

**COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ADICIONADO FIBRAS DE
POLIPROPILENO Y RECICLADAS DE BOTELLAS PET**

**JAVIER ANDRES SANTACRUZ CORAL
IVAN DARIO SARCHI**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2015

**COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ADICIONADO FIBRAS DE
POLIPROPILENO Y RECICLADAS DE BOTELLAS PET**

**JAVIER ANDRES SANTACRUZ CORAL
IVAN DARIO SARCHI**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Civil**

**Director:
Ingeniero Vicente Parra Santacruz**

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL
SAN JUAN DE PASTO**

2015

NOTA DE RESPONSABILIDAD

Las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1. Del acuerdo N° 324 de Octubre 11 de 1966, emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

“La Universidad de Nariño no se hace responsable de las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor”

Artículo 13, Acuerdo N. 005 de 2010, emanado del Honorable Consejo Académico.

Nota de aceptación

Director

Jurado

Jurado

San Juan de Pasto, Diciembre de 2015

AGRADECIMIENTOS

Dedicamos este trabajo a nuestros padres por su apoyo incondicional y consejos de vida que nos guiaron para seguir adelante.

Agradecemos a nuestras familias y amigos por su apoyo y comprensión.

Al Ingeniero Vicente Parra, por su tiempo, asesoría, enseñanzas y conocimiento, el cual fue valioso en el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, a los laboratoristas Gustavo Ponce y Roberto García quienes fueron de gran ayuda por su conocimiento y amistad.

RESUMEN

A la luz de las necesidades de la Ingeniería Civil y la clara responsabilidad con el medio ambiente, se adelantó el presente trabajo de investigación que tiene como propósito analizar y establecer una comparación entre el comportamiento del concreto convencional y el concreto adicionado con fibras de polipropileno y fibras recicladas de botellas PET, a partir de su desempeño al ser sometidos a ensayos de compresión y flexión.

El enfoque de esta investigación, parte de considerar que es necesario crear un equilibrio entre las necesidades de la construcción y la protección del medio ambiente; por lo tanto, siendo el plástico un material que tarda muchos años en desintegrarse y que por su gran volumen, ocupa enormes espacios en los rellenos sanitarios, la ingeniería puede dar usos alternativos a este material posicionándose como parte activa en la generación de condiciones sostenibles para el medio ambiente y el mejoramiento de la calidad de vida.

En ese sentido, en el curso de la presente investigación, una vez caracterizados los materiales de preparación del concreto, fueron elaboradas tres tipos de mezcla: la primera correspondiente a la muestra patrón (concreto convencional), la segunda contiene la mezcla convencional adicionada con Fibra SIKA FIBER y una última, que contiene la mezcla convencional adicionada con FIBRAS RECICLADAS DE BOTELLAS PET. Con la preparación de dichas mezclas, fueron elaborados cilindros y vigas que posteriormente se sometieron a ensayos de compresión y flexión, evaluando la resistencia a la compresión y módulo de rotura respectivamente, análisis que se produjo a la edad de 7 y 28 días.

Finalmente, se verifica que los concretos trabajados presentan diferentes comportamientos en cada uno de los ensayos y edades, resultando viable la utilización de fibras recicladas para el mejoramiento del concreto sometido a flexión, cuando el concreto ha llegado a su madurez máxima, entendiendo esta como la relación entre la temperatura del concreto, el tiempo y el aumento de la resistencia; esta última atraviesa un periodo de evolución que se hace cada vez más lento con el pasar del tiempo, hasta que logra estabilizarse. Por esa razón, se adopta como resistencia patrón la alcanzada a los 28 días, dado que a esa edad el concreto ha alcanzado gran parte de su resistencia total.

Sin embargo, teniendo en cuenta lo anterior se verifica que bajo las mismas condiciones no se obtiene un resultado favorable a compresión.

ABSTRACT

Address the needs of civil engineering and a clear responsibility to the environment, the present research work aims to analyze and make a comparison between the behavior of conventional concrete and concrete added with polypropylene fibers and recycled fibers of PET bottles from their performance when subjected to compressive and bending.

The focus of this research starts by considering the need to create a balance between the needs of construction and environmental protection; so being the plastic a material that takes many years to disintegrate and due to its large volume it occupies huge space in landfills decreasing their lifetime, engineering can provide alternative uses for this material positioning itself as an active part in creating sustainable conditions for the environment and improving the quality of life.

In that sense, in the course of this investigation, once characterized the preparation of concrete materials, three kinds of mixture were prepared: The first corresponds to the pattern sample (conventional concrete), the second contains the conventional mixture with added SIKA FIBER, and the last conventional mixture containing added with recycled PET bottle fibers. With the making of such mixtures, cylinders and beams were subsequently prepared and put into trials, evaluating bending and compression, modulus of rupture and compressive strength respectively. This analysis occurred at the age of 7 and 28 days.

Finally, it is verified that the worked concrete exhibit different behaviors in each of the trials and ages, resulting feasible to use recycled fibers to improve the concrete subjected to bending fibers when the concrete has reached its peak maturity, is understood as the relationship between the concrete temperature, time and increased resistance; the latter through a period of evolution is getting slower with the passage of time, until it can stabilize. For that reason, it is adopted as a standard resistance that achieved at 28 days, because at that age the concrete has achieved much of its total resistance.

However, considering the above verified and under the same conditions, there isn't obtained favorable to compression result.

GLOSARIO

ANOVA DE UN FACTOR: (Analysis of variance) el análisis de varianza sirve para comparar varios grupos de una variable cuantitativa.

ESPACIO MUESTRAL: consiste en el conjunto de todos los posibles resultados individuales de un experimento aleatorio.

PET: es la abreviatura de polietileno tereftalato, una resina plástica y una forma de poliéster. Es un tipo de materia prima plástica derivada del petróleo.

POLIETILENO: es químicamente el polímero más simple. Considerado uno de los plásticos más comunes debido a su bajo precio y simplicidad en su fabricación.

POLIPROPILENO: compuesto químico que se obtiene por polimerización del propileno; es un polímero versátil que cumple una doble tarea, como plástico y como fibra.

SUSTENTABILIDAD: existencia de condiciones económicas, ecológicas, sociales y políticas que permitan su funcionamiento de forma armónica a lo largo del tiempo y del espacio.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	15
1. METODOLOGIA.....	19
1.1. RECOPIACIÓN Y VERIFICACIÓN DE INFORMACIÓN	19
1.2. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO	19
1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	20
1.4. CONCLUSIONES.....	20
1.5. INFORME FINAL.....	20
2. CARACTERISTICAS DEL CONCRETO	21
3. MATERIALES.....	23
3.1. CEMENTO	23
3.2. AGREGADOS (ÁRIDOS)	24
3.3. AGUA	24
3.4. FIBRAS DE POLIPROPILENO DE SIKA SIKAFIBER AD.....	25
3.5. FIBRAS RECICLADAS DE BOTELLAS PET	26
4. CARACTERIZACION DE AGREGADOS	27
4.1. CARACTERIZACIÓN AGREGADO GRUESO	27
4.1.1. Granulometría agregados gruesos.....	27
4.1.2. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos.....	28
4.1.3. Peso unitario.....	30
4.2. CARACTERIZACION AGREGAGO FINO.....	31
4.2.1. Granulometría agregado fino.....	31
4.2.2. Gravedad específica y absorción de agregados.....	32
4.2.3. Peso unitario.....	33
5. DOSIFICACION DE LA MEZCLA.....	34
5.1. FULLER AJUSTADA.....	35
5.2. SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO	36
5.3. SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO	37
5.4. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DE MEZCLADO.....	37

5.5.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO.....	38
5.6.	SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO	38
5.7.	CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO	38
5.8.	DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LOS AGREGADOS.....	39
5.9.	PROPORCIONES INICIALES EN PESO SECO	39
6.	MEZCLA DE PRUEBA	40
6.1.	PRIMERA MEZCLA DE PRUEBA.....	40
6.2.	AJUSTE POR ASENTAMIENTO.....	41
6.3.	SEGUNDA MEZCLA DE PRUEBA	42
6.4.	AJUSTE POR RESISTENCIA	44
6.5.	TERCERA MEZCLA DE PRUEBA	45
7.	ELABORACIÓN DE LA MUESTRA PILOTO.....	47
7.1.	ELABORACIÓN PRUEBA PILOTO DE VIGAS.....	47
7.2.	ELABORACIÓN PRUEBA PILOTO DE CILINDROS	50
8.	RESULTADOS DE LA MUESTRA PILOTO	53
8.1.	RESULTADOS DE CILINDROS.....	53
8.2.	RESULTADOS DE VIGAS	60
9.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	66
9.1.	ANÁLISIS DE VARIANZA	67
10.	ESTIMACION ECONOMICA DEL NUEVO PRODUCTO	73
11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	75
12.	CONCLUSIONES.....	79
13.	RECOMENDACIONES	80
14.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Analisis granulométrico agregado grueso	27
Tabla 2. Requisitos granulometría agregado grueso según ASTM C-33	28
Tabla 3. Gravedad específica y absorción agregados gruesos I.N.V.E-223	29
Tabla 4. Peso unitario compacto.....	30
Tabla 5. Peso unitario suelto.....	30
Tabla 6. Análisis granulométrico agregado fino	31
Tabla 7. Requisitos de granulometría según ASTM C33 y NTC 174	31
Tabla 8. Gravedad específica y absorción agregado fino I.N.V.E-222-07	32
Tabla 9. Peso unitario compacto I.N.V.E-217-07	33
Tabla 10. Peso unitario suelto I.N.V.E-217-07	33
Tabla 11. Resumen para dosificación de mezcla.....	34
Tabla 12. Fuller ajustado para los diferentes tamices.....	35
Tabla 13. Mezcla de arena y gravilla empleando curva Fuller ajustada.....	36
Tabla 14. Selección de asentamiento	37
Tabla 15. Agua de mezclado en kg/m ³ de concreto.....	37
Tabla 16. Resistencia requerida de diseño	38
Tabla 17. Relación agua/cemento	38
Tabla 18. Proporciones Iniciales en peso seco.....	39
Tabla 19. Volumen de concreto para primera mezcla de prueba.....	40
Tabla 20. Resultados de la primera mezcla.....	40
Tabla 21. Mezcla preparada corrección por asentamiento	41
Tabla 22. Proporciones ajuste por asentamiento.....	41
Tabla 23. Volumen a preparar segunda mezcla de prueba	42
Tabla 24. Resultados segunda mezcla	43
Tabla 25. Resultados ensayo compresión ajuste por asentamiento 7 días	43
Tabla 26. Resultados ensayo compresión ajuste por asentamiento 28 días	44
Tabla 27. Mezcla preparada corrección por resistencia.....	44
Tabla 28. Proporciones ajuste por resistencia	45
Tabla 29. Volumen a preparar para tercera mezcla de prueba.....	45
Tabla 30. Resultados de tercera mezcla.....	46
Tabla 31. Resultados de ensayos compresión ajuste por resistencia a 7 días	46
Tabla 32. Resultados de ensayos compresión ajuste por resistencia a 28 días	46
Tabla 33. Volumen de concreto a preparar muestra piloto vigas	47
Tabla 34. Resultados de la primera lechada piloto vigas	48
Tabla 35. Elaboración muestra piloto vigas	49
Tabla 36. Volumen de concreto a preparar muestra piloto cilindros	50

Tabla 37. Resultados de la primera lechada piloto cilindros	50
Tabla 38. Elaboración prueba piloto cilindros	52
Tabla 39. Resultados a compresión edad 7 días muestra patrón	55
Tabla 40. Resultados a compresión edad 28 días muestra patrón	55
Tabla 41. Resultados a compresión edad 7 días cilindros fibras Sikafiber	56
Tabla 42. Resultado a compresión edad 28 días concreto fibras Sikafiber	57
Tabla 43. Resultado compresión edad 7 días concreto fibras recicladas PET	58
Tabla 44. Resultado compresión edad 28 días concreto fibras recicladas PET	59
Tabla 45. Resultados a flexión edad 7 días muestra patrón	61
Tabla 46. Resultados a flexión edad 28 días muestra patrón	61
Tabla 47. Resultados a flexión edad 7 días fibras Sikafiber	62
Tabla 48. Resultados a flexión edad 28 días fibras Sikafiber	63
Tabla 49. Resultados flexión edad 7 días muestra con fibras recicladas PET	64
Tabla 50. Resultados flexión edad 28 días muestra con fibras recicladas PET	65
Tabla 51. Resistencia de diseño para análisis estadístico	66
Tabla 52. Compilación de resultados cilindros 7 días	67
Tabla 53. Análisis estadístico cilindros 7 días	67
Tabla 54. Anova de un factor para cilindros 7 días	68
Tabla 55. Compilación de resultados cilindros 28 días	69
Tabla 56. Análisis estadístico cilindros 28 días	69
Tabla 57. Anova de un factor para cilindros 28 días	69
Tabla 58. Compilación de resultados de vigas 7 días	70
Tabla 59. Análisis estadístico vigas 7 días	70
Tabla 60. Anova de un factor para vigas 7 días	70
Tabla 61. Compilación de resultados vigas 28 días	71
Tabla 62. Análisis estadístico vigas 28 días.	72
Tabla 63. Anova de un factor para vigas 28 días	72
Tabla 64. Estimación económica concreto patrón	73
Tabla 65. Estimación económica concreto con fibras Sikafiber	73
Tabla 66. Estimación económica concreto con fibras recicladas PET	73
Tabla 67. Análisis costo-resistencia	74
Tabla 68. Análisis costo-beneficio cilindros	74
Tabla 69. Análisis costo-beneficio vigas	74
Tabla 70. Densidad del cemento argos tipo I	75
Tabla 71. Resultado de cilindros-compresión	77
Tabla 72. Resultado vigas-flexión	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fibras polipropileno Sikafiber AD.....	25
Figura 2. Fibras recicladas de botellas PET	26
Figura 3. Gráfica granulometría y requisitos según la ASTM-33.....	28
Figura 4. Gráfica granulometría finos y requisitos según la ASTM C33.....	32
Figura 5. Mezcla de arena-gravilla empleando curva fuller ajustada	36
Figura 6. Determinación del Asentamiento	42
Figura 7. Resultado calculadora tamaño muestral GRANMO.....	53
Figura 8. Probetas Cilíndricas y maquina de ensayo de cilindros.....	54
Figura 9. Cilindros de concreto y cilindro ensayado.....	54
Figura 10. Resistencia Vs Tiempo de curado de cilindros patrón	56
Figura 11. Resistencia Vs Tiempo de curado cilindros con fibras Sikafiber	57
Figura 12. Resistencia Vs Tiempo de curado cilindros con fibras recicladas PET ..	59
Figura 13. Comparación Resistencia Vs Tiempo de los concretos trabajados	59
Figura 14. Máquina de ensayo y molde para viguetas.....	60
Figura 15. Vigas falladas	60
Figura 16. Módulo de rotura Vs Tiempo de curado de vigas patrón	62
Figura 17. Módulo de rotura Vs Tiempo de curado de vigas con fibras sikafiber...	63
Figura 18. Módulo de rotura Vs Tiempo curado vigas con fibras recicladas PET ..	65
Figura 19. Módulo de rotura Vs Tiempo de los concretos trabajados.	65
Figura 20. Campana de Gauss.....	66
Figura 21. Gráfico anova para cilindros a 7 días.....	68
Figura 22. Gráfico anova para cilindros a 28 días.....	69
Figura 23. Gráfico anova para vigas a 7 días	71
Figura 24. Gráfico anova para vigas 28 días	72

ANEXOS

Anexo 1. ETAPAS DE ELABORACIÓN DEL CEMENTO	82
Anexo 2. CICLO GEOLÓGICO DE LAS ROCAS.....	85
Anexo 3. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA	86
Anexo 4. PASOS PARA GRANULOMETRIA DE GRUESOS.....	87
Anexo 5. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE GRUESOS	89
Anexo 6. PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTO	90
Anexo 7. GRANULEMETRÍA DE FINOS	91
Anexo 8. GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE FINOS.....	92
Anexo 9. PESO UNITARIO SUELTO Y COMPACTO	94
Anexo 10. PRIMERA MEZCLA DE PRUEBA	96
Anexo 11. ELABORACIÓN DE VIGAS	98
Anexo 12. ELABORACIÓN DE CILINDROS	103
Anexo 13. RESULTADOS DE CILINDROS (ENSAYO DE COMPRESIÓN)	105
Anexo 14. RESULTADOS DE VIGAS (ENSAYO DE FLEXIÓN)	108

INTRODUCCIÓN

Teniendo en cuenta que el concreto es la base de la construcción en Colombia y que se requiere contar con concretos de calidad que cumplan las especificaciones mínimas de manejabilidad, resistencia, durabilidad y economía, se ve la necesidad de adelantar investigaciones que permitan mejorar las condiciones del concreto, superando las actuales ofrecidas por el concreto convencional.

Adicionalmente, es claro que actualmente la Ingeniería Civil no solo debe responder a las necesidades propias de la construcción, sino que su actividad debe verse reflejada positivamente en el impacto medio ambiental; con ello se quiere decir, que es indispensable hoy por hoy dados los requerimientos de las naciones en todo el mundo, propender por una ingeniería responsable con el medio ambiente, que contrario a generar condiciones de destrucción adopte mecanismos de utilización sostenible de los recursos.

