960	343
Total	**2312**	**2350**	**1002**

Nota: proporciones iniciales después del ajuste de humedad para la mezcla elaborada con arena de trituración.

2.1.2.2.2. Cantidades para laboratorio.

Tabla 23.

Cantidades de material a utilizar por m^3 de concreto

	kg	***Relación***
Cemento	48	1,00
Agua	22	0,47
Agregado grueso	84	1,76
Agregado fino	106	2,23

Nota: cantidades para el diseño de mezcla con arena de trituración.

2.1.2.3. Arena gris 50% y arena de trituración 50%. para encontrar las proporciones más apropiadas para el diseño de mezcla, se deben tener en cuenta las propiedades de los materiales, los resultados del diseño de mezcla (véase Anexo H) fueron los siguientes:

2.1.2.3.1. Cantidades de los agregados

Tabla 24

Cantidades de los agregados

	W_{grueso} (kg/m^3)	**V_{grueso} (m^3)**	**V_{grueso} (L)**
Peso del agregado Grueso	1206	0,513	513
	V_f (m^3)	**V_f (L)**	**W_f (kg/m^3)**
peso del agregado fino	0,149	149	343

Nota: peso y volumen de los agregados.

2.1.2.3.2. Proporciones iniciales

Tabla 25

Proporciones iniciales en masa (masa seca de agregados)

Componentes	***Peso (kg/m³)***	***Volumen (L)***
Cemento	430	139
Agua	199	199
Aire	0	0
Agregado grueso	1206	513
Agregado fino	343	149
Total	**2179**	**1000**

Nota: proporciones iniciales para el diseño de mezcla 50% arena de trituración y 50% arena gris.

Tabla 26.

Pesos húmedos de los agregados.

Pesos húmedos de los agregados	
Peso húmedo A $_{grueso}$ (kg/m³)	1219
Peso húmedo A $_{fino}$ (kg/m³)	353
Aporte de humedad de los agregados	
A $_{grueso}$	-21
A$_{fino}$	2,1
	18
Agua efectiva	
W $_{agua\ ajuste}$ (kg/m³)	217
V$_{aguaajuste}$ (l)	217

Nota: pesos húmedos de los agregados para el diseño de mezcla 50% arena de trituración y 50% arena gris.

Tabla 27.

Proporciones de los agregados con ajuste de humedad.

Componentes	***Peso seco (kg/m³)***	***Ajuste por humedad (kg/m³)***	***Volumen (L)***
Cemento	430	430	139
Agua	199	217	217
Aire	0	0	0
Agregado grueso	1206	1219	513
Agregado fino	343	353	149
Total	**2179**	**2219**	**1018**

Nota: proporciones finales con ajuste de humedad.

2.1.2.3.3. Cantidades para laboratorio.

Tabla 28

Cantidades de material a utilizar por m³ de concreto

	kg	***Relación***
Cemento	48	1,00
Agua	24	0,51
Agregado grueso	135	2,83
Agregado fino	39	0’82

Nota: cantidades finales para el diseño de mezcla 50% arena de trituración y 50% arena gris.

2.1.3. Tercer objetivo ensayos de compresión y flexión

2.1.3.1. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto. La norma INV E – 410 tiene como objetivo aplicar una carga axial de compresión a cilindros moldeados, con una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla.

2.1.3.1.1. Ensayo a la compresión 100% arena gris

Tabla 29

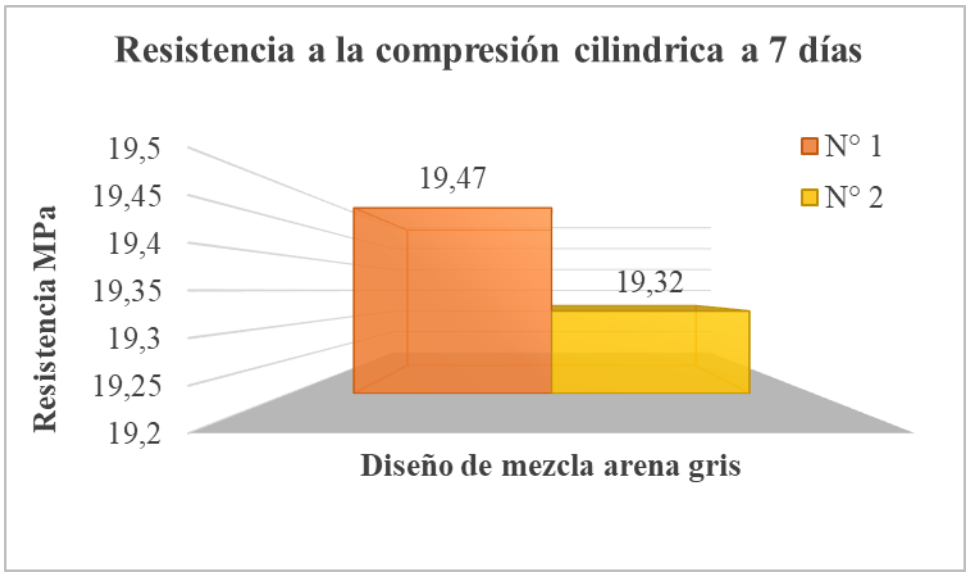
Ensayo de resistencia a la compresión a 7 días de curado.

Datos de ensayo a la compresión a 7 días de curado							
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	7	10/04/2023	18/04/2023	156	300	19,47	19,40
2	7			154	300	19,32	

Nota: datos de ensayo a especímenes de siete días de edad.

Figura 24

Gráfico de resistencia a la compresión a 7 días de curado



Nota: Resistencia a la compresión desarrollada hasta los 7 días de las probetas cilíndricas para el diseño de mezcla con el 100% de arena gris.

