

**UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**Evaluación de la durabilidad de mezclas de concreto con
sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno
Tereftalato, expuestos a ambientes agresivos.**

TRABAJO DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

Ronaldo Douglas Perdomo Gómez.

TUTOR

María Victoria Bolívar Sánchez.

FECHA

Septiembre, 2023



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
Prolongación Av. Atlántico. Puerto Ordaz.
Telf.: (0286) 600-02-36 Fax: (0286) 600-02-36

Período: 202415

NRC: 17362

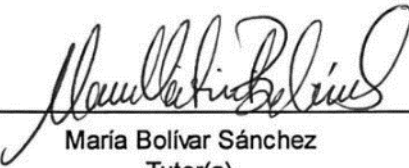
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

ACTA DE TRABAJO DE GRADO

Ciudad Guayana, 10 de Octubre de 2023

Los suscritos profesores: María Bolívar Sánchez, Julio Hernández Farfán y Elizabeth Zabala Medina, integrantes del jurado calificador del Trabajo de Grado intitulado "Evaluación de la durabilidad de mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato, expuestos a ambientes agresivos", elaborado por el bachiller Perdomo Gómez, Ronaldo Douglas, cédula de identidad N° 25746812, para optar al Título de Ingeniero Civil, certifican que, habiendo examinado dicho trabajo, consideramos que es merecedor de la calificación de Veinte (20) puntos.

Observaciones:


María Bolívar Sánchez
Tutor(a)


Julio Hernández Farfán
Jurado




Elizabeth Zabala Medina
Jurado

Secretaría General
c.c. Escuela

Dedicatoria

A mis abuelos, por su cariño, atención, enseñanzas y por siempre confiar en mí.

A mis padres, son la base de lo lejos que he llegado y lo que me falta por recorrer.

*A mi hermana, por siempre escucharme y estar en los momentos cuando más lo
necesitaba.*

*A mi tía Lourdes Gómez, por su dedicación, apoyo y empuje a lo largo de mi carrera
y de mi vida en general.*

A mi tía Judith Dos Ramos, uno de los ángeles en el cielo que siempre me cuida.

Ronaldo Perdomo.

Agradecimientos

A Dios, por permitirme despertar cada día, mantenerme en el camino correcto y darme el conocimiento necesario para afrontar cualquier circunstancia que se me atravesara.

A mi hermosa familia, a pesar que estamos todos dispersos en distintos países, nunca faltaron las palabras de apoyo, haciendo que no me diera por vencido y me impulsaron a seguir esforzándome hasta alcanzar cualquier meta que me proponga. Definitivamente “Não há gente como a gente”.

A mi compañera y hermana de la vida Suzan El Sahli, serás siempre un pilar fundamental en mi aprendizaje no solo académico si no también personal. Que dure para siempre nuestra amistad llena de emociones.

A mis compañeros de la universidad; Mauricio Velázquez, Ariana Ostos, Camilo Rodríguez, Francisco Hernández, Veruska Vivas, Yosmarian Betancourt, Arturo Bolívar, Julio Ansin, Carelis Bravo y Victoria Gómez, quienes me enseñaron que cuando consigues a tu gente, no existe nada en el mundo que no se pueda lograr.

A mi tutora, Profesora María Bolívar y al Sr. Juan Granada, por su extenso apoyo y constantes enseñanzas a lo largo de la realización de este trabajo de grado.

A la Sra. Elizabeth y la Industrias Santos Duque, C.A, por su atención y ayuda en la obtención del material fundamental para el desarrollo del presente escrito.

Ronaldo Perdomo.

Índice de contenido

	pp.
Dedicatoria.....	iii
Agradecimientos.....	iv
Índice de tablas.....	x
Índice de figuras.....	xiv
Resumen.....	xviii
Introducción.....	19
Capítulo I.....	21
El Problema.....	21
Planteamiento del problema.....	21
Objetivos.....	24
Objetivo General.....	24
Objetivos específicos.....	25
Justificación.....	25
Alcance y limitación.....	26
Capítulo II.....	27
Marco Teórico.....	27
Antecedentes.....	27
Bases teóricas.....	30
Concreto.....	30
Tipos de concreto.....	31
Diseño de mezcla.....	33
Proporción entre agregados.....	35
Datos de entrada.....	37
Ley de Abrams.....	40
Relación triangular.....	40

Principales propiedades del concreto en estado fresco.....	40
Trabajabilidad.....	41
Consistencia.....	41
Segregación.....	41
Exudación.....	42
Retracción.....	42
Peso Unitario.....	42
Asentamiento.....	43
Elaboración y curado de probetas.....	44
Principales propiedades del concreto endurecido.....	45
Resistencia a compresión.....	45
Durabilidad.....	46
Impermeabilidad.....	48
Materiales fundamentales en la mezcla de concreto.....	49
Agregados.....	49
Cemento.....	50
Agua.....	53
Plásticos.....	54
Características del plástico.....	54
Tipos de plásticos.....	55
Poliétileno tereftalato (PET).....	55
Proceso de producción del PET.....	56
Tipos de reciclaje del PET.....	58
Usos y aplicaciones del PET en la ingeniería Civil.....	58
Bases legales.....	59
Terminología básica.....	61
Capítulo III.....	63
Marco Metodológico.....	63

Tipo de investigación	63
Diseño de investigación.....	64
Sistema de variables	65
Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	66
Procedimiento.....	66
Primera Etapa.....	67
Segunda Etapa.....	68
Ensayo peso unitario	69
Ensayo de densidad y absorción.	71
Ensayo de humedad de los agregados.....	77
Ensayo de granulometría.....	79
Ensayo de la resistencia al desgaste del agregado grueso.	81
Ensayo de determinación de la finura del cemento Portland.	83
Ensayo de la consistencia normal del cemento	85
Ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland.....	87
Tercera Etapa	89
Ensayo de asentamiento	90
Elaboración de los cilindros.....	91
Cuarta Etapa.....	92
Ensayo de resistencia a compresión.....	92
Ensayo de durabilidad.....	94
Capítulo IV	97
Presentación y análisis de resultados	97
Ensayo de peso unitario de los agregados	97
Calibración de los recipientes.....	98
Peso unitario suelto.....	100
Peso unitario compacto.....	102
Ensayo de densidad y absorción de los agregados	104

Densidad y absorción agregado fino (arena)	105
Densidad y absorción agregado grueso (piedra).....	106
Ensayo de humedad de los agregados	108
Ensayo de granulometría de los agregados	110
Granulometría agregado fino	111
Granulometría agregado grueso.....	114
Ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso	119
Ensayo de determinación de la finura del cemento Portland	120
Ensayo de consistencia normal del cemento Portland.....	123
Ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland	124
Diseños de mezcla de concreto patrón y sustitución parcial del agregado grueso.127	
Diseño de mezcla de concreto con resistencia 210 kg/cm ² planteado.	128
Ensayo de asentamiento	131
Ensayo de Resistencia a compresión de las probetas de concreto y fallas.....	134
Concreto Patrón	134
Concreto con sustitución de 2%.....	141
Concreto con sustitución de 5%.....	148
Concreto con sustitución de 10%.....	153
Resumen y análisis de los resultados obtenidos mediante el ensayo de compresión.....	159
Ensayo de durabilidad de las probetas de concreto y ensayo de compresión.	163
Concreto patrón.....	164
Concreto con sustitución de 2%.....	170
Concreto con sustitución de 5%.....	176
Concreto con sustitución de 10%.....	183
Resumen y análisis de los resultados obtenidos	190
Conclusiones y recomendaciones	196
Conclusiones	196

De la caracterización del Polietileno Tereftalato (PET)	196
De los diseños de mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato.....	197
De las propiedades en estado fresco de los diferentes diseños de mezcla.	197
De la determinación de las propiedades de resistencia a compresión en concreto endurecido.....	197
De la determinación de las propiedades de durabilidad de las probetas de concreto mediante el ensayo acelerado de ataques por sulfatos.	199
Recomendaciones	200
Referencias.....	202
Anexos	207

Índice de tablas

Tabla	pp
1. Límites granulométricos recomendados para distintos tamaños máximos del agregado. Porcentajes pasantes.	36
2. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando se conoce la desviación estándar de la muestra.	39
3. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no se conoce la desviación estándar de la muestra.	39
4. Clases de mezclas según su asentamiento.	43
5. Compuestos químicos que conforman al cemento portland y su comportamiento.	52
6. Sistema de variables.	65
7. Valores usuales de las relaciones peso/volumen de los agregados no livianos.	98
8. Peso unitario del agua.	99
9. Resultado del factor de calibración para el molde de agregado fino.	99
10. Resultado del factor de calibración para el molde de agregado grueso.	100
11. Peso unitario suelto del agregado fino (arena).	100
12. Peso unitario suelto del agregado grueso (piedra).	101
13. Peso unitario suelto del agregado grueso (plástico).	101
14. Peso unitario compactado del agregado fino (arena).	102
15. Peso unitario compactado del agregado grueso (piedra).	103
16. Peso unitario compactado del agregado grueso (plástico).	103
17. Datos para ensayo de la densidad y absorción del agregado fino (arena).	105
18. Resultado de la densidad y absorción del agregado fino (arena).	106
19. Datos para ensayo de la densidad y absorción del agregado grueso (piedra).	107
20. Resultado de la densidad y absorción del agregado grueso (piedra).	107
21. Datos para determinar el contenido de humedad de los agregados.	109
22. Resultados del contenido de humedad de los agregados.	109
23. Resultados del contenido de humedad superficial de los agregados.	110

24. Resultados de la granulometría del agregado fino (arena).	111
25. Resultados de la granulometría del agregado grueso (piedra).	114
26. Resultados de la granulometría del agregado grueso (plástico).	117
27. Resultados del porcentaje de desgaste del agregado grueso.	119
28. Ensayos para la obtención de la finura del cemento Portland.	121
29. Promedio de tiempos y resultado de la finura del cemento Portland.	122
30. Intervalos y resultados de la consistencia normal del cemento.	123
31. Tiempo de fraguado inicial y penetración de la aguja de Vicat.	125
32. Tiempo de fraguado final y penetración de la aguja de Vicat.	125
33. Resumen de dosificaciones de material para un diseño de mezcla de 210 kg/cm ² equivalente a 1 m ³ (1000 lts).	128
34. Diseño de mezclas.	129
35. Diseño de mezclas ajustado a nuevos porcentajes de sustitución.	130
36. Caracterización de las mezclas.....	131
37. Asentamiento de las mezclas.	132
38. Asentamiento de las nuevas mezclas.	133
39. Resultados probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 a los 7 días de curado.	135
40. Resultados probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 a los 28 días de curado.	138
41. Resultados probetas de concreto con sustitución S2%-1 y S2%-2 a los 7 días de curado.	141
42. Resultados probetas de concreto con sustitución S2%-1 y S2%-2 a los 28 días de curado.	145
43. Resultados probetas de concreto con sustitución S5%-1 y S5%-2 a los 7 días de curado.	148
44. Resultados probetas de concreto con sustitución S5%-1 y S5%-2 a los 28 días de curado.	151
45. Resultados probetas de concreto con sustitución S10%-1 y S10%-2 a los 7 días de curado.	154

46. Resultados probetas de concreto con sustitución S10%-1 y S10%-2 a los 28 días de curado.	157
47. Resumen de resultados obtenidos mediante el ensayo a compresión en probetas con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato..	160
48. Pesos probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 a lo largo del ensayo de durabilidad.	164
49. Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.	167
50. Pesos probetas de concreto con sustitución 2% S2%-1 y S2%-2 a lo largo del ensayo de durabilidad.	170
51. Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto con sustitución 2% S2%-1 y S2%-2 luego de ser expuestas ataque de sulfatos.	174
52. Pesos probetas de concreto con sustitución 5% S5%-1 y S5%2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.	177
53. Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto con sustitución 5% S5%-1 y S5%-2 luego de ser expuestas ataque de sulfatos.	180
54. Pesos probetas de concreto con sustitución 10% S10%-1 y S10%2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.	183
55. Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto con sustitución 10% S10%-1 y S10%-2 luego de ser expuestas ataque de sulfatos.	187
56. Resumen resultados de variación de masa en cada ciclo del ataque por sulfatos.	190
57. Requisitos físicos para la finura del cemento Portland para el ensayo de permeabilidad al aire de Blaine.....	209
58. Requisitos físicos para el tiempo de fraguado del cemento Portland mediante el ensayo de la aguja de Vicat.....	209
59. Tolerancia en los valores del asentamiento medido mediante el cono de Abrams.....	210
60. Clases de exposición relacionados con las condiciones ambientales.	210
61. Valores límites recomendados para la composición y propiedades del	

concreto.	211
62. Resistencia promedio a la compresión requerida, F_{cr} , cuando no se dispone de datos para establecer la desviación estándar.....	223
63. Requerimientos aproximados de contenido de aire según tamaño máximo del agregado.....	224
64. Requerimientos aproximados de agua de mezclado según el tamaño máximo del agregado.....	225
65. Relación agua/cemento y la resistencia a compresión del concreto.....	226
66. Volumen del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.....	228
67. Porcentaje de Absorción y porcentaje de Humedad de los agregados.....	230
68. Resumen de dosificaciones de material para un diseño de mezcla de 210 kg/cm ² equivalente a 1 m ³ (1000 lts).....	232

Índice de figuras

Figura	pp
1. Esquema del ensayo acelerado de ataque por sulfatos al concreto.	48
2. Símbolo del Polietileno tereftalato (PET).....	56
3. Diagrama de Flujo del proceso de producción del Polietileno tereftalato (PET). 57	
4. Máquina utilizada para la elaboración de tuberías ubicada en la empresa Industrias Santos Duque, C.A.	68
5. Golpes con barra compactadora para medición de agregado fino compactado. ...	71
6. Elaboración del ensayo de absorción en agregado fino y agregado grueso, procedimiento para obtener muestra saturada con superficie seca.	77
7. Pesos muestras de agregado fino y grueso en estado húmedo.	79
8. Cernidora mecánica y tamices utilizados.	81
9. Introducción de muestra de agregado grueso y esferas de acero.	83
10. Aparato de Blaine para la elaboración del ensayo de finura del cemento Portland.	85
11. Aguja de Vicat indicando la consistencia normal del cemento al descender 10 mm.	87
12. Vaciado de los cilindros y curado de los mismos en las instalaciones del Laboratorio de materiales.	91
13. Tipo de fallas en los cilindros ensayados a compresión.	93
14. Ciclo para ensayo acelerado por Ataque de Sulfatos.	96
15. Curva granulométrica del agregado fino (arena).	113
16. Curva granulométrica del agregado grueso (piedra).	116
17. Curva granulométrica del agregado grueso (plástico).	118
18. Curva de ajuste para la estimación del tiempo de fraguado inicial.	126
19. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-1 a los 7 días.	136
20. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-2 a los 7 días.	137
21. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-1 a los 28 días.	139
22. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-2 a los 28 días.	140

23. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-1 a los 7 días.....	143
24. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-2 a los 7 días.....	143
25. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-1 a los 28 días.....	146
26. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-2 a los 28 días.....	147
27. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-1 a los 7 días.....	149
28. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-2 a los 7 días.....	150
29. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-1 a los 28 días.....	152
30. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-2 a los 28 días.....	152
31. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-1 a los 7 días.....	155
32. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-2 a los 7 días.....	155
33. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-1 a los 28 días.....	158
34. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-2 a los 28 días.....	158
35. Representación gráfica de los resultados de resistencia a compresión para cada una de las mezclas.....	161
36. Variación de masa mezcla patrón al finalizar el último ciclo de secado.	165
37. Aspecto de las probetas MP-1 luego del último ciclo de secado.	166
38. Aspecto de las probetas MP-2 luego del último ciclo de secado.	166
39. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-1 finalizado el último ciclo de secado.....	168
40. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-2 finalizado el último ciclo de secado.....	169
41. Variación de masa mezcla sustitución 2% al finalizar el último ciclo de secado.	171
42. Aspecto de las probetas S2-1% luego del último ciclo de secado.	172
43. Aspecto de las probetas S2-2% luego del último ciclo de secado.	173
44. Fallas en los cilindros de concreto patrón S2%-1 finalizado el último ciclo de secado.....	175
45. Fallas en los cilindros de concreto patrón S2%-2 finalizado el último ciclo de secado.....	175

46. Variación de masa mezcla sustitución 5% al finalizar el último ciclo de secado.	178
47. Aspecto de las probetas S5-1% luego del último ciclo de secado.	179
48. Aspecto de las probetas S5-2% luego del último ciclo de secado.	179
49. Fallas en los cilindros de concreto patrón S5%-1 finalizado el último ciclo de secado.....	181
50. Fallas en los cilindros de concreto patrón S5%-2 finalizado el último ciclo de secado.....	182
51. Variación de masa mezcla S10% al finalizar el último ciclo de secado.	184
52. Aspecto de las probetas S10%-1 luego del último ciclo de secado.	185
53. Aspecto de las probetas S10%-2 luego del último ciclo de secado.	186
54. Fallas en los cilindros de concreto con sustitución S10%-1 finalizado el último ciclo de secado.	188
55. Fallas en los cilindros de concreto con sustitución S10%-2 finalizado el último ciclo de secado.	189
56. Representación gráfica de los resultados de variación de masa en cada ciclo del ataque por sulfatos.....	191
57. Representación gráfica de los resultados de resistencia a compresión para probetas expuestas al ataque por sulfatos y no expuestas al ataque por sulfatos.	193
58. Cuarteo o separación de la muestra de agregado grueso (piedra) para ensayo de peso unitario.....	213
59. Muestra de agregado grueso (piedra) para peso unitario suelto y compactado. .	214
60. Cuarteo o separación de la muestra de agregado grueso (plástico) para ensayo de peso unitario.....	214
61. Muestra de agregado grueso (plástico) para peso unitario suelto y compactado.	215
62. Muestra de agregado fino (arena) para peso unitario suelto y compactado.....	215
63. Preparación y secado de agregado grueso (piedra) para ensayo de densidad y absorción.	216
64. Preparación de agregado fino (arena) para ensayo de densidad y absorción.....	216

65. Introducción de muestra y esferas para ensayo de resistencia al desgaste de agregado grueso.	217
66. Preparación de muestra y medición de ensayo de Finura de Blaine.	218
67. Preparación de mezcla de concreto con sustitución por material polimérico	220
68. Probetas en moldes cilíndricos para su posterior secado, desmoldado y curado.	220



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de la durabilidad de mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato, expuestos a ambientes agresivos.

Autor: Perdomo, Ronaldo D.
Tutor: Ing. María Bolívar.
Fecha: Julio, 2023

Resumen

En el área de ingeniería de la construcción, la utilización de recursos naturales se ha incrementado a fin de poder satisfacer la demanda de productos manufacturados, tal como lo es el concreto, del mismo modo para la producción de la materia prima del mismo, generando procesos cada vez menos amigables con el medio ambiente. En los últimos años se han estudiado alternativas que puedan sustituir total o parcialmente el uso de algunos de estos componentes del concreto, con el fin de crear procesos sostenibles. Tomando en cuenta estos antecedentes, se planteó el presente trabajo de grado, que ha propuesto el uso del material polimérico denominado polietileno tereftalato (PET), como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas de concreto, para usos en medios ambientes agresivos. Los diseños de mezcla evaluados contemplaron inicialmente sustituciones parciales en un 10% y 15% del agregado grueso por polietileno tereftalato (PET) reciclado. Debido a que la trabajabilidad se vio afectada se modificaron los porcentajes de sustitución del agregado grueso en 2%, 5% y 10%. Se evaluaron las propiedades mecánicas de las mezclas de concreto en cuanto a su resistencia a la compresión, así como sus propiedades de durabilidad en ambientes con presencia de sulfatos. Los resultados obtenidos demostraron que, a mayor cantidad de PET reciclado, usado como sustituto parcial del agregado grueso en las mezclas de concreto, se reduce a gran escala la resistencia a compresión del mismo, y se incrementa la susceptibilidad de la mezcla al ataque por sulfatos, afectando su durabilidad.

Palabras clave: concreto, sustitución parcial agregado grueso, polietileno tereftalato, diseño de mezcla, resistencia a compresión, durabilidad, ataque de sulfatos, reciclaje.

Introducción

Los avances tecnológicos permiten al hombre facilitar la mano de obra de su trabajo, disminuyendo el desgaste que provoca la misma y aumentando el rendimiento y la velocidad de la construcción. Sin embargo, es importante mencionar que este avance tecnológico y el desarrollo de la industria provoca un desnivel de carácter ambiental, puesto que propicia al crecimiento de la polución o la contaminación del medio ambiente; provocando que se requieran de vías alternas que permitan minimizar dicho impacto.

El concreto es un material manufacturado, compuesto por distintos elementos de los cuales en su gran mayoría son extraídos del medio ambiente y utilizados como materia prima. Esta extracción tiene un alto carácter contaminante, en donde solo la producción del cemento ocupa entre un 4% y 8% de la producción de CO₂ mundial, así como también es un alto consumidor del agua destinada para las industrias, requiriendo utilizar el agua dispuesta para otros espacios (Watts, 2019, párr. 11). Por otro lado la extracción de los materiales que también componen al concreto como la piedra y la arena, se extraen en grandes cantidades cada año, de manera que se siga en movimiento dicha industria económicamente, lo que conlleva a un continuo desgaste de los recursos ambientales.

A causa de la problemática planteada anteriormente y gracias a la misma necesidad del hombre de superarse, se han realizado estudios en donde se toman en cuenta la reducción o sustitución de los materiales convencionales del concreto por materiales no convencionales que puedan mantener o aumentar la calidad del mismo, sin restar las características que este posee originalmente (tanto en estado fresco como en estado endurecido); de esta manera se ha empleado el uso de materiales como: vidrio molido, caucho, cenizas, concreto reciclado y plástico, que han abierto debates y presentado un nuevo punto de vista.

El presente trabajo de grado se suma a este grupo de investigación sobre la introducción de materiales no convencionales a la mezcla de concreto, enfocándose en el estudio del plástico Polietileno Tereftalato (PET) y sus características, además de su comportamiento una vez se une al concreto y la capacidad de durabilidad que tiene el mismo (estando en estado endurecido) de soportar ambientes agresivos. Se desarrolla el estudio mediante cuatro capítulos delimitados, exponiendo en el primer capítulo la problemática presentada por la industria del concreto, así como la constante contaminación por parte de la industria del plástico, y cómo mediante la integración de ambos es posible reducir el impacto negativo que presentan al mundo.

A través del capítulo dos, se destacan los antecedentes pertinentes a la presente investigación, que sirven de apoyo para caracterizar la situación expuesta en el capítulo anterior, así como de guía para indicar el camino que se desea abordar en esta tesis. Se evalúan las bases teóricas, los ensayos realizados, la importancia de estos en este estudio y las leyes aplicadas para el análisis de cada uno de los materiales que componen el concreto y del concreto como tal.

En el tercer capítulo, se presenta el marco metodológico que como su nombre indica, se expone la metodología aplicada, el tipo de investigación y el diseño de la misma, las técnicas, materiales y equipos empleados en los ensayos.

Por último se encuentra el cuarto capítulo constituido de los distintos resultados obtenidos mediante los ensayos explicados anteriormente y que dan respuesta a los objetivos específicos de esta investigación, así como la interpretación de los mismos mediante gráficos y tablas. Se adjuntan además las conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos utilizados a lo largo de la tesis.

Capítulo I

El Problema

Planteamiento del problema

Siguiendo la historia de la humanidad, el hombre ha tenido como fin principal satisfacer sus necesidades y con ello ha crecido su interés por el aprender y evolucionar constantemente, creando un entorno tecnológico que facilita su trabajo regularmente. Sin embargo, esta evolución viene con un costo, y es que los recursos utilizados para hacer la vida cotidiana más sencilla, son obtenidos fundamentalmente del planeta tierra; propiciando que el mismo se debilite y al no existir conciencia por la preservación del ambiente, no se opta por la retribución a este último.

Tal como se conoce, en el proceso de construcción de alguna obra, el concreto es uno de los materiales con más uso gracias a que cumple con una serie de características que motivan a la constante aplicación del mismo. El implemento de este en la construcción se remonta desde la época Romana, donde se construyeron diferentes monumentos que hasta el día de hoy algunos siguen en pie, con lo que se puede sostener que aplicado correctamente, el concreto es de gran resistencia; sin dejar a un lado que posee una excelente trabajabilidad, manejabilidad y asentamiento.

No obstante, la elaboración del concreto resulta dañina para el medio ambiente; esto a causa de la forma en que se extraen o producen sus componentes. El concreto está constituido por un 80% de partículas de origen pétreo, a las que se les denomina agregados (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 34), las cuales son

extraídas directamente de las rocas mediante excavaciones, provocando polución en el aire.

Por otro lado, otro compuesto del concreto es el cemento, el cual es producido en instalaciones que participan con la liberación de dióxido de carbono, debido a las altas temperaturas en sus hornos y la materia prima principal del cemento siendo arcilla y piedra caliza (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 91).

En consecuencia a este inconveniente, en la actualidad se estudian constantemente alternativas para elaborar concretos no convencionales que buscan sustituir los componentes comunes del concreto por otros elementos más respetuosos con el medio ambiente. Existen estudios en donde se observa la sustitución de dichos componentes por materiales reciclables como cerámica, vidrio, materiales poliméricos, cenizas, caucho, entre otros.

Hecha las consideraciones anteriores, es necesario mencionar que existen otras actividades que participan en la contaminación ambiental y que crecen exponencialmente cada año. Se habla de la producción de plástico, específicamente en la producción de polietileno tereftalato (PET), el cual según Diaz, Beltrán, & Mendoza, (2016) “Es un tipo de polímero que se encuentra en los plásticos y es muy usado en envases de bebidas y textiles” (p. 14). A través de estudios se ha expuesto que un tercio de los desechos en Latinoamérica terminan en la naturaleza, y solo un 10% de las 145.000 toneladas diarias se recicla o se recupera (Sánchez, 2019, párr. 4).

Los objetos elaborados con este tipo de plástico pueden ser fácilmente reconocidos porque poseen un símbolo de reciclaje con el número uno (1) en su interior, permitiendo diferenciarlos de otros tipos de plástico.

Las ventajas del PET son numerosas luego de ser reciclado. Martínez y Cote, (2014) explican: “es transparente y cristalino, aunque admite algunos colorantes,

irrompible, liviano, impermeable, resistente a esfuerzos permanentes y al desgaste, ya que presenta alta rigidez y dureza, totalmente reciclable.” (p. 77), y por ello diferentes empresas optan por la utilización del mismo como reemplazo de alguno de sus materiales. De esta manera y por las razones mencionadas previamente, es uno de los materiales a utilizar para el proceso experimental del presente trabajo de investigación.

Estos procesos contaminantes pueden ser apreciados directamente en Ciudad Guayana, en donde por su características de ciudad industrial, se encuentran una gran cantidad de empresas básicas sin cultura sobre el cuidado del medio ambiente.

Guzmán (2007) expresa que: “Las zonas industriales de Puerto Ordaz se encuentran entre moderada y altamente contaminadas por efecto de las emisiones” (párr. 8) de las cuales, una parte son empresas dedicadas netamente a la producción de cemento y sus afines.

Del mismo modo, la conciencia por el reciclaje de plásticos en la ciudad es muy poco común, tomado de la mano de que el sistema de aseo es bastante precario. Estas condiciones generan una gran cantidad de basura en diferentes zonas de Puerto Ordaz, las cuales terminan en vertederos de cielo abierto que favorecen los problemas de contaminación mencionados a lo largo del presente escrito.

El planeta tierra en el que se habita es el único que se tiene, es por esto que la mejor manera de ayudarlo es buscando alternativas que minimicen los impactos ambientales mencionados, puesto que gradualmente van en aumento y están generando cambios que son evidentes, como el calentamiento global y cambio climático.