En ese sentido, esta investigación pretende analizar y establecer una comparación entre el comportamiento del concreto convencional y el concreto adicionado con fibras de polipropileno y fibras recicladas de botellas PET, a partir de su desempeño al ser sometidos a ensayos de compresión y flexión. Lo anterior, permite no solo identificar posibles mejoras a la capacidad de resistencia del concreto y la optimización de sus propiedades, sino además, dar un uso alternativo a materiales como el plástico, que por su gran volumen representa más del 12% de la cantidad de residuos sólidos urbanos, perjudicando enormemente la atmosfera del planeta.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para el desarrollo de la construcción en Colombia, se han utilizado distintos tipos de materiales atendiendo a las necesidades climatológicas, económicas, ambientales y disponibilidad en el mercado, por lo que elementos como la madera, la roca y el concreto han sido muy utilizados, siendo este último uno de los más comunes en la construcción no solo nacional sino mundial.

No obstante, es necesario que se estudien, se investiguen y se apliquen mecanismos para mejorar las propiedades físico-mecánicas del concreto, incidiendo en el mejoramiento de las construcciones pero adicionalmente, que sean medioambientalmente responsables. Una buena alternativa es la reutilización de elementos como el plástico, que al ser desechados producen altos índices de contaminación por requerir mayor cantidad de tiempo para su degradación.

Por lo anterior, se requiere realizar análisis que permitan determinar el comportamiento del concreto adicionado con fibras de polipropileno y fibras recicladas de botellas PET, a través de ensayos que determinen las cualidades del concreto al ser sometido a cargas de compresión y flexión.

Por todas estas razones, deben adelantarse estudios de investigación que permitan optimizar el uso del concreto, desde sus características propias y adicionalmente, que reivindiquen a la ingeniería como parte activa en la generación de condiciones sostenibles para el medio ambiente y el mejoramiento de la calidad de vida.

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el comportamiento del concreto convencional y concreto adicionado con fibras de polipropileno y de fibras de botellas PET recicladas a partir de su desempeño al ser sometidos a ensayos de compresión y flexión?

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar el comportamiento del concreto convencional, concreto adicionado con fibras de polipropileno y concreto con fibras recicladas de botellas PET.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los agregados grueso y fino, para lograr la dosificación y alcanzar el concreto mayor 3000 PSI, necesario para el desarrollo del estudio.
- Realizar los ensayos de compresión y flexión para concreto convencional, concreto adicionado con fibras de polipropileno y concreto adicionado con fibras de botellas PET.
- Comparar el comportamiento del concreto con fibras de polipropileno, el comportamiento del concreto con fibras recicladas de botellas PET y el concreto convencional, a diferentes edades (7 y 28) y analizar los resultados de los dos ensayos de resistencia realizados (compresión y flexión).
- Determinar los costos de cada una de las mezclas de los concretos sin fibra, con fibra de polipropileno y con fibra reciclada de botellas PET.

JUSTIFICACION

El concreto es el material por excelencia utilizado para el desarrollo de las obras civiles; no obstante, siempre se ha intentado mejorar la capacidad de resistencia, rapidez de fraguado y otras características del concreto, agregándole fibras y aditivos que contribuyan a mejorar sus propiedades físico mecánicas y al tiempo, que aporten al sostenimiento del medio ambiente.

La utilización de fibras en los concretos si bien ha sido una práctica ya utilizada en Colombia para el desarrollo de las obras civiles, constituye un campo poco estudiado a nivel académico, por lo que requiere del desarrollo de estudios investigativos que permitan identificar sus propiedades y las mejoras que pueden causar al usarlas en los concretos. En ese sentido, al someter un concreto adicionado con fibras de polipropileno y fibras recicladas de botellas PET a ensayos de compresión y flexión, es posible determinar los cambios en el comportamiento del producto denominado concreto hidráulico.

Esto resulta importante para la región, teniendo en cuenta que es una zona volcánica y sísmica, lo que hace necesario tener construcciones que cuenten con condiciones de mejor resistencia construidas a base de concreto de excelente calidad. Así las cosas este proyecto pretende comparar una muestra patrón sin ningún aditivo ni fibra (concreto convencional), con dos tipos de concretos adicionados: uno con fibras de polipropileno y otro con fibras recicladas de botellas PET, los cuales serán sometidos a dos tipos de cargas: compresión y flexión. En general, es averiguar los comportamientos de los productos con las adiciones.

1. METODOLOGIA

1.1. RECOPIACIÓN Y VERIFICACIÓN DE INFORMACIÓN

En esta etapa se pretendió buscar, recopilar, agrupar y organizar información existente y relacionada con los concretos, las clases de fibras y su utilización, los protocolos de los ensayos necesarios para la caracterización de los materiales y su posterior dosificación para generar un concreto de resistencia especificada igual a 3000 psi. Así mismo, se revisara material bibliográfico relacionado con los tipos de ensayos que se deben aplicar a los concretos para determinar su capacidad al ser sometidos a cargas de flexión y compresión.

1.2. REALIZACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

En este punto se aplicaron diferentes tipos de ensayos:

- Análisis de laboratorio para la caracterización de los materiales; agregado grueso de la cantera Samuel Pabón y agregado fino (arena negra) cantera Las Terrazas.
- Elaboración del concreto con la dosificación correspondiente para obtener un concreto de 3000 psi.
- Determinación de un espacio muestral confiable y representativo para los parámetros que se desean medir, el cual se obtuvo con una muestra piloto, en la que se elaborará un total de 48 cilindros y 48 viguetas. De los 48 cilindros se harán 16 cilindros de concreto convencional, 16 adicionado fibras de polipropileno y 16 con fibras recicladas de botellas PET los cuales serán ensayados a compresión dependiendo la edad (8 cilindros a la edad de 7 días y 8 cilindros a la edad de 28 días). Para las 48 viguetas se harán 16 viguetas de concreto convencional, 16 adicionado fibras de polipropileno y 16 con fibras recicladas de botellas PET los cuales serán ensayados a flexión dependiendo la edad (8 vigas a la edad de 7 días y 8 vigas a la edad de 28 días).
- A partir de los resultados obtenidos en la muestra piloto se determinó el tamaño de muestra a emplear en este trabajo para los diferentes concretos. (convencional, adicionado con fibras de polipropileno y adicionado con fibras recicladas de botellas PET).
- Pruebas de laboratorio de compresión y flexión, atendiendo a la edad del concreto (7 y 28).

1.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Teniendo en cuenta los ensayos de laboratorio aplicados a los concretos, se realizó una comparación con los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y flexión, dependiendo la edad del concreto y los tipos de concretos elaborados en la etapa de laboratorio (convencional, adicionado con fibras de polipropileno y adicionado con fibras recicladas de botellas PET). Con ello se trató de identificar las mejores resistencias dependiendo del tipo de ensayo correspondiente.

1.4. CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos se elaboraron las conclusiones pertinentes al estudio de acuerdo con el cumplimiento de los objetivos especificados.

1.5. INFORME FINAL

Se presentó un informe que contiene el análisis de cada uno de los ensayos de laboratorio aplicados, describiendo los resultados alcanzados y las debidas conclusiones.

2. CARACTERÍSTICAS DEL CONCRETO

El concreto es el material más utilizado en la construcción de hoy, principalmente por sus características de resistencia, versatilidad, durabilidad y economía, las cuales lo hacen perfecto para la construcción de viviendas, edificaciones, puentes, autopistas, presas, vías, etc. Una de sus propiedades más importantes es su resistencia a fenómenos naturales como la abrasión, la lluvia, el sol o el viento, caracterizándose por ser un material de construcción que se diseña a través de la dosificación de materiales y se produce de conformidad con normas de calidad.

A efectos de determinar la calidad del concreto, debe ponerse especial atención al comportamiento que presenta, principalmente en los estados endurecido y fresco. En el estado fresco el concreto debe contar con ciertos requisitos, cuyo cumplimiento determinará la calidad del mismo, por ejemplo: tener buena cohesión, suficiente para ser transportado en la mezcladora (Mixer) para el caso de grandes volúmenes de concreto, o en buggy en el caso de que las mezclas se hagan en el sitio de obra y entregado sin que se presente segregación de los componentes; la mezcla debe tener una consistencia tal que permita compactar el concreto con los medios que se disponga en el área de trabajo. Por su parte, en estado endurecido se requiere una resistencia satisfactoria según lo exigido por el contratante y por la interventoría, y el cumplimiento de propiedades importantes como la impermeabilidad, durabilidad, resistencia a la abrasión y a sulfatos.

Contrario a ello, un concreto de mala calidad presenta una consistencia acuosa, masa no homogénea y débil, que al endurecerse presenta hormigueros o ratoneras, es decir, un defecto causado por la falta de compactación; este tipo de comportamientos en el concreto se presentan por la mala caracterización de los materiales y en ocasiones por la forma del diseño.

Dicho lo anterior, debe decirse que el concreto convencional es una mezcla resultante de la combinación de agregado fino (arena), agregado grueso (triturado, grava), cemento y agua; sin embargo, existen otros tipos de concreto que además de contar con los materiales correspondientes a su composición primaria, incorporan otro tipo de elementos o agregados que varían su comportamiento modificando su resistencia¹. No obstante, independientemente del tipo de concreto que se utilice, debe cumplir con un conjunto de requisitos arquitectónicos, funcionales, estructurales, de comportamiento, de estabilidad, seguridad y durabilidad que le permitan tener una alta capacidad para resistir la acción del medio ambiente que lo rodea, de los ataques químicos y biológicos, de la abrasión o de cualquier proceso de deterioro.

¹ NEVILLE, A.M, BROOKS, J.J. “*Tecnología del concreto*”. Ed. Trillas. México, 2010.

Como se conoce, el concreto tiene un excelente comportamiento y goza de buena resistencia a cargas de compresión, por esta razón se conoce como un material muy noble para este tipo de carga; sin embargo, el concreto presenta dificultades al ser sometido a cargas de flexión, por lo que en esta investigación, se pretende analizar si al agregarle fibras comerciales como las de Sika (Sikafiber) y fibras recicladas de botellas PET el concreto presenta mejor comportamiento al ser sometidos a los dos tipos de cargas.

3. MATERIALES

En esta investigación se utilizaron los siguientes materiales para hacer la mezcla de concreto:

- Cemento portland tipo I de Argos
- Arena negra proveniente de la cantera Las Terrazas
- Gravilla tamaño máximo nominal $\frac{3}{4}$ ", cantera Samuel Pabón
- Fibras de polipropileno de Sika (SIKAFIBER)
- Fibras recicladas de botellas PET

Los agregados fueron acopiados en los espacios contiguos a los laboratorios de ingeniería del campus de la Universidad de Nariño y protegidos con plásticos para evitar contaminación con materia orgánica y/o pérdida de finos al tener contacto con el agua lluvia.

3.1. CEMENTO

El cemento es una de las materias primas de la construcción más populares y hoy en día más indispensable, por su reacción como el pegante más económico y de mayor versatilidad; su producción se realiza a partir de la extracción de minerales como calizas, arcilla, arena, yeso y mineral de hierro, que constituyen la materia prima para la elaboración del cemento. En Colombia, la facilidad de encontrar estos minerales ha potencializado su explotación a gran escala, produciendo en promedio 1'077.400 toneladas de cemento en un mes para el año 2014, cifra considerable si se tiene en cuenta que en Colombia, más de 10 departamentos cuentan con plantas de extracción de cemento, principalmente en ciudades como Bucaramanga, Cúcuta, Nobsa, Sogamoso, Yumbo, Barranquilla, Cartagena, entre otras. La explotación de estos minerales se hace por parte de multinacionales como el grupo Suizo Holcim, siendo una de las cementeras más grandes del mundo; así mismo, la compañía mexicana Cemex constituye una de las mayores productoras de concreto premezclado del mundo. A nivel nacional, hace presencia la Cementera Argos, empresa colombiana posicionada como la cuarta mayor productora de cemento en América Latina.

Así las cosas, el proceso de fabricación del cemento comprende varias etapas (Véase el Anexo 1).

3.2. AGREGADOS (ÁRIDOS)

El concreto en su mayor parte está compuesto por agregados, que corresponden entre un 70 a 80% en volumen, influyendo directamente en su calidad y economía.

Los agregados son todos aquellos materiales que cuentan con resistencia propia, son inertes y garantizan una adherencia al cemento y el agua, tienen distintos orígenes y naturaleza, en casi todos los casos provienen de una masa de mayor tamaño que se ha fragmentado con procesos de intemperismo natural o mediante trituración por parte del hombre. De acuerdo con la geología, por fenómenos geológicos internos de la tierra al solidificarse y consolidarse el magma se formaron las rocas ígneas, y posteriormente, por fenómenos como la meteorización y el intemperismo se formaron las rocas sedimentarias; estos dos grupos de rocas al sufrir procesos de presión y temperatura dan lugar a las rocas metamórficas, ciclo que se conoce como el “ciclo geológico de las rocas” y que permanece en actividad continua. Los agregados para concreto se clasifican según su tamaño, procedencia y densidad, siendo el primero la forma más generalizada de clasificarlos a través de un ensayo que se conoce como granulometría (Véase el Anexo 2).

3.3. AGUA

El agua es el elemento más utilizado en cualquier actividad del ser humano, en la parte de la producción y dosificación del concreto cumple dos funciones importantes: Por un lado, es indispensable para la hidratación del cemento, pues permite hacer manejable la mezcla permitiendo su fácil colocación en las formaleas y la capacidad de ligante. Es el elemento que hidrata las partículas del cemento, la cual al experimentar una reacción química funciona como material aglutinador; derivado de esta reacción química, se forma una pasta que al endurecer como consecuencia del fraguado, hace que parte del agua quede fija (agua de hidratación) en la estructura rígida de la pasta y el resto quede como agua evaporable.

En algunos casos es importante que se use agua de consumo humano teniendo en cuenta que debe estar libre de grasas, materia orgánica, azúcares, colorantes, ácidos, color, etc. Lo anterior por cuanto al tener estas sustancias, puede producir efectos desfavorables en propiedades como el fraguado, resistencia, durabilidad, apariencia del concreto, entre otras. Por esta razón se debe evaluar la calidad del agua analizando unos parámetros físico-químicos (Véase el Anexo 3).

3.4. FIBRAS DE POLIPROPILENO DE SIKA SIKAFIBER AD

Sikafiber AD es un refuerzo de fibra de polipropileno modificada que disminuye el agrietamiento de concretos y morteros. Sikafiber AD está compuesto por una mezcla de monofilamentos reticulados y enrollados y polímeros sintéticos que anulan la tendencia a reducir la trabajabilidad y el asentamiento del concreto, propia de otro tipo de fibras convencionales, como puede verse en la figura 1. Durante la mezcla, Sikafiber AD se distribuye aleatoriamente dentro de la masa de concreto o mortero formando una red tridimensional muy uniforme.

Los usos más frecuentes son en losas de concreto, placas de piso, pavimentos Mortero y concreto proyectados, pañetes de fachada, elementos prefabricados, revestimientos de canales.

Algunas de las ventajas que brinda son: la reducción de la fisuración por retracción impidiendo su propagación, no modifica la trabajabilidad ni el asentamiento de la mezcla de concreto, mejora la resistencia al impacto reduciendo la fragilidad. La acción del Sikafiber AD es de tipo físico y no afecta el proceso de hidratación del cemento, por el contrario, aumenta la resistencia al fuego en concretos lanzados y convencionales.

El modo de empleo de este producto en planta o a pie de obra, es directamente a la mezcla de concreto o mortero, no requiere disolver en el agua de amasado y una vez añadido el Sikafiber AD, basta con prolongar el mezclado al menos 5 minutos².

La dosificación de Sikafiber AD se empleó en dosificaciones de 1 kg/m³.



Figura 1. Fibras polipropileno Sikafiber AD

² Hoja técnica de producto. Sikafiber AD. Version:01/2015

3.5. FIBRAS RECICLADAS DE BOTELLAS PET

Se trata de fibras extraídas de botellas PET recicladas, que constituyen un elemento en su mayoría desechado y no reutilizado, este fenómeno ocurre por la falta de voluntad política de los gobiernos locales, teniendo en cuenta que no existen regulaciones que incentiven la labor de reciclaje y la reutilización de estos materiales, disminuyendo la contaminación medioambiental. Por esta razón, en este proyecto fueron utilizadas fibras de entre 3 y 4 cm de longitud obtenidas a partir del reciclaje de botellas PET como se observa en la figura 2, las cuales fueron agregadas al concreto para determinar su incidencia en el comportamiento del mismo al ser sometido a cargas de compresión y flexión.



Figura 2. Fibras recicladas de botellas PET

4. CARACTERIZACION DE AGREGADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN AGREGADO GRUESO

4.1.1. Granulometría agregados gruesos. De conformidad con la norma I.N.V. E 213 – 07, la granulometría es un método de ensayo que tiene por objeto determinar cuantitativamente la distribución de los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada progresivamente decreciente³.

Para el análisis granulométrico de grueso se realiza un cuarteo de una proporción grande de material, de la cual se eligen las dos partes diagonalmente opuestas; con los resultados de la granulometría se observa si el material está bien gradado y cumple con los requisitos de la norma ASTM-C33 (Véase el Anexo 4).