Tabla 30

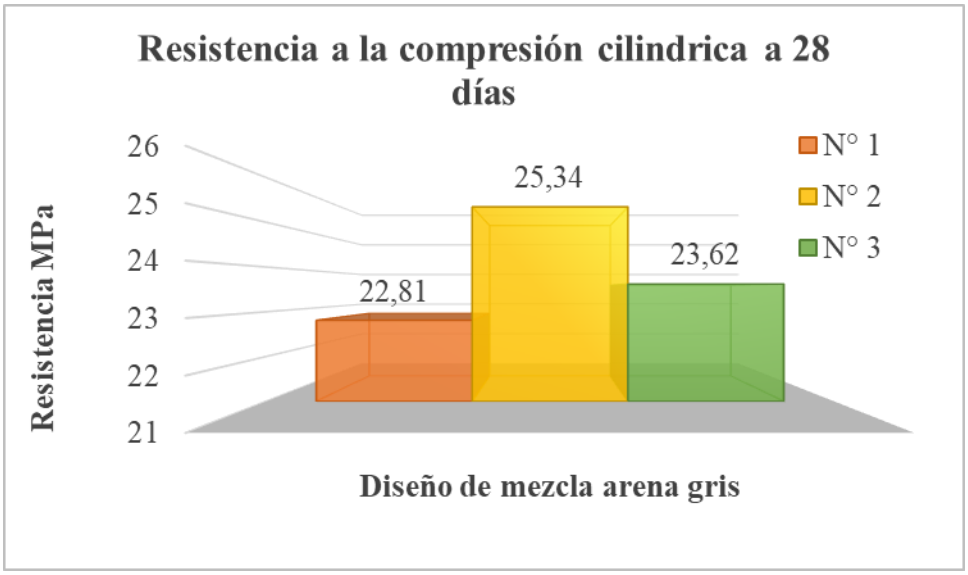
Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días de curado

Datos de ensayo a la compresión a 28 días de curado							
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	28	10/04/2023	9/05/2023	155	302	22,81	23,92
2	28			155	302	25,34	
3	28			155	302	23,62	

Nota: datos de ensayo de especímenes a veintiocho días de edad.

Figura 25

Grafico de resistencia a la compresión a 28 días de curado



Nota: resistencia a la compresión desarrollada hasta los 28 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena gris.

2.1.3.1.2. Ensayo a la compresión 100% arena de trituración

Tabla 31

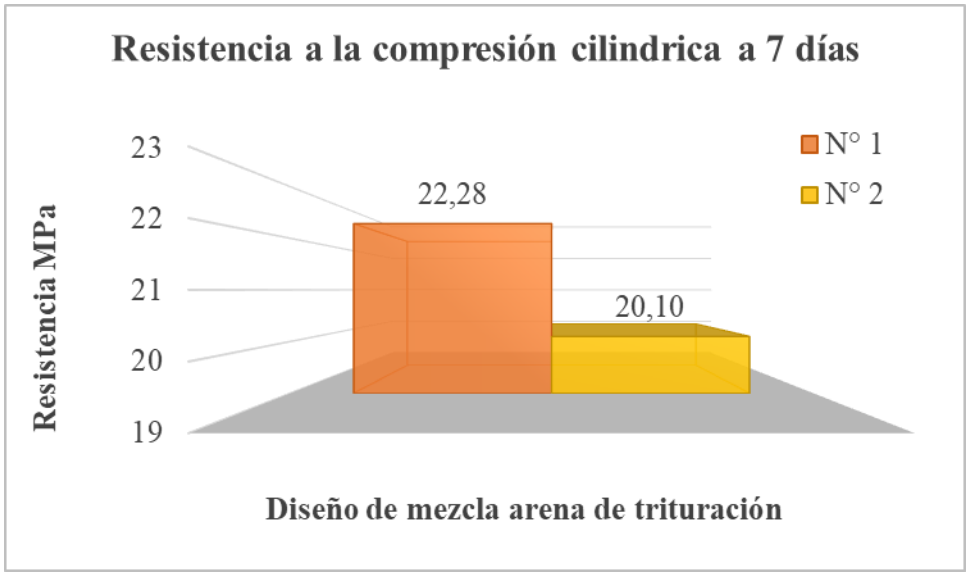
Ensayo de resistencia a la compresión a 7 días de curado

Datos de ensayo a la compresión a 7 días de curado							
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	7	12/04/2023	20/04/2023	154	304	22,28	21,19
2	7			154	303	20,10	

Nota: datos de ensayo a siete días de edad.

Figura 26

Grafico de resistencia a la compresión a 7 días de curado



Nota: resistencia a la compresión desarrollada hasta los 7 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena de trituración.

Tabla 32

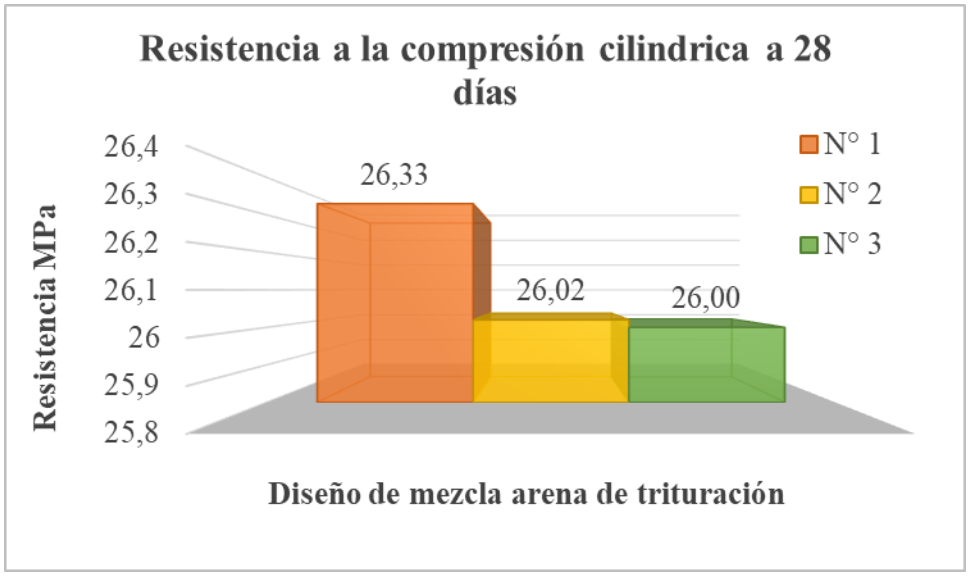
Ensayo de resistencia a la compresión a 28 días de curado

Datos de ensayo a la compresión a 28 días de curado							
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	28	12/04/2023	11/05/2023	152	303	26,33	26,12
2	28			153	301	26,02	
3	28			153	301	26,00	

Nota: datos de ensayo a veintiocho días de edad.