Hecha la observación anterior, el presente trabajo busca ofrecer la propuesta de un diseño de mezcla para la elaboración de un concreto no convencional,

sustituyendo parcialmente el agregado grueso por material polimérico con el fin de evaluar su durabilidad; observando la resistencia a compresión del mismo y el comportamiento de este al estar expuesto a ambientes químicos. Una vez analizado dichas cualidades, y de ser las mismas efectivas, este concreto no convencional pudiera ser útil para distintos proyectos no estructurales en zonas industriales, como Ciudad Guayana.

Ante la situación descrita y tomando como base la problemática explicada, se plantea dar respuesta a las siguientes interrogantes:

¿Cuál es la resistencia a compresión del concreto al sustituir parcialmente el agregado grueso por Polietileno Tereftalato (PET) reciclado?

¿Cuál es la durabilidad del concreto una vez se es sustituido parcialmente el agregado grueso por material polimérico, específicamente Polietileno Tereftalato (PET) reciclado, siendo sometido el mismo a ataques químicos?

¿Cuáles son las variaciones que se presentan en las características de un diseño de mezcla con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato (PET) reciclado, en comparación con los procesos realizados para los diseños de mezclas de concreto convencionales?

Objetivos

Objetivo General

Evaluar la durabilidad de mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato, expuestos a ambientes agresivos.

Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades de los materiales que formarán la mezcla de concreto mediante la realización de ensayos físicos enmarcados en las Normas venezolanas COVENIN.
- Elaborar diseños de mezcla de concreto con sustitución del 10% y 15% del agregado grueso por material reciclado de Polietileno Tereftalato (PET).
- Determinar la durabilidad del concreto mediante ensayos en probetas, frente a agentes agresivos identificados como sulfato de sodio anhidro.
- Determinar la resistencia a compresión del concreto basados en la Norma venezolana COVENIN 338:2002.

Justificación

El auge de las industrias se encuentra en ascenso exponencialmente desde hace unos cuantos años, y la necesidad de renovarse en términos tecnológicos crece con él. Este crecimiento requiere mayor demanda con la materia prima, la cual se extrae de la naturaleza, debilitando la misma; y que luego de haberse distribuido el producto, el mismo no es desechado correctamente generando un círculo del que se necesita escapar lo más pronto posible.

A través de este trabajo se busca ofrecer alternativas que permitan reducir el impacto por parte de las industrias, además de proporcionar información al lector sobre las formas en las que se pueden reciclar los productos que normalmente se piensa ya no tienen más uso. Del mismo modo, se ofrecen estudios que permiten conocer si mediante la sustitución parcial de agregados gruesos por materiales poliméricos, las características del concreto sufren variación y hasta qué punto son o no beneficiosas según el propósito que se desee utilizar el mismo.

En los marcos de las observaciones anteriores, una vez expresados los resultados de la investigación, se espera que los mismos sirvan de apoyo directo a distintos ingenieros que deseen tomar la ruta ambiental en su área de trabajo, mejorando el impacto en la huella ecológica de la producción de concreto. Del mismo modo, esta metodología servirá de utilidad en localidades donde no se disponga de gran cantidad de agregados, gracias a la sustitución de los mismos por otro tipo de material. Por último pero no menos importante, permite generar debate sobre los métodos de construcción con los que se ha trabajado desde hace un buen tiempo, propiciando a la creatividad e ingenio en materia de sustentabilidad.

Alcance y limitación

El presente trabajo de grado está enmarcado en la evaluación de la durabilidad de una mezcla de concreto a la cual se le fueron sustituidos parcialmente sus agregados gruesos por material polimérico reciclado conocido como Polietileno Tereftalato (PET). A dicha mezcla de concreto se le realizará su respectivo diseño de mezcla determinando cada una de las proporciones de los materiales inmersos y se evaluarán sus propiedades tanto antes de fraguar como luego de dicho proceso a través de distintos ensayos de laboratorio.

La investigación tiene lugar en las instalaciones de la Universidad Católica Andrés Bello Extensión Guayana, específicamente en el Laboratorio de Materiales de Construcción ubicado en la escuela de Ingeniería Civil e Informática.

En último lugar, el presente trabajo de grado se llevó a cabo en el período comprendido entre octubre 2022 y julio 2023 en Ciudad Guayana, Venezuela.

Capítulo II

Marco Teórico

Antecedentes

Para el desarrollo de este trabajo y su fundamento teórico, se implementó el uso de material de referencia que posee vínculo estrecho con el tema de estudio, dentro de los cuales destacan los siguientes:

Aquino (2019), en su trabajo investigativo que tiene como título: “Estudio comparativo de la Influencia del plástico (PET) en la resistencia a la compresión y durabilidad del concreto reciclado y concreto convencional” expuesto para optar al título de Ingeniero Agrícola en la Universidad Nacional de Trujillo en Perú; experimentaron con el reemplazo parcial del agregado grueso en mezclas de concreto por Polietileno Tereftalato (PET), en donde presentaron resultados sobre la resistencia a compresión y durabilidad de un concreto diseñado bajo estas características.

Para llevar a cabo el mismo, realizaron estudios de sustitución parcial de agregados gruesos en distintos porcentajes, a fin de poder comparar cada uno de los diseños y crear una base de datos que permitió establecer cuál de las sustituciones cuenta con más beneficios en relación a las características deseadas.

En ese mismo sentido, dicha investigación sirvió de sustento para el cálculo de los porcentajes a reemplazar; del mismo modo, permitió comparar los resultados

obtenidos por los tesisistas con nuestra propia experimentación, a manera de identificar posibles alteraciones y las causas de las mismas.

Del mismo modo, Apaza (2018) redactó su trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Nacional Federico Villarreal en Perú, el cual lleva por nombre: “Durabilidad del concreto elaborado en base a la ceniza del Bagazo de Caña de Azúcar (CBCA) con cemento portland, ante agentes agresivos” en donde elaboraron probetas tanto cilíndricas como rectangulares de concreto, una vez sustituyeron su agregado fino por cenizas de Bagazo de Caña de Azúcar y analizaron la durabilidad de las mismas.

Dicho proyecto sirvió como base en esta investigación, gracias a que involucró ambos procesos para el estudio de la durabilidad de probetas de concreto no convencionales, siendo estos la resistencia a compresión y la exposición a ambientes agresivos. Se muestra en detalle la realización de las pruebas, además de los resultados y conclusiones obtenidos a través de ellas.

Es importante mencionar el aporte otorgado por González y Ortiz (2022), mediante su trabajo investigativo titulado “Determinación de las Propiedades Mecánicas del concreto elaborado con sustitución parcial del agregado grueso por materiales Poliméricos reciclables”, presentado para optar al título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica Andrés Bello - Extensión Guayana; que como su nombre indica, tuvo como planteamiento principal estudiar la resistencia a compresión de las probetas de concreto con sustitución parcial por polímeros, así como indicar cuales usos se les puede otorgar a estos nuevos diseños de mezcla.

El enfoque presentado por los autores en dicho trabajo, generó una importante contribución a esta investigación, gracias a que se sustituyó el mismo tipo de agregado, con lo cual se evidenció similitudes con respecto a la resistencia a compresión del concreto final, considerando que además se hizo la sustitución por un

polímero de la misma familia de plásticos. Estos resultados permitieron generar comparación y discusión a lo largo del estudio de las probetas, e incluso se tomaron en cuenta las recomendaciones expuestas por los autores.

Por otro lado, los aportes expuestos por Pico (2012), en su trabajo de grado denominado “Propuesta de concreto con Agregado Fino de Escoria de Cubilote como aporte al estudio de la Durabilidad y Propiedades Acústicas” con el cual optó al título de Ingeniero Civil en la Universidad Industrial de Santander en Colombia, fueron de gran importancia para la presente tesis.

Los autores elaboraron múltiples ensayos de diferentes tipos para conocer el comportamiento en cuanto a la durabilidad en concretos con sustitución en porcentajes de escoria de cubilote, obteniendo resultados variados a fin de conocer si su teoría estaba en lo cierto.

En dicho trabajo se presentó todo el hilo investigativo sobre el ensayado de durabilidad mediante la utilización del Sulfato de Sodio Anhidro, incluyendo procedimiento, resultados y representación gráfica con los cuales fue posible realizar una comparación con los datos obtenidos en el proceso experimental del presente trabajo de grado.

En cuanto al reuso de materiales, Amoni y Khawam (2015), elaboraron su Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil en la Universidad Católica Andrés Bello titulado “Reuso de los agregados provenientes de los Residuos de Concreto en Ciudad Guayana” teniendo como enfoque probar la resistencia a compresión de las mezclas a través de ensayos realizados en laboratorio de control de calidad.

Los autores utilizaron una investigación de tipo aplicado, donde pudieron evaluar el aspecto teórico de su investigación con el proceso que ocurre en la realidad

a través de técnicas de muestreo. Mediante la utilización de residuos de concreto proveniente de empresas de premezclado de Ciudad Guayana, pudieron determinar las propiedades de estos materiales y a su vez realizar diseños de mezclas que sustituían a un 100% al agregado grueso.

Como aporte a la presente investigación, el trabajo mencionado anteriormente, mostró técnicas para la fabricación de probetas con sustitución parcial de agregados por residuos de concreto, donde el proceso detrás de la elaboración, curado y análisis de resistencia a compresión es similar; por ende, el marco metodológico, las técnicas utilizadas y los instrumentos dispuestos, aportaron una dirección para llevar a cabo ciertos capítulos de la investigación actual.

Bases teóricas

Concreto

Se define concreto a una mezcla constituida por una parte pastosa y moldeable capaz de endurecerse con el tiempo, y otra parte de material pétreo que son arropados por dicha pasta (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 31). Cuando se habla de concreto, generalmente se hace referencia a la combinación de agregados y cemento portland, donde se incluyen además otros productos dependiendo del resultado final y es utilizado frecuentemente como concreto estructural para la construcción de edificios (Parker, 2008, p. 15).

El concreto presenta diferentes características que generalmente dependen de la preparación del mismo y los elementos que se utilizan en la mezcla. Sin embargo, existen dos propiedades principales que lo definen: el grado de fluidez del material cuando esta fresco (conociéndose como trabajabilidad, manejabilidad, docilidad, asentamiento) y el grado de endurecimiento que es capaz de adquirir el concreto (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 36).

En este orden de ideas, Absalón y Salas (2008) explican que:

La calidad de un concreto es un factor determinante en la seguridad de una estructura, pero esta no se obtiene únicamente con un correcto diseño de mezcla para una obra, un eficiente mezclado y colocación, porque aun cumpliendo con estos, los resultados de laboratorio muestran variaciones considerables en la resistencia de un concreto hecha bajo un mismo diseño. (p. 5).

Tipos de concreto.

La clasificación de la mezcla de concreto abarca diferentes criterios, puesto que depende de varios factores como el tipo de material que utiliza, el tipo de estructura que se desea construir, además de encontrarse en juego su flexibilidad y trabajabilidad. En otras palabras, se busca aprovechar completamente las habilidades del concreto que al unirse con otro tipo de elementos o materiales, fortalezcan sus características permitiéndole ser empleado en estructuras que requieran una atención específica. De este modo, se enlistan algunos de los tipos de concretos más comunes en el área de la construcción:

Concreto simple. Generalmente es el más utilizado en las construcciones gracias a que solo necesita los materiales generales; siendo estos cemento portland, agregado grueso, agregado fino, agua y en ciertos casos aditivos. Este tipo de concreto destaca debido a que posee una excelente manejabilidad en su estado seco, además de una gran uniformidad al momento de endurecerse. Dentro de sus usos se encuentran las construcciones de cimentaciones, columnas y muros de contención.

Concreto Armado. Posee las mismas características que un concreto simple al cual se le añaden armaduras de acero, permitiendo que al momento de endurecerse este adquiera más resistencia en las edificaciones. Abanto, (s.f.) establece: “Está diseñado bajo la hipótesis de que los dos materiales trabajan conjuntamente, actuando

la armadura para soportar los esfuerzos de tracción o incrementar la resistencia a la compresión.” (p. 13). Destinado a construcciones como columnas, losas y vigas.

Concreto ciclópeo. Al igual que su predecesor, este tipo de concreto también dispone de las mismas características que el concreto simple con una leve especificación en el caso del agregado grueso, el cual está compuesto de piedras con tamaño máximo de 10” que cubren un 30% de la mezcla aproximadamente. Su uso constituye a la elaboración de cimientos corridos, sobrecimientos, muros de construcción.

Concreto hidráulico. Destaca por su poca o nula permeabilidad entre sus partículas, convirtiéndolo en el candidato perfecto para la elaboración de estructuras que estén en contacto con el agua tales como presas. Otra de sus ventajas es la posibilidad de resistir la corrosión ante ataques de agentes externos que se encuentran en el agua. (Construyendo.co, s.f., párr. 12).

Concreto liviano. Este tipo de concreto se prepara utilizando los materiales generales, agregándoles componentes de poliestireno expandido haciendo que su consistencia sea más plástica, permitiendo que se reduzca su peso por unidad de volumen y sea como su nombre indica, liviano. Es utilizado generalmente en rellenos y recubrimientos, losas de entrepiso, muros divisorios fundidos en sitio. (Ferreindustrialdelvalle.com, s.f., párr. 1).

Concreto normal. Se preparan también con los materiales que componen el concreto simple, diseñándolo para que adquiera su resistencia a compresión a los 28 días y con un peso unitario que varía entre 2300 a 2500 Kg/m³. Su uso es bastante general, pues son utilizados en construcciones donde no se requiera de una característica especial. (Abanto, s.f., p. 13).

Concreto pesado. Son aquellos concretos que se preparan utilizando agregados pesados como baritas, limonita, hematita, entre otros. Su peso unitario varía entre los 2800 Kg/m³ y los 6000 Kg/m³. (Abanto, s.f., p. 13).

Concreto compactado con rodillo CCR. Para la elaboración de este tipo de concreto, además de utilizar los materiales generales, se toma en cuenta que su relación agua/cemento debe ser mínima; y a su vez, se debe hidratar el cemento suficientemente con agua, de manera que se pueda conseguir una buena trabajabilidad permitiendo a las máquinas de compactación lograr la máxima densidad. Su uso se aplica en diferentes construcciones como presas y pavimentos.

Concreto premezclado. Está referido a aquellos concretos que son preparados en planta y pueden ser transportados a obras, mediante camiones mezcladores. Generalmente se colocan aditivos a la mezcla de estos concretos, a manera de ralentizar el proceso de endurecimiento. (Abanto, s.f., p. 14).

Concreto bombeado. Es un tipo de concreto que posee características que le permite ser impulsado por bombeo mediante tuberías, hacia su ubicación final. Se aplica en su mayoría, cuando se quiere conducir la mezcla a lugares con grandes alturas. (Abanto, s.f., p. 14).

Diseño de mezcla

El diseño de mezcla es la receta que se debe seguir para obtener el resultado final del concreto. Consiste en definir las proporciones de cada uno de los materiales involucrados en la mezcla de concreto, a fin de poder obtener el comportamiento y resistencia a compresión deseados en estado plástico y cuando ya se encuentra endurecido. (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 123).

Huanca (2006) lista la información que se debe conocer para la realización del diseño de mezcla, y son:

- ✓ Análisis granulométrico de los agregados.
- ✓ Peso unitario compactado de los agregados (finos y gruesos).
- ✓ Peso específico de los agregados (fino y grueso).
- ✓ Contenido de humedad y porcentaje de absorción de los agregados (fino y grueso).
- ✓ Perfil y textura de los agregados.
- ✓ Tipo y marca del cemento.
- ✓ Peso específico del cemento.
- ✓ Relaciones entre resistencia y la relación agua/cemento, para combinaciones posibles de cemento y agregados.

Actualmente existen diversos métodos aplicables para la elaboración de un diseño de mezcla óptimo, la selección del mismo dependerá de las leyes que correspondan a cada país o bien del gusto del ingeniero encargado. Algunos de los métodos más utilizados se pueden mencionar el expuesto por el Instituto Americano del Concreto (ACI), el método estándar británico DOE (BS), el método IS: 10262-2009 y por último el método comúnmente utilizado en Venezuela, presentado en la Norma FONDONORMA 1753:2006 Proyecto y construcción de obras en concreto estructural. (1ra revisión) y anudado a las Normas Venezolanas COVENIN.

En este mismo sentido, el método a utilizar en el presente trabajo de grado es el ACI, el cual comprende un conjunto de variables que se deben tomar en cuenta para la elaboración general de un diseño de mezcla, basándose en dos leyes básicas como son la Relación Triangular y la Ley de Abrams. Del mismo modo, proporciona factores de corrección que permiten aplicar este sistema de manera más general utilizando distintos tipos de tamaño máximo y agregados. De esta manera se

mencionan a continuación las variables que se deben estudiar para un diseño de mezcla óptimo.

Proporción entre agregados.

Los agregados en la mezcla final de concreto, juegan un papel fundamental en la misma y generalmente van de la mano, esto debido a que ambos se complementan entre sí trabajando como uno solo. Tomando en cuenta lo mencionado anteriormente, es indispensable conocer la proporción de los mismos al momento de realizar el diseño de mezcla y es por esto que se evalúan ciertas condiciones que permitirán una selección adecuada del material según las especificaciones que se requieran. Las cualidades a evaluar son las siguientes:

Límites granulométricos. Una vez conocidas las granulometrías de los agregados para el diseño, estas deben ser comparadas con límites recomendados por otras prácticas denominados zonas granulométricas, los cuales toman en cuenta los tamaños máximos de los agregados correspondientes. Este estudio a pesar de que no es normativo, garantiza que la mezcla a producir sea de buena calidad y de un costo económico. Porrero, Ramos, Grases, y Velazco (2009) ilustra en su libro una tabla en donde se presentan los límites granulométricos para ciertos tamaños máximos de los agregados:

Tabla 1.

Límites granulométricos recomendados para distintos tamaños máximos del agregado. Porcentajes Pasantes.

Cedazo		Tamaños máximos: mm (pulgadas)									
Abertura		88,9	76,2	63,5	50,8	38,1	25,4	19,1	12,7	9,53	6,35
mm	pulg	(31/2)	(3)	(2 1/2)	(2)	(1 1/2)	(1)	(3/4)	(1/2)	(3/8)	(1/4)
88,9	3 1/2	100-90	-	-	-	-	-	-	-	-	-
76,2	3	95-80	100-90	-	-	-	-	-	-	-	-
63,5	2 1/2	92-60	92-70	100-90	-	-	-	-	-	-	-
50,8	2	85-50	87-55	87-65	100-90	-	-	-	-	-	-
38,1	1 1/2	76-40	80-45	80-55	87-73	100-90	-	-	-	-	-
25,4	1	68-33	72-38	73-47	77-59	84-70	100-90	-	-	-	-
19,1	3/4	63-30	68-35	68-43	73-53	77-61	90-70	100-90	-	-	-
12,7	1/2	57-25	62-32	62-37	68-44	70-49	75-55	85-65	100-90	-	-
9,53	3/8	53-25	58-30	60-35	65-40	65-43	68-45	75-55	98-90	100-90	-
6,35	1/4	45-22	48-25	58-30	60-35	60-35	60-35	65-45	65-51	73-61	100-90
4,76	#4	45-22	48-25	50-28	55-30	55-30	55-30	60-38	58-42	62-48	65-52
2,38	#8	40-20	43-20	45-20	45-20	45-20	45-20	45-20	43-37	40-26	38-26
1,19	#16	35-15	35-15	35-15	35-15	35-15	35-15	35-15	31-17	26-14	21-9
0,59	#30	25-10	25-10	25-10	25-10	25-10	25-10	25-10	20-10	13-5	8-2
0,29	#50	16-7	16-7	16-7	16-7	16-7	16-5	16-5	11-5	7-3	5-1
0,14	#100	8-2	8-2	8-2	8-2	8-2	8-1	8-1	6-1	5-1	2-0
Concretos Alta Resistencia											

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 126), por Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2019, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

La tabla anterior muestra los distintos límites granulométricos correspondientes a las zonas granulométricas recomendadas para los agregados (tanto finos como gruesos), indicando los tamaños máximos más frecuentes. La misma se encuentra dividida en dos secciones: la primera sección muestra dos columnas que hacen referencia a los cedazos utilizados para realizar la granulometría; mientras que la sección de la izquierda se muestran los tamaños máximos, en conjunto de los límites máximos y mínimos, de los porcentajes pasantes recomendados para cada tamaño y cedazo.

Relación beta (β). Está referida al valor entero y en porcentaje, que resulte de la división entre el peso del agregado fino y el peso del agregado total en conjunto (la sumatoria de la grava y la arena). Su simbología es la letra griega beta β y se expresa de la siguiente manera: $\beta = 100 \times A / (A + G)$ (%). (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 127).

Datos de entrada.

Para dar inicio a cualquier diseño de mezcla, es necesario disponer de una cantidad de datos suficientes que permitan adaptarse al método deseado y obtener como resultado la dosificación de la mezcla que se desee. En principio de este apartado se mencionaron un conjunto de datos que se deben conocer para la realización del diseño de mezcla presentado por Huanca (2006); sin embargo, cada método escoge los valores necesarios según sus condiciones. Es por ello que para el sistema aplicado en el presente trabajo de grado, se tomaran en cuenta las siguientes condiciones:

Condiciones ambientales de la obra. Aquí se incluyen tanto la ubicación geográfica de la obra, la zona sísmica en la que se encuentra, así como las condiciones ambientales, que darán pie a la selección de requerimientos especiales para que el concreto no se deteriore rápidamente. Aquí se selecciona el valor de la resistencia a la compresión, la relación agua/cemento, la dosis de cemento, entre otros. (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 130).

Tipo de obra. Es de gran importancia conocer qué tipo de obra se desea construir, de manera que se puedan seleccionar correctamente tanto el asentamiento como el tamaño máximo más conveniente. El asentamiento enfocado en obtener el menor valor posible, a fin de reducir la cantidad de agua y a su vez aumentar la resistencia de la obra; mientras que el tamaño máximo teniendo influencia sobre la

dosis de cemento y la resistencia del concreto. (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 131).

Tipo de agregado y tipo de cemento. Se habla de si se desea un material para agregado que sea orgánico o producido de manera industrial; como agregados naturales se presentan los cantos rodados y la arena natural, mientras que para los producidos industrialmente podrían ser la piedra picada y la arena triturada. Para el caso del cemento deberá ser Portland Tipo I, siempre y cuando las condiciones ambientales no sean graves.

Resistencia promedio requerida (F_{cr}). Este elemento es uno de los más importantes a considerar a la hora de elaborar un diseño de mezcla; funciona como una medida de seguridad pues garantiza que se obtenga un valor de resistencia no menor al esperado por el proyectista al momento de realizar la obra. La selección de una correcta F_{cr} , permite que no se vea afectado el factor de seguridad de la estructura.

Tomando en cuenta el planteamiento anterior, se deben estudiar dos opciones para el cálculo de este elemento: Si se es conocida la desviación estándar (en donde se dispone de por lo menos 30 ensayos anteriores) o si no es conocida la desviación estándar (no se dispone de información anterior de la mezcla). Una vez determinado el método por el cual se desea calcular, se harán uso de las siguientes tablas:

Tabla 2.

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando se conoce la desviación estándar de la muestra.

Resistencia Especificada F_c (Kgf/cm²)	Resistencia promedio requerida. F_{cr} (Kgf/cm²)	Valor a Seleccionar.
$F_c \leq 350$	$F_{cr} = F_c + 1,34 \sigma$ $F_{cr} = F_c + 2,34 \sigma - 35 \text{ Kgf/cm}^2$	Se debe seleccionar el mayor valor obtenido entre ambas.
$F_c > 350$	$F_{cr} = F_c + 1,34 \sigma$ $F_{cr} = 0,90 F_c + 2,34 \sigma$	Se debe seleccionar el mayor valor obtenido entre ambas.

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 132), por Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2019, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Tabla 3.

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no se conoce la desviación estándar de la muestra.

Resistencia Especificada a la compresión. F_c (Kgf/cm²)	Resistencia requerida a la compresión. F_{cr} (Kgf/cm²)		
	Control de Calidad Excelente	Control de Calidad Intermedio	Sin Control de Calidad.
Menor de 210	$F_c + 45$	$F_c + 80$	$F_c + 130$
De 210 a 350	$F_c + 60$	$F_c + 95$	$F_c + 170$
Más de 350	$F_c + 75$	$F_c + 110$	$F_c + 210$

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 134), por Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2019, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Ley de Abrams.

Luego de establecer los datos de entrada para la elaboración de la mezcla, y a su vez seleccionado la resistencia que se desea obtener, se debe hacer uso de la Ley de Abrams. Dicha ley está destinada a establecer una relación entre la resistencia esperada por el concreto y la relación agua/cemento de la mezcla; que a su vez permite realizar el cálculo de la cantidad de cemento y de agua que se requieran para la mezcla de concreto. Se simboliza con la letra griega α y su expresión es la siguiente:

$$\alpha = \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} \quad (1)$$

Relación triangular.

Como su nombre indica, esta expresión tiene como finalidad establecer una relación entre la trabajabilidad (T), la relación agua/cemento (α) y la dosis de cemento (c); de manera que se pueda calcular la cantidad necesaria de cemento en peso que se desee utilizar en la mezcla. Estas tres condiciones trabajan en conjunto, al modificar alguna de ellas se modifican los valores de las dos restantes, y por ende la resistencia final. Se traduce en la siguiente fórmula exponencial:

$$C = 117,2 \times T^{0,16} / \alpha^{1,3} \quad (2)$$

Principales propiedades del concreto en estado fresco.

Se habla de concreto en estado fresco cuando el material se encuentra en estado fluido, abarcando el término desde el momento en que se mezclan todos los materiales, hasta que se produce el atiesamiento de la masa. Esta postura en la que se encuentra el concreto en esta etapa, puede ser de gran utilidad, tanto en su manejabilidad como en la indicación de las propiedades que pueda obtener el material

al endurecerse. Algunas de las características que dispone el concreto en estado blando pueden ser:

Trabajabilidad.

Abanto (s.f.) define la trabajabilidad como: “La facilidad que presenta el concreto fresco para ser mezclado, colocado, compactado y acabado sin segregación y exudación durante estas operaciones. No existe prueba alguna hasta el momento que permita cuantificar esta propiedad generalmente se le aprecia en los ensayos de consistencia.” (p. 47).

Consistencia.

Se refiere a la cualidad que posee el concreto en estado blando para deformarse permitiendo ocupar todos los espacios del molde o del encofrado. Este estado está influenciado por distintos factores, siendo la cantidad de agua uno de los más fundamentales, pero que también destaca el tamaño máximo, la forma de los agregados y la granulometría. Para determinar la consistencia del concreto generalmente se emplea el ensayo del Cono de Abrams, obteniendo el valor del asentamiento de la mezcla.

Segregación.

Se conoce como la propiedad del concreto fresco, en donde existe una descomposición del mismo con las partes que lo conforman; es decir, existe una separación entre el agregado grueso y el mortero. La segregación es producida generalmente por una precaria manipulación y colocación en las mezclas, provocando que parte del concreto se mueva más rápido que el concreto adyacente. (Abanto, s.f., p. 50).

Exudación.

Abanto (s.f.) establece la definición de exudación como: “El ascenso de una parte del agua de la mezcla hacia la superficie como consecuencia de la sedimentación de los sólidos. Este fenómeno se presenta momentos después de que el concreto ha sido colocado en el encofrado” (p. 54).

Los factores que producen la exudación son variados, pueden ser provocados por un exceso de agua en la mezcla, así como por la aplicación de aditivos en la misma; incluso la temperatura también juega un papel importante en este caso, pues entre mayor es la temperatura, mayor será la velocidad de exudación.

Retracción.

Porrero, Ramos, Grases, y Velazco (2009) explica la retracción como: “el fenómeno de encogimiento o disminución de volumen que sufre el concreto con el tiempo debido principalmente a la pérdida parcial de agua en las primeras horas y que puede llegar a producir grietas en el material” (p. 51).