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADOS GRUESO					
NORMA I.N.V.E-213-07					
GRADACIÓN					
Peso inicial	10633				
Tamiz	Tamiz mm	Peso Retenido	% Retenido	% Ret Acum	% Pasa
2"	50	0	0	0	100
1½"	37,5	0	0	0	100
1"	25,4	0	0	0	100
¾"	19	0	0	0	100
½"	12,7	3391	31,89	31,89	68,11
⅜"	9,51	3198	30,08	61,97	38,03
Nº4	4,76	3980	37,43	99,40	0,60
Fondo		64	0,60	100,00	0,00
Sumatoria		10633	100		
Tamaño máximo=¾"		Tamaño máximo nominal= ¾"			

Tabla 1. Analisis granulométrico agregado grueso

³ Norma I.N.V. E – 213 – 07

Requisitos de granulometría para agregado grueso según ASTM C-33

Tamaño nominal	25mm (1")	19mm (3/4")	12,5mm (1/2")	9,5mm (3/8")	4,75mm (No.4)
19,0 a 4,75 mm (3/4" a No.4)	100	90 a 100	-	20 a 55	0 a 10

Tabla 2. Requisitos granulometría agregado grueso según ASTM C-33⁴

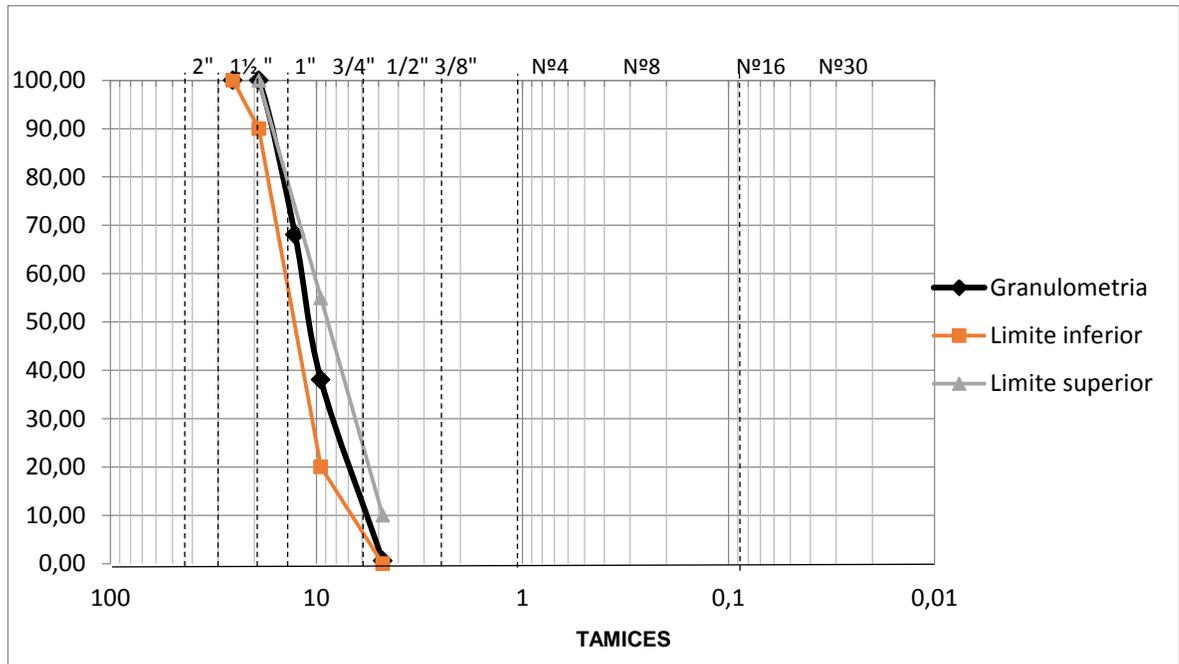


Figura 3. Gráfica granulométrica y requisitos según la ASTM-33

4.1.2. Gravedad específica y absorción de agregados gruesos. Este ensayo tiene por objeto determinar la densidad de los agregados teniendo en cuenta el volumen de vacíos entre partículas y los poros saturables del agregado, en este ensayo se determina la absorción de los materiales, para con estos resultados determinar la cantidad necesaria de agua para el diseño de mezcla. Se realizaron ocho ensayos para ser promediados y obtener un resultado mucho más confiable. La norma de referencia es la INV E-223, ASTM C 127-88 (Véase el Anexo 5).

⁴ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. "Tecnología del concreto y del mortero. Tabla 4.18. Requisitos de granulometría para agregado grueso según ASTM C-33". Pag. 90. Biblioteca de la construcción.

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS GRUESOS										
I.N.V.E-223-07										
ENSAYO No		1	2	3	4	5	6	7	8	Prom
Peso de la muestra SSS W _{sss}	gr	585,4	675,6	607,5	677,6	759	756,9	794,1	752,9	
Peso de la muestra en el agua W _a	gr	353,1	412,1	370,3	403,4	464,2	463,5	486	460,5	
Peso de la muestra seca W _s	gr	569,3	657,9	591,7	660,2	739,6	737	774,3	731,9	
W _s - W _a	gr	216,2	245,8	221,4	256,8	275,4	273,5	288,3	271,4	
W _{sss} - W _a	gr	232,3	263,5	237,2	274,2	294,8	293,4	308,1	292,4	
Densidad Nominal = W _s / W _s -W _a	gr/cm ³	2,63	2,68	2,67	2,57	2,69	2,69	2,69	2,70	2,67
Dens. Aparente= W _s / W _{sss} - W _a	gr/cm ³	2,45	2,50	2,49	2,41	2,51	2,51	2,51	2,50	2,49
Dens. Aparente= W _{sss} / W _{sss} - W _a	gr/cm ³	2,52	2,56	2,56	2,47	2,57	2,58	2,58	2,57	2,55
Absorción=(W _{sss} - W _s / W _s) * 100	%	2,83	2,69	2,67	2,64	2,62	2,70	2,56	2,87	2,73
Peso canastilla + muestra SSS	gr	729,1	818,4	752,7	820,6	905,9	882,9	939,1	896	
Peso canastilla + muestra en el agua	gr	435,2	494,2	452,4	485,5	546,3	545,6	568,1	542,6	
Peso canastilla en el agua	gr	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	82,1	
Peso muestra en el agua	gr	353,1	412,1	370,3	403,4	464,2	463,5	486	460,5	
Peso muestra seca + recipiente	gr	713	800,7	736,9	803,2	886,5	863	919,3	875	
Peso recipiente	gr	143,7	142,8	145,2	143	146,9	126	145	143,1	
Peso muestra seca	gr	569,3	657,9	591,7	660,2	739,6	737	774,3	731,9	

Tabla 3. Gravedad específica y absorción agregados gruesos I.N.V.E-223

4.1.3. Peso unitario. Este ensayo tiene por objeto establecer el método para determinar el peso unitario, ya sean finos, gruesos o una mezcla de ambos. Se realizó cuatro ensayos para peso unitario suelto y cuatro ensayos para peso unitario compacto, se promediaron los resultados para obtener más confiabilidad en este ensayo de laboratorio. La norma de referencia para este ensayo es la INV E-217 o ASTM C 29/C 29M-97⁵ (Véase el Anexo 6).

PESO UNITARIO COMPACTO DEL AGREGADO GRUESO						
I.N.V.E-217-07						
PARAMETROS	Unidad	ENSAYO N°				Prom
		1	2	3	4	
Masa agregado + recipiente medida G	kg	19,80	19,82	19,82	19,81	19,81
Masa del recipiente de medida T	kg	11,68	11,68	11,68	11,68	11,68
Volumen del recipiente de medida m3 V	m ³	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Peso Unitario del agregado M	kg/m ³	1467,1	1470,7	1470,7	1468,9	1469,4
Peso Unitario del agregado M	T/m ³	1,47	1,47	1,47	1,47	1,47

Tabla 4. Peso unitario compacto

PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO GRUESO						
I.N.V.E-217-07						
PARAMETROS	UND	ENSAYO				Prom
		1	2	3	4	
Masa agregado +recipiente de medida G	Kg	19,1	19,1	19,1	19,0	19,1
Masa del recipiente de medida T	Kg	11,7	11,7	11,7	11,7	11,7
Volumen del recipiente de medida m3 V	m ³	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Peso Unitario del agregado M	kg/m ³	1331,7	1333,5	1335,3	1329,8	1332,6
Peso Unitario del agregado M	T/m ³	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3

Tabla 5. Peso unitario suelto

⁵ GONZALES German, LÓPEZ Diego. "Incidencia de fibras de acero como refuerzo para el concreto hidráulico".

4.2. CARACTERIZACION AGREGAGO FINO

4.2.1. Granulometría agregado fino. Por su parte, el análisis granulométrico de finos se realizó con una proporción de más de 300 gramos, con los resultados obtenidos se analiza si el material tiene un buen módulo de finura y si cumple son los requisitos de la norma ASTM C-33 y NTC 174 (Véase el Anexo 7).

Peso inicial	2107,1				
Tamiz	Tamiz mm	Peso Retenido	% Retenido	% Ret Acum	% Pasa
Nº4	4,75	0	0	0	100
Nº8	2,36	353,00	16,75	16,75	83,25
Nº16	1,18	424,80	20,16	36,91	63,09
Nº30	0,6	477,30	22,65	59,57	40,43
Nº60	0,3	482,00	22,88	82,44	17,56
Nº100	0,15	138,90	6,59	89,03	10,97
Nº200	0,075	99,10	4,70	93,74	6,26
P.Nº200		132	6,26	100	0
Sumatoria		2107,1	100		
Módulo de finura	2,84				

Tabla 6. Análisis granulométrico agregado fino

Requisitos de granulometría del agregado fino para concreto según la ASTM C-33 y NTC 174⁶

TAMIZ		Porcentaje que pasa
mm	Pulgadas	%
9,51	3/8	100
4,76	No.4	95-100
2,38	No.8	80-100
1,19	No.16	50-85
0,595	No.30	25-60
0,297	No.50	10-30
0,149	No.100	2-10

Tabla 7. Requisitos de granulometría según ASTM C33 y NTC 174

⁶ SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. "Tecnología del concreto y del mortero. Tabla 4.19. Requisitos de granulometría para agregado grueso según ASTM C-33". Pag. 91. Biblioteca de la construcción.

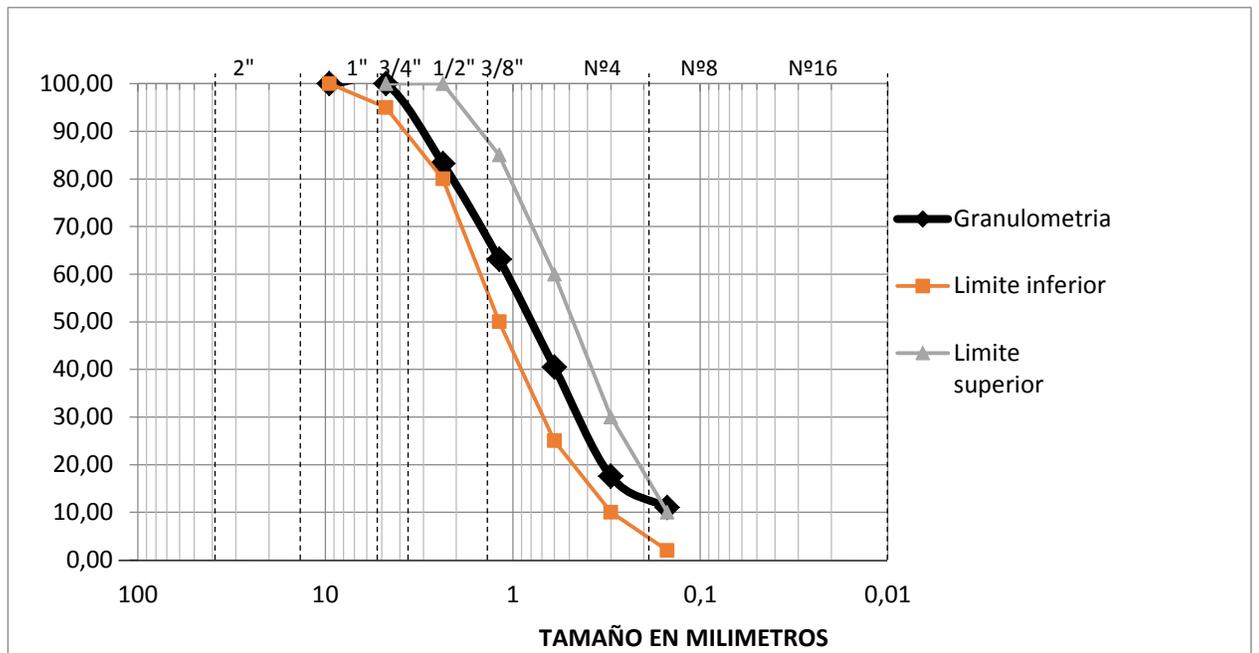


Figura 4. Gráfica granulométrica finos y requisitos según la ASTM C33

4.2.2. Gravedad específica y absorción de agregados. Para los agregados finos se realizaron 3 muestras para ser promediadas y obtener un resultado más seguro. La norma de referencia es la INV E-222, ASTM C 128-97 (Véase el Anexo 8).

GRAVEDAD ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGREGADOS FINOS					
I.N.V.E-222-07					
ENSAYO No		1	2	3	Prom
Temperatura de ensayo	°C	20,0	20,0	20,0	
Peso de la muestra SSS W _{sss}	Gr	330,0	324,1	337,1	
Peso matraz + agua W _{ma}	Gr	647,1	643,3	633,1	
Peso matraz + agua + muestra W _{mam}	Gr	844,8	837,9	834,7	
Peso muestra seca W _s	Gr	311,0	305,6	317,8	
Densidad Nominal = $W_s / (W_s + W_{ma} - W_{mam})$	gr/cm ³	2,745	2,753	2,735	2,74
Densidad Aparente = $W_s / (W_{sss} + W_{ma} - W_{mam})$	gr/cm ³	2,351	2,360	2,345	2,35
Dens. Aparente SSS = $W_{sss} / (W_{sss} + W_{ma} - W_{mam})$	gr/cm ³	2,494	2,503	2,488	2,49
Absorción = $(W_{sss} - W_s / W_s) * 100$	%	6,11	6,05	6,07	6,08

Tabla 8. Gravedad específica y absorción agregado fino I.N.V.E-222-07

4.2.3. Peso Unitario. Para la determinación del peso unitario para agregado fino se realizaron cinco ensayos tanto para suelto como compacto, se promediaron los resultados para obtener un resultado más confiable. La norma de referencia para este ensayo es la INV E-217 o ASTM C 29/C 29M-97 (Véase el Anexo 9).

PESO UNITARIO COMPACTO DEL AGREGADO FINO I.N.V.E-217-07							
PARAMETROS	UN D	ENSAYO					
		1	2	3	4	5	Prom
Masa del agregado+ recipiente de medida G	gr	12279,0	12314,0	12289,0	12278,0	12317,0	12295,4
Masa del recipiente de medida T	gr	8181,0	8181,0	8181,0	8181,0	8181,0	8181,0
Volumen del recipiente de medida m ³ V	m ³	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030	0,0030
Peso Unitario M	t/m ³	1,3886	1,4005	1,3920	1,3883	1,4015	1,3942

Tabla 9. Peso unitario compacto I.N.V.E-217-07

PESO UNITARIO SUELTO DEL AGREGADO FINO I.N.V.E-217-07							
Parámetros	UND	Ensayo					
		1	2	3	4	5	Prom
Masa del agregado+ recipiente de medida G	gr	11804	11877	11815	11862	11915	11854,6
Masa del recipiente de medida T	gr	8182	8182	8182	8182	8182	8182
Volumen del recipiente de medida m ³ V	m ³	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
Peso Unitario M	t/m ³	1,2	1,3	1,2	1,2	1,3	1,2

Tabla 10. Peso unitario suelto I.N.V.E-217-07

5. DOSIFICACION DE LA MEZCLA

La dosificación de la mezcla, también denominada diseño de la mezcla, es un proceso mediante el cual se seleccionan los ingredientes del concreto y las cantidades de los mismos, con el fin de producir un concreto económico que cuente con buena manejabilidad, resistencia y durabilidad.

Para realizar un buen diseño de la mezcla es necesario seguir las recomendaciones técnicas definidas por la norma NSR-10 (C.5.1.1) y utilizar métodos que proporcionen un acercamiento preliminar a las cantidades de materiales necesarios para elaborar la mezcla de concreto. Dichas cantidades son posteriormente verificadas mediante las mezclas de prueba en el laboratorio, donde se efectuarán los ajustes necesarios para alcanzar el concreto deseado, para ello se deberán determinar ciertos parámetros como asentamiento, relación agua/cemento, tamaño máximo nominal, entre otros.

Con los resultados obtenidos en la caracterización de los agregados tanto fino como grueso, los que se observan en la tabla 11, se inicia la dosificación de la mezcla.

CARACTERÍSTICA	AGREGADO GRUESO	AGREGADO FINO
Densidad aparente	2,49	2,35
%Absorción	2,73	6,08
Masa unitaria suelta	1,33	1,24
Masa unitaria compacta	1,47	1,39
Tamaño máximo	3/4"	NA
Tamaño máximo nominal	3/4"	NA
Módulo de finura	NA	2,84

Tabla 11. Resumen para dosificación de mezcla

5.1. FULLER AJUSTADA

En la tabla 12, se determinó las cantidades de agregado fino y grueso.