Figura 27

Gráfico de resistencia a la compresión a 28 días de curado



Nota: resistencia a la compresión desarrollada hasta los 28 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena de trituración.

2.1.3.1.3. Ensayo a la compresión 50% arena gris y 50% arena de trituración.

Tabla 33

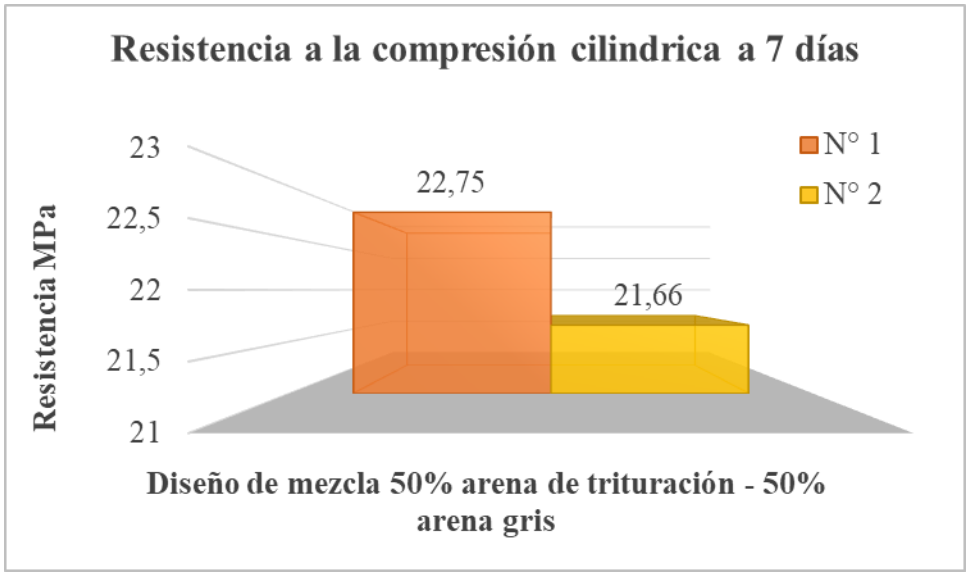
Ensayo de compresión a 7 días de curado

Datos de ensayo a la compresión a 7 días de curado							
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	7	17/04/2023	26/04/2023	154	303	22,75	22,21
2	7			153	302	21,66	

Nota: datos de ensayo a siete días de edad.

Figura 28

Gráfico de resistencia a la compresión a 7 días de curado



Nota: resistencia a la compresión desarrollada hasta los 7 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 50% de arena de trituración y 50% de arena gris.

Tabla 34

Ensayo a compresión a 28 días de curado

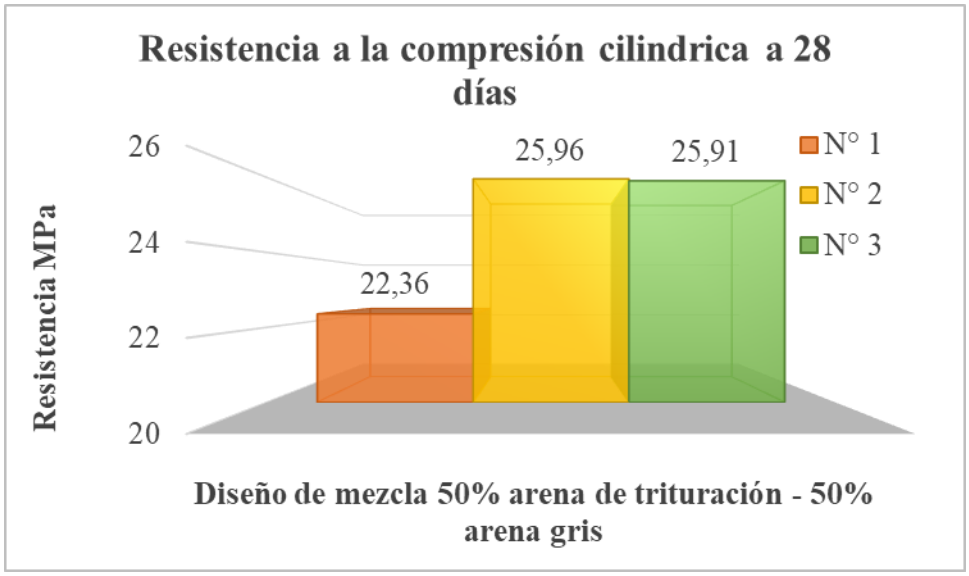
Datos de ensayo a la compresión a 28 días de curado

N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Diámetro [mm]	Altura [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	28	17/04/2023	17/05/2023	154	304	22,36	24,74
2	28			153	302	25,96	
3	28			153	302	25,91	

Nota: datos de ensayo a veintiocho días de edad.

Figura 29

Gráfico de resistencia a la compresión a 28 días de curado



Nota: resistencia a la compresión desarrollada hasta los 28 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 50% de arena de trituración y 50% de arena gris.