Al momento de establecer qué factores producen el fenómeno de retracción, se establece que se ve influenciado por la humedad relativa, la temperatura tanto del concreto como del ambiente, y la proporción de los componentes de la mezcla. Una de las actividades que reducen la retracción a gran escala es la aplicación del curado, además de ejecutar los vaciados en momentos del día en donde la temperatura es baja, tales como a primeras horas de la mañana o en la noche.

Peso Unitario.

Se le conoce generalmente como el porcentaje de un determinado volumen del concreto que es material sólido. Sin embargo, la definición técnica de este elemento

se entiende como la densidad del concreto a la relación del volumen de sólidos al volumen total de una unidad cúbica. (Rivva, 2000, p. 213).

Asentamiento.

Esta característica del concreto blando, también conocida como Slump, se mide a través del ensayo con el Cono de Abrams, y tiene la finalidad de determinar la consistencia del concreto, estableciendo el grado de fluidez de la mezcla y partiendo de qué tan seco o fluido está el concreto. La práctica se puede llevar a cabo utilizando las indicaciones de la Norma COVENIN 339 “Concreto: Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams” o bien mediante los pasos de la Norma ASTM C143.

Una vez realizada la práctica y habiendo obtenido el valor de asentamiento, se compara con la siguiente tabla que contiene la clasificación del concreto en estado fresco según la consistencia obtenida:

Tabla 4.

Clases de mezclas según su asentamiento.

Consistencia	Slump	Trabajabilidad	Método de Compactación.
Seca	0” a 2”	Poco trabajable.	Vibración normal.
Plástica	3” a 4”	Trabajable.	Vibración ligera chuseado.
Fluida	> 5”	Muy trabajable.	Chuseado.

Nota: Adaptado de *Tecnología del concreto*, (p. 49), por F. Abanto, s.f., Lima, Perú.

Derechos reservados por Flavio Abanto.

Elaboración y curado de probetas.

Seguidamente de haber realizado las observaciones pertinentes con respecto a la elaboración del diseño de mezcla y cubierto las bases de las características del concreto en estado fresco, se debe hacer mención a continuación de la elaboración y el curado de las muestras cilíndricas.

La función fundamental de estos elementos es tener un cuerpo compacto de concreto con el cual se puedan realizar distintas prácticas y medir sus características una vez se encuentre en estado endurecido. Las probetas se fabrican con una medida estándar de manera que se puedan seguir con los lineamientos de las normas COVENIN, las cuales indican que se deben implementar moldes metálicos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.

La elaboración de las probetas inicia una vez se tiene la mezcla, con todos sus componentes, en estado blando. Se toman los cilindros previamente descritos y se procede al llenado de los mismos que se realiza en tres capas: en primer lugar se llena el cilindro con un tercio de contenido, compactando propiamente con 25 golpes sin tocar el fondo del molde, generando que se eliminen las burbujas atrapadas y disminuyendo la segregación. Posteriormente se inicia el llenado de la siguiente capa, esta vez ocupando dos tercios del cilindro y se aplican nuevamente 25 golpes sin limitaciones. Finalmente, se vierte el resto del contenido del molde metálico correspondiente a los tres tercios del mismo, compactando de igual manera con los golpes y enrasando para eliminar la mezcla sobrante; de esta manera se llenan las cantidades de moldes deseados.

Las probetas una vez llenadas, deben permanecer en los moldes metálicos por un período aproximado de 24 horas, debido a que las mismas se encuentran aún en un proceso de fraguado, el cual termina al momento de observarse el endurecimiento de la mezcla. Luego de haber transcurrido las 24 horas, se deben

retirar de los moldes y colocar su debida identificación para luego iniciar con el proceso de curado.

El proceso de curado de las probetas es bastante sencillo, las mismas deben ser sumergidas en una especie de estanque en donde se pueda controlar la cantidad de agua que posee, puesto que las muestras deben estar cubiertas por agua en su totalidad, sobrepasando su parte superior. Allí permanecen hasta que se necesiten para sus posteriores estudios. Para el caso del presente trabajo de grado, se realiza el curado de la probetas para los 7 y 28 días de ser sumergidas.

Principales propiedades del concreto endurecido.

Finalizado el tiempo correspondiente del curado de las probetas, las mismas son extraídas y aprovechadas para evaluar las características que posee, aplicándoles una serie de prácticas que permiten determinar las siguientes condiciones del concreto en su estado endurecido:

Resistencia a compresión.

Cuando se habla de resistencia se hace referencia a la capacidad que tiene el concreto de soportar tanto cargas como esfuerzos; se podría decir que es la característica mecánica principal del mismo una vez endurecido, puesto que su comportamiento bajo resistencia a compresión es mucho mejor en comparación con la resistencia a tracción, gracias a la capacidad de la pasta de cemento en adherirse.

La prueba de resistencia a compresión de las probetas se realiza siguiendo los parámetros especificados en la Norma COVENIN 338:02, en donde una vez colocado el espécimen en la máquina de pruebas, se aplica una carga a compresión hasta que el mismo falla; esta carga de falla es registrada y es dividida entre el área transversal del

cilindro, con lo cual se obtiene el esfuerzo unitario último de compresión, expresado en kg/cm^2 (Amoni y Khawam, 2015, p. 27).

Los resultados obtenidos en esta prueba permiten conocer si la mezcla de concreto, elaborada con su respectivo diseño, cumple con los requerimientos de la resistencia especificada (F_c) para una estructura determinada; además, pueden ser utilizadas para medir el control de calidad del producto o la aceptación del concreto.

Durabilidad.

Una de las cualidades por las que se construyen obras a base de concreto es su capacidad de resistir la intemperie, la acción de productos químicos, el desgaste, la abrasión, o cualquier otra condición que deteriore su estructura; es por esto que se hacen ajustes correspondientes al diseño de mezcla, evaluando su durabilidad, para que una vez el concreto está endurecido, pueda soportar dichos escenarios.

Como se hace mención anteriormente, los agentes químicos juegan un papel fundamental en la desintegración y deterioro del concreto; de manera que para evitar el ataque de los mismos, es necesario proteger el concreto con un revestimiento resistente o en su defecto, trabajando con un concreto denso, de alta resistencia, hecho con agregados duros. (Abanto, s.f., p. 58).

Ataques de sulfatos. Algunos de los agentes químicos que más deterioran al concreto son los sulfatos, gracias a que estos se encuentran generalmente en el ambiente, bien sea naturalmente en el suelo en forma de sales o disueltos en el agua que corre por el mismo, como por ejemplo las aguas subterráneas.

Este tipo de ataques evolucionan generalmente en medios acuosos, tomando en cuenta que si el sulfato no se encuentra disuelto en agua, por lo general, no habrá penetración en los poros de concreto. (Pico, 2012, p. 31).

Los ataques sulfáticos son identificables fácilmente por los diferentes rasgos físicos que crean en el concreto, considerándose entonces como una reacción física; sin embargo, los procesos que llevan a cabo estos cambios físicos son de carácter químico, reaccionando los sulfatos acuosos con los componentes que conforman el concreto.

Inicialmente el concreto en su etapa de curado, cumple con la formación normal de etringita, en el momento en donde el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento reacciona con el sulfato de calcio (yeso); a este proceso se le conoce como la formación de etringita primaria. Ahora bien, este proceso de formación de etringita puede continuar si el concreto (una vez finalizado el curado a 28 días) se expone a condiciones de humedad, en donde las soluciones reactivas penetran en los poros del concreto, dando pie a la formación de etringita secundaria.

Cuando se somete el concreto ya curado a una solución de sulfatos (sodio, potasio, calcio, magnesio), se estima que el mismo sufre una degradación por causa de la descalcificación del Silicato de calcio hidratado (C-S-H) contenido en el cemento hidratado. El proceso inicia cuando reaccionan las soluciones de sulfato con el aluminato tricálcico (C_3A hidratado) en el cemento, que al combinarse con el ion de calcio liberado en la hidratación del Clinker, producen una sal hidratada de Sulfoaluminato de Calcio hidratado o mejor conocido como etringita secundaria ($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$). (Malanca, 2003, p. 26).

Una vez formada la etringita secundaria esta busca acomodarse en el interior de la matriz del concreto durante su cristalización, y al no tener espacio para este proceso, se expande de manera no controlada generando grietas donde se deposita el mineral. (Romero, 2012, p. 2).

Se puede esquematizar la reacción de la siguiente manera:

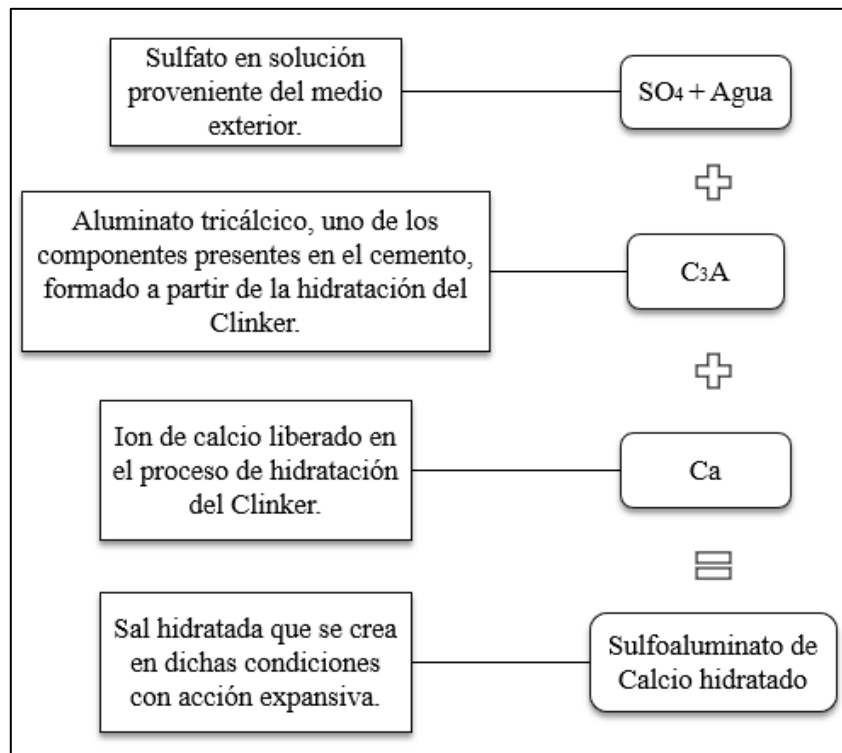


Figura 1. Esquema del ensayo acelerado de ataque por sulfatos al concreto. Adaptado de Propuesta de concreto con Agregado Fino de Escoria de Cubilote como aporte al estudio de la Durabilidad y Propiedades acústicas, (p. 32), por C. Pico, 2012. Derechos reservados por autor.

Tomando en cuenta que los ataques de sulfatos toman años en presentar efectos perjudiciales al concreto, en el presente trabajo de grado se empleó la técnica de ataques acelerados de sulfatos; los cuales se producen a través de ciclos de humedecimiento y secado del concreto, haciendo referencia a zonas donde el agua con sulfatos está presente de manera intermitente, provocando un ataque mucho mayor.

Impermeabilidad.

Apaza, (2018) explica en su trabajo investigativo el concepto de impermeabilidad como:

Propiedad del concreto que tiene la capacidad de impedir el paso del agua a través de él y es muy importante sobre todo en aquellos casos donde hay presencia de agentes agresivos nocivos que puedan afectar al acero de refuerzo y del concreto mismo. (p. 37).

Materiales fundamentales en la mezcla de concreto.

Agregados

También denominados áridos o inertes, son fragmentos o granos, usualmente pétreos, que tienen como finalidades específicas abaratar la mezcla y dotarla de características favorables, entre las cuales se destaca la disminución de la retracción de fraguado o retracción plástica.

Los agregados constituyen la mayor parte de la masa del concreto, ya que alcanzan a representar entre el 70% y el 85% de su peso, razón por la cual las propiedades de los inertes resultan tan importantes para la calidad final de la mezcla.

Las características de los agregados empleados deberán ser aquellas que beneficien el desarrollo de ciertas propiedades en el concreto, entre las cuales destacan: la trabajabilidad, las exigencias del contenido de cemento, la adherencia con la pasta y el desarrollo de resistencias mecánicas. (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 61).

Porrero, Ramos, Grases, y Velazco (2009) explican las funciones principales de los agregados, de las cuales destacan:

- ✓ Proporcionar relleno relativamente económico para el material cementante.
- ✓ Proveer una masa de partículas aptas para resistir la acción de cargas aplicadas, abrasión, paso de humedad, y la acción climática.

- ✓ Reducir los cambios de volumen resultante de los procesos de fraguado y endurecimiento y de los cambios de humedad de la pasta de cemento.

Los agregados dependiendo de su tamaño se clasifican en agregados gruesos y agregados finos, y se medirán a partir del tamiz en el que son retenidos, mediante un estudio granulométrico. La Norma Venezolana COVENIN 255 y 277, y la Norma ASTM C136, exponen los límites de granulometría para diferenciar los agregados.

Agregado Grueso. Se trata de aquella roca que ha pasado por su debido proceso de trituración y es retenida en el tamiz #4 (4,76mm). Cuando el agregado grueso es triturado, presenta un aumento significativo en su resistencia en comparación con el agregado natural; esto gracias a que sus características de adherencia son más óptimas.

Agregado Fino. Se considera agregado fino a aquel material que pasa por el tamiz #4 (4,76 mm) y además es retenido por el tamiz #200 (75 μm). La cantidad de agregado fino en la mezcla debe ser pequeña, de manera que se permita el flujo libre de la mezcla de agua y cemento entre las partículas de agregado (Parker, 2008, p. 31).

Granulometría. Porrero, Ramos, Grases, y Velazco (2009) la define como: “Es la composición del material en cuanto a la distribución del tamaño de los granos que lo integran. Esta característica decide, de manera muy importante, la calidad del material para su uso como componente del concreto” (p. 63).

Cemento

El cemento portland es uno de los elementos más utilizados en las construcciones de edificios y es el componente activo del concreto, determinando las características del mismo a pesar de que solo constituye de un 10% a un 20% del peso total del concreto.

Este elemento es obtenido a partir de materias primas abundantes en la naturaleza. Su elaboración se realiza en plantas industriales de gran capacidad, en donde debe ser controlado estrictamente, lo que redundará en su calidad y en la confiabilidad que sobre él pueda tener el usuario (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 91).

La elaboración del cemento es bastante simple si se disponen de las herramientas y los materiales correctos. Una vez la materia prima es molida y mezcladas entre sí, son llevadas a un horno giratorio para fundirlas, convirtiendo el resultado en el material conocido como Clinker. El Clinker es característico por su forma de pequeñas esferas que generalmente son duras, de color gris oscuro y de diferentes tamaños.

Luego de dejar enfriar el producto mencionado anteriormente, se muele hasta obtener un polvo muy fino, no sin antes agregar una pequeña cantidad de yeso para regular su proceso de fraguado; convirtiéndose en el cemento portland comercial. (Abanto, s.f., p. 15).

Es importante hacer mención que la combinación de los compuestos que se emplean para la elaboración del cemento, no permite establecer una fórmula química específica; sin embargo, si se pueden enlistar los cuatro componentes fundamentales del cemento, que ocupan más del 90% de su peso total:

Tabla 5.

Compuestos químicos que conforman al cemento portland y su comportamiento.

	Abreviación	Comportamiento.
Silicato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).	C_3S	Encargado de producir la alta resistencia inicial del cemento portland hidratado. La rapidez de endurecimiento de la pasta es directamente proporcional con el calor de hidratación.
Silicato dicálcico ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$).	C_2S	Es el causante principal de la resistencia posterior de la pasta de cemento.
Aluminato tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$).	C_3A	Una vez combinado con el yeso añadido al cemento, controla el tiempo de fraguado del mismo.
Alumino ferrita tricálcica ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$).	C_4AF	Es similar al componente anterior, gracias a que se hidrata con rapidez y sólo desarrolla baja resistencia.

Nota: Adaptado de *Tecnología del concreto*, (p. 16), por F. Abanto, s.f., Lima, Perú.

Derechos reservados por Flavio Abanto.

Así es como al variar cada uno de estos componentes, se obtienen diferentes tipos de cementos; los cuales se emplean en distintos tipos de obras y dependerán de las características que requieran las mismas.

Cemento Portland Tipo I. Se utiliza particularmente en obras de concreto general, siempre y cuando no se especifique cualquiera de los otros 4 tipos. Pueden

aplicarse en concreto armado general, estructuras que necesiten rápido encofrado, productos prefabricados, concretos para climas fríos. (Abanto, s.f., p. 17).

Cemento Portland Tipo II. Se emplea en obras de concreto general y en obras que se encuentran expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se deba moderar el calor de hidratación. (Abanto, s.f., p. 17).

Cemento Portland Tipo III. Este tipo de cemento posee una alta resistencia inicial en comparación con los dos anteriores, pues desarrolla en tres días la misma resistencia que a los 28 días en los otros casos. (Abanto, s.f., p. 17).

Cemento Portland Tipo IV. Se caracteriza por necesitar menor o bajo calor de hidratación y son utilizados generalmente en construcciones que requieran baja resistencia inicial. (Abanto, s.f., p. 17).

Cemento Portland Tipo V. Se caracteriza por poseer una alta resistencia a la reacción provocada por sulfatos. Dentro de las estructuras en la que se emplea este tipo de concreto se encuentran las hidráulicas expuestas a aguas con alto contenido de álcalis, así como las estructuras expuestas al mar. (Abanto, s.f., p. 17).

Agua

Para el caso del agua destinada a la fabricación de concreto, debe cumplir con ciertos requisitos para garantizar una óptima mezcla. Según Parker (2008) explica que: “Debe estar suficientemente limpia, libre de aceite, materia orgánica y sustancias que puedan afectar las acciones de endurecimiento, curado o la calidad general del acabado de concreto.” (p. 31). Particularmente el agua potable es la indicada para la inclusión al concreto, pero también es posible utilizar otro tipo de agua, todo dependerá del resultado que se quiera obtener y el uso que se le dará al concreto.

Plásticos.

El término plástico está referido a todo aquel material que se encuentra elaborado con compuestos orgánicos o sintéticos, capaces de cambiar su forma sin romperse, y que además, pueden ser moldeados nuevamente en objetos sólidos de diferentes formas.

Según Bolaños (2019):

La definición se aplica a todas las sustancias de diferentes naturalezas como también diferentes estructuras que presentan una ausencia de un punto fijo de ebullición y mientras que se realiza el cambio de temperaturas, adquieren propiedades físicas tales como flexibilidad y también elasticidad las cuales permiten realizar un modelado y también adaptarlas a diferentes formas y aplicaciones. (p. 13)

Características del plástico.

Este tipo de material dispone de una gran cantidad de características que lo diferencia de los demás, siendo la más fundamental su relación directa resistencia – calidad. Otra de sus cualidades es su excelente poder como aislante térmico y eléctrico, además de ser resistente a disolventes, ácidos, entre otros materiales corrosivos.

Bolaños (2019) explica: “Su composición de moléculas enormes permite que sean de forma lineal, entrelazadas o en forma de ramificación, todo depende del tipo de plástico.” (p. 14). Agregando de esta manera que, según el tipo de plástico, las moléculas permitirán que los mismos tomen una contextura suave o dura con el calor.

Tipos de plásticos.

La clasificación de los plásticos es bastante variada, y dependerá del contexto en los que se visualicen. Los mismos pueden distribuirse de la siguiente manera:

Según sus moléculas. Se toma en cuenta el monómero con el que inicia la producción del polímero, obteniendo entonces plásticos naturales o sintéticos.

Según su comportamiento al calor. En donde se establece si se trata de un termoplástico, capaz de ablandarse cuando son expuestos a altas temperaturas pero se endurecen al enfriarse, tales como los polietilenos; o bien los termoestables, quienes se endurecen mediante el proceso de fraguado, y no son capaces de ser fundidos ni moldeados nuevamente, tales como los polímeros, resinas epoxi.

Según la reacción de síntesis. Se dividen considerando la reacción producida por el polímero, destacando: Polímeros de adición, Polímeros de condensación, Polímeros formados por etapas.

Según su estructura molecular. Entrando en esta categoría los plásticos Amorfos, Semicristalinos, Cristalizables, Comodites y de ingeniería.

Polietileno tereftalato (PET)

Es un tipo de material perteneciente al grupo de los termoplásticos, específicamente de los polímeros, y se caracteriza por tener una gran tenacidad y excelente resistencia a la fatiga, al igual que al desgarramiento. Además, tiene un excelente comportamiento ante presencia de humedad, ácidos, grasas, aceites y disolventes (Acevedo y Posada, 2017, p. 47).

Estas propiedades físicas permitieron su utilización en diferentes áreas donde destaca el envasado de alimentos y bebidas, aunque primeramente eran solo utilizados por las empresas de fabricación de textiles. Las botellas de PET se pueden identificar por un símbolo de triángulo formado por flechas con el número 1 en su interior, normalmente acompañado de las siglas “PET”. Es importante mencionar que gracias a que pertenece a la familia de los termoplásticos, su moldeado es fácil cuando está caliente, pudiendo ser utilizado en una gran cantidad de ocasiones (Fernández, 2015, p. 15).



Figura 2. Símbolo del Polietileno tereftalato (PET). Tomado de *Reciclado de Plástico PET*, (p.17), por J. Bolaños, 2019. Derechos reservados por Juan José Bolaños.

Proceso de producción del PET.

Una vez es extraída la materia a través de la refinación del petróleo, se elabora una mezcla entre etilenglicol, el cual es un compuesto orgánico inodoro e incoloro, con ácido tereftálico; este último es llevado a través de proceso de polimerización, extrusión y pelletizado, transformando el PET en un PET Amorfo, que a su vez sufre un proceso de cristalización, polimerización en fase sólida, generando en esta etapa PET Cristalizado o resina.

La resina de PET se lleva a un horno donde se funde en moldes creando la figura similar a la de un tubo de ensayo de manera que pueda tomar cualquier forma o grosor. Por otro lado, la apertura del cuello de la botella ya se encuentra en su forma final y se le coloca su tapa correspondiente al finalizar el proceso de fabricación. Este producto del PET con forma de tubo de ensayo se denomina preforma y es obtenido mediante un proceso de alta velocidad denominado moldeado de inyección.

A continuación, cada una de las preformas se llevan a hornos con altas temperaturas, haciendo que las mismas se ablanden y se vuelvan elásticas, permitiendo su estiramiento y soplado, de manera que se adapte al molde requerido. Una vez terminado el proceso de soplado, se hace enfriar el PET a fin de que el mismo mantenga la nueva forma.

A través del siguiente diagrama de flujo es posible ejemplificar el procedimiento de producción del PET:

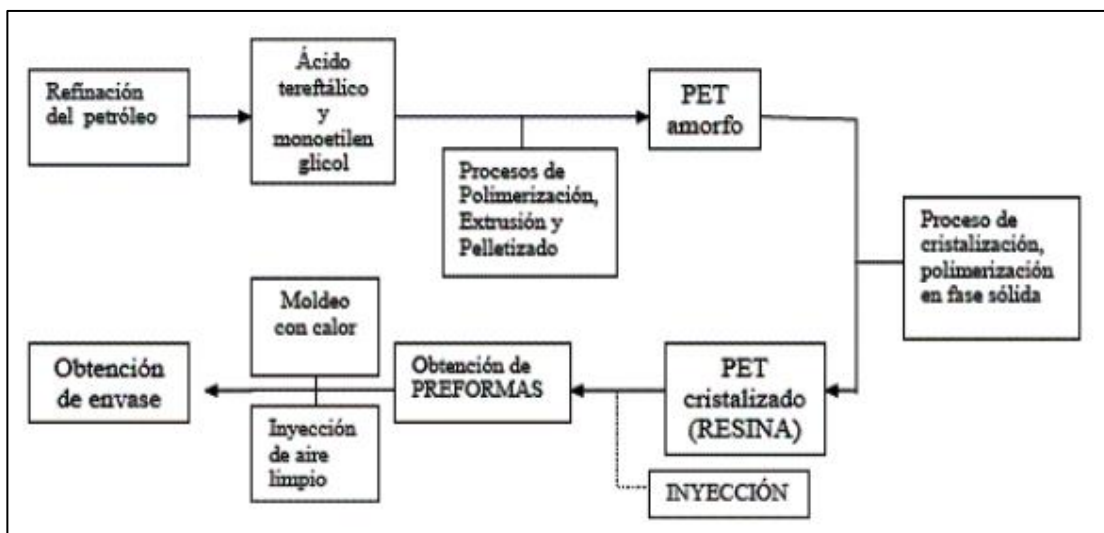


Figura 3. Diagrama de Flujo del proceso de producción del Polietileno tereftalato (PET). Tomado de *Reciclado de Plástico PET*, (p. 19), por J. Bolaños, 2019. Derechos reservados por Juan José Bolaños.

Tipos de reciclaje del PET.

Una vez los envases PET han cumplido su vida útil, existen dos procesos que permiten la reutilización de los mismos de la siguiente manera:

Reciclaje mecánico. Consiste en la trituración, segregación y desinfección de los envases, obteniendo mediante estos procesos un producto conocido como escamas (flakes) y se pueden utilizar directamente en productos de inyección o extrusión sin necesidad de aplicar un procedimiento previo. (Bolaños, 2019, p. 24).

Reciclaje químico. Este tipo de reciclaje del PET es considerado un proceso complementario al mecánico, gracias a que con él es posible resolver las limitaciones que este último presente. Consiste en descomponer el polímero para obtener la materia prima conocida como monómeros, para luego iniciar nuevamente el proceso de polimerización y obtener nuevos materiales poliméricos. (Bolaños, 2019, p. 31).

Usos y aplicaciones del PET en la ingeniería Civil.

Asfalto. Incluir contenido de PET reciclado en las mezclas de asfaltos, dotan a las mismas de diferentes características positivas, permitiendo que este material sea utilizado como modificador en sustitución de polímeros existentes en el mercado y además permita la disminución del impacto ambiental. Sin embargo, es importante tomar en cuenta la dosificación exacta de aplicación de este material, pues la mezcla pudiese verse afectada si no se regula el porcentaje a utilizar.

En las prácticas de leyes de fatiga del asfalto, realizadas por Herrera y Valencia, (2021), obtuvieron como resultado: “El asfalto modificado con PET tiene una confiabilidad y resistencia al desgaste y la fatiga de un 97% en promedio” (p. 30); observándose que la vida asfáltica de las mezclas de asfalto modificadas con PET aumentó significativamente en un promedio de 220%.

Concreto. Diversos estudios confirman que el incluir PET en las mezclas de concreto, benefician en algunas oportunidades a la misma; dotándola de características que por sí solo no posee. Saikia y Brito, (2012), establecieron en su trabajo investigativo que:

“La incorporación de PET puede mejorar significativamente algunas propiedades del concreto debido a que el plástico tiene alta dureza, buen comportamiento de abrasión, baja conductividad térmica y alta capacidad de calor” (p. 1)

Bases legales

En este apartado se establecen las diferentes normativas que dan sustento legal a todas las prácticas realizadas a lo largo del presente trabajo de grado y además, validan y certifican los resultados obtenidos mediante los ensayos. En esta investigación se hizo uso de las Normas Venezolanas COVENIN, las cuales están elaboradas siguiendo estudios previos realizados al concreto convencional y los componentes del mismo. A continuación se listan las normas utilizadas:

COVENIN 28:1993. Cemento Portland. Especificaciones. (5ta revisión).

COVENIN 255:1998. Agregados. Determinación de la composición granulométrica. (1ra revisión).

COVENIN 263:1978. Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado.

COVENIN 266:1977. Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos de menores de 38,1 mm (1 ½”) por medio de la máquina de Los Ángeles.

COVENIN 268:1998. Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción.

COVENIN 269:1998. Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción.

COVENIN 277:2021. Concreto. Agregados. Requisitos (4ra revisión).

COVENIN 338:2002. Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto. (2da revisión).

COVENIN 339:2003. Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams. (2da revisión).

COVENIN 487:1993. Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad. (3era Revisión).

COVENIN 493:1992. Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat. (3ra revisión).