Tamaño Pulg.	Tamaño mm	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Pasa	% Retenido	% Retenido	% Retenido	% Retenido	% Pasa ajust	% Pasa Ajust	% Pasa ajust	% pasa ajust
		2"	1 ^{1/2} "	1"	3/4"	2"	1 ^{1/2} "	1"	3/4"	2"	1 ^{1/2} "	1"	3/4"
2"	50,8	100,0				0,0				100,0			
1 ^{1/2} "	38,1	86,6	100,0			13,4	0,0			86,1	100,0		
1"	25,4	70,7	81,6	100,0		29,3	18,4	0,0		69,6	80,8	100,0	
3/4"	19,1	61,2	70,7	86,6	100,0	38,8	29,3	13,4	0,0	59,7	69,4	85,8	100,0
1/2"	12,7	50,0	57,7	70,7	81,6	50,0	42,3	29,3	18,4	48,0	55,8	69,0	80,4
3/8"	9,5	43,3	50,0	61,2	70,7	56,7	50,0	38,8	29,3	41,1	47,7	59,0	68,8
N 4	4,8	30,6	35,4	43,3	50,0	69,4	64,6	56,7	50,0	27,9	32,4	40,1	46,7
N 8	2,4	21,7	25,0	30,6	35,4	78,3	75,0	69,4	64,6	18,6	21,6	26,7	31,1
N 16	1,2	15,3	17,7	21,7	25,0	84,7	82,3	78,3	75,0	12,0	13,9	17,2	20,0
N 30	0,6	10,8	12,5	15,3	17,7	89,2	87,5	84,7	82,3	7,3	8,5	10,5	12,2
N 50	0,3	7,7	8,8	10,8	12,5	92,3	91,2	89,2	87,5	4,0	4,7	5,8	6,7
N 100	0,1	5,4	6,3	7,7	8,8	94,6	93,8	92,3	91,2	1,7	1,9	2,4	2,8

Tabla 12. Fuller ajustado para los diferentes tamices

MEZCLA DE ARENA Y GRAVILLA EMPLEANDO CURVA DE FULLER AJUSTADA					
		PORCENTAJES			
Tamiz	Tamaño mm	Fuller Ajustado TM 3/4"	0,4 Arena	0,6 Gravilla	Mezcla
3/4"	19,05	100	100	100	100
1/2"	12,70	80,4	100	68,1	80,9
3/8"	9,53	68,8	100	38,0	62,8
N4	4,76	46,7	100	0,6	40,4
N8	2,38	31,1	83,3	0,0	33,3
N16	1,19	20,0	63,2	0,0	25,3
N30	0,60	12,2	40,6	0,0	16,3
N60	0,25	6,7	17,8	0,0	7,1
N100	0,15	2,8	11,3	0,0	4,5

Tabla 13. Mezcla de arena y gravilla empleando curva Fuller ajustada

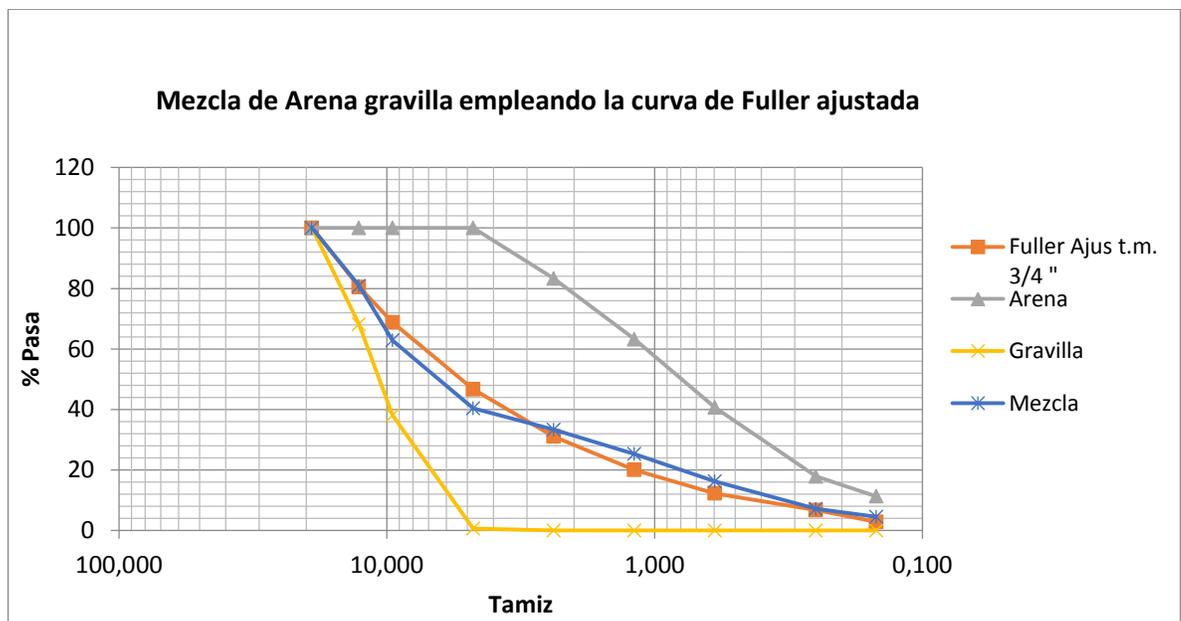


Figura 5. Mezcla de arena-gravilla empleando curva Fuller ajustada

5.2. SELECCIÓN DEL ASENTAMIENTO

Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcciones y sistemas de colocación y compactación.

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
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

Tabla 14. Selección de asentamiento

5.3. SELECCIÓN DEL TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO

Tamaño máximo: 3/4"

Tamaño máximo nominal: 3/4"

5.4. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA DE MEZCLADO

Requerimientos aproximados de agua de mezclado para los diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, en concreto sin aire incluido.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado en mm (pulgadas)							
		9,51 (3/4")	12,7 (1/2")	19,0 (3/4")	25,4 (1")	38,1 (1 1/2")	50,8 (2")	64,0 (2 1/2")	76,1 (3")
mm	Pulg	Agua de mezclado, en kg/m ³ de concreto							
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

Tabla 15. Agua de mezclado en kg/m³ de concreto

5.5. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE DISEÑO

De acuerdo con la tabla 16, se tiene que el coeficiente de variación V , es:

Resistencia específica a la compresión $f'c$ (kg/cm ²)	Resistencia promedio requerida a la compresión $f'cr$ (kg/cm ²)
Menos de 210 kg/cm ²	$f'c+70$ kg/cm ²
De 210 a 350 kg/cm ²	$f'c+85$ kg/cm ²
Más de 350 kg/cm ²	$f'c+100$ kg/cm ²

Tabla 16. Resistencia requerida de diseño

Por lo tanto, para este diseño será:

$$f'cr=210+70=280 \text{ kg/cm}^2.$$

5.6. SELECCIÓN DE LA RELACIÓN AGUA/CEMENTO

Resistencia a la compresión kg/cm ²	Relación agua-cemento en peso			
	Límite superior	Límite escogido	Límite media	Límite inferior
210	0,70	0,62	0,58	0,53
245	0,64	0,56	0,53	0,49
280	0,59	0,52	0,48	0,45
315	0,54	0,47	0,44	0,42
350	0,49	0,43	0,40	0,38

Tabla 17. Relación agua/cemento

5.7. CÁLCULO DEL CONTENIDO DE CEMENTO

Con información de los pasos 8.4 y 8.6:

$$C=199/0,52=382,69 \text{ kg/m}^3$$

5.8. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN DE LOS AGREGADOS

$$\text{Vol. Abs. Agregados} + \text{Vol. abs. Agua} + \text{Vol. abs. Cemento} = 1000 \text{ dm}^3 \quad (\text{Ecu.1})$$

$$\text{Vol. Abs. Agregados} = 1000 - \frac{199}{1} - \frac{382,69}{2,94} = 670,8 \text{ dm}^3$$

$$G \text{ promedio} = \frac{100}{\sum \frac{\%i}{Gi}} = \frac{100}{\frac{40}{2,35} + \frac{60}{2,49}} = 2,43 \text{ kg/dm}^3 \quad (\text{Ecu.2})$$

$$\text{Peso del agregado} = 670,8 * 2,43 = 1631,49$$

$$\text{Peso del agregado fino} = 1631,49 * 0,4 = 652,60 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del agregado grueso} = 1631,49 * 0,6 = 978,90 \text{ kg/m}^3$$

5.9. PROPORCIONES INICIALES EN PESO SECO

$$\text{Vol. abs. material} = \frac{\text{Peso del material}}{\text{Densidad o Peso específico}} \quad (\text{Ecu.3})$$

	Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Σ
Peso Mat (Kg/m ³ de concreto)	199,00	382,69	652,60	978,90	2213,19
Vol. Abs Materiales (dm ³ /m ³ de concreto)	199,00	130,17	277,70	393,13	1000,00
Proporción en peso seco	0,52	1,00	1,71	2,56	

Tabla 18. Proporciones iniciales en peso seco

6. MEZCLA DE PRUEBA

6.1. PRIMERA MEZCLA DE PRUEBA

Volumen de concreto a preparar	
Slump	1*0,0055m ³
Cilindros	0*0,0053m ³
% de desperdicio	10%
Volumen total	0,00605

Tabla 19. Volumen de concreto para primera mezcla de prueba

Cantidad de cemento para la primera mezcla:

$$\text{Cemento} = 382,69 * 0,00605 = 2,31 \text{ kg}$$

Humedades de los agregados

$$\text{Agregado fino} = 10,79$$

$$\text{Agregado grueso} = 0,4175$$

	Proporción Inicial	Peso seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Agua Agre (gr)	Absorción (gr)	Agua Libre (g)	Aporte (gr)
Agua	0,52	1203,9	-	-	-	-	-
Cemento	1	2315,2	-	-	-	-	-
Agregado fino	1,71	3948,2	4374,2	426,0	240,05	185,96	-
Agregado grueso	2,56	5922,3	5947,0	24,73	161,68	-136,9	49,01

Resultados de la primera mezcla		
Agua de mezcla (teórica)	1154,94 gr	1,15 kg
Cemento	2315,29 gr	2,32 kg
Agregado fino	4374,23 gr	4,37 kg
Agregado grueso	5947,05 gr	5,95 kg

Tabla 20. Resultados de la primera mezcla

Al preparar la primera mezcla de prueba se observa que para obtener el asentamiento requerido de 5 cm, se debió utilizar 1414,94 gr de agua.

$$\text{Agua} = \text{Agua de mezcla (real)} + \text{aporte} \quad (\text{Ecu.4})$$

$$\text{Agua} = 1414,94 + 49,01 = 1463,95 \text{ gr}$$

$$\text{Relación A/C} = \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = \frac{1463,95}{2315,29} = 0,63 \quad (\text{Ecu.5})$$

La relación A/C utilizada es diferente a la relación A/C escogida, por lo tanto se requiere hacer ajuste por asentamiento (Véase el Anexo 10).

6.2. AJUSTE POR ASENTAMIENTO

	Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Σ
Proporción utilizada	0,63	1,00	1,71	2,56	
Peso materiales (kg)	0,63	1,00	1,71	2,56	
Vol. Abs. materiales (dm ³)	0,63	0,34	0,73	1,027	2,725

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{1000}{2,725} = 366,92$$

	Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Σ
Proporción en peso seco	0,63	1,00	1,71	2,56	
Peso Mat (kg/m ³ de concreto)	232,00	366,92	625,71	938,56	2163,20
Vol. Abs. Materiales (dm ³ /m ³ de concreto)	232,00	124,80	266,26	376,93	1000,00

Tabla 21. Mezcla preparada corrección por asentamiento

	Agua	Cemento	Agregado fino	Agregado grueso	Σ
Vol. Abs. Materiales (dm ³ /m ³ de concreto)	232,00	151,76	239,31	376,93	1000,0
Peso Mat (kg/m ³ de concreto)	232,00	446,16	562,37	938,56	2179,1
Proporción en peso seco	0,52	1,00	1,26	2,10	

Tabla 22. Proporciones ajuste por asentamiento



Figura 6. Determinación del asentamiento

6.3. SEGUNDA MEZCLA DE PRUEBA

Se preparó la segunda mezcla con las proporciones ajustadas por asentamiento.

Volumen de concreto a preparar	
Cilindros	6*0,0053m ³
% de desperdicio	20%
Volumen total	0,03816 m ³

Tabla 23. Volumen a preparar segunda mezcla de prueba

Cantidad de cemento para la mezcla:

$$\text{Cemento} = \text{Peso Mat (kg/m}^3 \text{ de concreto)} * \text{Volumen total} \quad (\text{Ecu.6})$$

$$\text{Cemento} = 446,16 * 0,03816 = 17,02 \text{ kg} = 17025,6 \text{ gr}$$

Humedades de los agregados:

$$\text{Agregado fino} = 11,72$$

$$\text{Agregado Grueso} = 0,49$$

	Pro. Inic	Peso seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Agua Agre (gr)	Absorción (gr)	Agua Libre (gr)	Aporte (gr)
Agua	0,52	8445,2	-	-	-	-	-
Cemento	1	17025,5	-	-	-	-	-
Agregado fino	1,26	21460,0	23975,1	2515,1	1304,7	1210,3	-
Agregado grueso	2,10	35815,5	35991,0	175,5	977,7	-802,2	408,08

Resultados de la segunda mezcla		
Agua de mezcla (teórica)	8445,22 gr	8,45 kg
Cemento	17025,58 gr	17,03 kg
Agregado fino	23975,18 gr	23,98 kg
Agregado grueso	35991,02 gr	35,99 kg

Tabla 24. Resultados segunda mezcla

Resultados obtenidos en la segunda mezcla con corrección por asentamiento:

Se ensayó a compresión a dos diferentes edades como se muestra en las tablas 25 y 26.

Fecha de elaboración de los cilindros:

- 22 de agosto del 2015

Fecha de prueba en la máquina de compresión

- A 7 días: 29 de agosto del 2015
- A 28 días: 19 de septiembre del 2015

CILINDROS A 7 DIAS					
Muestra	Resultado maquina (kN)	Relación A/C	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Resistencia Real (Mpa)
1	281,9	0,52	153	18385,39	15,33
2	277,0	0,52	153	18385,39	15,07
3	278,4	0,52	153	18385,39	15,14
				Promedio	15,18

Tabla 25. Resultados ensayo compresión ajuste por asentamiento 7 días

CILINDROS A 28 DIAS					
Muestra	Resultado maquina (kN)	Relación A/C	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Resistencia Real (Mpa)
1	644,6	0,52	153	18385,39	35,06
2	647,4	0,52	153	18385,39	35,21
3	655,9	0,52	153	18385,39	35,68
				Promedio	35,31

Tabla 26. Resultados ensayo compresión ajuste por asentamiento 28 días

$$\text{Área del cilindro} = \frac{\pi \times D^2}{4} = \frac{\pi \times 153^2}{4} = 18385,3856 \text{ mm}^2 \quad (\text{Ecu.7})$$

$$\text{Resistencia} = \frac{\text{Carga máxima soportada por el espécimen Kg-f}}{\text{Area del cilindro cm}^2} \quad (\text{Ecu.8})$$

6.4. AJUSTE POR RESISTENCIA

A/C	0,6
-----	-----

	Agua	Cemento	Ag fino	Ag grueso	Σ
Proporción utilizada	0,60	1,00	1,26	2,10	
Peso Mat (kg)	0,60	1,00	1,26	2,10	
Vol. Abs Materiales (dm ³)	0,60	0,34	0,54	0,845	2,321

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{1000}{2,321} = 430,8$$

	Agua	Cemento	Ag fino	Ag grueso	Σ
Proporción en peso seco	0,60	1,00	1,26	2,10	
Peso Mat (kg/m ³ de concreto)	258,47	430,79	542,99	906,22	2138,46
Vol. Abs Materiales (dm ³ /m ³ de concreto)	258,47	146,53	231,06	363,94	1000,00

Tabla 27. Mezcla preparada corrección por resistencia

	Agua	Cemento	Ag fino	Ag grueso	Σ
Vol. Abs Materiales (dm ³ /m ³ de concreto)	232,00	131,52	259,54	376,93	1000,00
Peso Mat (kg/m ³ de concreto)	232,00	386,67	609,92	938,56	2167,16
Proporción en peso seco	0,60	1,00	1,58	2,43	

Tabla 28. Proporciones ajuste por resistencia

6.5. TERCERA MEZCLA DE PRUEBA

Se preparó la tercera mezcla con las proporciones ajustadas por asentamiento.

Volumen de concreto a preparar	
Cilindros	6*0,0053m ³
% de desperdicio	20%
Volumen total	0,03816 m ³

Tabla 29. Volumen a preparar para tercera mezcla de prueba

Cantidad de cemento para la mezcla:

$$\text{Cemento} = 386,67 * 0,03816 = 14,75 \text{kg} = 14755,5 \text{gr}$$

Humedades de los agregados:

$$\text{Agregado fino} = 7,2 \quad \text{Agregado Grueso} = 0,43$$

	Pro. Inic	Peso seco (gr)	Peso húmedo (gr)	Agua Agre (gr)	Absorción (gr)	Agua Libre (gr)	Aporte (gr)
Agua	0,60	9416,3	-	-	-	-	-
Cemento	1	14755,5	-	-	-	-	-
Agregado Fino	1,58	23274,5	24950,3	1675,77	1415,09	260,68	-
Agregado Grueso	2,43	35815,5	35969,5	154,01	977,7	-823,76	-563,1

Resultados de la tercera mezcla		
Agua de mezcla (teórica)	9416,38 gr	9,42 kg
Cemento	14755,50 gr	14,76 kg
Agregado fino	24959,34 gr	24,95 kg
Agregado grueso	35969,53 gr	35,97 kg

Tabla 30. Resultados de tercera mezcla

Resultados obtenidos en la tercera mezcla con corrección por resistencia:

Se ensayó a compresión a dos diferentes edades como se muestra en las tablas 31 y 32.