2.1.3.2. Resistencia a la flexión del concreto. Según la norma INV E – 414 tiene como objetivo determinar la resistencia a la flexión del concreto, empleando una viga simplemente soportada, cargada en los tercios de la luz libre.

2.1.3.2.1. Ensayo de resistencia a flexión 100% arena gris.

Tabla 35

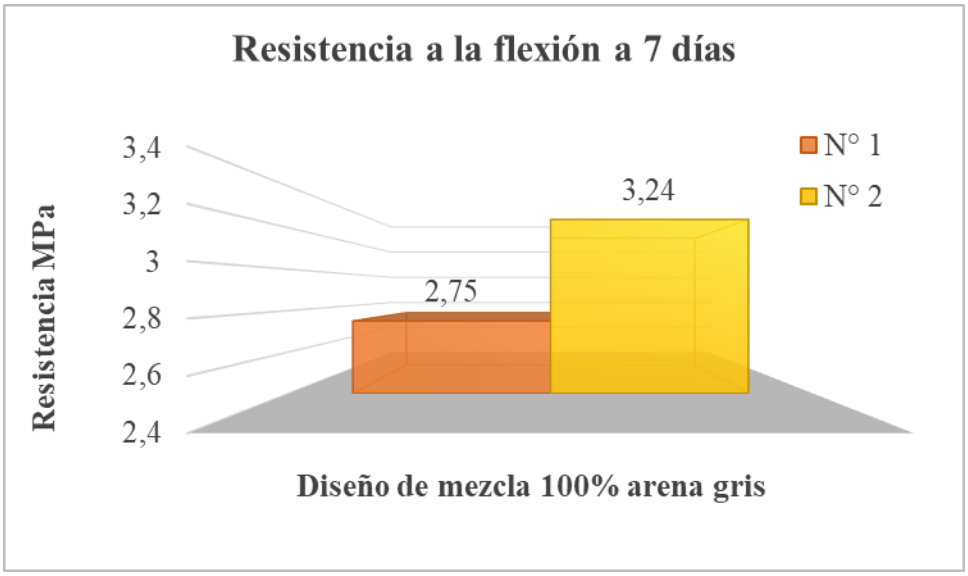
Ensayo de resistencia a la flexión a 7 días de curado.

Datos de ensayo a la flexión a 7 días de curado								
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Base [mm]	Altura [mm]	Luz [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	7	10/04/2023	19/04/2023	148	151	544	2,75	3,00
2	7			150	150	544	3,24	

Nota: datos de ensayo a siete días de edad, resistencia a flexión.

Figura 30

Gráfico resistencia a flexión a 7 días de curado



Nota: resistencia a la flexión desarrollada hasta los 7 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena gris.

Tabla 36

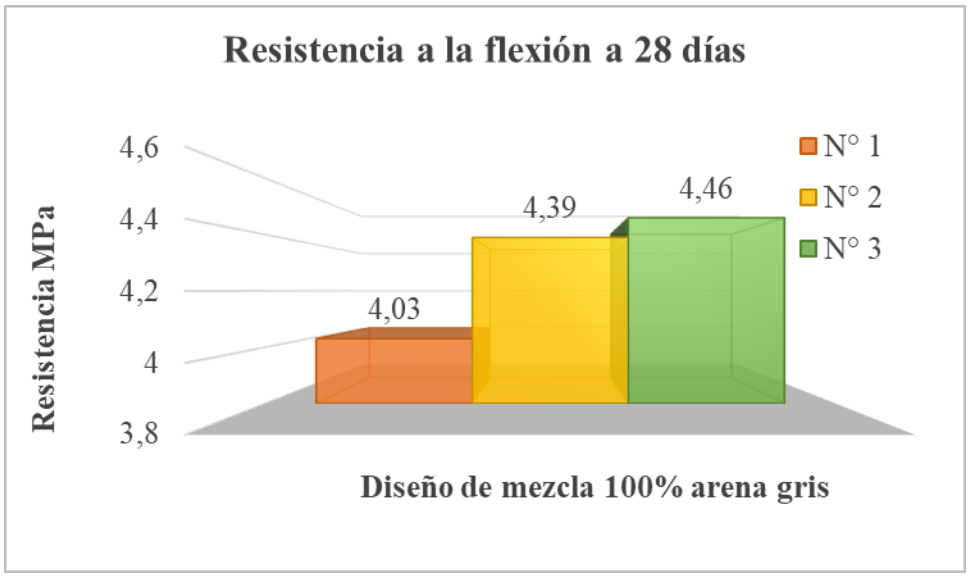
Ensayo de resistencia a la flexión 28 días de curado.

Datos de ensayo a la flexión a 28 días de curado								
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Base [mm]	Altura [mm]	Luz [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	28	10/04/2023	10/05/2023	152	150	544	4,03	4,29
2	28			153	150	543	4,39	
3	28			152	150	543	4,46	

Nota: datos de ensayo a veintiocho días de edad, resistencia a flexión.

Figura 31

Gráfico de resistencia a flexión a 28 días de curado



Nota: resistencia a la flexión desarrollada hasta los 28 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena gris.