COVENIN 494:1994. Cemento portland. Determinación de la consistencia normal. (2da revisión).

COVENIN 1375:1979. Método de ensayo para determinar por secado, el contenido de humedad total y superficial en el agregado.

FONDONORMA 1753:2006. Proyecto y construcción de obras en concreto estructural. (1ra revisión).

American Concrete Institute. Committee 211. (1977-2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91).

ASTM C1012-04. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution.

FONDONORMA 4015:2012. Concreto. Durabilidad.

Terminología básica

Concreto: Material compuesto por agregado grueso, fino, cemento, agua y aditivo que se utiliza con fines estructurales y constituyó como una solución para la construcción económica y rápida de estructuras de envergadura (Hernández y Gil, 2007, p. 45).

Cemento: Componente activo del concreto que influye en todas las características de este y constituye aproximadamente un 10% a un 20% del peso del concreto (González y Robles, 2005).

Cemento Portland: Especie de cal hidráulica perfeccionada. Producto obtenido de la trituración del Clinker (Sánchez, 2009).

Durabilidad: Habilidad del concreto para resistir la acción continua de agentes destructivos ambientales, ataques químicos, abrasión y otras condiciones de servicio. (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 452).

Módulo de finura: Es un número que indica el cedazo teórico a través del cual pasa el 50% del material. (COVENIN 273:1998 1era Revisión).

Resistencia del concreto a la compresión: Resistencia a la compresión del concreto F_c usada en el diseño estructural. También llamada resistencia de diseño (Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, p. 458).

Mezcla: Sistema heterogéneo, constituido por varias fases, cada una de ellas homogéneas (cemento, agua, aditivo, arena) y limitadas por una superficie de reparación físicamente definida (García 2004).

Tamaño máximo nominal: Es la abertura de la malla menor a través del cual puede pasar como mínimo el 95% de la muestra de agregados (COVENIN 273:1998 1era Revisión).

Relación agua/cemento: Cociente entre el peso del contenido de agua libre de mezclado y el de cemento de una mezcla dada. (Hernández, 2007, p. 57).

Trabajabilidad: Propiedad del concreto que indica la facilidad de manejo y colocación del concreto. Está ligado directamente con el asentamiento. (Hernández y Gil 2007).

Etringita: Es el nombre de un mineral natural capaz de generar expansión excesiva, agrietamiento e incluso la completa desintegración del concreto cuando este se encuentra sometido a un ataque intensivo de sulfatos. (¿Qué es etringita?, s.f., párr. 2)

Capítulo III

Marco Metodológico

Tipo de investigación

Al momento de llevar a cabo un estudio científico, es recomendable establecer la metodología que se requiere aplicar para el desarrollo del mismo, de manera que no se presenten equivocaciones bien sea en la obtención de resultados o en la realización de algún procedimiento de esta índole. Es así como, considerando lo mencionado anteriormente y teniendo presente los objetivos expuestos a lo largo de este trabajo de grado, se decide adoptar el método de investigación exploratoria.

Hernández (2006) describe la esencia de la investigación exploratoria como “Examinar un tema o problema de investigación poco estudiado del cual se tienen muchas dudas o se ha abordado antes. Es decir, cuando existen solo ideas vagamente relacionadas con el tema” (p. 100). En otras palabras, a través de esta metodología se busca generar mayor contenido con respecto a un tema del cual surgieron algunas inquietudes, o bien del que se desee evaluar desde un punto de vista diferente.

Habiendo mencionado esto, a través del desarrollo de este trabajo de grado se evalúan las propiedades mecánicas del concreto, elaborando diseños de mezcla con sustitución parcial de agregado grueso por PET en diferentes proporciones; para ello, se realiza el estudio primeramente con una mezcla patrón y se determina la

durabilidad de las mismas, fabricando probetas las cuales son expuestas a ambientes agresivos.

Diseño de investigación

Siguiendo lo expuesto por Hernández, Fernández y Baptista (2014) con respecto al diseño de investigación, se entiende como “Plan o estrategia que se desarrolla para obtener la información que se requiere en una investigación” (p. 128), haciendo referencia entonces a que seleccionar correctamente la estrategia de investigación permite dar respuesta a las preguntas planteadas en la misma.

Tomando en cuenta las distintas incógnitas planteadas para dar inicio a este trabajo de grado, se selecciona entonces que el diseño de investigación propio debe ser de tipo experimental; el cual, según Palella y Martins (2010) lo definen como:

Aquel según el cual el investigador manipula una variable experimental no comprobada, bajo condiciones estrictamente controladas. Su objetivo es describir de qué modo y porque causa se produce o puede producirse un fenómeno. Busca predecir el futuro, elaborar pronósticos que una vez confirmados, se convierten en leyes y generalizaciones tendentes a incrementar el cúmulo de conocimientos pedagógicos y el mejoramiento de la acción educativa. (p. 86).

De esta manera, para llevar a cabo la investigación, se elaboran diseños de mezclas en los cuales se miden las cantidades de material de Polietileno Tereftalato (PET) reciclado a sustituir, con el fin de conocer el comportamiento del concreto implementando diferentes proporciones del agregado grueso y generando una base de datos para su posterior análisis.

Sistema de variables

Tabla 6.

Sistema de variables.

Objetivo general: Evaluar la durabilidad de mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato, expuestos a ambientes agresivos.					
Objetivos Específicos	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento
Evaluar las propiedades de los materiales que formarán la mezcla de concreto mediante la realización de ensayos físicos enmarcados en las Normas venezolanas COVENIN.	Materiales convencionales para concreto y Plástico reciclado Polietileno Tereftalato (PET).	Elaboración de pruebas de laboratorio evaluados como agregado grueso convencional.	- Peso Unitario Suelto - Peso unitario Compacto - Densidad Aparente - Densidad Aparente SSS - Densidad Nominal - Absorción	Análisis de contenido.	Normas COVENIN, ficha técnica y registro fotográfico.
Elaborar diseños de mezcla de concreto con sustitución del 10% y 15% del agregado grueso por material reciclado de Polietileno Tereftalato (PET).	Diseños de mezcla de concreto.	Elaboración de tres diseños de mezclas.	- Diseño Patrón. - Diseño con 10% de Polietileno tereftalato (PET). - Diseño con 15% de Polietileno tereftalato (PET).	Análisis de contenido.	Normas COVENIN.
Determinar la resistencia a compresión del concreto basados en la Norma COVENIN 338:2002.	Probetas de concreto endurecido.	Ensayos a compresión de Probetas cilíndricas.	- Resistencia a compresión. - Carga soportada. - Modo de falla.	Análisis de contenido.	Normas COVENIN, ficha técnica y registro fotográfico.
Determinar la durabilidad del concreto mediante ensayos en probetas, frente a agentes agresivos identificado como sulfato de sodio anhídrido.	Probetas de concreto endurecido.	Ensayos de durabilidad a Probetas cilíndricas.	- Ataque de Sulfatos. - Diferencia de masa. - Aspecto físico post ensayo. - Resistencia a compresión. - Modo de falla.	Análisis de contenido.	Normas FONDONORMA, ficha técnica y registro fotográfico.

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Técnicas e instrumentos de recolección de información

El paso siguiente a la selección del tipo de investigación y el diseño de la misma, es el de establecer las técnicas e instrumentos a utilizar para recolectar la información necesaria que dan respuestas a los objetivos expuestos en este trabajo de grado. Siguiendo las palabras de Arias (2012) sobre las técnicas de investigación se tiene que es “el procedimiento o forma particular de obtener datos o información” (p. 67), y además agrega que un instrumento es “cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información” (p. 68).

Con referencia a lo anterior, el presente trabajo de investigación se realiza mayormente en campo, haciendo uso fundamentalmente de fichas técnicas y observación directa como instrumento, con ayuda de notas de campo permitiendo crear una base de datos y manteniendo la información de manera ordenada; así como también el uso de registros fotográficos para la elaboración de guías fotográficas. Del mismo modo, se aplica como técnica el análisis de contenido, ampliando el estudio de diferentes investigaciones con el presente.

Procedimiento

Para llevar a cabo este trabajo de investigación, se dividió su estudio en diferentes etapas (cada una con sus actividades características) las cuales ayudaron a desarrollar de manera más eficiente cada uno de los objetivos específicos planteados, como se presenta a continuación:

Primera Etapa

Un paso esencial en este tipo de trabajo de grado es la recolección de información, con ella se pueden identificar los distintos aspectos y las características que presenta la problemática seleccionada, a fin de conocer de primera mano con que se dispone.

Es así como lo primero que se realizó fue la consulta por distintos medios de cómo es el proceso de reciclaje en Ciudad Guayana y cuáles empresas son las encargadas de la recolección de residuos poliméricos PET, además de cuáles están capacitadas para la trituración del mismo, a fin de conocer si se disponía de la materia prima principal de nuestros ensayos en la ciudad.

Mediante este proceso de investigación se localizó una empresa ubicada en Puerto Ordaz, específicamente en la zona industrial Matanzas sur (UD 321), que tiene por nombre Industrias Santos Duque. Esta compañía se especializa en la venta de productos de plástico, destacándose por la producción de tuberías de aguas blancas y residuales, tuberías para electricidad, como de mangueras para riego.

A través de un recorrido por las instalaciones del lugar, fue posible observar las distintas etapas por las que pasan los varios tipos de plásticos que allí se encuentran, hasta alcanzar el producto final. Primeramente los trabajadores de la empresa proceden a realizar una inspección directa de los materiales reciclados que reciben, a manera de retirar cualquier otro tipo de componente que no sea plástico (etiquetas, grapas, entre otros) y clasificarlos según su tipo; seguidamente comienza el proceso de trituración del material en cada una de sus máquinas correspondientes, también divididas según el tipo de plástico, obteniendo un producto que es transportado a un molino para adquirir partículas de menor tamaño.

Continuando con el proceso, la materia prima obtenida es llevada a una máquina precalendadora y es donde se prepara la mezcla con las que se fabrican las piezas de plásticos finales. Del mismo modo, dicha mezcla es filtrada retirando impurezas y se le da forma al material, quedando solamente el proceso de embalaje y almacenado para la posterior venta.

Otro factor importante del que se necesitó conocer fueron las características generales de los materiales que contienen Polietileno Tereftalato (PET) con la finalidad de entender el comportamiento del mismo en las diferentes etapas de su reciclaje y cuáles productos serían los más óptimos en la realización de nuestras pruebas.



Figura 4. Máquina utilizada para la elaboración de tuberías ubicada en la empresa Industrias Santos Duque, C.A. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Segunda Etapa

Esta segunda etapa abarca una de las partes fundamentales en la investigación, en donde se evaluaron las propiedades de cada uno de los materiales que estarán involucrados en la mezcla de concreto; esto con la finalidad de conocer las características de cada uno de ellos según se indica en el primer objetivo específico, mediante la utilización de las Normas venezolanas COVENIN correspondientes a cada caso. A continuación, se presentan cada una de las propiedades evaluadas:

Ensayo peso unitario

Una de las características principales al momento de realizar el diseño de mezcla, fue conocer la densidad de cada uno de los materiales que integran la misma. A través del ensayo de peso unitario se logró determinar la densidad de los agregados, tanto agregados gruesos como agregados finos, partiendo entonces de la Norma Venezolana COVENIN 263-78 titulada “Método de ensayo para la determinación del peso unitario del agregado”. Para llevar a cabo dicha prueba, se hicieron uso de los siguientes materiales de laboratorio:

- ✓ Balanza.
- ✓ Barra Compactadora.
- ✓ Recipiente Cilíndrico.

Para el caso del proceso experimental se realizaron los siguientes pasos:

1. Calibración del recipiente.
 - a. Se midió el peso de los recipientes a ensayar.
 - b. Cada uno de los recipientes se llenó de agua hasta el tope, colocando una lámina de vidrio para eliminar el exceso de burbujas, para luego tomar su peso correspondiente.
 - c. Se midió la temperatura del agua, ubicando mediante tablas el peso unitario de la misma.
 - d. Se realizó la sustracción del peso de la lámina de vidrio y el recipiente ensayado, obteniendo como resultado el peso neto del agua.
 - e. Acto seguido, se aplicó la relación entre el peso unitario del agua y el peso neto del agua, a fin de obtener el factor de calibración.

2. Determinación del peso compactado.

Se tomó primeramente una muestra de agregado vertiéndolo en el recipiente ensayado anteriormente, tomando en cuenta que cada $1/3$ del recipiente se debe compactar con la barra compactadora, golpeando 25 veces de manera uniforme sobre la superficie de la capa; repitiendo hasta que se llene completamente. Se realizó la medición del peso del recipiente con el agregado.

Se aplicó luego la ecuación para el cálculo del peso unitario, multiplicando el peso calculado anteriormente por el factor de calibración correspondiente.

3. Determinación del peso suelto.

En este mismo orden, para el caso del peso suelto se vertió el agregado en el recipiente de ensayo hasta que el mismo se llenó completamente, enrasando el tope con la barra compactadora. Se realizó la medición del peso del recipiente con el agregado.

Se aplicó luego la ecuación para el cálculo del peso unitario, multiplicando el peso calculado anteriormente por el factor de calibración correspondiente.



Figura 5. Golpes con barra compactadora para medición de agregado fino compactado. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de densidad y absorción.

A través de este ensayo se determinó el peso específico o densidad de cada uno de los agregados, partiendo de la Norma Venezolana COVENIN 268-98 para la “Determinación de la densidad y absorción para agregados finos” y la Norma Venezolana COVENIN 269-98 para la “Determinación de la densidad y absorción para agregados gruesos”. Los cálculos fueron realizados en procesos separados ya que los agregados al poseer características diferentes, tendrán entonces densidades y absorciones distintas. El proceso experimental se plantea de la siguiente forma:

Densidad de los agregados gruesos. Se emplearon materiales como la balanza, recipiente para la muestra, tanque, cedazos, horno de secado, cesta de alambre y su procedimiento consistió en los siguiente:

1. Se hizo pasar la muestra de agregado grueso por el tamiz #4, rechazando cualquier material que pase a través de él.

2. Se sumergió la misma en un recipiente con agua para el lavado de sus impurezas, y se dejó secar al horno por 24 horas. Se sacó del horno y una vez enfriado se sumergió nuevamente en agua con temperatura ambiente por 24 horas saturando la muestra.
3. Luego de las 24 horas sumergidas, se extrajeron del agua y se secaron con un paño eliminando la película de agua visible, generando la condición de saturado con superficie seca.
4. Se tomó la cesta de alambre y se midió su peso individualmente, colocando posteriormente el agregado grueso en la misma y midiendo nuevamente el peso. Se obtuvo la masa del agregado grueso en condición saturado con superficie seca.
5. A continuación, se sumergió la cesta en agua con el agregado grueso en condición saturada con superficie seca, a una profundidad que permita cubrir la misma y por medio de una balanza hidrostática se determinó su peso.
6. Se realizó el secado de la muestra en horno con temperatura no mayor a 110°C y no menor a 100°C para obtener una masa constante. Una vez enfriada, se determinó su masa.
7. Por último, con todos los datos obtenidos anteriormente, se realizaron los cálculos correspondientes:

- Cálculo de densidad aparente:

$$\rho_A = \frac{d \times M_1}{M_2 - M_3} \quad (3)$$

Donde: ρ_A es la densidad aparente en g/ml, d es la densidad del agua (aproximada a 1 g/ml), M_1 es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gramos, M_2 es la masa en el aire de la muestra saturada de superficie seca (SSS) en gramos y M_3 es la masa en el agua de la muestra de ensayo saturada en gramos.

- Cálculo de la densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca (SSS):

$$\rho_{ASSS} = \frac{d \times M_2}{M_2 - M_3} \quad (4)$$

Donde: ρ_{ASS} es la densidad aparente en g/ml, d es la densidad del agua (aproximada a 1 g/ml), M_2 es la masa en el aire de la muestra saturada de superficie seca (SSS) en gramos y M_3 es la masa en el agua de la muestra saturada en gramos.

- Cálculo de la densidad nominal:

$$\rho_N = \frac{d \times M_1}{M_1 - M_3} \quad (5)$$

Donde: ρ_N es la densidad nominal en g/ml, d es la densidad del agua (aproximada a 1 g/ml), M_1 es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gramos y M_3 es la masa en el agua de la muestra de ensayo saturada en gramos.

- Cálculo del porcentaje de absorción:

$$A = \frac{M_2 - M_1}{M_1} * 100 \quad (6)$$

Donde: A es la absorción expresada en porcentaje, M_1 es la masa en el aire de la muestra de ensayo secada al horno en gramos y M_2 es la masa en el aire de la muestra saturada de superficie seca (SSS) en gramos.

Densidad de los agregados finos. Se emplearon materiales como la Balanza, picnómetro, molde metálico, compactador, horno de secado. Para llevar a cabo este ensayo, primeramente se realizó la preparación de la muestra tal y como se indica a continuación:

1. Se tomó aproximadamente 1000 gramos de agregado fino como muestra, aplicando el método de cuarteo descrito en la Norma COVENIN 270:1998, para luego introducir la muestra en el horno para su secado a una temperatura de 110°C hasta que se contó con un peso constante. Se dejó enfriar la muestra y se introdujo en agua a temperatura ambiente por 24 horas.
2. Transcurridas las 24 horas, la muestra se extendió en una bandeja plana metálica (evitando su absorción) exponiendo la misma a una corriente suave de aire, revolviéndola para conseguir un secado uniforme. Este proceso mencionado anteriormente, se repitió hasta que se adquirió una condición de flujo libre entre partículas, indicador de una condición saturada y de superficie seca de la muestra; midiéndose este último a través del ensayo de cono a intervalos descrito en los pasos siguientes.
3. Haciendo uso del cono, se colocó el mismo en una superficie plana que no sea absorbente; sosteniendo firmemente se añadió el agregado fino parcialmente seco dentro del mismo hasta que se presente un rebose del material sobre el borde superior del cono, enrasando con ayuda de la barra compactadora. A continuación, se compactó la muestra, mediante el uso del compactador apisonando suavemente la misma con 25 caídas del instrumento desde una altura de 5 mm sobre la parte superior del cono.

4. Acto seguido, se alisó la superficie y se removió el agregado sobrante, para luego levantar el cono sin girarlo en un movimiento vertical hacia arriba. Se tomó en consideración la forma en la que se encuentra el agregado al levantar el instrumento: si este permanece en su misma forma, es posible que se deba a que todavía el material presenta humedad superficial entre partículas; en este caso, se debe repetir los pasos anteriormente mencionados hasta que al retirar el instrumento, el material se derrumbe ligeramente, dando a entender que se presenta la condición deseada de saturada y con superficie seca.

Una vez conseguida la condición deseada del agregado fino, se continuó con el procedimiento para el cálculo de la densidad:

5. Utilizando el picnómetro, se llenó parcialmente con agua agregando además una muestra del material a ensayar en condición saturada con superficie seca (aproximadamente 500 gramos). Continuando, se agregó agua de forma gradual en un 50%, luego en un 75%, para completar luego la capacidad del instrumento en un 100% agitando constantemente para eliminar las burbujas de aire.
6. Se llevó el picnómetro a la balanza para determinar la masa total del mismo con el agregado fino y el agua.
7. El agregado fino se retiró del picnómetro y se colocó en una bandeja para su secado en horno con temperatura entre 100°C y 110°C hasta que su masa fue constante, y se dejó enfriar a temperatura ambiente por 30 min para su posterior pesaje.
8. Por último, se llenó el picnómetro de agua hasta su capacidad de calibración y se llevó a la balanza para su posterior medición de masa.

9. Una vez obtenidos los datos ofrecidos por los pasos anteriores, se elaboraron los cálculos correspondientes.

- Cálculo de la masa total del picnómetro con muestra y agua:

$$M_{asap} = d \times V_a + M + M_o \quad (7)$$

Donde: **d** es la densidad aproximada a 1 g/ml, **V_a** es el volumen de agua añadido, **M** es la masa de muestra SSS y **M_o** es la masa del picnómetro vacío.

- Cálculo de la densidad aparente:

$$\rho_a = \frac{d \times M_1}{M_a + M - M_p} \quad (8)$$

Donde: **M₁** es la masa de la muestra secada al horno, **ρ_a** es la densidad aparente en g/ml.

- Cálculo de la densidad aparente de muestra saturada y de superficie seca SSS:

$$\rho_s = \frac{d \times M}{M_a + M - M_p} \quad (9)$$

Donde: **ρ_s** es la densidad aparente con base en muestra saturada y de superficie seca en g/ml.

- Cálculo de la densidad nominal:

$$\rho_N = \frac{d \times M_1}{M_a + M_1 - M_p} \quad (10)$$

Donde: ρ es la densidad nominal en g/ml.

- Cálculo del porcentaje de absorción:

$$A = \frac{M - M_1}{M_1} * 100 \quad (11)$$

Donde: A es la absorción en g/ml.



Figura 6. Elaboración del ensayo de absorción en agregado fino y agregado grueso, procedimiento para obtener muestra saturada con superficie seca. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de humedad de los agregados.

Existe una cualidad importante a tomar en cuenta en los agregados, y es que los mismos están constituidos por poros que generalmente absorben agua cuando se encuentran en la intemperie; de esta manera los mismos disponen de un cierto grado de humedad que debe conocerse antes de realizar los diseños de mezclas para la elaboración de concreto.

Aplicando la Norma Venezolana COVENIN 1375:1979 que lleva por nombre “Método de ensayo para determinar por secado, el contenido de humedad total y

superficial en el agregado”, fue posible determinar cuanta cantidad de humedad se encuentra dentro del agregado y los materiales a utilizar corresponden a los siguientes:

- ✓ Balanza.
- ✓ Horno.
- ✓ Envase para la muestra.
- ✓ Agitador.

Luego de adquirir todos los materiales necesarios y haber preparado la muestra correctamente, se continuó con los siguientes pasos:

1. Se tomó la muestra y se pesó, evitando que se perdiera la humedad que posee. Se obtuvo el peso del material húmedo.
2. Se colocó la muestra en uno de los envases, evitando que se perdiera alguna partícula del agregado y se secó llevándola al horno, chequeando su peso en intervalos hasta que la diferencia entre dos pesadas sucesivas sea inferior al 0,1% del peso de la muestra.
3. Se sacó del horno y se dejó enfriar. Una vez manejable nuevamente, se pesó para conocer su masa en estado seco.
4. Para finalizar se realizaron los cálculos correspondientes descritos a continuación:
 - Cálculo del contenido total de humedad:

$$H = \left(\frac{W_o - W_s}{W_s} \right) \times 100 \quad (12)$$

Donde: H es el contenido de humedad de la muestra en porcentaje, W_o es el peso de la muestra original en gramos, W_s es el peso de la muestra seca en gramos.

- Cálculo del contenido de humedad superficial:

$$H_s = H - A \quad (13)$$

Donde: H es el contenido de humedad de la muestra en porcentaje, A es el porcentaje de absorción de la muestra en porcentaje.



Figura 7. Pesos muestras de agregado fino y grueso en estado húmedo. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de granulometría.

Otra de las características físicas medibles de los materiales que involucran la mezcla de concreto es la granulometría de los mismos; se realizó este ensayo a partir de la Norma Venezolana COVENIN 255-98 titulada “Agregados. determinación de la composición granulométrica” utilizando principalmente los siguientes materiales del laboratorio:

- ✓ Balanza con apreciación de ± 20 kg.
- ✓ Cedazos.
- ✓ Cernidora mecánica.
- ✓ Horno.

Para el caso del proceso experimental se realizaron los siguientes pasos:

1. Tomando una muestra del agregado, se cuarteó la misma y se determinó la cantidad de material a utilizar de acuerdo a la norma, dependiendo entonces del tamaño de partículas del agregado.
2. Se seleccionaron los tamices adecuados por tamaño, los cuales se describen más adelante en la presente tesis.
3. Los tamices se ordenaron según el tamaño de sus aberturas en forma decreciente, desde el de mayor abertura, hasta el de menor abertura. Seguidamente, se colocó la muestra del agregado en el tamiz superior que una vez instalado en la cernidora mecánica se dejó cernir durante 5 minutos.
4. Una vez transcurrido los 5 min, se tomó cada tamiz de manera individual, midiendo en la balanza la masa de cada porción de la muestra y se aplicó este procedimiento tanto para el agregado grueso como para el agregado fino.
5. Luego de haber realizado la medición de sus masas, se aplicaron las siguientes ecuaciones:

- ✓ Porcentaje retenido acumulado:

$$\% \text{ Ret Acumulado} = \frac{\text{Peso Retenido Acumulado}}{\text{Peso Total}} \times 100 \quad (14)$$

✓ Porcentaje pasante:

$$\% \text{ Pasante} = 100 - \% \text{ Ret Acumulado.} \quad (15)$$



Figura 8. Cernidora mecánica y tamices utilizados. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de la resistencia al desgaste del agregado grueso.

Esta práctica se llevó a cabo haciendo uso de las instrucciones expuestas en la Norma Venezolana COVENIN 266:1977 titulada “Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste en agregados gruesos de menores de 38,1 mm (1 1/2”) por medio de la máquina de Los Ángeles” en donde se utilizaron como instrumentos los siguientes:

- ✓ Máquina de Los Ángeles.
- ✓ Cedazos.
- ✓ Balanza.
- ✓ Carga Abrasiva.

Para dar inicio al ensayo se preparó la muestra a ensayar tratándose de una muestra previamente secada al horno y representativa del material retenido específicamente en los cedazos de 1/2" y 3/8" equitativamente. Los mismos se introdujeron en la máquina de Los Ángeles mencionada anteriormente y se siguieron las instrucciones a continuación:

1. Se tomó nota antes de elaborar el ensayo de la muestra a ensayar.
2. Se colocó la muestra anteriormente pesada y la carga abrasiva constituida de 11 esferas en la máquina de Los Ángeles, haciendo girar su tambor rotatorio durante 500 revoluciones a una velocidad de 30 a 33 rpm.
3. Una vez finalizadas las revoluciones mencionadas, se vació el tambor en la bandeja que se encuentra en la parte inferior de la máquina; para luego hacer pasar el material por el tamiz #12 (1,68 mm) a fin de rechazar el polvillo o material más fino.
4. Como paso final se pesó el material retenido en el cedazo mencionado y se efectuaron los cálculos respectivos, siendo los mismos la diferencia entre el peso original y el peso final de la muestra expresado en porcentaje del peso original; tomando este último como el porcentaje de desgaste.



Figura 9. Introducción de muestra de agregado grueso y esferas de acero. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de determinación de la finura del cemento Portland.

Para obtener un diseño de mezcla exitoso, entre más características se conozcan de los materiales que componen la mezcla mejor. La finura del cemento Portland corresponde a una de estas características y se trata de una de las más cuidadosas de determinar; debido a que las partículas del mismo son pequeñas y no pueden ser separadas por mallas, llevando a emplear otro tipo de métodos.

Para la elaboración de este ensayo se utilizó la Norma Venezolana COVENIN 487:1993 con título “Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato de Blaine de permeabilidad” la cual busca determinar el área específica medida en cm^2/g o bien m^2/kg , que se traduce en la cantidad de superficie que un gramo de partículas de cemento puede cubrir. Los instrumentos que se utilizaron son los siguientes:

- ✓ Aparato de Blaine. Compuesto por una célula de permeabilidad, un disco, un embolo, papel de filtro, manómetro.

✓ Cronómetro.

Como se menciona anteriormente, la práctica requiere de mucho cuidado y atención. Inicialmente se hizo una calibración del aparato de Blaine que fue bastante extensa, donde se determinó el peso exacto del cemento que se introduce en la celda de permeabilidad para conocer el factor de calibración del aparato, el cual fue constante para todo el ensayo y fue uno de los datos necesarios para determinar la finura del cemento Portland.