Fecha de elaboración de los cilindros:

- 21 de septiembre del 2015

Fecha de prueba en la máquina de compresión

- A 7 días: 28 de octubre del 2015
- A 28 días: 19 de octubre del 2015

CILINDROS A 7 DIAS					
Muestra	Resultado máquina (kN)	Relación A/C	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Resistencia Real (Mpa)
1	250,04	0,52	153	18385,39	13,60
2	447,2	0,52	153	18385,39	13,48
3	435,8	0,52	153	18385,39	12,80
				Promedio	13,29

Tabla 31. Resultados de ensayos compresión ajuste por resistencia a 7 días

CILINDROS A 28 DIAS					
Muestra	Resultado maquina (kN)	Relación A/C	Diámetro (mm)	Área (mm ²)	Resistencia Real (Mpa)
1	524,16	0,52	153	18385,39	28,51
2	533,54	0,52	153	18385,39	29,02
3	529,31	0,52	153	18385,39	28,79
				Promedio	28,77

Tabla 32. Resultados de ensayos compresión ajuste por resistencia a 28 días

7. ELABORACIÓN DE LA MUESTRA PILOTO

La muestra piloto fue desarrollada con 10 muestras de cada uno de los tipos de concretos utilizados es decir, concreto patrón, concreto adicionado con fibras del mercado Sikafiber y un concreto con fibras recicladas de botellas PET. La muestra piloto inició el día 20 de octubre del 2015, fecha en la que se realizaron 10 vigas patrón para ser falladas a flexión a la edad de los 28 días, posteriormente el día 22 de octubre, fueron elaborados 10 cilindros patrón.

7.1. ELABORACIÓN PRUEBA PILOTO DE VIGAS

Para la elaboración de las vigas, se ejecutó el siguiente diseño:

Fecha de producción: 20 de octubre del 2015 (Véase el Anexo11).

Edad para prueba de flexión: 28 días

Se realizaron 10 vigas patrón

Volumen de concreto a preparar	
Vigas	5*0,012m ³
% de desperdicio	12%
Volumen total	0,0672 m ³

Tabla 33. Volumen de concreto a preparar muestra piloto vigas

Cantidad de cemento= $0,0672 \times 386,67 = 25,98$ kg

Humedad de los materiales:

Humedad de finos: 8,47%

Humedad de gruesos: 0,44%

MATERIAL	Prop. Inicial	Peso Seco (g)	Peso húmedo (g)	Agua Agre. (g)	Absorción (g)	Agua libre (g)	Aporte (g)
Agua	0,60	16055,47	-	-	-	-	-
Cemento	1	25984,53	-	-	-	-	-
Agregado Fino	1,58	40986,67	44458,24	3471,57	2491,99	979,58	
Agregado Grueso	2,43	63071,37	63348,88	277,51	1721,85	1444,33	-464,75

Resultados de la mezcla		
Agua de mezcla (teórica)	16055,47 gr	16,06 kg
Cemento	25984,53 gr	25,98 kg
Agregado fino	44458,24 gr	44,46 kg
Agregado grueso	63348,88 gr	63,35 kg

Tabla 34. Resultados de la primera lechada piloto vigas

Con los resultados obtenidos en el diseño se realizaron las 10 vigas en dos grupos de 5 unidades por la capacidad de la mezcladora, en los ensayos obtuvimos dos asentamientos.

Muestra 1= 4,5

Muestra 2= 4,2

A continuación, en la tabla No.35, se realiza un resumen detallado del proceso de elaboración de vigas, identificando las fechas de elaboración, clase de viga elaborada y cantidad, volumen aplicado, las cantidades de material utilizadas, la cantidad de fibras incorporadas y finalmente, los resultados de asentamiento obtenidos; esto permite comprender más fácilmente lo que se expuso con antelación a manera de ejemplo.

ELABORACIÓN DE LA PRUEBA PILOTO PARA VIGAS											
Fecha producción	Viga	Can	Volumen de concreto m3	Humedad fino %	Humedad Grueso %	Agua Kg	Cemento kg	Arena Kg	Triturado kg	Fibras gr	Asentamiento cm
20/10/2015	Patrón	5	0,067	8,47	0,44	16,06	25,98	44,46	63,35	0	4,5
20/10/2015	Patrón	5	0,067	8,47	0,44	16,06	25,98	44,46	63,35	0	4,2
21/10/2015	Fibra	5	0,067	5,71	0,43	17,19	25,98	43,33	63,34	67,2	5
22/10/2015	Fibra	5	0,067	5,65	0,44	17,21	25,98	43,30	63,35	67,2	5,5
24/10/2015	PET	5	0,067	5,60	0,46	17,22	25,98	43,28	63,36	67,2	4,2
24/10/2015	PET	5	0,067	5,60	0,46	17,22	25,98	43,28	63,36	67,2	3,9
26/10/2015	Patrón	5	0,067	10,79	0,52	15,05	25,98	45,41	63,40	0	4,5
26/10/2015	Patrón	5	0,067	10,79	0,52	15,05	25,98	45,41	63,40	0	4,2
28/10/2015	Fibra	5	0,067	10,79	0,51	15,06	25,98	45,41	63,39	67,2	5
29/10/2015	Fibra	5	0,067	10,7	0,48	15,12	25,98	45,37	63,37	67,2	5,2
29/10/2015	PET	5	0,067	10,7	0,48	15,12	25,98	45,37	63,37	67,2	5
30/10/2015	PET	5	0,067	8	2,02	15,25	25,98	44,27	64,35	67,2	6
03/10/2015	Patrón	5	0,067	10,55	0,46	15,19	25,98	45,31	63,36	0	6,2
03/10/2015	Patrón	5	0,067	10,55	0,46	15,19	25,98	45,31	63,36	0	5,6
04/10/2015	Fibra	5	0,067	14,79	0,51	13,42	25,98	47,05	63,39	67,2	4,2
04/10/2015	Fibra	5	0,067	14,79	0,51	13,42	25,98	47,05	63,39	67,2	4
06/10/2015	PET	5	0,067	15,03	2	12,38	25,98	47,15	64,33	67,2	6
06/10/2015	PET	5	0,067	15,03	2	12,38	25,98	47,15	64,33	67,2	5

Tabla 35. Elaboración muestra piloto vigas

7.2. ELABORACIÓN PRUEBA PILOTO DE CILINDROS

Para la elaboración de las vigas, se ejecutó el siguiente diseño:

Fecha de producción: 22 de octubre del 2015 (Véase el Anexo12).

Edad para prueba de compresión: 28 días

Se realizaron 10 cilindros patrón

Volumen de concreto a preparar	
Cilindros	10*0,0053m ³
% de desperdicio	13%
Volumen total	0,05989 m ³

Tabla 36. Volumen de concreto a preparar muestra piloto cilindros

Cantidad de cemento= 0,05989*386,67= 23,16gr

Humedad de los materiales:

Humedad de finos: 5,65%

Humedad de gruesos: 0,44%

MATERIAL	Prop. Inicial	Peso Seco (g)	Peso húmedo (g)	Agua Agr. (g)	Absorción (g)	Agua libre (g)	Aporte (g)
Agua	0,60	15339,06		-	-	-	-
Cemento	1	23157,94	-	-	-	-	-
Agregado Fino	1,58	36528,15	38591,99	2063,84	2220,91	-157,07	
Agregado Grueso	2,43	56210,48	56457,81	247,33	1534,55	1287,22	1444,29

Resultados de la mezcla		
Agua de mezcla (teórica)	15339,06 gr	15,34 kg
Cemento	23157,94 gr	23,16 kg
Agregado fino	38591,99 gr	38,59 kg
Agregado grueso	56457,81 gr	56,46 kg

Tabla 37. Resultados de la primera lechada piloto cilindros

Con los resultados obtenidos en el diseño se realizaron los 10 cilindros, en el cual se obtuvo un asentamiento de 5,7 cm.

A continuación, en la tabla No.36, se realiza un resumen detallado del proceso de elaboración de cilindros, identificando las fechas de elaboración, clase de cilindro elaborado y cantidad, volumen aplicado, las cantidades de material utilizadas, la cantidad de fibras incorporadas y finalmente, los resultados de asentamiento obtenidos, esto permite comprender más fácilmente lo que se expuso con antelación a manera de ejemplo.

ELABORACIÓN DE LA PRUEBA PILOTO PARA CILINDROS											
Fecha producción	Cilindros	Can	Volumen de concreto m3	Humedad fino %	Humedad Grueso %	Agua Kg	Cemento kg	Arena Kg	Triturado kg	Fibras gr	Asentamiento cm
22/10/2015	Patrón	10	0,05989	5,65	0,44	15,34	23,16	38,59	56,46	0	5,7
22/10/2015	Fibra	10	0,05989	5,65	0,44	15,34	23,16	38,59	56,46	59,8	5,5
24/10/2015	PET	10	0,05989	5,60	0,46	15,35	23,16	38,57	56,47	59,8	3,9
27/10/2015	Patrón	10	0,05989	14,95	0,49	11,91	23,16	41,99	56,49	0	5,6
27/10/2015	Fibra	10	0,05989	14,95	0,49	11,91	23,16	41,99	56,49	59,8	5,3
29/10/2015	PET	10	0,05989	10,7	0,48	13,47	23,16	40,44	56,48	59,8	5,1
04/10/2015	Patrón	10	0,05989	14,79	0,51	11,96	23,16	41,93	56,50	0	3,9
06/10/2015	Fibra	10	0,05989	15,03	2	11,04	23,16	42,02	57,33	59,8	5,3
07/10/2015	PET	10	0,05989	15,91	1,48	11,01	23,16	42,34	57,04	59,8	5,5

Tabla 38.Elaboración prueba piloto cilindros

8. RESULTADOS DE LA MUESTRA PILOTO

Al finalizar la muestra piloto se contó con la asesoría del Profesor Arsenio Hidalgo, quien solicitó la determinación de las medias y la desviación estándar en cada uno de los ensayos a compresión y flexión para las dos diferentes edades, mediante la utilización del programa GRANMO como podemos observar en la figura 7, fue posible precisar el número exacto de ensayos a realizar para tener un buen número de pruebas que permitan obtener un resultado confiable de investigación.



Figura 7. Resultado calculadora tamaño muestral GRANMO

En ese sentido, el resultado obtenido a través del programa fue de 13 sujetos en cada grupo, razón por la que fueron elaborados 13 cilindros patrón, 13 cilindros con fibra Sikafiber y 13 cilindros con fibras PET a la edad de 7 días, cantidad que fue utilizada en los mismos términos para la elaboración de vigas.

En el caso de los 28 días fueron elaborados 20 cilindros y 20 vigas para cada tipo de concreto (patrón, adicionado con fibra Sikafiber y adicionado con fibras PET), se escogió como número base 15, eliminando los cilindros y vigas que marcaban mayor dispersión.

8.1. RESULTADOS DE CILINDROS

Este ensayo se refiere a la determinación de la resistencia a la compresión de especímenes de cilindros de concreto, tanto cilindros moldeados como núcleos extraídos. Este ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a una velocidad de carga prescrita, hasta que se presente la falla, la norma de referencia es la I.N.V.E-410-07. Para el cálculo de la resistencia aplicamos la ecuación 7 y la ecuación 8 (Véase Anexo13).



Figura 8. Probetas cilíndricas y máquina de ensayo de cilindros



Figura 9. Cilindros de concreto y cilindro ensayado

- Resultados de la muestra patrón a las diferentes edades 7 y 28 días.

CILINDROS PATRON 7 DIAS			
Carga máxima kN	Diámetro mm	Área mm ²	Resistencia real Mpa
240,92	153	18385,39	13,10
250,30	153	18385,39	13,61
243,19	153	18385,39	13,23
244,25	153	18385,39	13,29
233,97	153	18385,39	12,73
231,85	153	18385,39	12,61

Promedio	12,99 Mpa
Desviación Estándar	0,3621
Coefficiente de variación	2,78%

241,83	153	18385,39	13,15
242,44	153	18385,39	13,19
227,92	153	18385,39	12,40
235,02	153	18385,39	12,78
241,38	153	18385,39	13,13
228,98	153	18385,39	12,45
242,89	153	18385,39	13,21

Tabla 39. Resultados a compresión edad 7 días muestra patrón

CILINDROS PATRÓN A 28 DÍAS			
Carga máxima kN	Diámetro mm	Área mm ²	Resistencia real Mpa
523,89	153	18385,39	28,49
542,19	153	18385,39	29,49
536,14	153	18385,39	29,16
519,50	153	18385,39	28,26
544,76	153	18385,39	29,63
528,58	153	18385,39	28,75
534,02	153	18385,39	29,05
544,91	153	18385,39	29,64
534,02	153	18385,39	29,05
539,62	153	18385,39	29,35
535,08	153	18385,39	29,10
532,51	153	18385,39	28,96
529,03	153	18385,39	28,77
523,13	153	18385,39	28,45
530,24	153	18385,39	28,84

Promedio	28,99 Mpa
Desviación Estándar	0,419
Coficiente de variación	1,44%

Tabla 40. Resultados a compresión edad 28 días muestra patrón

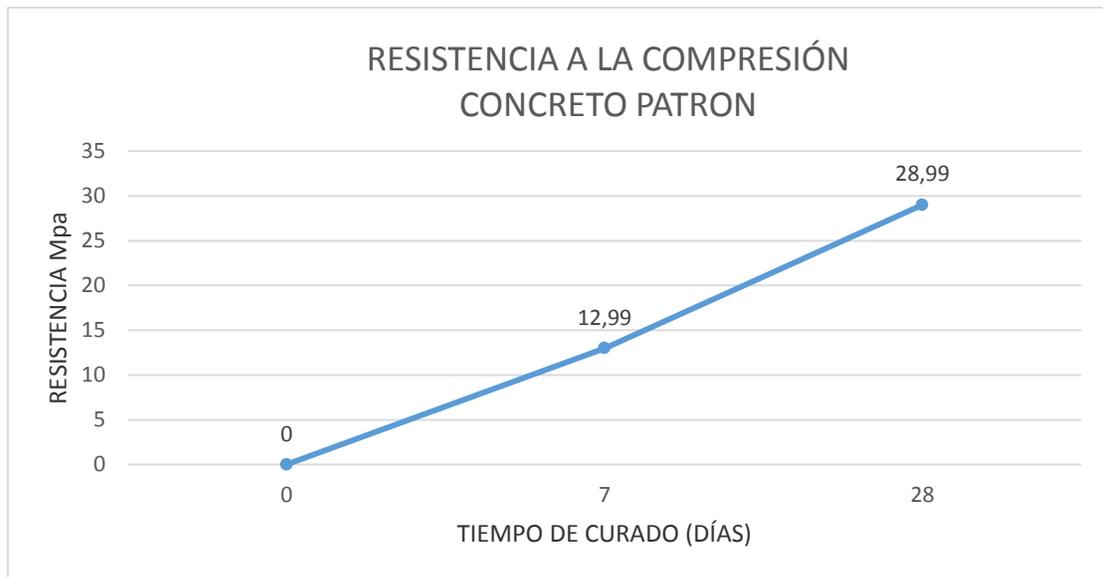


Figura 10. Resistencia Vs Tiempo de curado de cilindros patrón

- Resultados de la muestra fibras Sikafiber a las diferentes edades 7 y 28 días

CILINDROS CON FIBRAS SIKAFIBER A 7 DIAS			
Carga máxima kN	Diámetro mm	Área mm ²	Resistencia real Mpa
229,58	153	18385,39	12,49
231,55	153	18385,39	12,59
231,09	153	18385,39	12,57
219,30	153	18385,39	11,93
233,06	153	18385,39	12,68
199,18	153	18385,39	10,83
213,40	153	18385,39	11,61
233,21	153	18385,39	12,68
209,31	153	18385,39	11,38
230,19	153	18385,39	12,52
230,49	153	18385,39	12,54
214,15	153	18385,39	11,65
224,14	153	18385,39	12,19

Promedio	12,12 Mpa
Desviación Estándar	0,595
Coficiente de variación	4,91%

Tabla 41. Resultados a compresión edad 7 días cilindros fibras Sikafiber

CILINDROS CON FIBRAS SIKAFIBER A 28 DÍAS			
Carga máxima kN	Diámetro mm	Área mm ²	Resistencia real Mpa
501,96	153	18385,39	27,30
525,40	153	18385,39	28,58
517,39	153	18385,39	28,14
511,94	153	18385,39	27,85
521,47	153	18385,39	28,36
519,05	153	18385,39	28,23
527,67	153	18385,39	28,70
513,15	153	18385,39	27,91
531,00	153	18385,39	28,88
529,33	153	18385,39	28,79
513,45	153	18385,39	27,93
522,83	153	18385,39	28,44
530,09	153	18385,39	28,83
519,05	153	18385,39	28,23
543,40	153	18385,39	29,56