2.1.3.2.2. Ensayo de resistencia a flexión 100% arena de trituración

Tabla 37

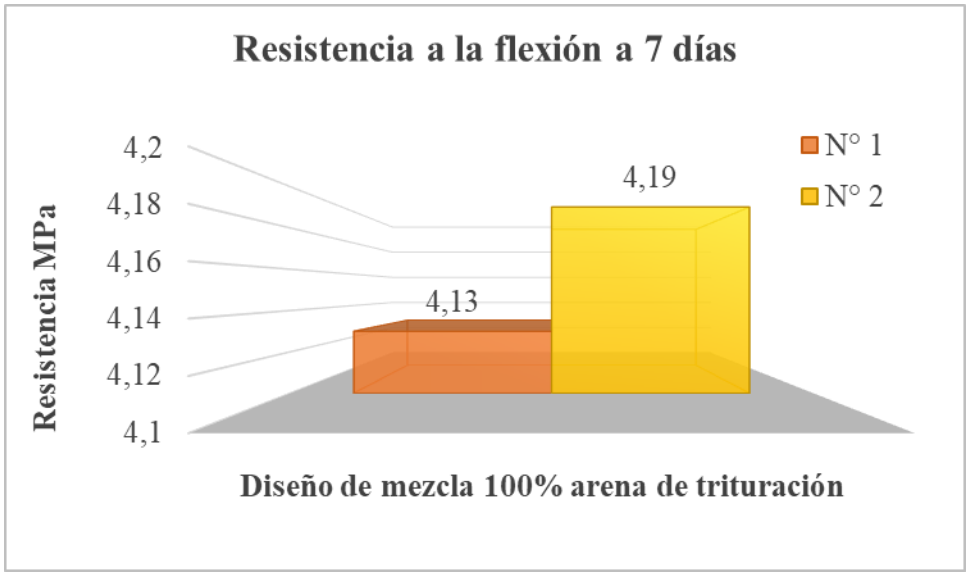
Ensayo de resistencia a flexión a 7 días de curado.

Datos de ensayo a flexión a 7 días de curado								
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Base [mm]	Altura [mm]	Luz [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	7	12/04/2023	20/04/2023	150	150	544	4,13	4,16
2	7			150	150	544	4,19	

Nota: datos de ensayo a siete días de edad, resistencia a flexión.

Figura 32

Gráfico de resistencia a flexión a 7 días



Nota: resistencia a la flexión desarrollada hasta los 7 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena de trituración.

Tabla 38.

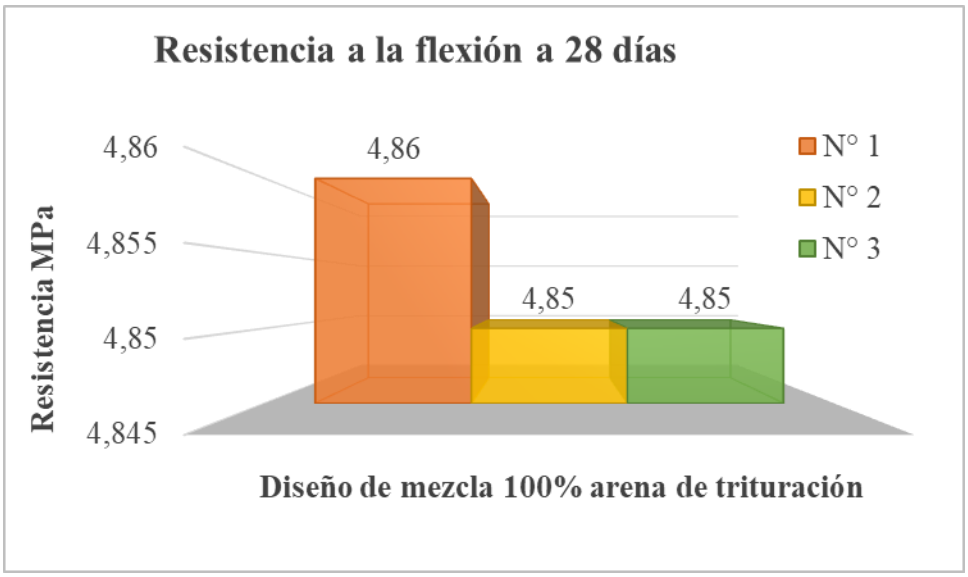
Ensayo de resistencia a flexión a 28 días de curado.

Datos de ensayo a flexión a 28 días de curado								
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Base [mm]	Altura [mm]	Luz [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	28	12/04/2023	11/05/2023	150	150	543	4,86	4,85
2	28			150	150	542	4,85	
3	28			152	150	544	4,85	

Nota: datos de ensayo a veintiocho días de edad, resistencia a flexión.

Figura 33

Grafico de resistencia a flexión a 28 días



Nota: resistencia a la flexión desarrollada hasta los 28 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 100% de arena de trituración.

2.1.3.2.3. Ensayo de resistencia a flexión, mezcla 50% AG y 50% AT.

Tabla 39

Ensayo a flexión a 7 días de curado.

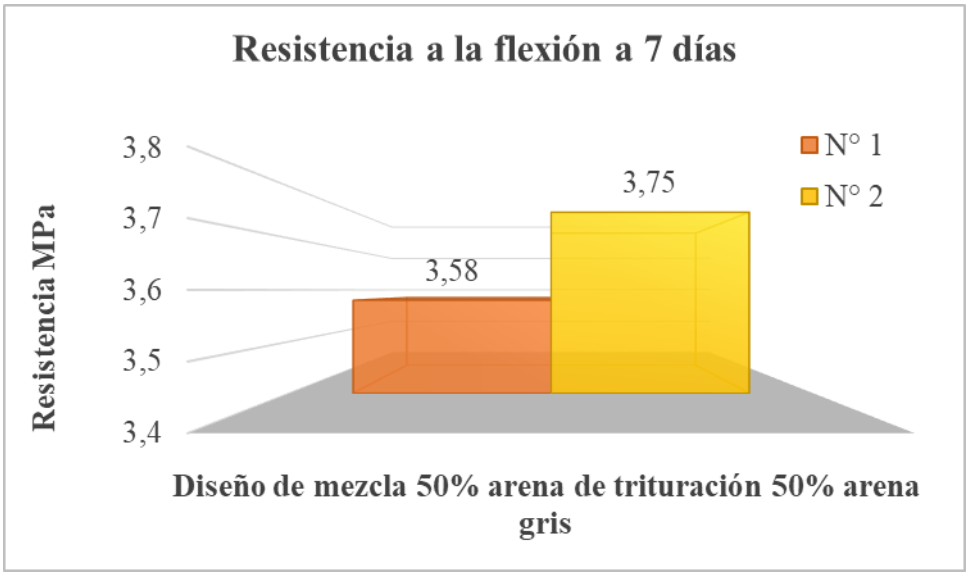
Datos de ensayo a flexión a 7 días de curado								
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Base [mm]	Altura [mm]	Luz [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	7	17/04/2023	26/04/2023	150	150	542	3,58	3,67
2	7			151	151	543	3,75	

Nota: datos de ensayo a siete días de edad, resistencia a flexión.