Luego de haber finalizado el proceso de calibración del aparato de Blaine, se realizaron los siguientes procedimientos:

1. Se preparó la muestra nuevamente haciéndola pasar por el tamiz #20, para evitar que se generen grumos en la misma. Se tomó la temperatura del laboratorio.
2. De la muestra anterior se tomaron $2,90 \text{ gr} \pm 1 \text{ gr}$ y se introdujeron en el embolo luego de haber preparado el mismo correctamente colocando primeramente el disco y un papel filtro.
3. Se colocó el embolo en la parte superior del aparato de Blaine y se comenzó a realizar el estudio del mismo. Se presionó el manómetro y se dejó abrir la válvula dejando que líquido que se encuentra dentro del aparato pase la tercera marca que se ubica en el mismo. Inmediatamente se cerró la válvula, haciendo que el líquido descienda lentamente.
4. Cuando el menisco del líquido tocó la tercera marca se accionó el cronómetro, deteniendo este último una vez el menisco alcance la segunda marca del aparato de Blaine.

5. Se tomó registro del tiempo en el cronómetro necesario en segundos, la temperatura y la muestra ensayada para posterior cálculos.

- Cálculo de la superficie específica o finura del cemento Portland:

$$S = (Fc) \times \sqrt{T} \quad (16)$$

Donde: **S** es la superficie específica de la muestra de cemento en estudio en m^2/kg , **Fc** es el factor de Blaine o factor de calibración en m^2/kg y **T** es intervalo de tiempo del descenso del líquido en segundos.



Figura 10. Aparato de Blaine para la elaboración del ensayo de finura del cemento Portland. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de la consistencia normal del cemento

Para la elaboración de este ensayo, se requirió el apoyo de la Norma Venezolana COVENIN 494:1994 que lleva por título “Cemento Portland, Determinación de la consistencia normal” con la cual se pudo conocer cuánto

porcentaje de agua es requerido por el cemento para adquirir una consistencia normal. Se emplearon los siguientes materiales de laboratorio:

- ✓ Balanza.
- ✓ Cilindro Graduado.
- ✓ Aparato Vicat.
- ✓ Cronómetro.

Para el caso del proceso experimental se realizaron los siguientes pasos:

1. Inicialmente se seleccionó la cantidad de material que se desea trabajar y se pesó el mismo en la balanza eléctrica. Del mismo modo, se seleccionó el porcentaje de agua inicial para la realización del ensayo.
2. En un recipiente, se introdujo tanto el cemento como el agua y se dejó reposar por 30 segundos, de manera que el cemento absorbiera el agua.
3. Una vez transcurrido el tiempo mencionado anteriormente, se comenzó con la mezcla de los materiales anteriores con un cucharón por 30 segundos y con una velocidad de 140 rpm aproximadamente.
4. Luego por 15 segundos, se raspó los bordes del recipiente, a manera de incluir el material que ha quedado en las paredes del mismo a causa del movimiento circular.
5. Se empleó un último mezclado por un minuto aproximadamente, con una velocidad un poco más rápida de 285 rpm.
6. Una vez adquirida una consistencia pastosa, se colocó la mezcla en un cono, se enrasa y se colocó debajo del aparato de Vicat para su evaluación.

7. Según la norma, la pasta tendrá una consistencia normal si el aparato de Vicat penetra 10 ± 1 mm.



Figura 11. Aguja de Vicat indicando la consistencia normal del cemento al descender 10 mm. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland

Este ensayo va de la mano con el ensayo de consistencia normal del cemento; luego de haber obtenido la relación agua cemento en la prueba anterior y habiendo conseguido la consistencia normal de la pasta, se preparó la misma nuevamente para ser ensayada siguiendo las indicaciones descritas en la Norma Venezolana COVENIN 493:1992 que tiene por nombre “Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat” y se utilizan los siguientes equipos:

- ✓ Balanzas.
- ✓ Cilindros graduados.

- ✓ Aparato de Vicat.
- ✓ Cronómetro.
- ✓ Recipiente de mezcla.
- ✓ Cono troncocónico.

Para iniciar se preparó la muestra de la misma forma que en el ensayo anterior, mezclando los 650 gr de cemento Portland con la cantidad de agua propuesta anteriormente; colocando primeramente el agua, luego el cemento, dejando reposar por 30 segundos, mezclando con velocidad moderada por 30 segundos, descansando y quitando el exceso pegado a las paredes del recipiente por 15 segundos y por último mezclando con velocidad rápida por 1 minuto. A continuación, se tomó la mezcla y se dio forma ovalada para ser colocada en el cono troncocónico que una vez enrasado se colocó en el vidrio y se niveló con la aguja de Vicat. Antes de iniciar la prueba se dejó reposar la mezcla por aproximadamente 30 minutos.

Pasado los 30 minutos de reposo de la mezcla, se realizó la primera medición con el aparato de Vicat y se tomó registro de cuanto descendió la misma luego de 30 segundos de haberse liberado, se repitió este proceso cada 15 minutos hasta que la aguja penetró aproximadamente 25 mm, obteniendo de esta manera el tiempo de fraguado inicial.

A continuación, para el estudio del tiempo de fraguado final se utilizó la misma mezcla en el cono troncocónico anterior pero esta vez colocando el diámetro más grande hacia arriba. Del mismo modo, se tomaron mediciones con la aguja de Vicat cada 15 min dejándola caer sobre la mezcla y se hicieron anotaciones de cuanto descendió la misma. Se da por terminado el ensayo cuando la aguja ya no penetra la mezcla, traducándose en que la misma está completamente seca y se adquiere el tiempo de fraguado final.

Tercera Etapa

Esta etapa corresponde al planteamiento presentado por el segundo objetivo específico, en donde se busca elaborar los diseños de mezclas con la sustitución correspondiente de su agregado grueso.

Primeramente se realizó el estudio de la dosificación de los materiales para un diseño de mezcla modelo (con el cual se realizan las comparaciones correspondientes), a fin de conocer cuánta cantidad de cada uno se debe añadir para realizar la evaluación a 1 m³, que luego fue ajustado para la elaboración de los cilindros de prueba.

Continuando, se desarrollaron los diseños de mezcla variando las proporciones del material polimérico en sustitución parcial del agregado grueso para su posterior estudio. La totalidad de este procedimiento será presentado en capítulos posteriores del presente trabajo de investigación.

Luego de haber calculado el diseño de mezcla, se inició el proceso de elaboración del mismo; para ello se pesaron cada uno de los componentes del concreto (arena, piedra, cemento, plástico) y se midió la cantidad de agua a implementar. Acto seguido, se comenzó con la unión de la arena y la piedra, mezclándola hasta lograr que ambas se encontraran uniformemente distribuidas (se incluyó en este proceso además el plástico a sustituir según la mezcla que corresponda), para luego incluir la cantidad de cemento calculada, mezclando la misma con los materiales mencionados anteriormente hasta su uniformidad y creando un círculo hueco en el centro en donde se colocó el agua. Por último, se agregó la mitad del agua en el centro y se inició el proceso de mezcla, observando cómo se comenzaron a unir todos los componentes y se agregó el resto del agua según la consistencia que se desee.

Ensayo de asentamiento

En los marcos de las observaciones anteriores, en esta etapa es importante considerar ciertas características como el asentamiento del concreto en estado fresco que se midió haciendo uso del Cono de Abrams y la Norma Venezolana COVENIN 339:2003, que de ser efectiva permitirá rellenar los moldes cilíndricos metálicos. El procedimiento se describe a continuación:

Una vez preparada la mezcla según el apartado anterior, inmediatamente se debe tomar el asentamiento de la misma. Para ello, se hizo uso de una bandeja metálica en donde se colocó el cono de Abrams con su diámetro mayor hacia abajo y se aplicó presión ubicando los pies sobre sus aletas. A continuación, se llenó el cono de Abrams con la mezcla de concreto preparada en 3 capas, aplicando con la barra compactadora 25 golpes entre el llenado de cada una de ellas, dejando que la última capa rebose; acto seguido se enrazó el cono de manera que no quede mezcla de cemento sobresaliendo del mismo y se limpió un poco sus alrededores si hubiese mezcla sobrante.

Antes de alzar el cono de Abrams se tomó este por sus asas haciendo presión hacia abajo equivaliendo a la misma aplicada con los pies, evitando que el contenido se escurra antes de tiempo. Una vez todo en orden, el alzado del cono se hizo de manera cuidadosa y debe durar aproximadamente 8 segundos, haciendo que la mezcla se esparza un poco por la bandeja. Habiendo levantado el cono tomando en cuenta el tiempo mencionado, se colocó el mismo a un lado de la mezcla con la circunferencia o abertura de menor tamaño hacia abajo, y se situó la barra compactadora sobre él. Se procedió a realizar la medición del asentamiento con la cinta métrica, el cual es la distancia desde el lado superior de la mezcla y el inicio de la barra compactadora.

Elaboración de los cilindros

El proceso de elaboración de la mezcla, la medición del asentamiento y la realización de los cilindros van totalmente de la mano y deben aplicarse uno tras otro. Al culminar con el ensayo de asentamiento, se proceden a llenar los cilindros con la mezcla de concreto preparada, a los cuales se les aplicó previamente una capa de aceite de motor a fin de facilitar el desmolde de los mismos una vez hayan endurecido.

A continuación, se llenaron los cilindros también por 3 capas, aplicando con la barra compactadora 25 golpes entre cada una de las capas y llenando hasta el rebose. De igual manera se enrazó con la barra compactadora para limpiar todo el exceso de contenido sobrante y obtener una superficie lo más uniforme posible. Pasadas las 24 horas, los cilindros fueron desmoldados e introducidos en la piscina de agua debidamente señalados para su posterior estudio.



Figura 12. Vaciado de los cilindros y curado de los mismos en las instalaciones del Laboratorio de materiales. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Cuarta Etapa

En esta etapa recae la mayor cantidad de peso de este trabajo de investigación, pues es donde se evalúa y se da respuesta a las interrogantes presentadas en capítulos anteriores que hace referencia a la durabilidad y resistencia a compresión al sustituir parcialmente el agregado grueso por material de Polietileno Tereftalato (PET).

En este mismo orden de ideas, los ensayos mencionados anteriormente se llevaron a cabo en las instalaciones del laboratorio de materiales de la Universidad Católica Andrés Bello – Extensión Guayana, y su procedimiento se explica a continuación:

Ensayo de resistencia a compresión

Para elaborar el ensayo de resistencia a compresión se tomó como referencia la Norma Venezolana COVENIN 338:2002 que lleva por nombre “Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto”; y con ella se utilizó como instrumento la prensa de ensayo a compresión, que permite aplicar una fuerza a velocidad constante en aumento, hasta que se produce la falla en la probeta de concreto en estudio. Se registraron los datos como la carga máxima aplicada y el área del cilindro para realizar los cálculos posteriores tal como se muestra a continuación:

- ✓ Cálculo de la resistencia a compresión:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (17)$$

Donde: **R_c** es la resistencia a compresión en kg/cm², **P** es la carga máxima aplicada en kg y **A** es el área de la sección transversal del cilindro en cm².

- ✓ Cálculo de la sección transversal del cilindro:

$$\text{Área} = \frac{\pi \times D^2}{4} \quad (18)$$

Donde: **D** es el diámetro de la probeta.

Otro aspecto importante que se identificó fue el tipo de falla que presentaron las probetas una vez las mismas cedieron. La Norma COVENIN 338:2002 establece un representación gráfica de los diferentes tipos de fallas que pueden ocurrir al momento de realizar el ensayo a compresión y se dividen en dos tipos distintos: falla por compresión y falla por corte; estos últimos a su vez se dividen en cuatro sub grupos enumerados tal como se muestra a continuación:

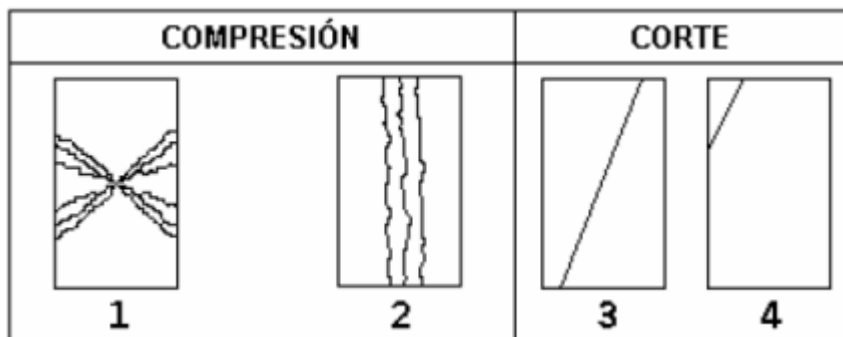


Figura 13. Tipo de fallas en los cilindros ensayados a compresión. Tomado de Norma Venezolana COVENIN 338:2002, (p. 6), por FONDONORMA, 2002, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

La primera falla presentada por la norma se caracteriza por una ruptura por compresión a lo largo del diámetro en la zona central del cilindro, mientras que la segunda establece también una falla por compresión presentándose un agrietamiento a lo largo de la altura de probeta. En el caso de las fallas por corte, la primera es calificada por la norma como un corte diagonal a lo largo de toda la altura del cilindro, mientras que la segunda representa un corte diagonal pero solo en una de las

esquinas de la probeta, pudiendo presentarse tanto en la parte superior como inferior de la misma.

Ensayo de durabilidad

En el mismo orden de ideas, se realizó el estudio de la durabilidad de las muestras cilíndricas de concreto. Tomando en cuenta que cuando se habla de durabilidad se hace referencia a la capacidad que posee el concreto con la que puede resistir cualquier fenómeno que produzca deterioro del mismo (Apaza, 2018, p. 37), se decidió realizar una de las diferentes pruebas para evaluar la durabilidad del concreto con la sustitución parcial de agregado grueso en distintos porcentajes; siendo la misma un ensayo acelerado de ataque por sulfatos haciendo uso de la Norma ASTM C-1012.

Ensayo acelerado de ataque por sulfatos. Este ensayo se efectuó siguiendo y adaptando los lineamientos de la Norma ASTM C-1012 que tiene por nombre “Standard Test Method For Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution” en donde se buscó determinar el cambio que sufren muestras de concreto al estar expuestas a ambientes agresivos en este caso una solución acelerada de sulfato de sodio anhidro.

Las muestras ensayadas corresponden a cilindros de concreto patrón y concreto con sustitución parcial de agregado grueso a distintos porcentajes, los cuales fueron curados a 28 días y secados en el horno para garantizar su estado seco.

Para llevar a cabo el ensayo, se hizo uso de baldes de plástico con relieve en su fondo de manera que la solución a utilizar pueda alcanzar todas las partes de las muestras. Allí fueron introducidas las mismas con una combinación de Agua y Sulfato de sodio anhidro de manera intermitente, cada uno en proporciones recomendadas por la norma y doblando su valor para acelerar el proceso del ensayo, y

con ello establecer una relación con el daño que pueden sufrir las mezclas patrón y las mezclas con polietileno tereftalato. El proceso se explica a continuación:

La proposición inicial consistió en la presentación de un ensayo acelerado a 14 días con ciclos intermitentes de humedad y secado a agentes agresivos con concentración mayor que las condiciones de servicio. A lo largo de la evolución del ensayo fue necesario medir la variación de la masa, y realizar una inspección visual del cambio.

- ✓ Preparación de la solución: La Norma ASTM C1012 propone que se debe preparar una solución de Sulfato de Sodio Anhidro (Na_2SO_4) siguiendo la medida de 50 gramos de dicho material por cada litro de agua, sin embargo el estudio de las probetas siguiendo esta solución requiere de grandes periodos de tiempo, realizándose por aproximadamente 12 meses. Es por esta condición que se requirió incrementar la concentración de la solución en un 2.4%; preparándose entonces con una concentración de 80 gramos por cada litro de agua, elaborándose con un período de anticipación de 24 horas antes de la inmersión de las probetas.

Tal y como se hace mención anteriormente, los ciclos estuvieron constituidos por etapas de inmersión, secado y enfriamiento, dando paso a un nuevo ciclo iniciando con una nueva inmersión.

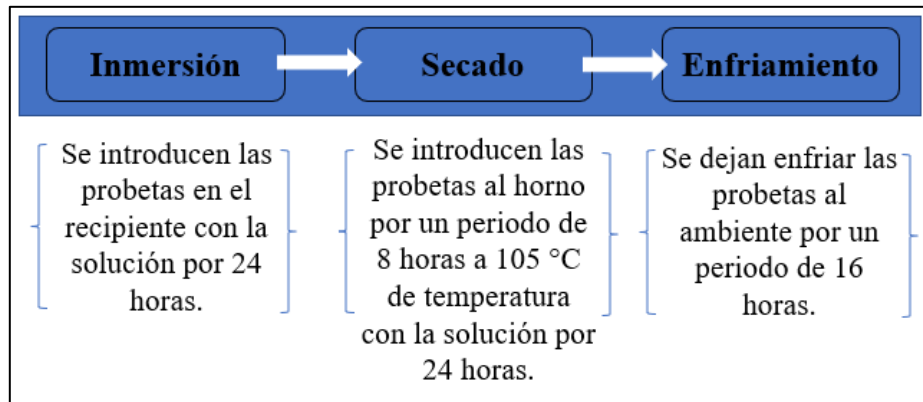


Figura 14. Ciclo para ensayo acelerado por Ataque de Sulfatos. Adaptado de Propuesta de Concreto con Agregado Fino de Escoria de Cubilote como aporte al estudio de la Durabilidad y Propiedades acústicas, (p. 61), por C. Pico, 2012. Derechos reservados por Carlos Pico.

A lo largo del ensayo se realizó la medición de la masa de las probetas, tanto en modo seco (al horno) como húmeda (s.s.s); además, se evaluó visualmente los posibles cambios presentados en el exterior de las mismas.

Como estudio final, a las probetas ensayadas al ataque de sulfatos se les evaluó además su resistencia a compresión y se compararon con los cilindros que no estuvieron expuestas al daño; de manera que se pudo establecer una correlación entre ambos casos y observar cuanto fue el daño provocado.

Capítulo IV

Presentación y análisis de resultados

Ensayo de peso unitario de los agregados

Para la elaboración del ensayo de peso unitario de los agregados, se siguieron las instrucciones planteadas en la Norma Venezolana COVENIN 263:1978, obteniendo de esta manera resultados útiles para realizar la mezcla de concreto.

Esta norma destaca las indicaciones para las muestras tanto de agregado fino como para agregado grueso, llevándose a cabo el estudio para ambos casos. Ahora bien, tomando en cuenta que el plástico de polietileno tereftalato (PET) también fue un tipo de agregado, se empleó la misma Norma Venezolana COVENIN a pesar de que el mismo es un material no común para la elaboración de concreto y por ello no cuenta con estudios propios.

Una vez obtenidos los resultados de la práctica, los mismos fueron comparados con los límites establecidos por la norma como los valores usuales de las relaciones peso/volumen de los agregados no livianos; a manera de determinar si se encontraban en los rangos correspondientes aceptables. A continuación, se presenta la tabla de valores aceptables previamente mencionados:

Tabla 7.

Valores usuales de las relaciones peso/volumen de los agregados no livianos.

PROPIEDAD	GRUESOS	ARENA
Peso unitario suelto (kgf/litro)	1,4 a 1,5	1,5 a 1,6
Peso unitario compacto (kgf/litro)	1,5 a 1,7	1,6 a 1,9
Densidad (peso específico)	2,5 a 2,7	2,5 a 2,7

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 81), por Porrero, Ramos, Grases, y Velazco, 2009, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Calibración de los recipientes.

Inicialmente para la elaboración de este ensayo, se realizó una calibración de los recipientes a utilizar según indica la norma COVENIN. Empleando las herramientas del laboratorio, se seleccionaron dos tipos de moldes, uno de mayor tamaño exclusivo para el agregado grueso, y otro de un tamaño más pequeño perteneciente al agregado fino. La calibración de los recipientes consistió en aplicar una relación entre el peso unitario del agua según la temperatura in situ y la cantidad del mismo que puede ser contenido por los moldes.

Tabla 8.

Peso unitario del agua.

Temperatura °C	Kg/m³
15.6	999.01
18.3	998.54
21.1	997.97
(23.0)	(997.54)
23.9	997.32
26.7	996.59
29.4	995.83

Nota: Tomado de Norma Venezolana COVENIN 263:1978, (p. 3), por FONDONORMA, 1978, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con respecto la calibración de los recipientes. En la tabla 9 se observan los valores para el molde de menor tamaño que se utilizó previamente para el estudio del agregado fino y en la tabla 10 los valores pertenecientes al molde de mayor tamaño destinado al estudio del agregado grueso.

Tabla 9.

Resultado del factor de calibración para el molde de agregado fino.

Factor de Calibración	348,428 1/m ³
Peso Molde	1620 gr
Peso lámina de vidrio	2200 gr
Peso total: Molde + Agua + Vidrio	6680 gr
Temperatura del agua	27 °C
Peso Unitario del agua	996,51 gr
Peso Neto del agua	2860 gr

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 10.

Resultado del factor de calibración para el molde de agregado grueso.

Factor de Calibración	105,339 1/m ³
Peso Molde	4860 gr
Peso lámina de vidrio	2200 gr
Peso total: Molde + Agua + Vidrio	16520 gr
Temperatura del agua	27 °C
Peso Unitario del agua	996,51 gr
Peso Neto del agua	9460 gr

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Peso unitario suelto

Para evaluar el peso unitario suelto de cada uno de los agregados, se decidió tomar dos muestras similares de cada uno de los materiales, de manera que se pueda comparar ambos resultados y comprobar que no exista un margen de error muy grande entre ellos. A continuación, se presentan los resultados del peso unitario suelto para cada uno de los materiales ensayados:

Tabla 11.

Peso unitario suelto del agregado fino (arena).

AGREGADO FINO SUELTO (ARENA)						
Factor de Calibración (1/m³)	Muestra	Peso Molde (Kg)	Peso A+M (Kg)	Peso Agregado (Kg)	Peso Promedio (Kg)	Peso Unitario (Kg/m³)
348,43	1	1,62	6,08	4,46	4,50	1567,93
348,43	2	1,62	6,16	4,54		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 12.

Peso unitario suelto del agregado grueso (piedra).

AGREGADO GRUESO SUELTO (PIEDRA)						
Factor de Calibración (1/m³)	Muestra	Peso Molde (Kg)	Peso A+M (Kg)	Peso Agregado (Kg)	Peso Promedio (Kg)	Peso Unitario (Kg/m³)
105,34	1	4,86	19,62	14,76	14,71	1549,53
105,34	2	4,86	19,52	14,66		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 13.

Peso unitario suelto del agregado grueso (plástico).

AGREGADO GRUESO SUELTO (PLÁSTICO)						
Factor de Calibración (1/m³)	Muestra	Peso Molde (Kg)	Peso A+M (Kg)	Peso Agregado (Kg)	Peso Promedio (Kg)	Peso Unitario (Kg/m³)
105,34	1	4,86	7,28	2,42	2,45	258,08
105,34	2	4,86	7,34	2,48		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Según los resultados obtenidos mediante la realización de la práctica, se puede evidenciar en la tabla 11 que para el agregado fino (arena) contó con un peso unitario suelto de 1567,93 Kg/m³; el cual haciendo la comparación con los valores establecidos en la tabla 7, se encontraron perfectamente entre el rango mínimo permitido propuestos.

Ubicando en la tabla 12 los resultados pertenecientes al estudio del peso unitario suelto del agregado grueso (piedra), se observó el valor de 1549,53 Kg/m³;

que al compararlo con los valores presentes en la tabla 7, es posible concluir que el agregado grueso (piedra) cumplió con los estándares mínimos de peso unitario suelto.

Los resultados presentados en la tabla 13 reflejan el valor del peso unitario suelto del agregado grueso (plástico) de 258,08 Kg/m³, y aunque no se disponen de estudios para este material, al compararlo con los datos de la tabla 7 se evidenció que no cumplen el valor mínimo exigido por la norma.

Peso unitario compacto

Los pasos a seguir para evaluar el peso unitario compactado de los materiales son bastante similares al caso anterior, exceptuando que se debe compactar el material dentro del molde aplicando una serie de golpes a medida que se llena el mismo antes de realizar la medición de la masa. A continuación se presentan los resultados del peso unitario compactado para cada uno de los materiales ensayados:

Tabla 14.

Peso unitario compacto del agregado fino (arena).

AGREGADO FINO COMPACTADO (ARENA)						
Factor de Calibración (1/m³)	Muestra	Peso Molde (Kg)	Peso A+M (Kg)	Peso Agregado (Kg)	Peso Promedio (Kg)	Peso Unitario (Kg/m³)
348,43	1	1,62	6,50	4,88	4,88	1700,33
348,43	2	1,62	6,50	4,88		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 15.

Peso unitario compacto del agregado grueso (piedra).

AGREGADO GRUESO COMPACTADO (PIEDRA)						
Factor de Calibración (1/m³)	Muestra	Peso Molde (Kg)	Peso A+M (Kg)	Peso Agregado (Kg)	Peso Promedio (Kg)	Peso Unitario (Kg/m³)
105,34	1	4,86	20,46	15,60	15,58	1641,18
105,34	2	4,86	20,42	15,56		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 16.

Peso unitario compactado del agregado grueso (plástico).

AGREGADO GRUESO COMPACTADO (PLÁSTICO)						
Factor de Calibración (1/m³)	Muestra	Peso Molde (Kg)	Peso A+M (Kg)	Peso Agregado (Kg)	Peso Promedio (Kg)	Peso Unitario (Kg/m³)
105,34	1	4,86	7,54	2,68	2,67	281,25
105,34	2	4,86	7,52	2,66		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Siguiendo los datos establecidos en la tabla 14, se pudo observar que el valor del peso unitario compactado para el agregado fino (arena) fue de 1700,33 kg/m³, que al compararlo con la tabla 7, es posible concluir que se encontró dentro de los valores mínimos de su categoría.

En este mismo orden de ideas, evaluando los resultados expresados en la tabla 15, se evidenció que el valor del peso unitario compactado para el agregado grueso (piedra) fue de 1641,18 kg/m³, y una vez haciendo la comparación con la tabla 7 se

concluye que el mismo se encontró entre el rango mínimo de peso unitario para agregados gruesos compactados.

Por otro lado, la tabla 16 expresa los valores del ensayo de peso unitario para el agregado grueso (plástico) con un valor de 281,25 kg/m³; se evidenció la misma situación ocurrida en el caso del peso unitario suelto, en donde los valores de peso unitario del plástico compactado quedaron fuera del rango establecido en la tabla 7 por la norma, esto debido a que el polietileno tereftalato no es un material común de estudio para la adición al concreto y no se encuentran estudios para el mismo.

Realizando una retrospectiva y evaluando los valores tanto del agregado grueso (plástico) como del agregado grueso (piedra), se evidenció que la piedra obtuvo un peso unitario 6 veces más pesado que el polietileno tereftalato aproximadamente, bien sea medido suelto o compactado. Esta diferencia en los pesos de ambos materiales se evidenciará en el concreto una vez se lleve a cabo la sustitución parcial del agregado grueso por el material polimérico, que siendo este último más liviano, se disminuirá el peso de la mezcla para un mismo volumen.

Ensayo de densidad y absorción de los agregados

Este ensayo se realizó a fin de conocer y calcular la densidad aparente, la densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca, la densidad nominal y la absorción de los agregados que se van a utilizar para la elaboración de la mezcla de concreto; siguiendo los lineamientos expuestos en las Normas Venezolanas COVENIN 268: 1998 para agregado fino y COVENIN 269:1998 para agregado grueso.

Es importante mencionar que la práctica fue elaborada solo para el agregado fino (arena) y para el agregado grueso (piedra), tomando en cuenta que debido a las características del plástico polietileno tereftalato PET, al aplicar la secuencia de

agregado grueso para su estudio de densidad y absorción, el mismo flota al momento de introducirlo al agua y por esto no se pudo examinar sus propiedades para este caso.