Promedio	28,38 Mpa
Desviación Estándar	0,54
Coefficiente de variación	1,91%

Tabla 42. Resultado a compresión edad 28 días concreto fibras Sikafiber

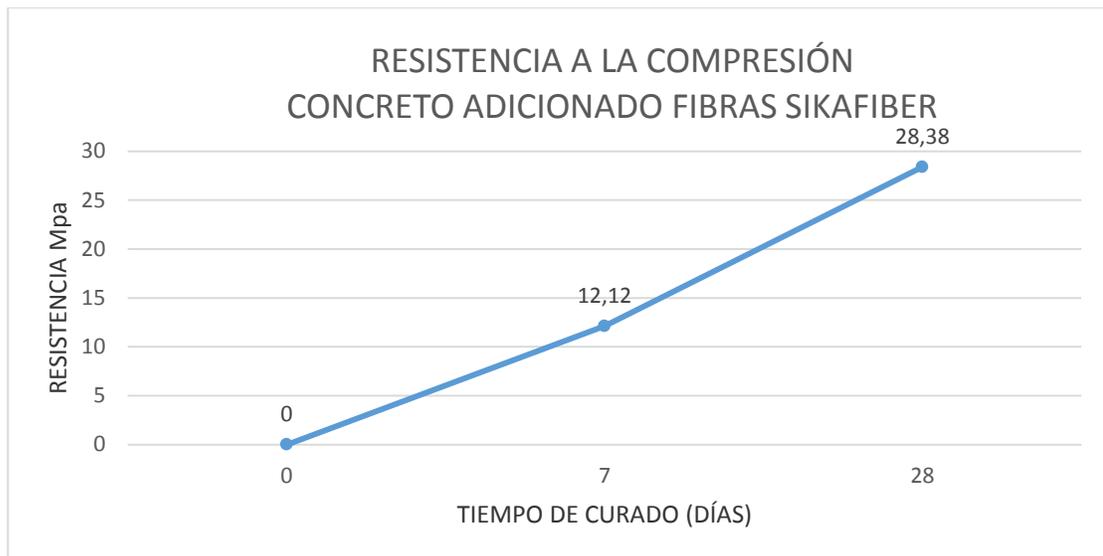


Figura 11. Resistencia Vs Tiempo de curado cilindros con fibras Sikafiber

- Resultados de la muestra fibras recicladas PET a las diferente edades 7 y 28 días

CILINDROS CON FIBRAS RECICLADAS PET A 7 DÍAS			
Carga máxima kN	Diámetro mm	Área mm ²	Resistencia real Mpa
218,99	153	18385,39	11,91
215,36	153	18385,39	11,71
225,95	153	18385,39	12,29
197,97	153	18385,39	10,77
209,01	153	18385,39	11,37
231,70	153	18385,39	12,60
222,32	153	18385,39	12,09
212,19	153	18385,39	11,54
200,54	153	18385,39	10,91
214,30	153	18385,39	11,66
211,13	153	18385,39	11,48
225,19	153	18385,39	12,25
231,85	153	18385,39	12,61

Promedio	11,78 Mpa
Desviación Estándar	0,582
Coefficiente de variación	4,94%

Tabla 43. Resultado compresión edad 7 días concreto fibras recicladas PET

CILINDROS CON FIBRAS RECICLADAS PET A 28 DÍAS			
Carga máxima kN	Diámetro mm	Área mm ²	Resistencia real Mpa
527,97	153	18385,39	28,72
516,33	153	18385,39	28,08
503,32	153	18385,39	27,38
537,50	153	18385,39	29,24
541,59	153	18385,39	29,46
534,48	153	18385,39	29,07
529,03	153	18385,39	28,77
531,00	153	18385,39	28,88
513,45	153	18385,39	27,93
501,96	153	18385,39	27,30
504,68	153	18385,39	27,45
513,76	153	18385,39	27,94

Promedio	28,30 Mpa
Desviación Estándar	0,76
Coefficiente de variación	2,69%

498,18	153	18385,39	27,10
529,33	153	18385,39	28,79
524,34	153	18385,39	28,52

Tabla 44. Resultado compresión edad 28 días concreto fibras recicladas PET

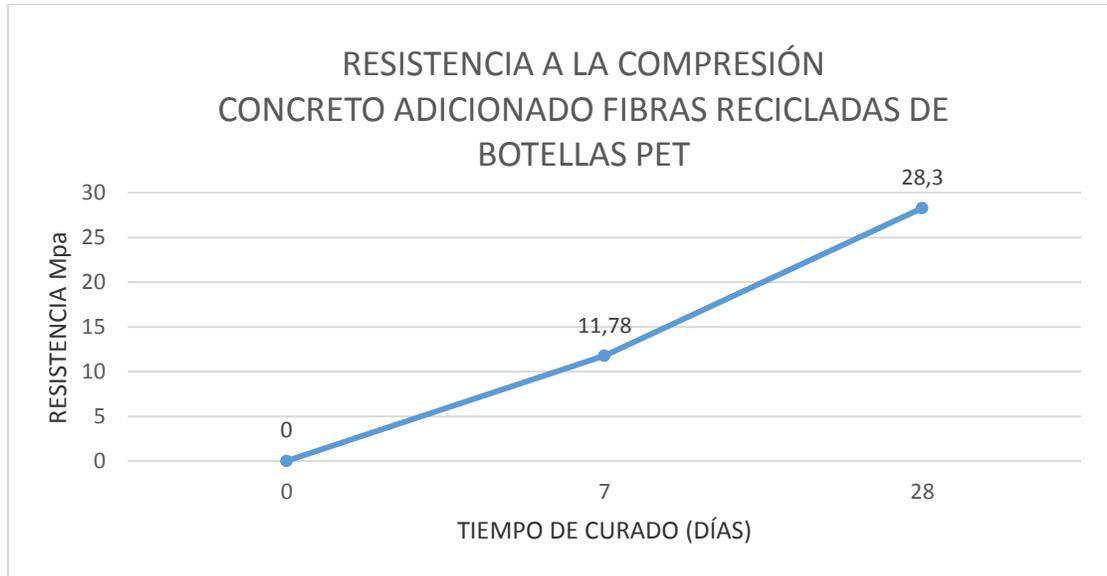


Figura 12. Resistencia Vs Tiempo de curado cilindros con fibras recicladas PET

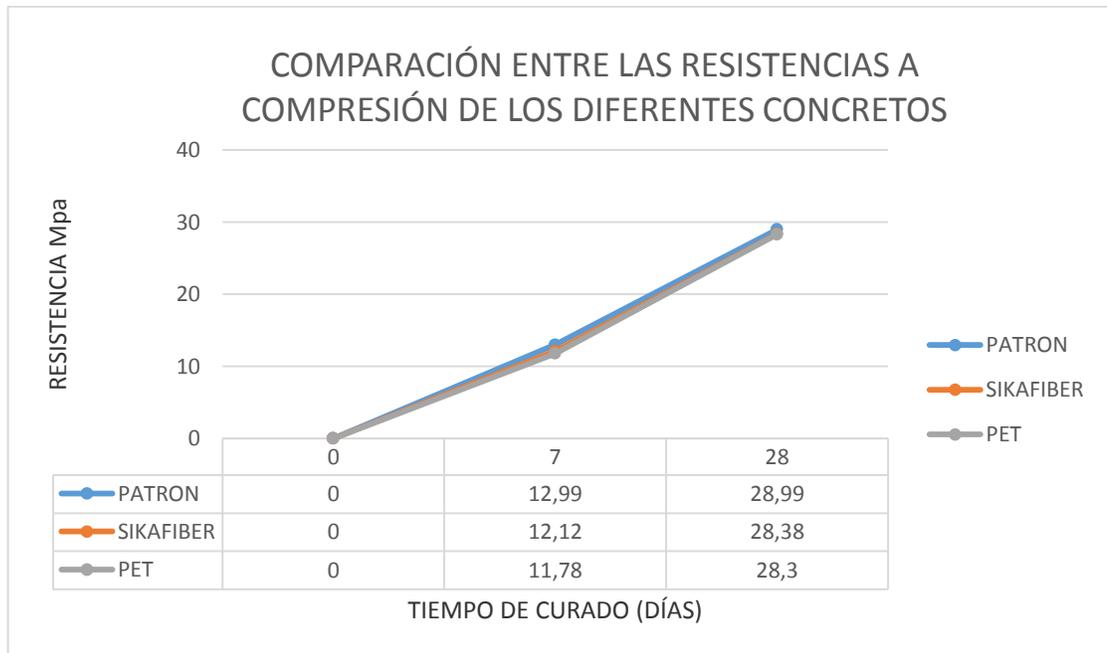


Figura 13. Comparación Resistencia Vs Tiempo de los concretos trabajados

8.2. RESULTADOS DE VIGAS

Este ensayo tiene por objeto establecer el procedimiento que se debe seguir para la determinación de la resistencia de flexión del concreto, por medio del uso de la viga simple cargada en los tercios de la luz; estos ensayos se basan bajo la norma I.N.V.E-414-07 (Véase el Anexo14).

$$R = \frac{P \times L}{b \times d^2} \quad (\text{Ecu.9})$$

R=Módulo de rotura Mpa

d=Altura promedio de la muestra mm

P=Carga máxima aplicada por la maquina en kN

L=Longitud libre entre apoyos mm

b=Ancho promedio de la muestra mm



Figura 14. Máquina de ensayo y molde para viguetas



Figura 15. Vigas falladas

VIGAS PATRÓN A 7 DÍAS				
Carga máxima kN	Base mm	Altura mm	Distancia entre apoyos mm	Módulo de rotura Mpa
17,87	152	153	480	2,41
23,35	152	153	480	3,15
17,20	152	153	480	2,32
17,74	152	153	480	2,39
16,59	152	153	480	2,24
23,29	152	153	480	3,14
22,44	152	153	480	3,03
22,26	152	153	480	3,00
18,29	152	153	480	2,47
23,72	152	153	480	3,20
19,27	152	153	480	2,60
21,10	152	153	480	2,85
21,77	152	153	480	2,94

Promedio	2,74 Mpa
Desviación Estándar	0,352
Coefficiente de variación	12,8%

Tabla 45. Resultados a flexión edad 7 días muestra patrón

VIGAS PATRÓN A 28 DÍAS				
Carga máxima kN	Base mm	Altura mm	Distancia entre apoyos mm	Módulo de rotura Mpa
26,77	152	153	480	3,61
26,10	152	153	480	3,52
26,16	152	153	480	3,53
25,24	152	153	480	3,41
25,79	152	153	480	3,48
25,00	152	153	480	3,37
26,04	152	153	480	3,51
25,06	152	153	480	3,38
25,00	152	153	480	3,37
24,57	152	153	480	3,32
25,79	152	153	480	3,48
26,83	152	153	480	3,62
24,21	152	153	480	3,27
24,27	152	153	480	3,27
23,54	152	153	480	3,18

Promedio	3,42 Mpa
Desviación Estándar	0,12
Coefficiente de variación	3,76%

Tabla 46. Resultados a flexión edad 28 días muestra patrón

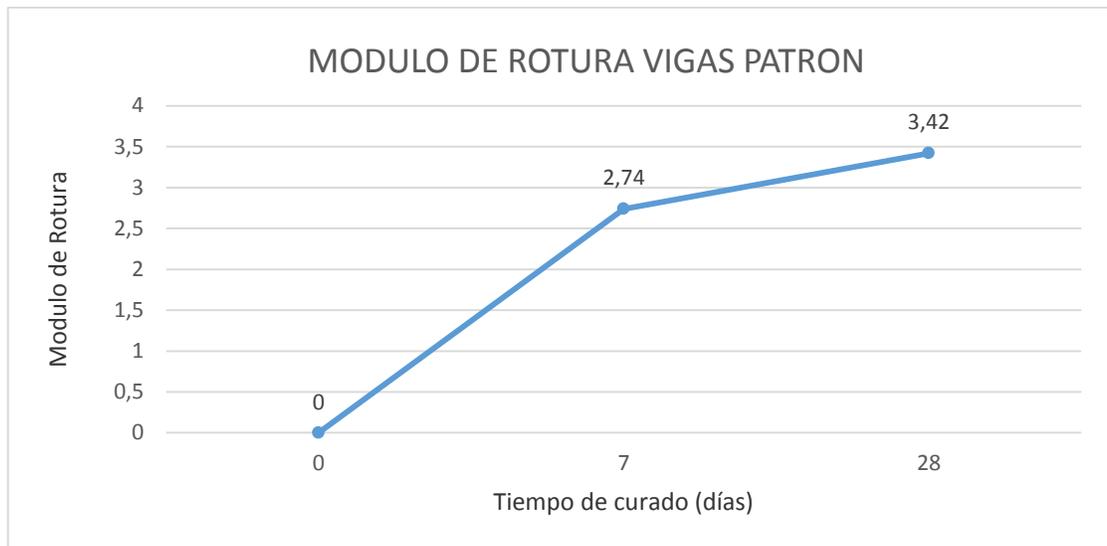


Figura 16. Módulo de rotura Vs Tiempo de curado de vigas patrón

VIGAS CON FIBRA SIKAFIBER A 7 DÍAS				
Carga máxima kN	Base mm	Altura mm	Distancia entre apoyos mm	Módulo de rotura Mpa
16,28	152	153	480	2,20
17,07	152	153	480	2,30
18,35	152	153	480	2,48
17,26	152	153	480	2,33
18,48	152	153	480	2,49
16,04	152	153	480	2,16
15,73	152	153	480	2,12
16,89	152	153	480	2,28
15,92	152	153	480	2,15
18,23	152	153	480	2,46
18,35	152	153	480	2,48
17,62	152	153	480	2,38
17,13	152	153	480	2,31

Promedio	2,31 Mpa
Desviación Estándar	0,13
Coefficiente de variación	5,7%

Tabla 47. Resultados a flexión edad 7 días fibras Sikafiber

VIGAS CON FIBRA SIKAFIBER A 28 DÍAS				
Carga máxima kN	Base mm	Altura mm	Distancia entre apoyos mm	Módulo de rotura Mpa
26,83	152	153	480	3,62
25,06	152	153	480	3,38
24,39	152	153	480	3,29
25,43	152	153	480	3,43
24,33	152	153	480	3,28
24,88	152	153	480	3,36
26,83	152	153	480	3,62
25,24	152	153	480	3,41
25,73	152	153	480	3,47
23,29	152	153	480	3,14
26,77	152	153	480	3,61
26,40	152	153	480	3,56
26,10	152	153	480	3,52
26,83	152	153	480	3,62
24,64	152	153	480	3,32

Promedio	3,44 Mpa
Desviación Estándar	0,149
Coefficiente de variación	4,33%

Tabla 48. Resultados a flexión edad 28 días fibras Sikafiber

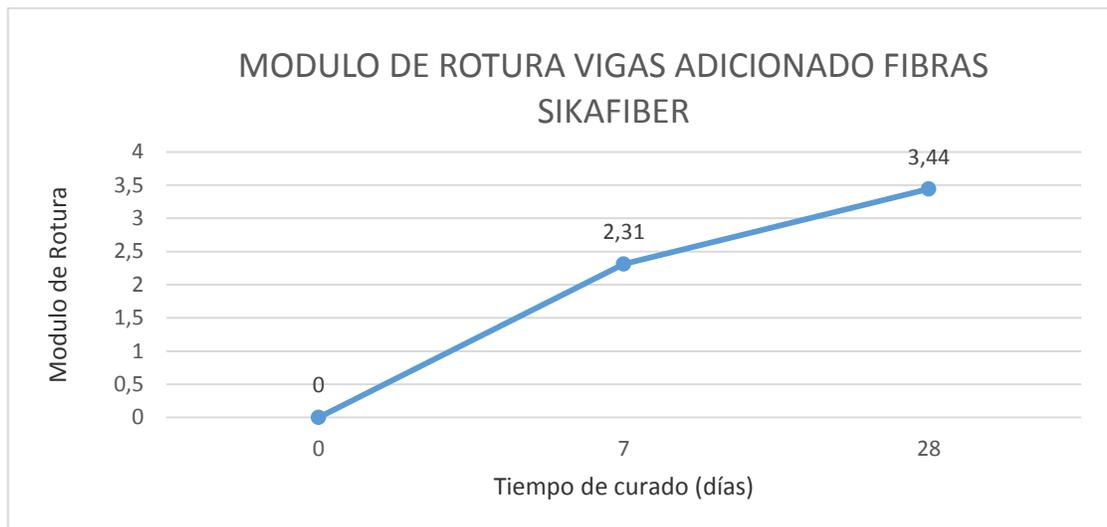


Figura 17. Módulo de rotura Vs Tiempo de curado de vigas con fibras Sikafiber

VIGAS CON FIBRAS RECICLADAS PET A 7 DÍAS				
Carga máxima kN	Base mm	Altura mm	Distancia entre apoyos mm	Módulo de rotura Mpa
14,33	152	153	480	1,93
15,85	152	153	480	2,14
15,43	152	153	480	2,08
14,33	152	153	480	1,93
13,66	152	153	480	1,84
15,85	152	153	480	2,14
14,88	152	153	480	2,01
13,96	152	153	480	1,88
13,96	152	153	480	1,88
16,59	152	153	480	2,24
16,53	152	153	480	2,23
15,24	152	153	480	2,06
14,76	152	153	480	1,99

Promedio	2,02Mpa
Desviación Estándar	0,13
Coefficiente de variación	6,59%

Tabla 49. Resultados flexión edad 7 días muestra con fibras recicladas PET

VIGAS CON FIBRAS RECICLADAS PET A 28 DÍAS				
Carga máxima kN	Base mm	Altura mm	Distancia entre apoyos mm	Módulo de rotura Mpa
27,14	152	153	480	3,66
27,56	152	153	480	3,72
25,85	152	153	480	3,49
25,55	152	153	480	3,45
27,44	152	153	480	3,70
26,10	152	153	480	3,52
26,53	152	153	480	3,58
26,40	152	153	480	3,56
26,77	152	153	480	3,61
26,89	152	153	480	3,63
26,77	152	153	480	3,61
27,50	152	153	480	3,71