.

Figura 34

Grafico de resistencia a flexión a 28 días



Nota: resistencia a la flexión desarrollada hasta los 7 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 50% de arena de trituración y 50% de arena gris.

Tabla 40

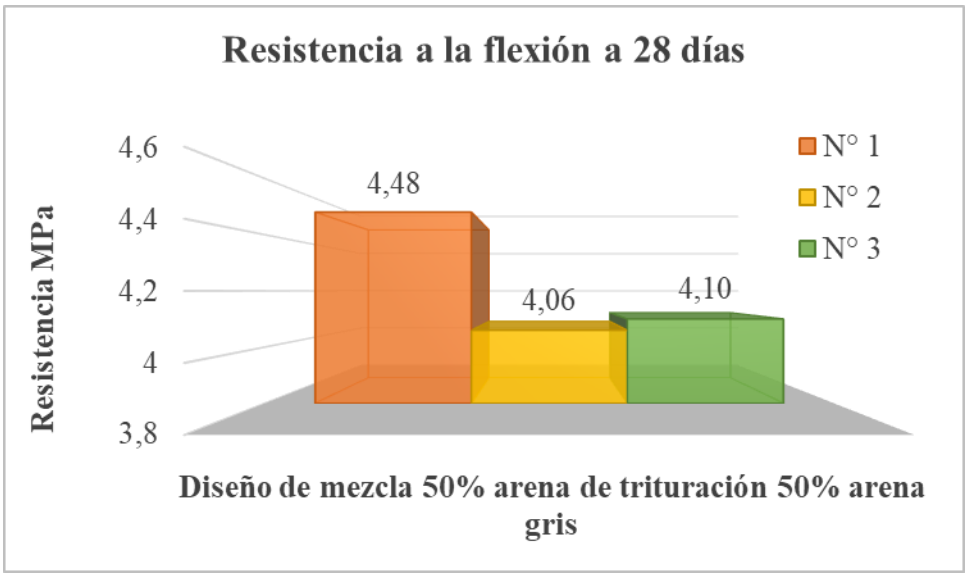
Ensayo a flexión a 28 días de curado

Datos de ensayo a flexión a 28 días de curado								
N°	Edad [días]	Fecha de mezclado	Fecha de ensayo	Base [mm]	Altura [mm]	Luz [mm]	Resistencia [MPa]	Resistencia promedio [MPa]
1	28	17/04/2023	17/05/2023	150	150	543	4,48	4,21
2	28			150	150	544	4,06	
3	28			150	150	542	4,10	

Nota: datos de ensayo a veintiocho días de edad, resistencia a flexión.

Figura 35

Resistencia a la flexión a 28 días de curado



Nota: resistencia a la flexión desarrollada hasta los 28 días de las probetas para el diseño de mezcla con el 50% de arena de trituración y 50% de arena gris.

2.2. Análisis e interpretación de resultados

2.2.1. Ensayos de caracterización a los materiales granulares

2.2.1.1. Análisis granulométrico de los agregados. En el análisis granulométrico de la arena gris, (véase Tabla 3), se observa que se encuentran dentro de los limites propuestos por las especificaciones de construcción de carreteras 2022, por lo cual se aprecia que la masa de agregados contiene todos los tamaños de grano, desde el mayor hasta el más pequeño, lo que permite que la mezcla de concreto tenga mejor resistencia, menor permeabilidad y mayor durabilidad, entre otras propiedades del concreto mientras que en los resultados de la granulometría de la arena de trituración, (véase Tabla 4), se aprecia que la curva granulométrica no se encuentra dentro de los limites dados en las especificaciones, como también se aprecia que el módulo de finura esta por fuera de los rangos, lo que quiere decir que se trata de una arena gruesa mal gradada que no es apta para la elaboración de un buen concreto, este tipo de granulometrías no son deseables debido a que producen concretos poco trabajables, con baja resistencia, baja permeabilidad y baja durabilidad , sin embargo, al no cumplir con los requisitos propuestos mencionados anteriormente, se pueden realizar optimizaciones granulométricas con base en algunos métodos, estos consisten en la combinación de los agregados de tal manera que la curva granulométrica se adapte a una curva ideal y garantice un mínimo de vacíos, algunos métodos que se pueden tomar como referencia son las curvas ideales corregidas propuestas por Fuller o Weymouth.

2.2.1.2. Determinación de terrones de arcilla y partículas deleznables. Después de realizar los ensayos correspondientes a la normativa INV E211-13, se encontraron resultados óptimos en relación con el requisito del agregado fino para concreto estructural (máximo 3%) debido a que los resultados obtenidos en laboratorio mediante la elaboración del ensayo resultaron ser menores al porcentaje requerido, por tanto, el material ensayado es apto para la utilización en la elaboración de una mezcla de concreto. Para el agregado grueso, el cual solicita el mismo requisito que el agregado fino del 3%, el porcentaje obtenido es equivalente al 0.6%, es decir, con una mínima cantidad de terrones de arcilla y partículas deleznables, demostrando que los materiales analizados son compatibles para la implementación en una mezcla de concreto.

2.2.1.3. Presencia de impurezas orgánicas en arenas. Después de realizar las paletas de vidrio con los colores de referencia respecto al líquido que sobrenada por encima de la muestra analizada, se obtuvo como resultado que la arena gris contiene un porcentaje mayo de materia orgánica respecto a la arena de trituración, sin embargo, ambas cumplen con las exigencias requeridas por la norma INV E 212, ya que están dentro de los rangos establecidos por la misma según el método aplicado para el registro de los resultados obtenidos, es decir, que las muestras analizadas cumplen para el uso respectivo en la elaboración de morteros o la elaboración de concreto.