Densidad y absorción agregado fino (arena)

Tal como se expresa anteriormente, se hizo uso de la Norma venezolana COVENIN 268:1998 para llevar a cabo la práctica correspondiente al agregado fino (arena). Una vez preparada la muestra humedeciéndola en agua por 24 horas aproximadamente y secándola previamente con una corriente de aire, se toma 500 ± 10 gr tal como indica la norma, de los cuales para nuestro caso se tomaron 500,32 gr y se llevaron a cabo los respectivos cálculos mostrados a continuación:

Tabla 17.

Datos para ensayo de la densidad y absorción del agregado fino (arena).

Datos	Resultados
Peso arena condición SSS (gr)	500,32
Peso arena SSS + picnómetro hasta aforo (gr)	963,41
Peso picnómetro vacío (gr)	158,18
Peso picnómetro + agua hasta aforo (gr)	655,28
Peso arena secada al horno (gr)	496,09
Temperatura del agua (°C)	27
Densidad del agua a 27°C (gr/ml)	0,99659

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 18.

Resultados de la densidad y absorción del agregado fino (arena).

Cálculos	Resultados
Densidad aparente (gr/ml)	2,572
Densidad aparente con muestra SSS (gr/ml)	2,594
Densidad nominal (gr/ml)	2,630
Absorción (%)	0,853

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Los datos presentados en la tabla 17 fueron esenciales para realizar los cálculos expuestos en la tabla 18; en donde existió una diferencia de la densidad aparente SSS de 0,022 gr/ml y de la densidad nominal de 0,058 gr/ml con respecto a la densidad aparente de 2,572 gr/ml. Las cuales representan unas variaciones de 0,86% y 2,26% respectivamente, en donde la primera pudiese considerarse como insignificante, mientras que la segunda fue considerada significativa; de tal manera que este valor no se tomó en cuenta al momento de elaborar el diseño de mezcla.

Por otro lado, comparando estos valores de densidades obtenidos con los establecidos en la tabla 7 presentada en la práctica anterior de este trabajo de grado, se observa que los mismos entran en el límite establecido por la Norma COVENIN, y por ende el agregado fino (arena) estudiado es considerado un agregado no liviano.

Densidad y absorción agregado grueso (piedra)

Al igual que en el apartado anterior, se llevó a cabo la práctica de densidad y absorción del agregado grueso a partir de las especificaciones de la Norma venezolana COVENIN 269:1998. De igual manera se preparó la muestra humedeciéndola en un recipiente con agua por 24 horas aproximadamente, que luego fue secada y medida su masa respectivamente. Se introdujo la muestra además en un

recipiente de malla y a su vez en un balde con agua, a fin de medir su masa sumergida con el uso de una balanza hidrostática y realizar sus cálculos correspondientes que se muestran a continuación:

Tabla 19.

Datos para ensayo de la densidad y absorción del agregado grueso (piedra).

Datos	Resultados
Peso de la cesta en el aire (gr)	963
Peso de la muestra SSS + cesta en el aire (gr)	4907
Peso de la muestra SSS al aire (gr)	3944
Peso de la cesta en el agua (gr)	843
Peso de la muestra + cesta en el agua (gr)	3329
Peso de la muestra en el agua (gr)	2486
Peso de la muestra seca al horno (gr)	3922
Temperatura del agua (°C)	27
Densidad del agua a 27°C (gr/ml)	0,99659

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 20.

Resultados de la densidad y absorción del agregado grueso (piedra).

Cálculos	Resultados
Densidad aparente (gr/ml)	2,68
Densidad aparente con muestra SSS (gr/ml)	2,70
Densidad nominal (gr/ml)	2,72
Absorción (%)	0,56

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Mediante los resultados presentados en la tabla anterior, se pudo evidenciar que al igual que el agregado fino (arena) se presentó una diferencia de la densidad aparente con muestra saturada y superficie seca de 0,02 gr/ml y de la densidad nominal de 0,04 gr/ml con respecto a la densidad aparente de 2,68 gr/ml. Estos valores representaron una variación de 0,75% de la densidad con muestra SSS y una variación de 1,49% para la densidad nominal, pudiendo considerarse ambos como insignificantes. Del mismo modo, se pudo apreciar que haciendo la comparación de las densidades obtenidas con los valores presentados en la tabla 7, tanto la densidad aparente con muestra SSS y la densidad nominal se encontraron un poco fuera del límite establecido por la norma, asumiendo entonces que el agregado grueso (piedra) estudiado se puede considerar un agregado no liviano.

Ensayo de humedad de los agregados

Una de las características importantes que se deben tomar en cuenta cuando se trabaja con agregados es la cantidad de líquido que los mismos pueden retener en sus poros, debido a que estos pueden interferir en el producto final de la mezcla de concreto, modificando su relación agua cemento.

Esta práctica se realizó siguiendo las indicaciones presentadas en la Norma Venezolana COVENIN 1375:1979, que tiene como fin determinar por secado el porcentaje de humedad evaporable en una muestra de agregado y además determinar su humedad superficial. Una vez finalizado el ensayo, se tomaron registros de los datos y se realizaron los cálculos correspondientes, los cuales se exponen a continuación:

Tabla 21.

Datos para determinar el contenido de humedad de los agregados.

Instrumento	Peso (gr)
Peso bandeja A. Grueso	207,58
Peso bandeja + agregado grueso húmedo	2145,49
Peso agregado grueso húmedo	1937,91
Peso agregado grueso seco	1935,95
Peso bandeja A. Fino	162,42
Peso bandeja + agregado fino húmedo	1069,49
Peso agregado fino húmedo	907,07
Peso agregado fino seco	900,79

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 22.

Resultados del contenido de humedad de los agregados.

Material	Humedad natural (%)
Agregado fino (arena)	0,7
Agregado grueso (piedra)	0,1

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Los valores obtenidos al realizar los cálculos correspondientes a esta práctica fueron relativamente bajos, lo que indica que los poros de los agregados se encontraban parcialmente secos y por tanto el aporte de agua a la mezcla también será mínimo.

Por otro lado, el contenido de humedad superficial también fue otro resultado que puede ser calculable, haciendo una diferencia entre el contenido total de humedad de cada agregado y la absorción de cada uno, esta última obtenida previamente en el

ensayo anterior (Densidad y absorción de los agregados). Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 23.

Resultados del contenido de humedad superficial de los agregados.

Material	Contenido de humedad superficial (%)
Agregado fino	-0,15
Agregado grueso	-0,46

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Como se puede evidenciar en la tabla anterior, ambos valores resultaron negativos, lo que se traduce en que ambos agregados van a absorber mayor cantidad de agua de la mezcla de la que aportan. De esta manera, se debe tomar en cuenta que el agregado grueso absorberá mayor cantidad de líquido de la mezcla en comparación con el agregado fino.

Ensayo de granulometría de los agregados

Para la elaboración de este ensayo se tomó como base principal los lineamientos expuestos en la Norma Venezolana COVENIN 255:1998, en donde se busca determinar la distribución del tamaño de los granos de cada uno de los agregados.

Como se explicaba en el apartado de procedimientos, para llevar a cabo esta práctica se hizo uso de una cernidora mecánica; a la cual se le colocaron los tamices indicados en la Norma Venezolana COVENIN 254:1998, siendo para el agregado fino los tamices #4, #8, #16, #30, #50, #100 y #200, mientras que para el agregado grueso los tamices 1", 3/4", 1/2", 3/8", #4 y #8. Por último, al finalizar con el

proceso, se hizo un registro del material que quedó retenido en cada uno de los tamices para calcular los valores necesarios.

Granulometría agregado fino

Utilizando los tamices correspondientes para el agregado fino tal como se indica anteriormente y con ayuda de la cernidora mecánica, se distribuyeron a través de los mismos una muestra de 609,06 gr a manera de obtener las masas retenidas en cada uno de los tamices. Finalmente, se realizó el cálculo de la masa retenida acumulada, el porcentaje retenido acumulado, el módulo de finura y además el porcentaje pasante, el cual fue comparado con los límites expuestos en la Norma COVENIN y graficados en la figura 15.

Tabla 24.

Resultados de la granulometría del agregado fino (arena).

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (G)	Retenido Acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
						Min	Máx.
#4	4,76	8,35	8,35	1,37	98,63	85	100
#8	2,38	81,43	89,78	14,74	85,26	60	95
#16	1,19	253,49	343,27	56,36	43,64	40	80
#30	0,595	217,48	560,75	92,07	7,93	20	60
#50	0,297	33,48	594,23	97,57	2,43	8	30
#100	0,149	7,15	601,38	98,74	1,26	2	10
#200	0,075	6,32	607,7	99,78	0,22	0	5
Módulo de Finura					3,61		

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Gracias a los resultados presentados en la tabla anterior, se pudo observar que la mayor cantidad de peso retenido se encontró en el tamiz #16 con 253,49 gr, lo que equivale a un 41,62% de la muestra estudiada inicialmente. Por otra parte, el tamiz #200 obtuvo la menor cantidad de peso retenido de 6,32 gr representado solo un 1,04% de la muestra total estudiada, indicando entonces que la arena utilizada posee una baja cantidad de ultrafinos.

Con respecto al módulo de finura Porrero, Ramos, Grases y Velazco, (2009) explican que:

Se considera que el módulo de finura adecuado de una arena para producir concreto dentro de una granulometría aceptable, debe estar entre 2,3 y 3,1 donde un valor menor de 2,0 indica una arena fina, 2,5 una arena media y más de 3,0 una arena gruesa. (p. 71).

Observando los valores obtenidos se presenta que el módulo de finura para la arena estudiada fue de 3,61, tratándose entonces de una arena gruesa; lo que significó que se trata de una arena pesada, confirmando este hecho gracias a los resultados obtenidos en el apartado de “Densidad y absorción del agregado fino (arena)”, donde calificó como arena no liviana, o lo que es lo mismo una arena pesada.

Del mismo modo, se presentan los resultados obtenidos de manera gráfica, colocando además los límites tanto máximos como mínimos ofrecidos por la norma según ensayos posteriores, a fin de poder observar cómo se distribuye la granulometría del agregado fino.

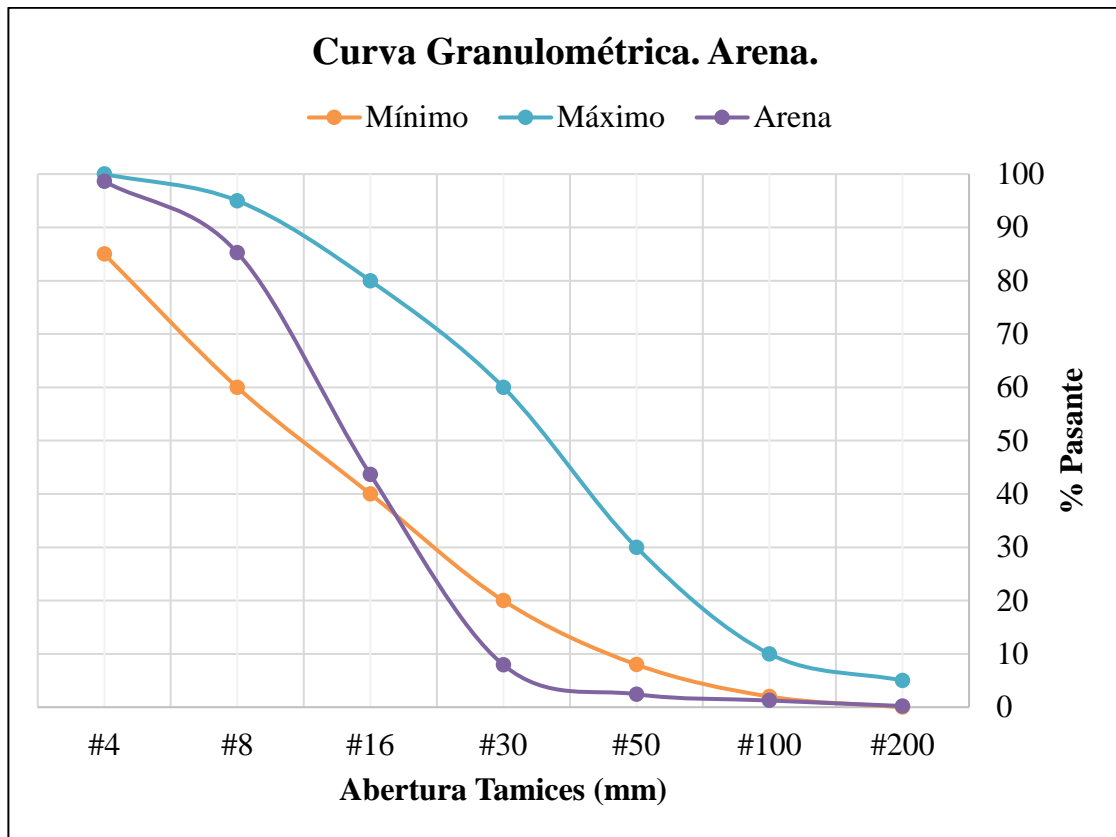


Figura 15. Curva granulométrica del agregado fino (arena). Elaborado por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tomando en cuenta las curvas presentadas en la figura mostrada anteriormente, se pudo observar que la curva granulométrica para la arena en el ensayo, se encontró mayormente dentro de los límites adecuados presentados por las otras dos curvas; obteniendo su valor más alto en el tamiz #4 con 98,63% de material pasante y continuando de manera descendiente dentro del rango propuesto. Una vez pasado el tamiz #16, la curva alcanzó al tamiz #30 saliéndose del rango asignado, disponiendo de un porcentaje pasante de 7,93%, sin embargo se mantuvo cercano al límite mínimo para integrarse nuevamente en el tamiz #100.

De los planteamientos anteriores se dedujo que el agregado fino a utilizar en la mezcla de concreto se encontró bien gradado, siendo el mismo óptimo para cumplir su función.

Granulometría agregado grueso

A fin de conocer la granulometría del agregado grueso se hizo uso de los tamices dispuestos por la Norma COVENIN: 1 1/2" (38,1 mm), 1" (25,40 mm), 3/4" (19,00 mm), 1/2" (12.70 mm), 3/8" (9.51 mm) y #4 (4.76 mm); además de seguir el mismo procedimiento correspondiente al agregado grueso con el uso de la cernidora mecánica. Una vez finalizada la práctica, se tomó nota de cada material retenido en los cedazos mencionados anteriormente y se llevaron a cabo los cálculos de la masa retenida acumulada, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje pasante, haciendo la respectiva comparación con los límites superiores e inferiores correspondientes al agregado grueso.

Agregado grueso (piedra). Para el estudio granulométrico de la piedra, se contó con una muestra inicial de 3707 gr que se hicieron pasar por los cedazos mencionados anteriormente, obteniendo los siguientes valores:

Tabla 25.

Resultados de la granulometría del agregado grueso (piedra).

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (G) (gr)	Retenido Acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
						Min	Máx.
1 1/2"	38,1	0	0	0	100	100	100
1"	25,4	204,26	204,26	5,512	94,49	90	100
3/4"	19	1205,24	1409,5	38,033	61,97	50	90
1/2"	12,7	1411,16	2820,66	76,111	23,89	15	45
3/8"	9,51	484	3304,66	89,171	10,83	0	20
#4	4,76	366,55	3671,21	99,061	0,94	0	7

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Observando los resultados expuestos anteriormente en la tabla, se observó la mayor cantidad de masa retenida en el tamiz de 1/2" con un valor de 1411,16 gr y que representa un 38,07% de la masa total estudiada inicialmente. Por otro lado, la menor cantidad retenida se situó en el tamiz de 1" con un valor de 204,26 gr y que corresponde a un 5,51% de la masa total inicial.

Con respecto al tamaño máximo del agregado grueso, este estará determinado por el tamaño de las partículas más gruesas, y se mide con la abertura del tamiz de mayor tamaño por el que pase el 95% o más del material. (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2009, p. 68). De esta manera, se estableció que el tamaño máximo del agregado grueso (piedra) fue de 1" (25,4 mm), gracias a que por este último pasó el porcentaje mínimo de la muestra requerido para considerarse agregado grueso; teniendo de segundo lugar el tamiz de 3/4" por el que pasó el 61,97% del material.

De esta manera se pudo representar los valores de manera gráfica para obtener una mejor escala de los mismos, agregando a esta los límites máximos y mínimos dispuestos por la Norma COVENIN mediante estudios estandarizados, presentada a continuación:

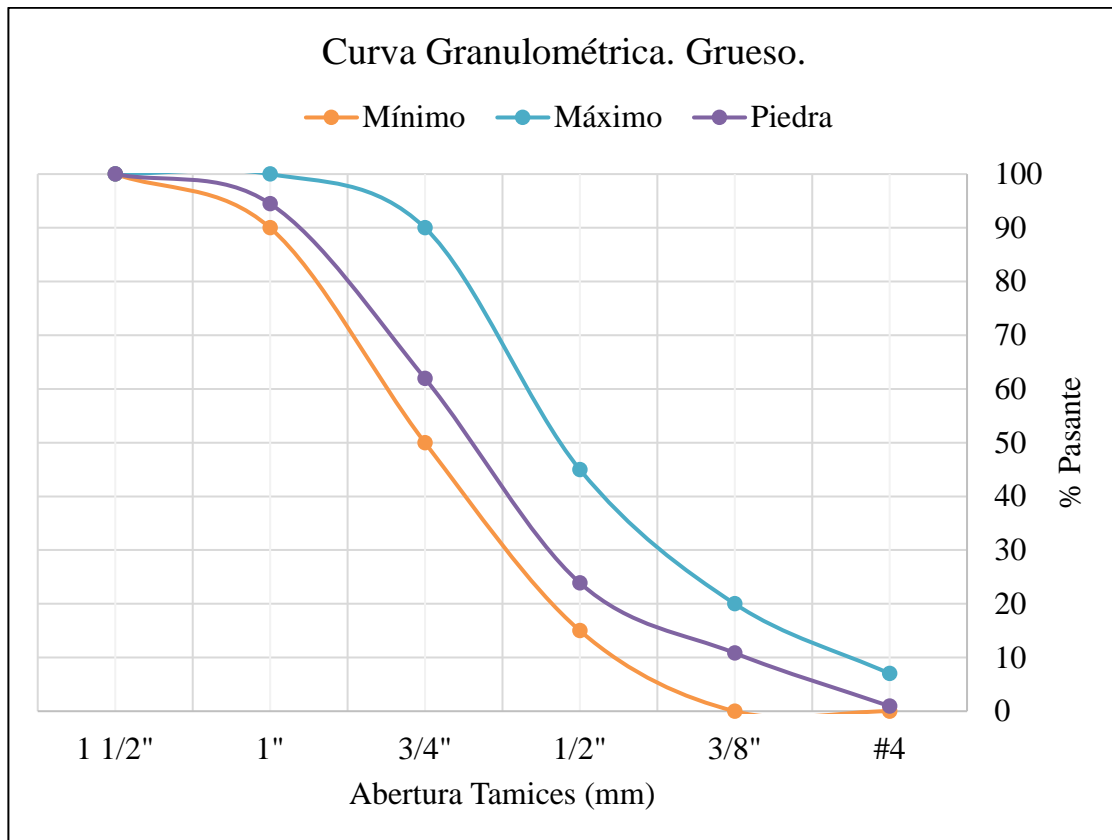


Figura 16. Curva granulométrica del agregado grueso (piedra). Elaborado por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Mediante la figura presentada anteriormente, se observó que la curva granulométrica para el agregado grueso (piedra) se encontró en su totalidad dentro de los límites propuestos por la Norma COVENIN, lo que se traduce en que el agregado grueso (piedra) estudiado se encuentra bien gradado permitiendo que las mezclas de concreto sean más trabajables y por ende no se presenten mucho espacio entre los granos.

Se pudo observar además, una vez se alcanzó el tamiz de 1" con un porcentaje pasante de 94,49%, comenzó un descenso característico de este material, adaptándose a los tamices siguientes, en donde finalizó con el tamiz #4 con un porcentaje pasante de 0,94%.

Agregado grueso (plástico). El mismo estudio se planteó para el polietileno tereftalato, en donde se contó con una muestra inicial de material de 1126,03 gr y que se hicieron pasar por los tamices correspondientes al agregado grueso, obteniendo entonces los siguientes datos:

Tabla 26.

Resultados de la granulometría del agregado grueso (plástico).

Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (G) (gr)	Retenido Acumulado (%)	Pasante (%)	Especificaciones	
						Min	Máx.
1 1/2"	38,1	0	0	0	100	100	100
1"	25,4	0	0	0	100	90	100
3/4"	19	0	0	0	100	50	90
1/2"	12,7	10,78	10,78	0,957	99,043	15	45
3/8"	9,51	65,99	76,77	6,818	93,182	0	20
#4	4,76	872,99	949,76	84,346	15,654	0	7
#8	2,38	169,93	1119,69	99,437	0,563	0	0

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La tabla anterior presenta los datos de granulometría del agregado grueso (plástico), en donde se observó que la mayor cantidad de masa presentó un valor de 872,99 gr, siendo retenida en el tamiz #4 (4,76 cm) y que equivale a un 77,52% de la muestra inicial utilizada. Mientras que la menor cantidad de masa retenida se presentó en el tamiz de 1/2" con un valor de 10,78 gr, siendo un 0,95% de la muestra inicial. Es importante resaltar que este material paso completamente por los tamices de 1 1/2", 1" y 3/4" y que al tener su mayor cantidad de porcentaje retenido en el tamiz #4 se consideró como un agregado grueso.

Al igual que las granulometrías de los agregados anteriores, para el plástico también se graficaron sus valores granulométricos y así poder tener una visión más amplia de los resultados expuestos en la siguiente figura:

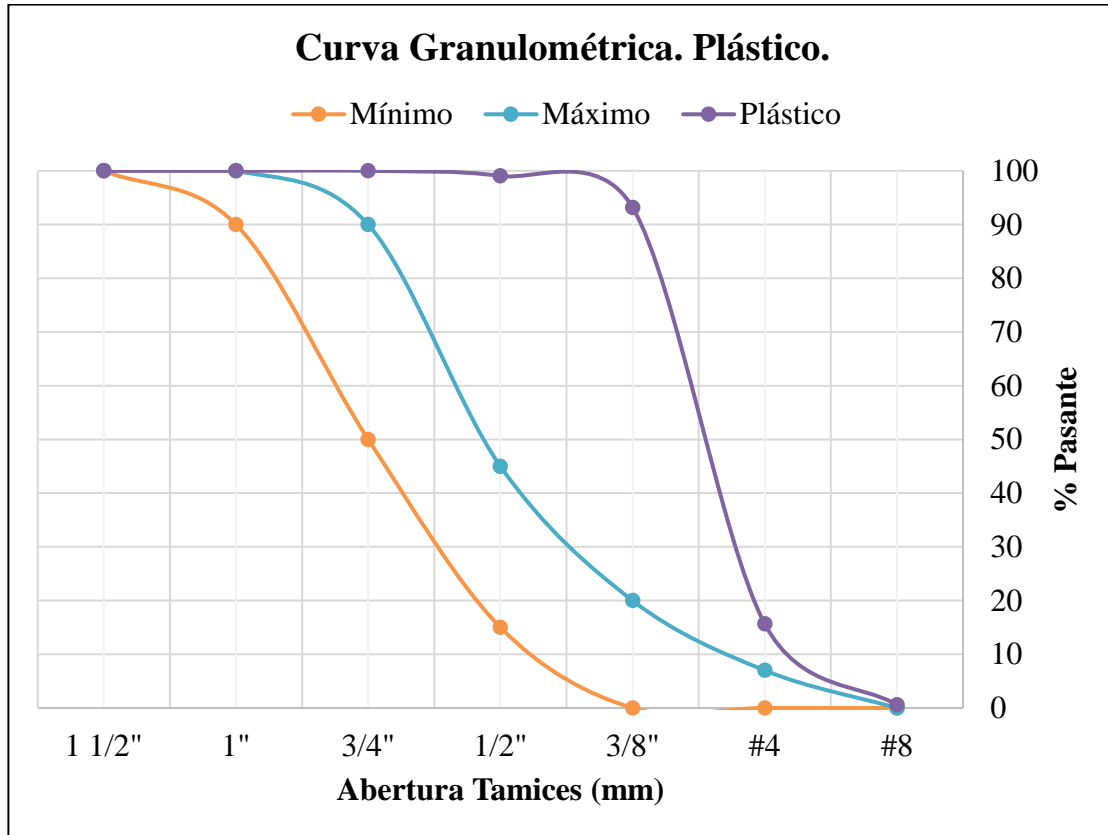


Figura 17. Curva granulométrica del agregado grueso (plástico). Elaborado por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La figura 17 muestra la curva granulométrica para el agregado grueso (plástico), en donde se evidenció de manera inmediata que la misma se encontró por fuera de los valores máximos y mínimos establecidos por la Norma COVENIN para el agregado grueso; esto en consecuencia que el polietileno tereftalato no es un material común para la elaboración de concreto y por esto no se tienen valores para establecer correctamente los límites. Sin embargo, es posible observar que a partir del tamiz #4, la gráfica comenzó a tender a 0; por lo que, como se consideró

anteriormente, se puede decir que el PET posee una distribución de tamaño de partícula acorde con la del agregado grueso en este estudio.

Ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso

La elaboración del ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso se llevó a cabo siguiendo las instrucciones presentadas en la Norma Venezolana COVENIN 266:1977, en donde se hizo uso de la máquina de abrasión “Los Ángeles”.

Esta práctica se realizó exclusivamente para el agregado grueso (piedra), en donde la muestra a utilizar deberá ser el material que pasa por el tamiz 1 ½”; tomando en cuenta que el tamaño máximo a emplear a lo largo de este trabajo de grado es de 1”, como se explica en apartados anteriores, entonces se cumple con dicha condición.

Continuando con el ensayo y disponiendo de la muestra necesaria, se inició introduciendo la misma a la máquina de abrasión “Los Ángeles” en conjunto con las esferas, haciéndola girar a una velocidad de 30 rpm durante 500 revoluciones. Al finalizar, se pesó el material resultante que quedó retenido en el tamiz N° 12 (1,68 mm), obteniendo que la masa tuvo una reducción a 3500 gr, lo que se traduce a un desgaste de 30% de la muestra inicial tomada. Se presentan los resultados a continuación:

Tabla 27.

Resultados del porcentaje de desgaste del agregado grueso.

Muestra inicial (gr)	Muestra final (gr)	Desgaste (%)
5000	3500	30

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La Norma Venezolana COVENIN 277:2021 explica los requisitos que deben cumplir los agregados para ser utilizados en la elaboración de concretos convencionales y mencionan que el agregado grueso ensayado (piedra) debe presentar un desgaste menor o igual al 40%; traduciendo entonces el resultado de porcentaje de desgaste obtenido se puede decir que el agregado grueso (piedra) estudiado, se encontró dentro de los límites propuestos, contando con una alta resistencia a la abrasión, haciéndolo material óptimo para la elaboración de mezclas de concreto.

Ensayo de determinación de la finura del cemento Portland

Los lineamientos para esta práctica fueron tomados de la Norma Venezolana COVENIN 487:1993 en donde se desea conocer la finura del cemento portland que se utilizará para la elaboración de los cilindros de concreto, en función de la superficie específica. Este ensayo se caracteriza por emplearse solamente al cemento portland y se utiliza un instrumento fundamental denominado aparato de Blaine.

Previo a la elaboración del ensayo el aparato de Blaine debe ser calibrado; considerando que esta calibración es extensa y cuidadosa, fue realizada previamente por los asistentes del laboratorio a manera de agilizar el ensayo y poder obtener resultados acordes, obteniendo un factor de calibración de 43,19 m²/kg.

Una vez calibrado el aparato, se preparó una muestra de cemento portland haciéndola pasar por el tamiz #20 para eliminar grumos y que luego se pesó hasta obtener 2,90 gr (misma cantidad utilizada para la calibración del aparato), la misma se agregó a la célula de permeabilidad con su respectivo disco, filtro y émbolo. Se realizaron cuatro ensayos a fin de promediar los más cercanos y se muestran a continuación:

Tabla 28.

Ensayos para la obtención de la finura del cemento Portland.