Promedio	3,6 Mpa
Desviación Estándar	0,1
Coefficiente de variación	2,68%

25,79	152	153	480	3,48
27,87	152	153	480	3,76
26,10	152	153	480	3,52

Tabla 50. Resultados flexión edad 28 días muestra con fibras recicladas PET

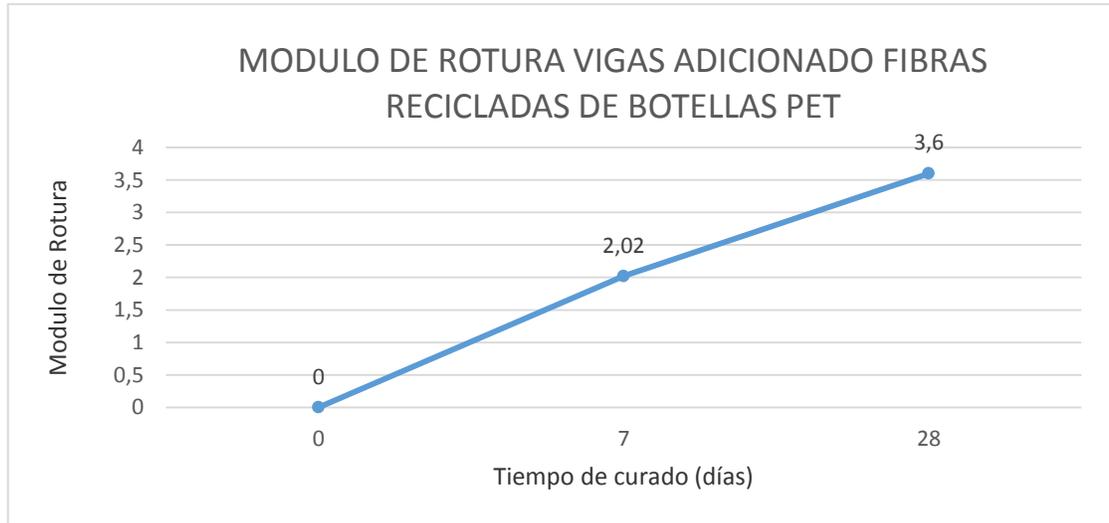


Figura 18. Módulo de rotura Vs Tiempo curado vigas con fibras recicladas PET

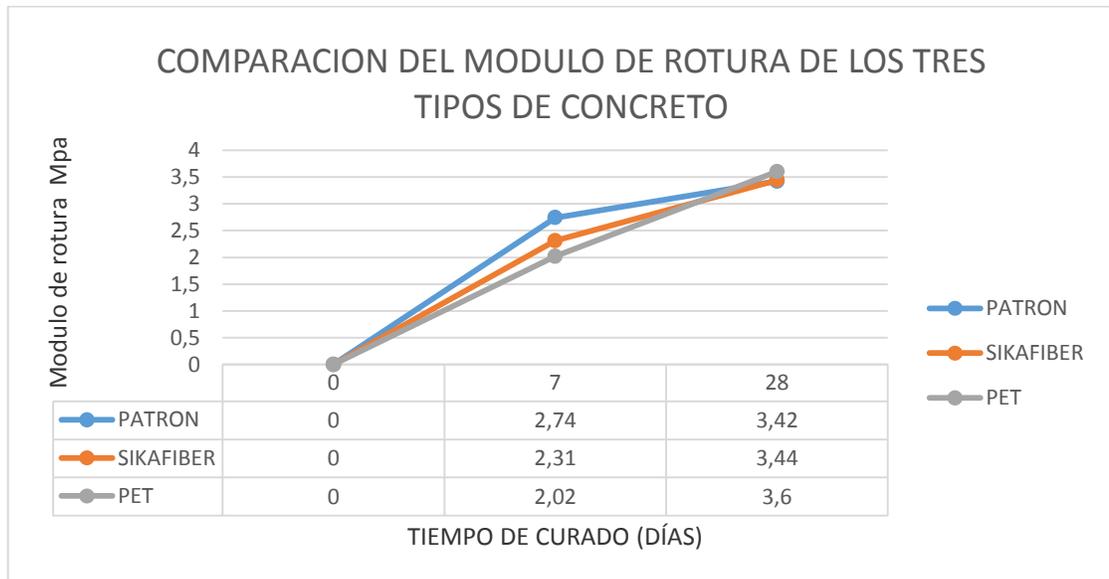


Figura 19. Módulo de rotura Vs Tiempo de los concretos trabajados.

9. ANALISIS ESTADISTICO

En esta investigación se evaluó la resistencia del concreto a compresión y a flexión y a partir de este último, se determinó el módulo de rotura en las diferentes edades 7 y 28, siendo la edad de 28 la más importante puesto que constituye el 100% de su madurez. En el inicio de la investigación se optó por una resistencia especificada $f'c$ de 210kg/cm^2 , que representa el extremo izquierdo de la campana de Gauss, en la norma NSR-10 la resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar se obtiene sumando 70kg/cm^2 a la cantidad mencionada anteriormente, para obtener la resistencia de diseño que será de 280kg/cm^2 . Esta última representa el punto central de la campana de Gauss, por lo tanto a ese valor se le suma 70kg/cm^2 para alcanzar el extremo derecho de la campana el cual será de 350kg/cm^2 .

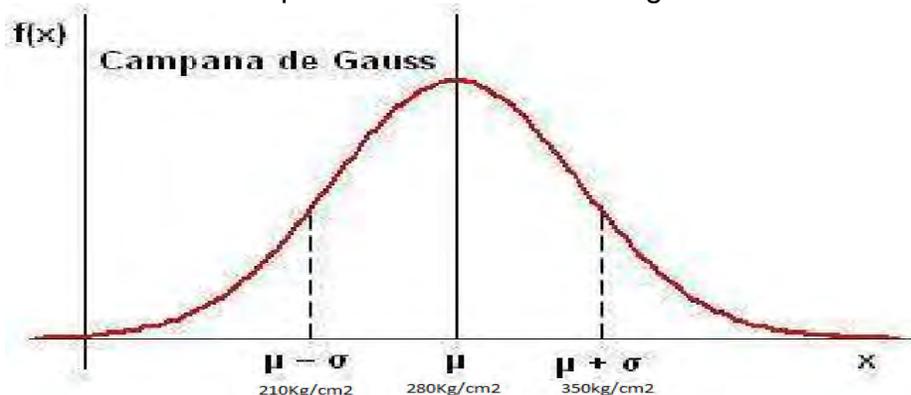


Figura 20. Campana de Gauss

Resistencia especificada $f'c(\text{kg/cm}^2)$	Resistencia de diseño de la mezcla $f'cr(\text{kg/cm}^2)$
Menos de 210 kg/cm^2	$f'c+70\text{ kg/cm}^2$
De 210 kg/cm^2 a 350 kg/cm^2	$f'c+85\text{ kg/cm}^2$
Más de 350 kg/cm^2	$f'c+100\text{kg/cm}^2$

Tabla 51. Resistencia de diseño para análisis estadístico

$f'c$ =Resistencia especificada=Resistencia en el extremo izquierdo de la campana. El valor de la resistencia especificada es de 210 kg/cm^2 .

$f'cr$ =Resistencia de diseño de mezcla=Resistencia ubicada al centro de la campana. El valor de la resistencia de diseño es de $210\text{kg/cm}^2+70=280\text{kg/cm}^2$.

$f'cr+70\text{kg/cm}^2$ =Resistencia en el extremo derecho de la campana de Gauss.

9.1. ANÁLISIS DE VARIANZA

Al terminar la fase de realización de cilindros y vigas se continuó con la ejecución de las pruebas de compresión y flexión en cada caso, con los resultados obtenidos, se optó por eliminar los datos más dispersos a la media de los resultados. En ese sentido, a la edad de 28 días se realizaron 15 especímenes y para la edad de 7 días se hicieron 13 especímenes, con el fin de evaluar si el número de pruebas cumple con el 95% de confiabilidad determinado en el análisis estadístico para el diseño.

CILINDROS 7 DÍAS								
Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo
7	13,10	P	7	12,49	F	7	11,91	R
7	13,61	P	7	12,59	F	7	11,71	R
7	13,23	P	7	12,57	F	7	12,29	R
7	13,29	P	7	11,93	F	7	10,77	R
7	12,73	P	7	12,68	F	7	11,37	R
7	12,61	P	7	10,83	F	7	12,60	R
7	13,15	P	7	11,61	F	7	12,09	R
7	13,19	P	7	12,68	F	7	11,54	R
7	12,40	P	7	11,38	F	7	10,91	R
7	12,78	P	7	12,52	F	7	11,66	R
7	13,13	P	7	12,54	F	7	11,48	R
7	12,45	P	7	11,65	F	7	12,25	R
7	13,21	P	7	12,19	F	7	12,61	R

Tabla 52. Compilación de resultados cilindros 7 días

CILINDROS								
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 7 DÍAS (MPA)								
Tipo	N	Medias	Desviación Típica	Error Típico	Intervalo de confianza para la media 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
P	13	12,99	0,362	0,1454	12,78	13,19	12,40	13,61
F	13	12,12	0,595	0,1454	11,91	12,33	10,83	12,68
R	13	11,78	0,582	0,1454	11,57	11,99	10,77	12,61
Total	39	12,30	0,724				10,77	13,61

Tabla 53. Análisis estadístico cilindros 7 días

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 7 DIAS Mpa					
TABLA ANOVA					
Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	10,05	2	5,026	18,28	0,0000
Intra grupos	9,89	36	0,274		
Total	19,94	38			

Tabla 54. Anova de un factor para cilindros 7 días

Medias y 95,0% de Fisher LSD

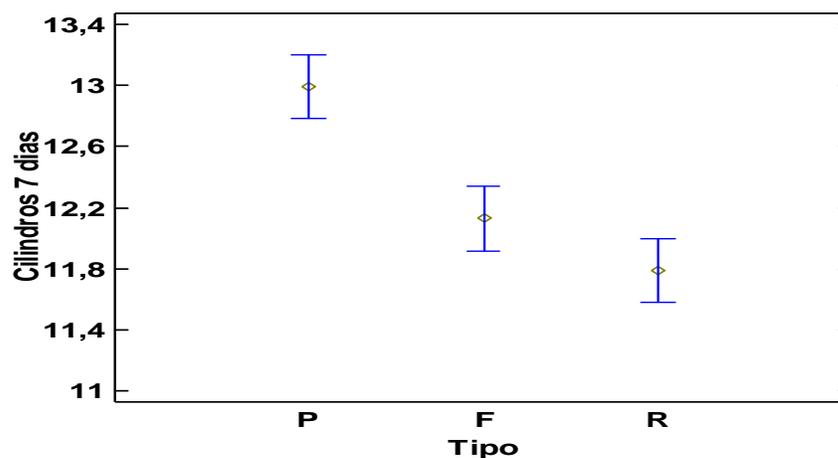


Figura 21. Gráfico anova para cilindros a 7 días

CILINDROS 28 DÍAS								
Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo
28	28,49	P	28	27,3	F	28	28,72	R
28	29,49	P	28	28,58	F	28	28,08	R
28	29,16	P	28	28,14	F	28	27,38	R
28	28,26	P	28	27,85	F	28	29,24	R
28	29,63	P	28	28,36	F	28	29,46	R
28	28,75	P	28	28,23	F	28	29,07	R
28	29,05	P	28	28,7	F	28	28,77	R
28	29,64	P	28	27,91	F	28	28,88	R
28	29,05	P	28	28,88	F	28	27,93	R
28	29,35	P	28	28,79	F	28	27,3	R
28	29,1	P	28	27,93	F	28	27,45	R
28	28,96	P	28	28,44	F	28	27,94	R

28	28,77	P	28	28,83	F	28	27,1	R
28	28,45	P	28	28,23	F	28	28,79	R
28	28,84	P	28	29,56	F	28	28,52	R

Tabla 55. Compilación de resultados cilindros 28 días

CILINDROS								
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A 28 DÍAS (MPA)								
Tipo	N	Medias	Desviación Típica	Error Típico	Intervalo de confianza para la media 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
P	15	28,99	0,419	0,153	28,78	29,21	28,26	29,64
F	15	28,38	0,543	0,153	28,16	28,60	27,3	29,56
R	15	28,30	0,763	0,153	28,09	28,52	27,1	29,46
Total	45	28,56	0,658				27,1	29,64

Tabla 56. Análisis estadístico cilindros 28 días

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN 28 DIAS Mpa					
TABLA ANOVA					
Fuente	Suma de Cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	4,3174	2	2,1587	6,14	0,0046
Intra grupos	14,762	42	0,3514		
Total	19,079	44			

Tabla 57. Anova de un factor para cilindros 28 días

Medias y 95,0% de Fisher LSD

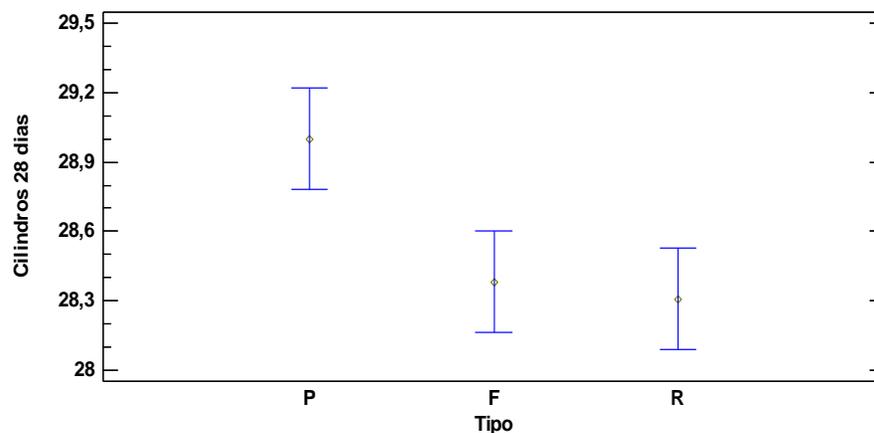


Figura 22. Gráfico anova para cilindros a 28 días

VIGAS EDAD 7 DÍAS								
Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo
7	2,41	P	7	2,2	F	7	1,93	R
7	3,15	P	7	2,3	F	7	2,14	R
7	2,32	P	7	2,48	F	7	2,08	R
7	2,39	P	7	2,33	F	7	1,93	R
7	2,24	P	7	2,49	F	7	1,84	R
7	3,14	P	7	2,16	F	7	2,14	R
7	3,03	P	7	2,12	F	7	2,01	R
7	3	P	7	2,28	F	7	1,88	R
7	2,47	P	7	2,15	F	7	1,88	R
7	3,2	P	7	2,46	F	7	2,24	R
7	2,6	P	7	2,48	F	7	2,23	R
7	2,85	P	7	2,38	F	7	2,06	R
7	2,94	P	7	2,31	F	7	1,99	R

Tabla 58. Compilación de resultados de vigas 7 días

VIGAS								
MODULO DE ROTURA A 7 DIAS (MPA)								
Tipo	N	Medias	Desviación típica	Error Típico	Intervalo de confianza para la media 95%		Mínimo	Máximo
					Límite inferior	Límite superior		
P	13	2,74	0,352	0,064	2,65	2,84	2,24	3,2
F	13	2,31	0,133	0,064	2,22	2,41	2,12	2,49
R	13	2,02	0,133	0,064	1,93	2,11	1,84	2,24
Total	39	2,36	0,375				1,84	3,2

Tabla 59. Análisis estadístico vigas 7 días

MODULO DE ROTURA 7 DIAS Mpa						
TABLA ANOVA						
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P	
Entre grupos	3,4332	2	1,7166	32,16	0,0000	
Intra grupos	1,92174	36	0,05338			
Total	5,35497	38				

Tabla 60. Anova de un factor para vigas 7 días

Medias y 95,0% de Fisher LSD

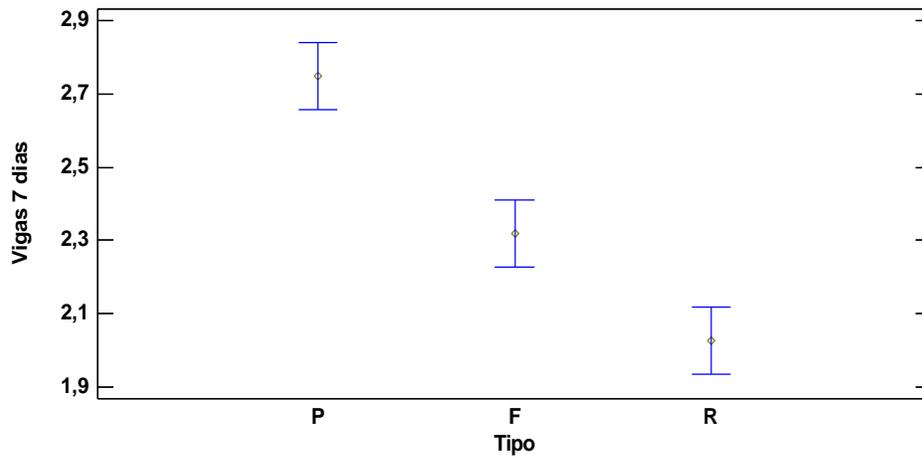


Figura 23. Gráfico anova para vigas a 7 días

VIGAS EDAD 28 DÍAS								
Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo	Edad	Resistencia f'cr Mpa	Tipo
28	3,61	P	28	3,62	F	28	3,66	R
28	3,52	P	28	3,38	F	28	3,72	R
28	3,53	P	28	3,29	F	28	3,49	R
28	3,41	P	28	3,43	F	28	3,45	R
28	3,48	P	28	3,28	F	28	3,7	R
28	3,37	P	28	3,36	F	28	3,52	R
28	3,51	P	28	3,62	F	28	3,58	R
28	3,38	P	28	3,41	F	28	3,56	R
28	3,37	P	28	3,47	F	28	3,61	R
28	3,32	P	28	3,14	F	28	3,63	R
28	3,48	P	28	3,61	F	28	3,61	R
28	3,62	P	28	3,56	F	28	3,71	R
28	3,27	P	28	3,52	F	28	3,48	R
28	3,27	P	28	3,62	F	28	3,76	R
28	3,18	P	28	3,32	F	28	3,52	R

Tabla 61. Compilación de resultados vigas 28 días

VIGAS								
MODULO DE ROTURA A 28 DÍAS (MPA)								
Tipo	N	Medias	Desviación típica	Error típico	Intervalo de confianza para la media 95%		MÍNIMO	MÁXIMO
					Límite inferior	Límite superior		
P	15	3,42	0,1289	0,0327	3,374	3,468	3,18	3,62
F	15	3,44	0,1491	0,0327	3,395	3,488	3,14	3,62
R	15	3,60	0,0965	0,0327	3,553	3,646	3,45	3,76
Total	45	3,48	0,1478				3,14	3,76

Tabla 62. Análisis estadístico vigas 28 días.