2.2.1.4. Resistencia a la degradación de los agregados. Según el resultado que se obtuvo después de realizar el desgaste, que fue del 25,5 % se puede analizar que hay una gran cantidad de material que pierde sus propiedades físicas iniciales, esto puede alterar la mezcla de concreto si se tiene cuidado a la hora de ingresar el agregado grueso a la mezcladora.

2.2.1.5. Índice de aplanamiento y alargamiento. Después de identificar cada partícula por el calibrador de longitudes se puede deducir que existe un menor porcentaje en el índice de aplanamiento, con esta deducción se puede asegurar que el concreto tendrá óptimas condiciones de durabilidad, debido a que no hay un porcentaje alto de rocas planas que pueden fracturarse a la hora de compactar el concreto en su estado líquido.

2.2.2. Ensayos de resistencia a la compresión y flexión

Para la mezcla con arena gris, la resistencia a la compresión aumenta a medida que los especímenes tienen mayor tiempo de fraguado, siendo la resistencia máxima hasta el día 28. A los 7 días los especímenes mostraban un aumento de la resistencia a la compresión del 92.38% (19.40 Mpa) de la deseada, lo que indica que los especímenes mostraban un aumento de resistencia a los 7 días de edad, la resistencia a los 28 días fue de 23.92 Mpa, superando la de diseño en un 13.9%.

La resistencia a la flexión alcanzada a los 7 días fue de 2.75 Mpa, obtuvo un 8.75% más de la resistencia que se esperaba (2.47 MPa) y a los 28 días de curado su resistencia fue de 4.29 Mpa superando en un 8.25% su máxima resistencia de diseño.

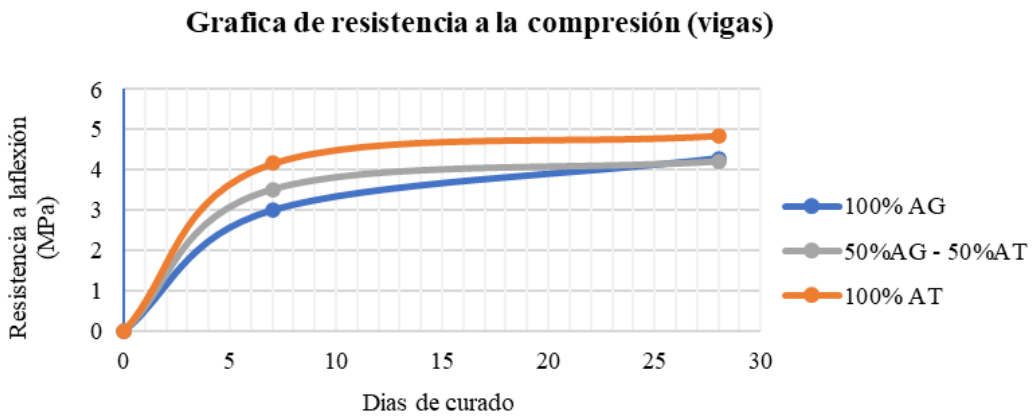
Para la mezcla que sustituían el 100% del agregado fino por arena de trituración tanto su resistencia a compresión (véase Tabla 32 y 33) y su resistencia a flexión (véase Tabla 38 y 39) alcanzaron más del 100% la resistencia de diseño, superando la resistencia del diseño de las otras dos mezclas, es decir, la realizada con el 100% de arena gris y con el 50% arena gris y 50% arena de trituración.

Cada una de las mezclas cumplieron con la resistencia de diseño, pero la mezcla con el 100% de arena de trituración fue la que mejor resultado obtuvo tanto en la resistencia a la compresión como en el módulo de rotura siendo así un buen material para la elaboración de un concreto. Con los resultados obtenidos se puede observar que el uso de la arena de trituración en un diseño de mezcla no afecta las propiedades físicas del concreto, pero si tiene un aumento en la optimización de sus propiedades en comparación con los otros diseños de mezcla en donde se implementó el 100% y el 50% de arena gris.

En el (Anexo I) se encuentran las gráficas representando el crecimiento de la resistencia a compresión y a flexión de las diferentes mezclas de concreto.

Figura 36

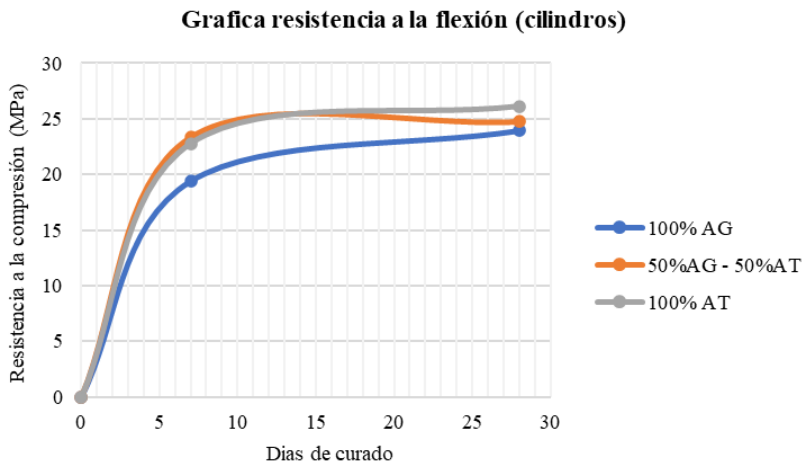
Gráfico de resistencia a compresión de los diferentes diseños de mezcla



Nota: Resistencia a la compresión versus el tiempo de curado para los tres diseños de mezcla.

Figura 37

Gráfico de resistencia a flexión de los diferentes diseños de mezcla



Nota: Resistencia a la flexión versus el tiempo de curado para los tres diseños de mezcla.