Ensayo 1	Peso de la muestra (gr)	2,90
	Tiempo (seg)	150,62
	Temperatura (°C)	26
Ensayo 2	Peso de la muestra (gr)	2,90
	Tiempo (seg)	129,63
	Temperatura (°C)	26
Ensayo 3	Peso de la muestra (gr)	2,90
	Tiempo (seg)	183,87
	Temperatura (°C)	26
Ensayo 4	Peso de la muestra (gr)	2,90
	Tiempo (seg)	162,27
	Temperatura (°C)	27

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Es importante destacar que según los valores obtenidos en la tabla anterior, en algunos intervalos existió una gran diferencia de tiempo producida por distintos factores, es por esta razón que se decidió realizar diversos ensayos de los cuales los más convenientes para la práctica fueron el ensayo 1 y el ensayo 4 por su cercanía en tiempo. Tomando los intervalos mencionados anteriormente y promediando los mismos para realizar los cálculos correspondientes a la finura del cemento Portland, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 29.

Promedio de tiempos y resultado de la finura del cemento Portland.

Promedio tiempo ensayos 1 y 4 (seg)	154,45
Finura cemento Portland (m²/kg)	534,75

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Observando los resultados obtenidos en la tabla anterior, es posible deducir que el cemento Portland estudiado y del que se hará uso en este trabajo de grado fue bastante fino, evidenciándose en su alto valor de finura de 534,75 m²/kg; lo que se traduce en que se esperan asentamientos bajos en la mezcla y una mayor demanda de agua, lo que conduciría a una poca trabajabilidad del concreto en estado fresco y con ello una mayor cantidad de poros al endurecerse el mismo.

Comparando el resultado obtenido con la Norma COVENIN 28:1993, en donde se exponen las especificaciones con respecto al cemento, que se deben tomar en cuenta para la elaboración de concretos convencionales y que se destaca en el anexo A del presente trabajo, se explica que para el ensayo de Finura con el aparato de Blaine se debe obtener un resultado como mínimo de 280 m²/kg; por ende el resultado presentado en la tabla anterior califica dentro del límite mínimo.

Se debe mencionar que el cemento Portland al ser tan fino también ofrece algunas desventajas como un deterioro más rápido producido por la atmosfera o el ambiente, pudiéndose presentar reacciones más fuertes con agregados reactivos alcalinos y son más susceptibles al agrietamiento gracias a que la pasta obtiene una mayor contracción.

Ensayo de consistencia normal del cemento Portland

Para la elaboración de este ensayo se siguieron las indicaciones descritas en la Norma Venezolana COVENIN 494:1994, la cual consistió en determinar la consistencia normal del cemento Portland colocada en un cono troncocónico, una vez la aguja de Vicat haya penetrado 10 ± 1 mm luego de transcurrido 30 segundo de haber soltado la misma. La prueba estuvo destinada a emplearse en el cemento Portland, por lo tanto no se requirió el uso de ningún tipo de agregado, solo una cantidad de agua medida.

Para iniciar la práctica se pesó una muestra de 650 gr de cemento, con la que se fueron realizando diferentes ensayos en el que se variaba la relación agua cemento hasta obtener la consistencia normal de la pasta. Es importante mencionar que la prueba se realizó de manera manual pues no se contaba con una mezcladora mecánica, hecho que pudiese variar el resultado final mínimamente. A continuación se presentan los distintos intervalos, así como el porcentaje y cantidad de agua necesario para que la pasta cumpliera con las especificaciones de la norma:

Tabla 30.

Intervalos y resultados de la consistencia normal del cemento.

Ensayo	Porcentaje de Agua (%)	Cantidad de agua (ml)	Penetración a los 30seg (mm)
1	23,5	152,75	5
2	23,8	154,7	7
3	24,2	157,3	10

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tal como expone la tabla anterior, para que el cemento empleado en el presente trabajo de grado adquiera su consistencia normal, debe poseer una relación de agua del 24,2% y cemento del 75,8%, en otras palabras, la muestra de cemento de 650gr estudiada alcanzará una fluidez ideal y una plasticidad óptima al ser mezclada con 157,3 ml de agua.

Ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland

La práctica anterior y el ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland están relacionados mutuamente, puesto que una vez determinado la relación agua cemento que genere una consistencia normal en la pasta, se deben utilizar esos mismos valores para la pasta a evaluar en esta práctica. Una vez más, para la elaboración de la misma se seguirán los lineamientos expuestos en la Norma Venezolana COVENIN 493:1992, empleando de equipos como aparato de Vicat, balanza, cilindros graduados y cronómetro. La norma explica que el tiempo de fraguado se produce cuando la aguja de Vicat penetra exactamente 25 mm en una pasta de cemento de consistencia normal.

De esta manera se utilizó igualmente una muestra de 650 gr de cemento y 157,3 ml de agua, mezclando según los tiempos de la Norma Venezolana COVENIN 494:1994, colocándola en el cono troncocónico y alineándola con la aguja de Vicat. La misma se dejó descender sobre la pasta y se hacen repeticiones cada 15 minutos, tomando nota de la penetración en cada una de ellas hasta que se alcancen o se sobrepase de los 25 mm. Se presentan los resultados en la tabla continua:

Tabla 31.

Tiempo de fraguado inicial y penetración de la aguja de Vicat.

Repeticiones	Tiempo (min)	Penetración (mm)
		Fraguado Inicial
1	0	42
2	15	41
3	30	40
4	45	37
5	60	12

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tabla 32.

Tiempo de fraguado final y penetración de la aguja de Vicat.

Repeticiones	Tiempo (min)	Penetración (mm)
		Fraguado Final
1	60	22
2	75	4
3	90	3
4	105	0

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Según los datos presentados anteriormente, se observó que la penetración por parte de la aguja de Vicat no siguió un patrón continuo, puesto que en las primeras mediciones la diferencia entre ellas es apenas 1 mm, mientras que al alcanzar la cuarta y la quinta repetición, se presentaron diferencias de 3 mm y 25 mm respectivamente. Por otro lado, el tiempo de fraguado final fue alcanzado en la cuarta repetición habiendo transcurrido 105 min, tomando en cuenta el tiempo ya contado

para el fraguado inicial, en donde la pasta estaba totalmente endurecida o fraguada y la aguja de Vicat no pudo penetrarla.

Ahora bien, es de suma importancia conocer el tiempo exacto en que la aguja de Vicat penetra los 25 mm para el fraguado inicial y notando que no se dispone de un patrón para ello, fue necesario elaborar una gráfica a partir de los datos obtenidos, permitiendo interpolar los mismos y obtener el valor buscado:

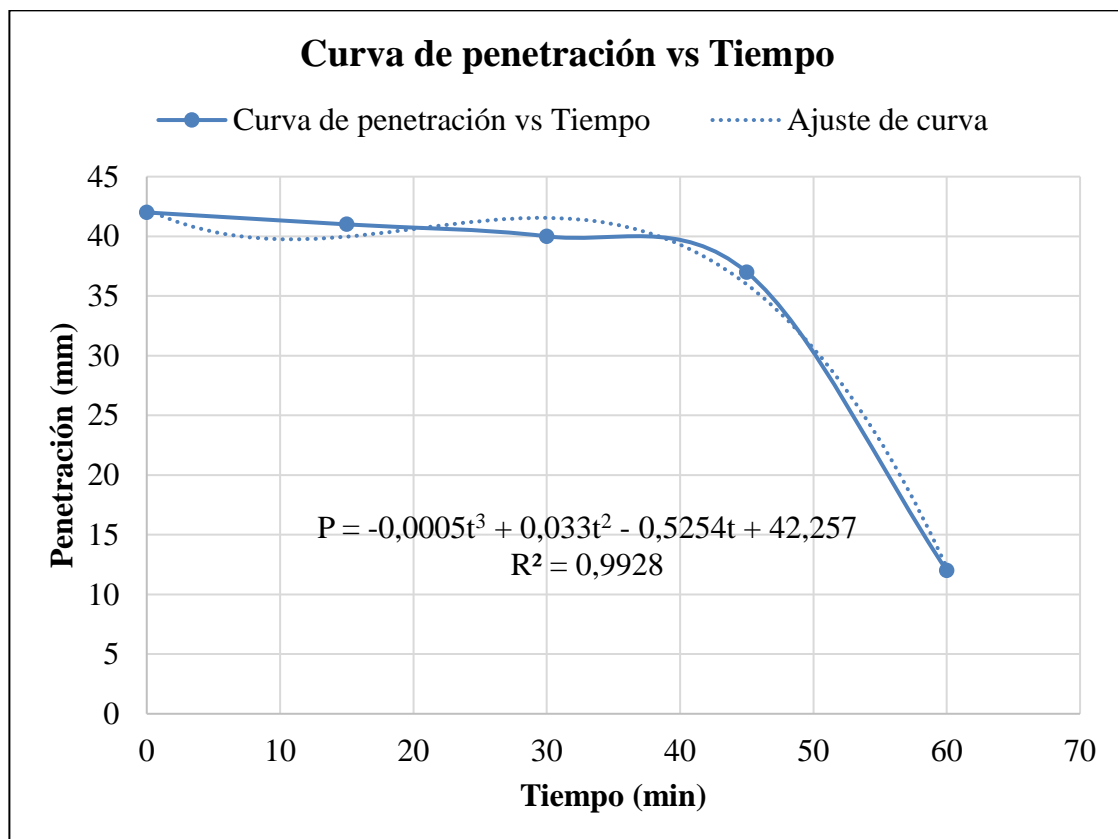


Figura 18. Curva de ajuste para la estimación del tiempo de fraguado inicial. Elaborado por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tomando la ecuación generada por el ajuste de la curva en la figura anterior, se realiza un despeje de “t” que en este caso corresponde al tiempo y haciendo “P” igual a 25 que corresponde a la distancia de penetración a la que se le desea conocer su tiempo, se obtuvo como resultado 58,14 min, siendo el tiempo de fraguado inicial

del cemento Portland en estudio; entendiéndose entonces que a los 58 minutos con 8 segundos y 13 milisegundos, la aguja de Vicat penetra 25 mm de la pasta de consistencia normal. Del mismo modo, es importante destacar que aun conociendo el tiempo exacto de fraguado, no se garantiza que el mismo se cumpla en el concreto elaborado con los diseños de mezcla pues en ellos se ven influenciado otros factores que alteran dicha característica.

Por último, se realizó una verificación según los resultados obtenidos y la Norma COVENIN 28:1993 que trata sobre las especificaciones del cemento Portland para la elaboración de concretos convencionales. Esta última establece que los tiempos para el fraguado inicial con la práctica de la aguja de Vicat debe ser mayor a los 45 minutos, mientras que para el caso del fraguado final no debe exceder los 480 min. Observando los resultados obtenidos con nuestro cemento, es propio indicar que tanto los valores para el fraguado inicial como para el fraguado final, se encontraron dentro de los recomendables por la norma.

Diseños de mezcla de concreto patrón y sustitución parcial del agregado grueso.

Los datos que se obtuvieron de los ensayos anteriores dieron pie para poder elaborar los diseños de mezcla con los que se elaboraron los cilindros de concreto para su posterior análisis. Inicialmente, se propuso un diseño patrón que constaría con una resistencia a compresión de 210 kg/cm^2 para abarcar 1 m^3 de mezcla, al cual se les hizo las modificaciones correspondientes para incluir la sustitución del agregado grueso en un 10% y 15% por material polimérico Polietileno Tereftalato (PET). El desarrollo y los cálculos necesarios para la mezcla patrón se muestran en el anexo B y sus resultados se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 33.

Resumen de dosificaciones de material para un diseño de mezcla de 210 kg/cm² equivalente a 1 m³ (1000 lts).

Material	Peso específico (kg/m³)	Volumen (m³)		Peso (kg/m³)	
Cemento	3150	0,128		404	
Agua	1	0,202		207,95	
Aire	-	0,015		-	
Arena	2570	0,655	0,257	1732,95	665,63
Piedra	2680		0,398		1067,84
		1		2345,42	

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Diseño de mezcla de concreto con resistencia 210 kg/cm² planteado.

Luego de determinar las dosificaciones de cada uno de los componentes que integran la mezcla de concreto, es necesario realizar la equivalencia a los moldes de metal que se encuentran en el laboratorio para así poder luego vaciar la misma y construir las probetas de concreto. Los moldes cilíndricos tienen dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, siendo estas medidas estándares para este tipo de estudios. Para conocer el volumen de los mismos se hizo una multiplicación del área de la sección transversal del molde por su altura, obteniendo un volumen de 5301,44 cm³ para cada cilindro.

La tabla que se muestra a continuación presenta las cantidades necesarias para que la mezcla de concreto logre llenar ocho cilindros, tomando en consideración las dosificaciones planteadas y el volumen de los cilindros. Es importante mencionar que el cálculo se redondeó a 9 probetas, a pesar de que solo se necesitaban ocho; esto a

fin de evitar que hiciera falta mezcla y se presentara un inconveniente al momento del llenado.

Tabla 34.

Diseño de mezclas.

Materiales	1 m³	Patrón	10% sustitución con PET	15% sustitución con PET
Cemento (kg)	404	19,28	19,28	19,28
Agua (Lts)	207,95	9,92	9,92	9,92
Arena (kg)	665,63	31,76	31,76	31,76
Piedra (kg)	1067,84	50,95	45,85	43,31
Plástico (kg)	-	-	5,09	7,64

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

A lo largo de los tres diseños de mezcla planteados en la tabla anterior, se pudo observar que la cantidad de cemento, agua y arena se mantienen constantes, puesto a que no se hizo sustitución de ninguno de estos materiales. Sin embargo, se debe proponer el cálculo para la sustitución del 10% y 15% del agregado grueso por polietileno tereftalato (PET); de esta manera se utilizaron 5,09 kg y 7,64 kg de plástico para la sustitución del 10% y 15% respectivamente de material polimérico, en donde el agregado grueso ocupó entonces 90% y 85% en el diseño de mezcla.

Es importante acotar que al momento de elaborar la mezcla de concreto siguiendo la dosificación planteada anteriormente, se presentaron ciertos inconvenientes técnicos en donde la mezcla se vio influenciada por la demanda de agua debido a la finura del cemento (esta teoría ampliada más adelante), haciendo que se tuviera que diseñar nuevamente la receta para otras cantidades de sustitución parcial de agregado grueso por PET, tal como se muestra a continuación:

Tabla 35.

Diseño de mezclas ajustado a nuevos porcentajes de sustitución.

Materiales	1 m³	Patrón	2% sustitución con PET	5% sustitución con PET	10% sustitución con PET
Cemento (kg)	404	19,28	19,28	19,28	19,28
Agua (Lts)	207,95	9,92	9,92	9,92	9,92
Arena (kg)	665,63	31,76	31,76	31,76	31,76
Piedra (kg)	1067,84	50,95	49,93	48,40	45,85
Plástico (kg)	-	-	1,02	2,55	5,09

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Se observó de la tabla anterior que se propuso la sustitución parcial de agregado grueso por polietileno tereftalato a un 2%, 5% y 10%, aplicándose entonces cantidades de 1,02 kg, 2,55 kg y 5,09 kg respectivamente; a fin de obtener resultados pertinentes para la investigación.

Por otro lado, la elaboración de cada una de las mezclas se llevó a cabo en dos repeticiones, a manera de crear una base de datos y diseñar una comparación estadística por repetibilidad en mezclas con dosificaciones idénticas; de tal manera se optó nombrar cada una de ellas de la siguiente forma:

Tabla 36.

Caracterización de las mezclas.

Identificación	Tipo de mezcla	Cantidad de probetas
MP-1	Concreto Patrón 1	8
MP-2	Concreto Patrón 2	8
S2%-1	1era sustitución 2%	8
S2%-2	2da sustitución 2%	8
S5%-1	1era sustitución 5%	8
S5%-2	2da sustitución 5%	8
S10%-1	1era sustitución 10%	8
S10%-2	2da sustitución 10%	8

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Ensayo de asentamiento

El ensayo para determinar el asentamiento del concreto en estado fresco se elaboró siguiendo el planteamiento que se encuentra en la Norma Venezolana COVENIN 339:2003, en donde se explica que es necesario el uso del cono de Abrams, como de una barra compactadora y una cinta métrica; midiendo la distancia entre el cono y el descenso de la mezcla.

Los diseños de mezcla propuestos se elaboraron teniendo en cuenta un asentamiento de 7 pulgadas, de manera que el resultado obtenido una vez realizada la mezcla de concreto y ensayada la muestra, debe ser igual o estar cercano al valor propuesto. Los resultados de asentamiento para cada una de las mezclas fueron los siguientes:

Tabla 37.

Asentamiento de las mezclas.

Identificación	Asentamiento (pulg)
MP-1	7,5
MP-2	7
S10%-1	3,5
S10%-2	3
S15%-1	-
S15%-2	-

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Como se observa en la tabla 37, al medir el asentamiento de las mezclas de concreto patrón se obtuvieron valores cercanos al calculado, siendo los mismos de 7,5 y 7 pulgadas, los cuales comparándolos con las especificaciones de la Norma COVENIN 633:2001, se considera el asentamiento de las mezclas como aceptable.

Del mismo modo, estudiando el asentamiento obtenido en las mezclas con la sustitución parcial por polietileno tereftalato (PET), se nota que inicialmente para las mezclas de 10% los porcentajes estuvieron por debajo del calculado, obtenido valores de 3,5 y 3 pulgadas.

Tomando en cuenta la problemática anterior y proyectando que para el asentamiento de sustitución parcial del 15% se estimó un valor mucho más bajo, generando poca fluidez y trabajabilidad, se decidió modificar los porcentajes de sustitución parcial del agregado grueso por 2% y 5% de PET, de forma que la dosificación de las mezclas quedó de la forma que muestra siguiente tabla:

Tabla 38.

Asentamiento de las nuevas mezclas.

Identificación	Asentamiento (pulg)
MP-1	7,5
MP-2	7
S2%-1	7
S2%-2	6
S5%-1	5
S5%-2	5
S10%-1	3,5
S10%-2	3

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

De la tabla anterior se observa como a medida que se agrega mayor cantidad de plástico a la mezcla, la misma disminuye su asentamiento a causa de la gran absorción de agua, tal y como se proyectaba anteriormente; traduciéndose en una mezcla menos fluida y por ende poco trabajable. De esta manera las mezclas con sustitución parcial de 2% presentaron un asentamiento de 7 y 6 pulgadas, mientras que las mezclas con sustitución parcial de 5% presentaron ambos asentamientos de 5 pulgadas.

Según la Norma Venezolana COVENIN 633:2001 la tolerancia en la medición del asentamiento en este caso es de $\pm 2,5$ (presentada en el anexo A), por tanto, la mezcla con sustitución del 2% y 5% califican dentro del rango aceptado, mientras que los resultados obtenidos para las mezclas de 10% no cumplen con dicha condición.

Tomando en cuenta que la finura del cemento es muy alta y por ende, genera problemas en la demanda de agua que afecta la trabajabilidad de la mezcla, este

comportamiento se incrementa a medida que se añade más polímero a la misma, ya que la relación agua/cemento no se modificó.

Ensayo de Resistencia a compresión de las probetas de concreto y fallas.

El ensayo de resistencia a compresión se realizó una vez diseñadas las mezclas, preparados los cilindros, efectuado el desencofrado de los mismos y habiendo transcurrido el tiempo necesario de curado; siguiendo los parámetros enmarcados en la Norma Venezolana COVENIN 338:2002, en donde se hizo uso de una máquina de compresión con tal fuerza que permitió la ruptura de las probetas.

Las pruebas se efectuaron en cilindros que han sido curados por 7 y 28 días, contados desde el momento en que se introducen en el agua para su curado. Inicialmente los cilindros evaluados fueron pesados y medidos, a fin de conocer sus dimensiones dando paso a los cálculos correspondientes. Luego, estos fueron introducidos en la máquina de resistencia a compresión, con la que se obtuvo el valor de resistencia y la carga soportada por las probetas. A fin de minimizar el error que pudiese existir en la medición de este ensayo, se pusieron a prueba dos probetas, de manera que se identifique si existe alguna discrepancia en los mismos o en tal caso que se confirmen ambos.

Concreto Patrón

La tabla que se muestra a continuación expresa los valores medidos a través de la evaluación de la resistencia a compresión de las probetas realizadas con la primera y segunda mezcla patrón (MP-1 y MP-2) a los 7 y 28 días de curado.

Tabla 39.

Resultados probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 a los 7 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
26/1/2023	MP-1	1	15,00	30,00	12542,0	175,93	28100	159,72	157,31	3,42
			15,00	30,00						
			14,90	30,00						
		2	15,00	29,90	12578,0	175,93	27250	154,89		
15,00	30,00									
15,10	30,00									
06/03/2023	MP-2	1	15,00	29,90	12685,0	175,93	45510	258,68	257,51	1,65
			14,90	29,90						
			15,00	30,00						
		2	15,00	30,00	12645,0	176,71	45300	256,35		
15,00	29,90									
15,00	30,00									

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Según los resultados que se obtuvieron a través del ensayo de resistencia a compresión para la mezcla MP-1, se observó que las probetas estudiadas adoptaron una resistencia a compresión de 159,72 Kgf/cm² y 154,89 Kgf/cm², teniendo una diferencia entre ellas de 4,83 Kgf/cm² considerándose no tan alejadas una de otra. De igual manera, las resistencias a compresión obtenidas para la mezcla MP-2 fueron de 258,68 Kgf/cm² y 256,35 Kgf/cm² respectivamente, encontrando una diferencia una con respecto a la otra de 2,33 Kgf/cm² siendo las mismas cercanas.

La Norma COVENIN establece que a los 7 días de curado las probetas deben adquirir como mínimo un 75% de la resistencia a compresión calculada; en donde para la mezcla MP-1, se obtuvo un valor de resistencia a compresión promedio de 157,31 Kgf/cm² que equivale al 74,91%, encontrándose cercano al límite impuesto por la norma. Haciendo el mismo estudio para la mezcla MP-2 la resistencia a compresión promedio fue de 257,51 Kgf/cm², equivalente al 122,62%, superando el

valor de referencia de la norma. Tomando en cuenta que los valores promedios fueron muy cercanos o excedieron a lo impuesto por la Norma COVENIN, se consideraron los mismos como aceptables.

Por último, la Norma COVENIN mencionada anteriormente establece además que la desviación estándar en los ensayos de resistencia a compresión de una muestra debe ser como máximo 8 Kgf/cm², considerando que la desviación estándar de la mezcla MP-1 y MP-2 es de 3,42 Kgf/cm² y 1,65 Kgf/cm² respectivamente, se puede deducir que los resultados obtenidos a través de la prueba de resistencia a compresión de ambas mezclas son confiables y pueden ser considerados para su análisis.



Figura 19. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-1 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 20. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-2 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

A través de las figuras previas, es posible visualizar las fallas que presentaron los cilindros de concreto patrón MP-1 y MP-2 ensayados a compresión luego de 7 días de curado, según lo establecido en la Norma COVENIN 338:2002 y representado por la figura 13.

Para el caso de las probetas MP-1, ambas cumplieron con un tipo de falla por corte #4, la cual está caracterizada por una ruptura en una de las esquinas del cilindro. En el cilindro #1 se observó como la falla por corte se produce en la parte inferior de la probeta, mientras que para el cilindro #2 dicha falla se evidenció en la parte superior de la misma.

Del mismo modo, las probetas correspondientes a la mezcla MP-2 presentaron además fallas por corte pero diferentes entre sí. Observando la falla del cilindro #1 se clasificó la misma como falla por corte #3 en donde inició desde una de las esquinas de la probeta y terminó en la esquina opuesta de la misma, presentando además

desprendimiento de su masa. Para el caso del cilindro #2, ocurrió un tipo de falla por corte #4, que tal como se describe en los resultados de los cilindros MP-1, se presentó el corte en la parte inferior de la probeta con desprendimiento de su masa.

De esta manera, también se realizó el estudio para las probetas elaboradas con las mezclas MP-1 y MP-2 una vez fueron curadas a 28 días. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 40.

Resultados probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 a los 28 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
16/02/2023	MP-1	1	14,90	30,00	12531,0	176,01	38690	219,62	218,62	1,70
			15,00	29,90						
			15,01	30,00						
		2	15,00	30,00	12584,0	175,93	38250	217,42		
15,00	29,90									
14,90	29,90									
27/03/2023	MP-2	1	15,00	29,90	12667,0	175,15	56950	325,15	321,42	5,28
			14,90	29,90						
			14,90	29,90						
		2	15,00	30,00	12817,0	175,93	55890	317,68		
15,00	29,90									
14,90	30,00									

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

El análisis de los resultados para las probetas evaluadas anteriormente es similar a las estudiadas para 7 días. Para este caso, es posible observar que las probetas elaboradas con la mezcla MP-1 obtuvieron a los 28 días una resistencia a compresión de 219,62 Kgf/cm² y 217,42 Kgf/cm² respectivamente, habiendo una diferencia entre ellas de 2,2 Kgf/cm². Igualmente, para la mezcla MP-2 los cilindros adoptaron una resistencia a compresión de 325,15 Kgf/cm² y 317,68 Kgf/cm², con

diferencia entre ambas de 7,47 Kgf/cm². En general los cilindros obtuvieron una resistencia a compresión promedio de 218,62 Kgf/cm² para la mezcla MP-1 y de 321,42 Kgf/cm² para la mezcla MP-2.

Por otro lado, ya pasados los 28 días de curado se evidenció que tanto para la mezcla MP-1 como para la mezcla MP-2, la resistencia a compresión alcanzadas por las probetas superó la resistencia mínima calculada inicialmente en un 4,10% y 53,06%, traduciéndose en que al utilizar el diseño de mezcla con el que se elaboraron las probetas se alcanzaran resistencias a compresión óptimas luego de haberse curado por 28 días.

Del mismo modo, la desviación estándar entre las probetas de la mezcla MP-1 Y MP-2 son de 1,70 Kgf/cm² y 5,28 Kgf/cm², confirmando que los resultados obtenidos son aceptables puesto que no superan la máxima desviación estándar impuesta por la Norma COVENIN de 8 Kgf/cm².



Figura 21. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-1 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 22. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-2 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tanto en la figura 21 y 22 se pudieron evidenciar las fallas producidas en los cilindros a causa del ensayo de compresión una vez transcurridos los 28 días de curado. El cilindro #1 de la mezcla MP-1 presentó una falla por corte de tipo #3, en donde la misma inició desde una esquina de la probeta y recorre esta hasta la esquina opuesta de ella, causando desprendimiento de su masa; por otro lado, el cilindro #2 de la misma mezcla, detalló además una falla por corte pero esta vez de tipo #4, donde se observó un corte en la parte inferior del cilindro resultando en el desprendimiento de su masa.

A su vez, las probetas elaboradas con la mezcla MP-2 presentaron además fallas por corte. El cilindro #1 adoptó una falla por corte #3 evidenciándose como su ruptura se produce de forma diagonal desde una de las esquinas del cilindro hasta la que se encuentra opuesta, generándose un desprendimiento de un poco más de la

mitad de su masa total; mientras que para el caso del cilindro #2 se presentó una falla por corte #4, ocurriendo en la parte inferior de la probeta.

Concreto con sustitución de 2%.

A continuación se muestran los valores presentados al momento de realizar el ensayo de compresión para las probetas con sustitución parcial de agregado grueso por PET en un 2%:

Tabla 41.