MODULO DE ROTURA 28 DIAS Mpa					
TABLA ANOVA					
Fuente	Suma de cuadrados	GI	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0,28656	2	0,143282	8,92	0,0006
Intra grupos	0,67461	42	0,016062		
Total	0,96117	44			

Tabla 63. Anova de un factor para vigas 28 días

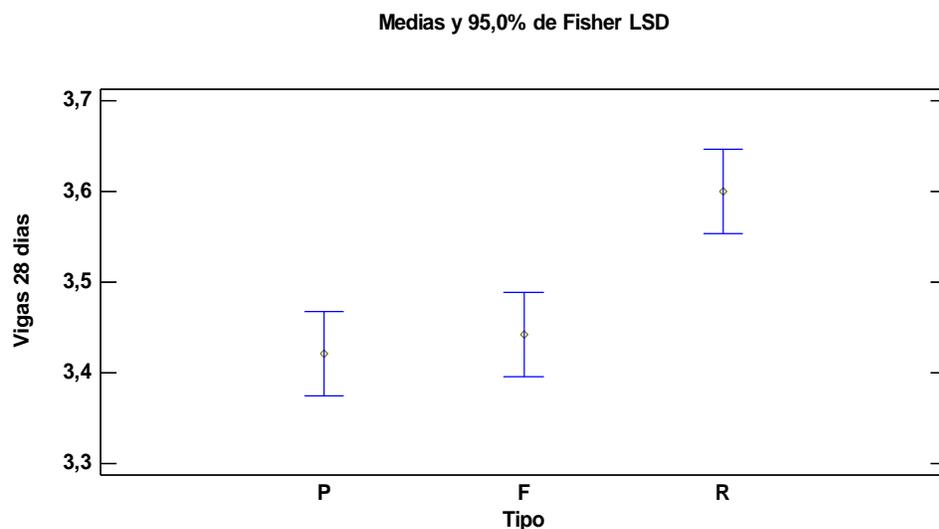


Figura 24. Gráfico anova para vigas 28 días

10. ESTIMACION ECONOMICA DEL NUEVO PRODUCTO

Como uno de los componentes de esta investigación, es necesario realizar un diagnóstico de los costos de cada tipo de concreto utilizado es decir, concreto patrón, concreto adicionado con fibra de polipropileno y concreto adicionado con fibra reciclada de botellas PET.

Concreto Patrón costo total para 1m3				
Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
Cemento Argos Tipo I	kg	387	570	220590
Gravilla TM 3/4" Cantera Pabón	m3	0,37	60000	22200
Arena Negra Cantera Las terrazas	m3	0,28	50000	14000
Agua	Lts	218	30	6540
Desperdicio	%	0,05	263330	13166,5
			Costo total	276496,5

Tabla 64. Estimación económica concreto patrón

Concreto con fibras Sikafiber costo total para 1m3				
Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
Cemento Argos Tipo I	kg	387	570	220590
Gravilla TM 3/4" Cantera Pabón	m3	0,37	60000	22200
Arena Negra Cantera Las terrazas	m3	0,28	50000	14000
Fibras Sikafiber	kg	1	17516	17516
Agua	Lts	218	30	6540
Desperdicio	%	0,05	280046	14042,3
			Costo total	294888,3

Tabla 65. Estimación económica concreto con fibras Sikafiber

Concreto con fibras recicladas PET costo total para 1m3				
Descripción	Unidad	Cantidad	Valor unitario	Valor Total
Cemento Argos Tipo I	kg	387	570	220590
Gravilla TM 3/4" Cantera Pabón	m3	0,37	60000	22200
Arena Negra Cantera Las terrazas	m3	0,28	50000	14000
Fibras recicladas de botellas PET	kg	2	250	500
Agua	Lts	218	30	6540
Desperdicio	%	0,05	263830	13191,5
			Costo total	277021,5

Tabla 66. Estimación económica concreto con fibras recicladas PET

Análisis costo-beneficio para los diferentes tipos de concreto:

Tipo de Concreto	Valor m ³	Resistencia a compresión Mpa	Módulo de rotura Mpa
Concreto Patrón	276496,5	28,99	3,42
Concreto con fibras Sikafiber	294888,3	28,38	3,44
Concreto con fibras recicladas PET	277021,5	28,30	3,60

Tabla 67. Análisis costo-resistencia

Tipo de concreto	Costo unitario	Aumento %	Resistencia Compresión	Aumento %
Patrón	276496,5	0	28,99	0
Con fibras Sikafiber	294888,3	6,65	28,38	0
Con fibras Recicladas PET	277021,5	0,18	28,30	0

Tabla 68. Análisis costo-beneficio cilindros

Tipo de concreto	Costo unitario	Aumento %	Módulo de Rotura	Aumento %
Patrón	276496,5	0	3,42	0
Con fibras Sikafiber	294888,3	6,65	3,44	0,58
Con fibras Recicladas PET	277021,5	0,18	3,60	5,2

Tabla 69. Análisis costo-beneficio vigas

11. ANALISIS DE RESULTADOS

Análisis de caracterización de materiales:

- El cemento utilizado para esta investigación fue Argos Tipo I, no fue posible realizar el ensayo de densidad ya que la norma I.N.V.E-307-07 exige el uso de kerosene libre de agua, químico que no se consigue en la Ciudad de Pasto; por esta razón, se tomaron los datos definidos en la tesis “Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de cuatro cementos comerciales Portland Tipo I”, teniendo como base la siguiente tabla para el cálculo del promedio general de la densidad del cemento Argos:

Repeticiones	Peso del cemento	Lectura inicial	Lectura final	Densidad del cemento (kg/cm ³)
R1	55	0,5	19,2	2941
R2	55	0,4	19,1	2941
R3	55	0,5	19,3	2926
R4	55	0,6	19,3	2941
R5	55	0,9	19,5	2957
R6	55	0,5	19,4	2910
R7	55	0,3	19,1	2926
R8	55	0,6	19,2	2957
R9	55	0,1	18,8	2941
R10	55	0,5	19,3	2926
			Promedio	2937

Tabla 70. Densidad del cemento Argos tipo I

- El agregado fino que se utilizó para esta investigación fue Arena Negra de la cantera “Las Terrazas”, en el caso de este agregado el análisis de granulometría dio como resultado un módulo de finura de 2,84 cumpliendo el rango especificado por la ASTM según el cual, debe estar entre 2,3 y 3,1. Así mismo, se evaluó la gradación de acuerdo con los requisitos de granulometría del agregado fino definidos en la ASTM C-33 y NTC 174, los cuales fueron cumplidos según los rangos de estas normas. En el caso de la densidad aparente seca, el resultado obtenido fue de 2,35 t/m³, el porcentaje de absorción de 6,08, las masas unitarias sueltas de 1,24 y la masa unitaria compacta 1,39; en general estos resultados son buenos para

un concreto considerando que se encuentran dentro de las especificaciones.

- El agregado grueso que se utilizó para la investigación fue triturado de la cantera del señor Samuel Pabón; este material presentó una granulometría aceptable según los requisitos determinados en la ASTM C-33, con un tamaño máximo de 3/4" y un tamaño máximo nominal de 3/4". Para los demás análisis como densidad aparente seca el resultado fue de 2,49 t/m³, el porcentaje de absorción fue de 2,37, el peso unitario compacto de 1,46 y el peso unitario suelto de 1,33; estos resultados fueron aceptados según las especificaciones.
- En el caso del agua, se optó por utilizar agua potable tanto para la mezcla como para el curado, ya que se necesitaba una alta calidad y por consiguiente, los resultados obtenidos fueran más exactos.
- Las Fibras Sikafiber son un producto de SIKA que sirve como refuerzo de fibra de polipropileno modificada, que disminuye el agrietamiento de concretos y morteros. La presentación de este producto es de bolsas de 1kg y la longitud de sus fibras es de 2 cm.
- Las fibras recicladas de botellas PET, son el producto que se obtuvo en esta investigación a partir del reciclaje de botellas; a efectos de los ensayos, se optó por cortarlas en fibras de longitudes de 3 a 4 cm de largo, las cuales fueron adicionadas al concreto en dosificaciones de 1kg por metro cubico, según lo dispuesto en la norma Sika.

Análisis de los ensayos al concreto:

- **Asentamiento:** el asentamiento escogido para esta investigación fue de 5cm, el cual se intentó alcanzar desde la primera mezcla de prueba en la que se obtuvo un resultado de 5,5 cm de asentamiento. De conformidad con la bibliografía consultada, la opción de error es de 1,5 hacia arriba y de 1,5 hacia abajo, es decir que el asentamiento puede llegar hasta 3,5 hacia abajo o hasta 6,5 hacia arriba para que no salga de la consistencia media. De acuerdo con lo anterior, en los tres tipos de concretos estudiados en este proyecto como son patrón, con fibras Sikafiber y con fibras recicladas de botellas PET, el asentamiento de la mezcla de concreto en cada uno de los casos no tuvo modificación.
- **Ensayo de resistencia a la compresión:** este ensayo se desarrolló con base en la norma I.N.V.E-410-07 y los resultados obtenidos pueden ser utilizados como parámetro de control de calidad para dosificaciones,

mezclado y colocación del concreto. Dichos resultados fueron los siguientes:

TIEMPO (DÍAS)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN MPA		
	PATRÓN	SIKAFIBER	PET
0	0	0	0
7	12,99	12,12	11,78
28	28,99	28,38	28,30

Tabla 71. Resultado de cilindros-compresión

Como puede verse, los resultados al ser sometidos a cargas de compresión fueron muy similares tanto para los cilindros patrón, con fibras Sikafiber y con fibras recicladas de botellas PET. En este caso, el comportamiento de cilindros correspondiente a la muestra Patrón es la mejor, toda vez que al agregarle las fibras disminuye la resistencia a compresión.

- **Ensayo de resistencia a la flexión:** este ensayo se desarrolló con base en la norma I.N.V.E-414-07; la importancia de este ensayo es la determinación del módulo de rotura el cual es usado para establecer la resistencia de losas y pavimentos rígidos. Estos son los resultados obtenidos:

TIEMPO (DÍAS)	MODULO DE ROTURA MPA		
	PATRÓN	SIKAFIBER	PET
0	0	0	0
7	2,74	2,31	2,02
28	3,42	3,44	3,60

Tabla 72. Resultado vigas-flexión

Los resultados promedios conseguidos en el ensayo de Flexión fueron similares entre el módulo de rotura para las vigas Patrón y las vigas con Sikafiber, verificando mayor resistencia en estas últimas. En el caso de las vigas con fibras recicladas de botellas PET se obtuvo un excelente resultado, ya que el módulo de rotura es el más alto dando un gran valor a esta investigación no solo porque se podría trabajar con estas fibras, sino porque implica el punto de partida hacia la conciencia ambiental en el ejercicio de la ingeniería, potencializando el reciclaje de estos elementos e incluyéndolas a la construcción en Colombia.

En el caso del concreto armado para construcción, se puede analizar el módulo de rotura basados en la ecuación C.9-10 descrita en la norma NSR-10:

$$f_r = 0,62 \times \lambda \times \sqrt{f'_c} \text{ (Mpa)} \quad \text{(Ecu.10)}$$

$\lambda = 1$ para concretos normales

$$f_r = 0,62 \times 1 \times \sqrt{28 \text{ Mpa}}$$

$$f_r = 3,28 \text{ Mpa}$$

Por esta razón, los promedios obtenidos en los diseños son mucho más altos para el módulo de rotura en el concreto armado, lo que contribuye a mejorar los momentos de fisuración y por consiguiente influye favorablemente tanto en el momento de inercia efectivo como en la disminución de las deflexiones elásticas y plásticas en los elementos de concreto reforzado.

12. CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos en el ensayo a Compresión, se puede concluir que el desempeño de las fibras tanto las de Sikafiber como las recicladas de botellas PET no es favorable, puesto que no se evidencia mejoría en el comportamiento del concreto.
- Con los resultados obtenidos en el ensayo de Flexión se puede concluir, que el desempeño de las fibras de Sikafiber y recicladas de botellas PET generan un excelente comportamiento del concreto, ya que las fibras de botellas PET aumentan satisfactoriamente en un 5,2% los resultados del módulo de rotura, en comparación a las vigas Patrón.
- En el análisis de costo-beneficio se observó que para el caso de los cilindros, el comportamiento de las fibras no es bueno, ya que deterioró la resistencia en comparación con el concreto Patrón; por esta razón se incrementa el costo del concreto sin que se verifiquen beneficios.
- Por el lado de las vigas, el análisis costo-beneficio es favorable teniendo en cuenta que las fibras de botellas PET recicladas generan un excelente comportamiento del concreto, verificando que el costo solo aumenta en un 0,18% y el benéfico que nos brinda en el módulo de rotura es de 5,2%.
- En lo correspondiente a la manejabilidad del concreto adicionado con fibras de Sikafiber y fibras recicladas de botellas PET, no se identifica afectación al hacer el ensayo del cono de Abrams, el cual puede verse afectado por los cambios de temperatura en el Laboratorio debido a la exudación de los materiales.
- En el análisis estadístico ANOVA (Analysis of variance), se comparó las medias suponiendo dos hipótesis: una nula $H_0=P=F=R$ (sean iguales) y una alternativa $H_1=P\neq F\neq R$ (sean diferentes), análisis realizado con utilización del programa Statgraphics. Así las cosas, en los cuatro análisis vistos anteriormente, se obtuvo como resultado final que el Valor de "P" siempre fue menor de 0,05, lo que indica que existe una diferencia significativa entre las medias de cada uno de los ensayos con un nivel de confianza del 95%.
- A partir de esta investigación es posible desarrollar una conciencia ecológica que permita implementar políticas de reciclaje en cada una de las áreas de la ingeniería, logrando la consolidación de una ingeniería amigable con el medio ambiente y contribuyendo a vinculaciones de empleo y mejoras salariales de quienes trabajan en el reciclaje de este tipo de material.

13.RECOMENDACIONES

- Seguir investigando sobre alternativas ecológicas que permitan la consolidación de una Ingeniería Civil responsable con el medio ambiente, contrario a la metodología común de construcción reconocida por su capacidad de destrucción.
- Variar las cantidades de fibras de botellas PET adicionadas a la mezcla, con el fin de determinar el comportamiento del concreto al agregar más o menos fibras tanto para los ensayos de compresión como para los de flexión.
- Garantizar el buen acopio de los materiales protegiéndolos del contacto con materia orgánica, la lluvia o el sol, teniendo en cuenta que la humedad reviste un alto grado de importancia en la variación del asentamiento y en las cantidades de cada una de las producciones de vigas y cilindros.
- Realizar la caracterización de los agregados con pequeñas proporciones dadas por el dueño de la cantera, con el objeto de corroborar y analizar si cumple con los requerimientos exigidos en las normas y además, si cuentan con una buena gradación y homogeneidad en sus componentes, con el fin de tener menor dispersión en los ensayos obteniendo bajos coeficientes de variación y pequeñas desviaciones estándar.
- El agua utilizada en este tipo de investigaciones debe ser potable, libre de grasas o aceites, materia orgánica e impurezas que puedan afectar la resistencia y propiedades del concreto.
- Tener mucho cuidado con la limpieza de la mezcladora de concreto, verificando que no tenga ningún tipo de agregado de anteriores lechadas, con el fin de evitar la contaminación de la mezcla. Así mismo, es indispensable tener en cuenta el tiempo en el proceso de mezclado para evitar la segregación de los materiales.

14. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICA

GIRALDO BOLIVAR, Orlando. "Guía práctica para el diseño de mezclas de hormigón".

GUARIN, Luis Humberto. Ciclo de conferencias "Teoría del concreto". Noviembre 1986.

NEVILLE, A.M. BROOKS, J.J. "Tecnología del concreto". Ed. Trillas S.A, México, 2010.

Norma I.N.V.E-217-07. "Densidad Bulk (Peso Unitario) y porcentaje de vacíos de los agregados compactados o sueltos.

Norma I.N.V.E-213-07. "Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos"

Norma I.N.V.E-223-07. "Gravedad específica y absorción de agregados gruesos"

Norma I.N.V.E-414-07. "Resistencia a la flexión del concreto método de la viga simples cargada en los tercios de la luz"

Norma I.N.V.E-410-07. "Resistencia a la compresión de cilindros de concreto"

NORMA SISMO RESISTENTE NSR-10. "Título C- Concreto estructura"

RIVERA L, Gerardo. "Resistencia del concreto-Capitulo6"

RIVERA L, Gerardo. "Dosificación de mezclas de concreto-Capitulo8"

SANCHEZ DE GUZMAN, Diego. "Tecnología del concreto y del mortero". Biblioteca de la construcción.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA, Facultad de Ingeniería Civil. "Guía para el diseño de mezcla". Ing. Gerardo Rivera.