3. Conclusiones

Con los resultados presentados después de los ensayos se deduce que, al reemplazar la arena gris por diferentes porcentajes de arena de trituración, que fueron del 50% y 100%, se alcanza de igual manera e inclusive se superan las resistencias a compresión y flexión solicitadas, en este caso de 21 MPa para resistencia a compresión y 3.8 MPa para resistencia a flexión.

Tras el análisis, se puede deducir que, las proporciones del diseño de mezcla cambian. El diseño con el 100% de arena de trituración implica un menor porcentaje de agregado grueso disminuyendo en un 35.39% y presenta un mayor porcentaje de agregado fino aumentando en un 52.83% a comparación de las proporciones del diseño con el 100% de arena gris, esto sucede debido a que la arena de trituración presenta partículas más gruesas que la arena gris.

La granulometría es una de las características más importantes de los agregados, debido a que su elaboración permite conocer si las propiedades de los materiales a utilizar son aptas para la elaboración de un concreto, ya que arroja diferentes tamaños de partículas que constituyen la masa de agregados, dando a conocer si son granulometrías continuas, es decir, que contengan partículas de agregado con todos los tamaños ya que esto permite que la mezcla tenga el mínimo de vacíos posibles garantizando una mejor resistencia a la mezcla en estado endurecido. Si son granulometrías discontinuas, las partículas son del mismo tamaño y producen concretos poco trabajables con baja resistencia. En el presente estudio se observó que la granulometría de la arena de trituración aun teniendo su módulo de finura mayor y no cumpliendo con las curvas granulométricas especificadas, se puede ajustar su granulometría con métodos como el de Weymouth, en donde se obtuvo una curva granulométrica ideal.

En relación a la elaboración del concreto, partiendo desde los distintos porcentajes de los agregados se puede inferir que, la manejabilidad del concreto elaborado con el 100% de arena de trituración presenta ligeras variaciones respecto al diseño con el 100% de arena gris, puesto que la arena de trituración presenta más partículas gruesas, por ende, la mezcla tiende a secarse más rápido y tener menos fluidez.

Los agregados usados para realizar las diferentes mezclas de concreto cumplen con los requisitos establecidos (Especificaciones generales de construcción de carreteras 2022), son agregados de buena calidad, bien gradados, limpios, resistentes a abrasión lo que permite que se elabore un buen concreto con buena resistencia.

4. Recomendaciones

Se deja abierta la investigación para posibles estudios futuros con el fin de realizar un análisis mecánico especifico con briquetas.

Al ser una mezcla semiseca no se recomienda implementarla en estructuras de mucha altura debido a su fluidez y su manejabilidad.

Referencias

Anonimo. (26 de Diciembre de 2018). *Petreos naturales.* Obtenido de Materiales de uso tecnico IV. Petreos naturales y artificiales: http://www.iespando.com:81/tecnologia/images/stories/materiales/petreos.pdf

anónimo. (junio de 2021). *einforma información de empresas.* Obtenido de presentación del sector cemento: https://www.einforma.co/informes-sectoriales/sector-cemento

Asociación Colombiana de Productores de Concreto. (26 de junio de 2020). *360 en concreto.* Obtenido de Tipos de concreto según el sistema de colocación y compactación.: https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoria/tecnologia-del-concreto/tipos-de-concreto-segun-el-sistema-de-colocacion-y-compactacion

Beixing, L., Guoju , K., & Mingkai, Z. (10 de october de 2011). *science direct.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061811001449

CEMENTOS CIBAO. (08 de septiembre de 2017). *Arena, sus tipos y sus clasificaciones.* Obtenido de cementos CIBAO: https://www.cementoscibao.com/arena-sus-tipos-y-sus-clasificaciones/

Dominguez, D. G. (13 de junio de 2016). *módulo de ruptura del concreto.* Obtenido de prezi: https://prezi.com/-k4ruolijuhq/modulo-de-ruptura-del-concreto/

Estupiñan, D. F. (16 de enero de 2020). *formacionestrategica.* Obtenido de https://formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/18/14

Euch Khay, E., Neji, J., & Luolizi, A. (9 de september de 2010). *sciencedirect.* Obtenido de https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061810000437

Herrera, G. p. (12 de abril de 2018). *Norma INVIAS.* Obtenido de Capítulo 5 ART. 500-13: http://gerconcesion.co/invias2013/500%20PAVIMENTO%20DE%20CONCRETO%20HIDRAULICO.pdf

INVIAS, I. N. (29 de Noviembre de 2022). *Portal INVIAS Colombia*. Obtenido de Especificaciones generales de costruccion de carreteras 2022 : https://www.invias.gov.co/index.php/informacion-institucional/139-documento-tecnicos/4570-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras

JOEL, M. (24 de december de 2010). *leonardo electronic journal of practices and technologies.* Obtenido de http://lejpt.academicdirect.org/A17/085_096.pdf

M&S Ingenieria y equipos. (06 de Mayo de 2021). *Arena de trituracion.* Obtenido de Ingenieriaytopografia.co: https://ingenieriaytopografia.co/venta-arena-de-trituracion.html#:~:text=La%20arena%20de%20Trituraci%C3%B3n%20se,una%20de%20mayor%20calidad%20debido

Matallana Rodríguez , R. (2019). *El concreto fundamentos y nuevas tecnologias.* Bogotá.

Mocondino, J. J. (29 de Abril de 2020). *Pavimento.* Obtenido de Construyored: https://construyored.com/noticias/2299-que-es-un-pavimento

Ramos, H. (16 de septiembre de 2019). *AGREGADOS: GRAVAS Y ARENAS PARA LA CONSTRUCCIÓN.* Obtenido de ARGOS, 360 EN CONCRETO:

https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/agregados-gravas-y-arenas-para-la-construccion

Rivera, G. (s.f.). *Concreto simple.*