Resultados probetas de concreto con sustitución S2%-1 Y S2%-2 a los 7 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
07/03/2023	S2%-1	1	15,00	29,90	12350,0	176,71	26750	151,37	156,31	6,98
			15,00	29,90						
			15,00	30,00						
		2	15,00	29,90	12380,0	177,50	28620	161,24		
08/03/2023	S2%-2	1	15,00	29,90	12500,0	175,15	21530	122,93	127,53	6,51
			14,90	29,90						
			14,90	29,90						
		2	15,00	29,90	12360,0	176,71	23350	132,13		
			15,00	29,90						

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Como se observa en la tabla anterior, las probetas estudiadas que disponían de sustitución del 2% de plástico polietileno tereftalato, para la mezcla S2%-1 contaron con una resistencia a compresión a los 7 días de curado de 151,37 Kgf/cm² y 161,24 Kgf/cm², con una diferencia entre ellas de 9,87 Kgf/cm²; mientras que para la mezcla

S2%-2 contaron con resistencias a compresión de 122,93 Kgf/cm² y 132,13 Kgf/cm² respectivamente, siendo la diferencia entre ellas de 9,2 Kgf/cm². Tal como lo explica la Norma COVENIN, el resultado de dos ensayos será el promedio de los mismos, observando para la mezcla S2%-1 una resistencia a compresión promedio de 156,31 Kgf/cm² y para la mezcla S2%-2 de 127,53 Kgf/cm².

Del mismo modo, se evidenció que para este caso de sustitución, ambas probetas de cada mezcla se encontraron por debajo de lo estipulado por la Norma COVENIN con respecto a la resistencia a compresión a los 7 días. Sin embargo, los resultados promedios presentados por la primera mezcla se encontraron bastante cercanos al límite de 75% con un valor de 74,43%; mientras que para la segunda mezcla los resultados promedios fueron más bajos obteniendo un porcentaje de 60,73%.

Por último, la Norma COVENIN indica que la desviación estándar entre dos pruebas no debe exceder los 8 Kgf/cm² a fin de que los resultados sean confiables. Según los resultados expuestos se contó con una desviación estándar para la mezcla S2%-1 de 6,98 Kgf/cm² y de 6,51 Kgf/cm² para la mezcla S2%-2, haciendo los resultados de ambas aceptables.



Figura 23. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-1 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 24. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-2 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Las figuras anteriores destacan las fallas obtenidas mediante el ensayo a compresión de las probetas realizadas con las mezclas de sustitución parcial del 2% S2%-1 y S2%-2. Para el primer caso, el cilindro #1 presentó una falla por corte #4 en donde como se ha explicado anteriormente se produce en una de las esquinas de la probeta provocando una separación de su masa. Por otro lado, el cilindro #2 presentó una falla por compresión #1 evidenciándose desprendimiento de su masa en la zona central de la probeta, extendiéndose grietas a partir de la misma.

Para el caso de las probetas elaboradas con la mezcla S2%-2, ambas presentaron fallas por compresión de diferentes tipos. El cilindro #1 demostró una falla por compresión #1 iniciando la ruptura en el centro de la probeta y extendiéndose a lo largo de la misma con grietas diagonales; mientras que para el cilindro #2 la falla es de compresión #2, con rupturas verticales que inician desde la parte inferior de la probeta y prolongándose hasta la parte superior de la misma.

A continuación, se elaboró el estudio de la resistencia a compresión a 28 días de curado tanto para la mezcla S2%-1 como para la mezcla S2%-2, mostrando los resultados a continuación:

Tabla 42.

Resultados probetas de concreto con sustitución S2%-1 Y S2%-2 a los 28 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
28/03/2023	S2%-1	1	14,90	29,90	12400,0	175,93	33930	192,86	198,54	8,04
			15,00	30,00						
			15,00	30,00						
		2	15,00	29,90	12435,0	175,15	35770	204,23		
14,90	29,90									
14,90	30,00									
29/03/2023	S2%-2	1	15,00	29,90	12540,0	176,71	33080	187,19	192,80	7,93
			15,00	30,00						
			15,00	30,00						
		2	14,90	30,00	12405,0	175,15	34750	198,40		
15,00	29,90									
14,90	30,00									

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Para el caso presentado anteriormente, se pudo visualizar que al ensayar las probetas curadas a 28 días se obtuvieron resultados de resistencia a compresión para la mezcla S2%-1 de 192,86 Kgf/cm² y 204,23 Kgf/cm²; mientras para la mezcla S2%-2 de 187,19 Kgf/cm² y 198,40 Kgf/cm², diferenciándose entre ambas en un valor de 11,37 Kgf/cm² y 11,21 Kgf/cm² respectivamente. Calculando la resistencia a compresión promedio de cada una de las mezcla se obtuvieron resultados de 198,54 Kgf/cm² y 192,80 Kgf/cm².

Analizando los resultados, se observó que en ambas mezclas ensayadas la resistencia a compresión obtenida se encuentra por debajo de la resistencia a compresión propuesta de 210 Kgf/cm² y por ello no cumple con esta condición de diseño, llegando a alcanzar solo un 94,54% y 91,80%; porcentajes que a pesar de su

valor no se encuentran tan alejados del diseño restando un 5,46% y 8,19% para alcanzar la resistencia a compresión requerida de 210 Kgf/cm².

De igual manera, la desviación estándar entre muestras para la mezcla S2%-1 fue superada por solo 0,04 Kgf/cm², mientras que para la mezcla S2%-2 estuvo cercano al límite pero no lo pasa. En ambos casos se obtuvieron valores de 8,04 Kgf/cm² y 7,93 Kgf/cm² respectivamente



Figura 25. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-1 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 26. Fallas en los cilindros con sustitución del 2% S2%-2 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Mediante las figuras 25 y 26 se detallaron las diferentes fallas ocurridas en las probetas elaboradas con sustitución del 2% ensayadas a compresión al cumplir los 28 días de curado. Para el caso de la primera mezcla (S2%-1) el primer cilindro presentó una falla de corte #4, observándose un grieta en posición diagonal en la parte inferior de la probeta produciendo separación de su masa; mientras que en el cilindro #2 ocurrió el mismo comportamiento, se puede presenciar inicialmente una falla de corte #4 en la parte superior de la probeta, la cual genera grietas a lo largo de la misma produciendo desprendimiento de su masa.

Del mismo modo, evaluando las probetas elaboradas con la segunda mezcla (S2%-2), tanto el primer cilindro como el segundo, presentaron falla por corte #4 con una ruptura en la parte inferior de cada probeta desprendiendo un poco su masa.

Concreto con sustitución de 5%.

Siguiendo con el mismo orden de ideas, se evaluó la resistencia a compresión de las probetas con sustitución parcial de agregado grueso por polietileno tereftalato en un 5%, mostrando los resultados en la tabla siguiente:

Tabla 43.

Resultados probetas de concreto con sustitución S5%-1 Y S5%-2 a los 7 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
9/03/2023	S5%-1	1	15,00	29,90	12230,0	176,64	27190	153,93	148,21	8,09
			14,99	29,90						
			15,00	29,90						
		2	15,00	29,90	12245,0	176,71	25180	142,49		
15,00	30,00									
21/03/2023	S5%-2	1	15,00	29,90	12430,0	176,71	26140	147,92	147,73	0,28
			15,00	30,00						
			15,00	29,90						
		2	15,00	29,90	12370,0	175,15	25840	147,53		
		14,90	30,00							
		14,90	30,00							

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tal y como se describe en la tabla anterior, para las probetas ensayadas a 7 días con sustitución del 5% de su agregado grueso, se obtuvieron resultados de 153,93 Kgf/cm² y 142,49 Kgf/cm² para la mezcla S5%-1, con diferencia entre ellas de 11,44 Kgf/cm²; mientras que para el caso de la mezcla de S5%-2 los resultados de resistencia a compresión obtenidos fueron de 147,92 Kgf/cm² y 147,53 Kgf/cm², observándose una diferencia entre probetas de 0,39 Kgf/cm². En general, la

resistencia a compresión promedio para cada uno de los casos fueron 148,21 Kgf/cm² y 147,73 Kgf/cm².

Tomando en cuenta los últimos valores presentados, se evidencia que las probetas se encuentran por debajo del 75% mínimo establecido por la Norma COVENIN, obteniendo valores de 70,57% y 70,34%. Por otro lado, al detallar la desviación estándar de las mezclas, la primera mezcla con esta sustitución se encuentra en el límite recomendado con un valor de 8,09 Kgf/cm² y la segunda mezcla si posee un valor más bajo con 0,19 Kgf/cm², validando los resultados obtenidos.



Figura 27. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-1 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 28. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-2 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Las figuras presentadas anteriormente, destacan los tipos de fallas en los cilindros una vez se les ha ensayado en la prensa de compresión. Para los cilindros de la mezcla S5%-1 en ambos casos se presentaron fallas a compresión #2, que tal como se describe en apartados anteriores, se caracteriza por grietas verticales en donde para el primer cilindro las mismas comenzaron en la parte superior mientras que para el segundo cilindro iniciaron en la parte inferior, ambas extendiéndose a lo largo de las probetas.

Analizando los cilindros realizados con la mezcla S5%-2, es posible apreciar que para el primer cilindro se presentó una falla de corte #3, evidenciándose una pequeña grieta diagonal desde una esquina de la probeta hasta la esquina opuesta con muy poco desprendimiento de su masa; mientras que para el cilindro #2 se presentó una falla de compresión #2, mostrando grietas en la parte inferior de la probeta que adoptaron una dirección vertical desplazándose a la parte superior de la misma, de igual manera el desprendimiento y separación de su masa es poca.

El estudio también se aplicó para las probetas que habían cumplido los 28 días de curado, evaluando su resistencia a compresión una vez se sustituyó parcialmente el 5% de su agregado grueso. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 44.

Resultados probetas de concreto con sustitución S5%-1 Y S5%-2 a los 28 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
30/03/23	S5%-1	1	14,90	29,90	12250,0	175,15	34490	196,92	199,41	3,52
			15,00	29,90						
			14,90	29,90						
		2	15,00	30,00	12242,0	175,93	35520	201,90		
11/04/2023	S5%-2	1	14,90	29,90	12325,0	175,15	32050	182,99	185,45	3,48
			14,90	30,00						
			15,00	30,00						
		2	15,00	30,00	12255,0	175,93	33060	187,92		
		14,90	29,90							
		15,00	30,00							

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Según lo expuesto en la tabla anterior, al ensayar los cilindros con los diseños de mezcla S5%-1 y S5%-2 curados a los 28 días, se obtuvieron resultados de 196,92 Kgf/cm² y 201,90 Kgf/cm² para el primer caso; mientras que para el segundo caso se adoptaron resistencias a compresión de 182,99 Kgf/cm² y 187,92 Kgf/cm². Siguiendo su estudio, las probetas ofrecieron una resistencia a compresión promedio de 199,41 Kgf/cm² y 185,45 Kgf/cm² tanto para la mezcla de S5%-1 y S5%-2.

Tal y como se evaluó en apartados anteriores, las resistencia a compresión obtenidas a los 28 días para probetas con sustitución parcial del 5% no superaron la

resistencia a compresión propuesta en el diseño de mezcla, haciendo falta 10,59 Kgf/cm² y 24,55 Kgf/cm² para poder alcanzar la misma. Por otro lado, la desviación estándar obtenida en ambas mezclas de 3,52 Kgf/cm² y 3,48 Kgf/cm², encontrándose por debajo del límite de la Norma COVENIN de 8 Kgf/cm², asegurando la confiabilidad de los resultados.

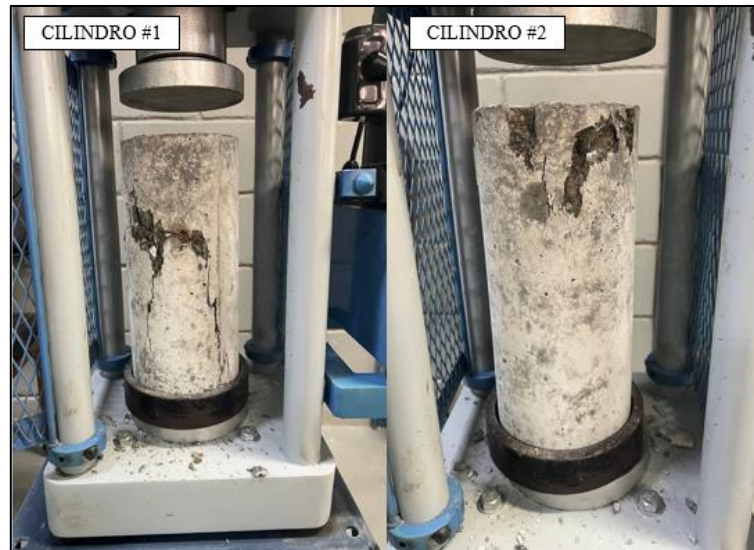


Figura 29. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-1 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 30. Fallas en los cilindros con sustitución del 5% S5%-2 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

En las figuras 29 y 30 se pueden observar las fallas presentadas por los cilindros evaluados a 28 días tanto de la mezcla S5%-1 como de la mezcla S5%-2. Para el caso de la primera mezcla, el cilindro #1 presentó una falla de corte #3, con una clara fisura diagonal que inicia desde la parte inferior de la probeta y se distribuye a lo largo de la misma provocando un desprendimiento en la zona central de la misma; mientras que en el segundo cilindro se destacó además una falla de corte siendo en este caso #4, con desprendimiento de su masa en la zona superior izquierda de la probeta.

Para las probetas de la segunda mezcla (S5%-2), ambos cilindros presentaron fallas por compresión #2, en donde se produjo una ruptura con fisuras verticales desplazándose para el cilindro #1 desde la parte inferior de la probeta hasta su parte superior; mientras que para el cilindro #2 se destaca en la zona superior del mismo pero no se desliza a lo largo de la probeta. En ambos casos las fisuras provocan separación y desprendimiento de sus masas.

Concreto con sustitución de 10%.

Siguiendo con la investigación planteada, se evaluó la resistencia a compresión de los cilindros con sustitución parcial de agregado grueso del 10%, analizando primeramente las probetas curadas a 7 días; resultados que se muestran en la tabla adyacente:

Tabla 45.

Resultados probetas de concreto con sustitución S10%-1 Y S10%-2 a los 7 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
6/02/23	S10%-1	1	15,00 14,90 14,90	29,90 30,00 29,90	11913,0	175,15	21200	121,04	120,23	1,14
		2	14,90 15,00 15,00	29,90 30,00 29,90						
16/02/23	S10%-2	1	14,90 15,00 14,90	29,90 29,90 30,00	10878,0	175,15	5540	31,63	33,09	2,06
		2	15,00 14,90 14,90	29,90 30,00 30,00						

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La tabla anterior muestra los resultados de la resistencia a compresión de cilindros con sustitución de 10% de su agregado grueso por polietileno tereftalato (PET), obteniendo valores de 121,04 Kgf/cm² y 119,42 Kgf/cm² para la primera mezcla con una diferencia entre cilindros de 1,62 Kgf/cm². Por otro lado, la segunda mezcla adoptó resultados de 31,63 Kgf/cm² y 34,54 Kgf/cm², presentando una diferencia de 2,91 Kgf/cm². El promedio de resistencia a compresión para la mezcla S10%-1 y S10%-2 fue de 120,23 Kgf/cm² y 33,09 Kgf/cm² respectivamente.

Los resultados de resistencia a compresión de las mezclas para este caso se encontraron por debajo del 75% mínimo planteado por la Norma COVENIN, y por ende no cumplen con dicha condición. Al analizar estos resultados es posible observar que son bastante bajos en comparación con las otras sustituciones.

La desviación estándar calculadas para cada ensayo fue bastante buena, obteniendo resultados de 1,14 Kgf/cm² y 2,06 Kgf/cm²; los cuales no pasan el límite de 8 Kgf/cm² establecido por norma y confirmando que los resultados son confiables.



Figura 31. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-1 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 32. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-2 a los 7 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Mediante las figuras 31 y 32 fue posible determinar qué tipo de fallas presentaron las probetas fabricadas con las mezclas S10%-1 Y S10%-2 luego de haber transcurrido 7 días de curado y de haber realizado el ensayo a compresión. Con respecto a la primera mezcla, el cilindro #1 presentó una falla de corte #4, observándose un agrietamiento en la esquina superior derecha del mismo con muy poca separación de su masa; mientras que para el cilindro #2 se evidenció una falla de corte #3 en donde la grieta se presenta en diagonal a lo largo de la probeta, con desprendimiento de su masa en el centro de la misma.

Analizando las fallas del ensayo de compresión para la segunda mezcla con sustitución del 10% (S10%-2), se detalla que en el primer cilindro no se observó ningún tipo de falla externa en la probeta, probablemente porque la misma cedió internamente debido a la gran cantidad de espacio entre la mezcla y los agregados, sin mostrar grietas o pérdidas de masa en su exterior; mientras que en el cilindro #2 se presentó una falla de compresión #1, mostrando una separación de su masa en la zona central de la probeta extendiéndose alrededor de este punto.

Seguidamente se extendió el análisis a las probetas con la misma sustitución de agregado grueso, pero esta vez se ensayaron las curadas a los 28 días, obteniendo los resultados siguientes:

Tabla 46.

Resultados probetas de concreto con sustitución S10%-1 Y S10%-2 a los 28 días de curado.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
28/02/23	S10%-1	1	14,90	29,90	11918,0	175,15	29590	168,94	163,37	7,89
			15,00	29,90						
			14,90	30,00						
		2	15,00	30,00	11848,0	175,93	27760	157,79		
09/03/23	S10%-2	1	15,00	30,00	11115,0	175,93	7900	44,90	40,33	6,47
			15,00	30,00						
			14,90	30,00						
		2	15,00	30,00	10727,0	175,93	6290	35,75		
			14,90	30,00						

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La tabla presentada anteriormente establece los resultados obtenidos del ensayo de compresión realizado a probetas elaboradas con mezclas de sustitución del 10% una vez transcurrieron 28 días de su curado. Se puede observar que para la primera mezcla (S10%-1) se obtuvieron resistencias a compresión de 168,94 Kgf/cm² y 157,79 Kgf/cm²; mientras que para la segunda mezcla con dicha sustitución (S10%-2), las resistencias a compresión fueron de 44,90 Kgf/cm² y 35,75 Kgf/cm². En general, el promedio de resistencia a compresión para ambas mezclas fue de 163,37 Kgf/cm² y 40,33 Kgf/cm².

En la evaluación a los 28 días de los cilindros con sustitución del 10% ocurre la misma situación que para la evaluación a los 7 días; los resultados obtenidos se encuentran por debajo de la resistencia calculada y no cumplen con la misma, con porcentajes alcanzados del 77,79% y 19,20% respectivamente.

Por otro lado, se puede garantizar la confiabilidad de los resultados pues los mismos no sobrepasan los 8 Kgf/cm² establecidos por la norma con respecto a la desviación estándar entre probetas; siendo estos de 7,89 Kgf/cm² y 6,47 Kgf/cm².

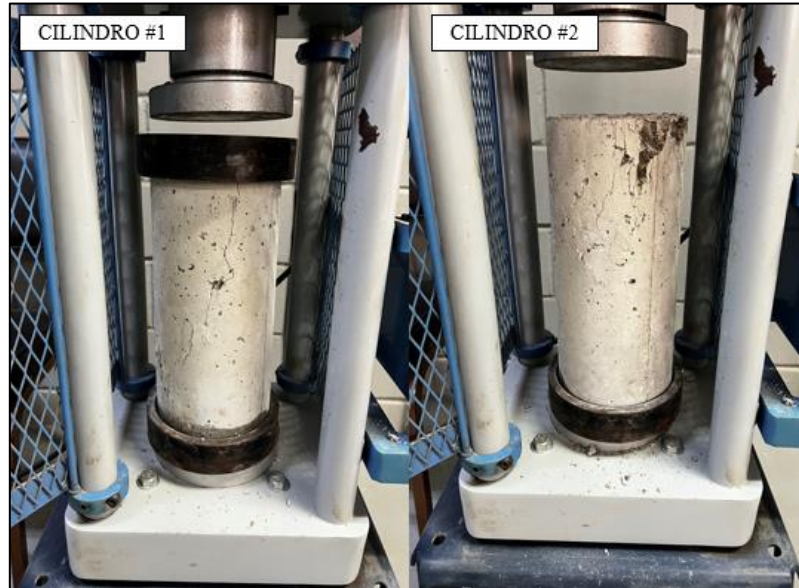


Figura 33. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-1 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

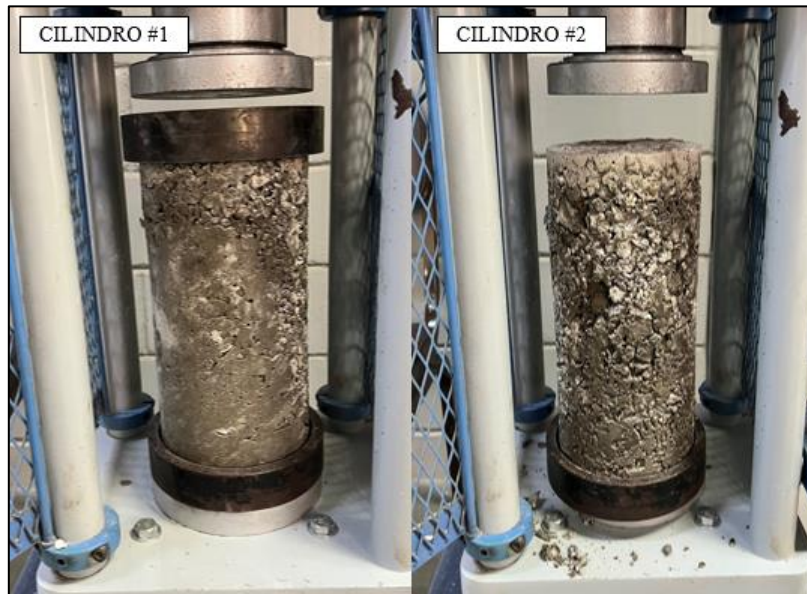


Figura 34. Fallas en los cilindros con sustitución del 10% S10%-2 a los 28 días. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Las figuras 33 y 34 destacan las fallas presentadas por probetas con sustitución del 10% a los 28 días de curado. Tal y como se evidenció, el cilindro #1 de la primera mezcla con sustitución (S10%-1) presentó una falla de corte #3, detallándose una grieta diagonal desde la parte superior de la probeta hasta su zona inferior en donde se produce una mínima separación de su masa; mientras que en el cilindro #2 se destacó una falla por corte #4 en donde se genera una grieta con desprendimiento de su masa en la esquina superior derecha de la probeta, desplegándose a lo largo de la misma.

Del mismo modo, se realizó el análisis de los cilindros elaborados con la segunda mezcla con sustitución (S10%-2) en donde no se distinguieron fallas en el exterior de las probetas para ambos casos, sin embargo, el cilindro #2 si presentó separación de su masa ubicada en el centro de la misma. Como se describía anteriormente, el no presentar fallas en el exterior no descarta la posibilidad de que las mismas ocurrieran internamente y pudo estar provocada por la elasticidad que le otorga la gran cantidad de plástico agregado a la mezcla.

Resumen y análisis de los resultados obtenidos mediante el ensayo de compresión.

A continuación se desglosa un resumen de los resultados obtenidos luego de evaluar la resistencia a compresión de las probetas propuesta para dicho estudio, a fin de analizar los mismos como un todo, comparar los datos conseguidos y observar su representación gráfica. La tabla resumen se muestra seguidamente:

Tabla 47.

Resumen de resultados obtenidos mediante el ensayo a compresión en probetas con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato.

Mezcla	Resistencia a compresión promedio a los 7 días (Kgf/cm²)	Resistencia a compresión promedio a los 28 días (Kgf/cm²)
MP-1	157,31	218,62
MP-2	257,52	321,42
S2%-1	156,31	198,55
S2%-2	127,53	192,80
S5%-1	148,21	199,41
S5%-2	147,73	185,45
S10%-1	120,23	163,37
S10%-2	33,09	40,33

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tal como lo expresa la Norma Venezolana COVENIN 338:2002, se promediaron los resultados de resistencia a compresión de las dos probetas elaboradas para cada mezcla, de manera que se tenga una muestra representativa. Así mismo, se presenta a continuación la representación gráfica de dichos resultados para un mejor análisis y entendimiento:

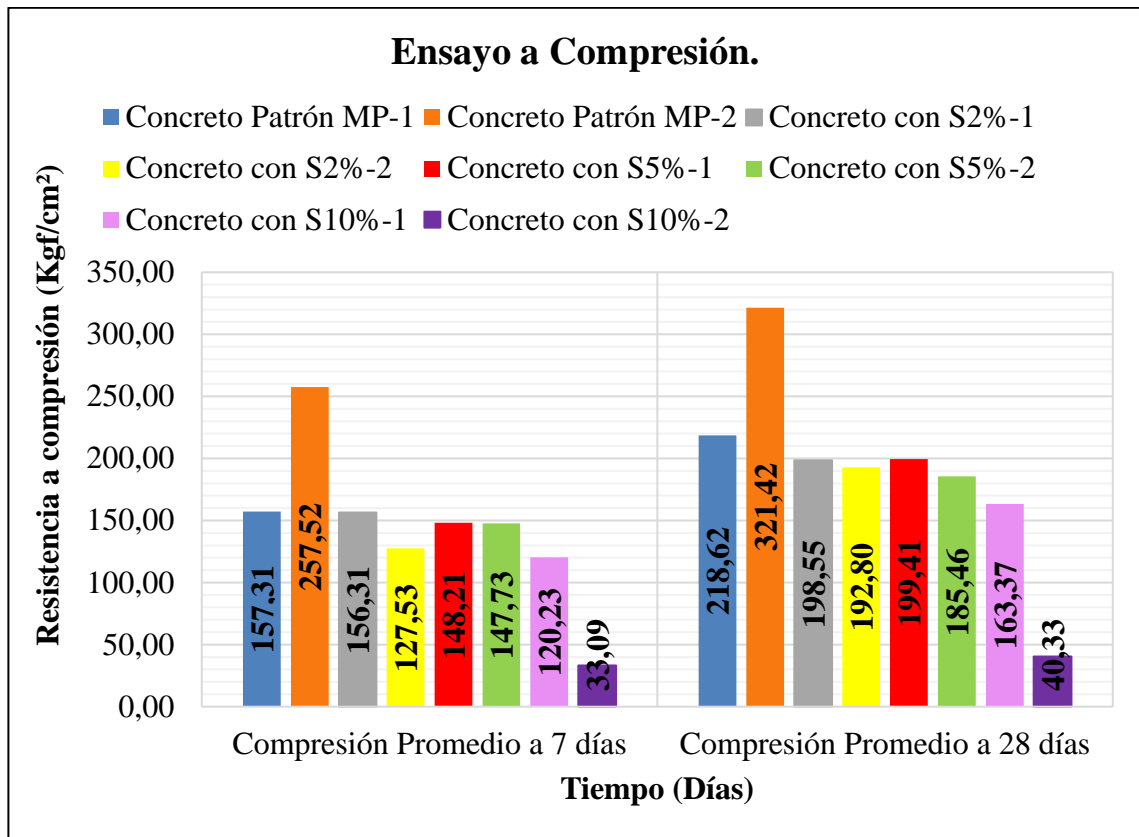


Figura 35. Representación gráfica de los resultados de resistencia a compresión para cada una de las mezclas. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

En la figura mostrada anteriormente se observan los resultados de los ensayos de resistencia a compresión de manera gráfica, en donde en primera instancia se evidenció que los valores de resistencias a compresión aumentaron a medida que disponen de mayor tiempo de curado; característica bastante común en los concretos. Del mismo modo, el análisis se dividió según los resultados obtenidos en la evaluación a los 7 y 28 días de curado; en donde a simple vista se detalló que la segunda mezcla patrón (MP-2) fue la que alcanzó mayor capacidad de resistencia a compresión en comparación con las demás probetas ensayadas, superando en un 63,50% la resistencia a compresión propuesta en el diseño a los 7 días y en un 53,06% a los 28 días.

Con respecto a los cilindros ensayados a 7 días, se pudo evidenciar que a mayor cantidad de adición de Polietileno tereftalato la capacidad de resistencia a compresión de las mismas disminuyó; de manera que solo las mezclas patrón cumplieron con el 75% requerido por la Norma Venezolana COVENIN para este tiempo de curado. La mezcla con menor resistencia a compresión perteneció a los cilindros elaborados con el diseño con sustitución parcial del 10% (S10%-2), quienes obtuvieron un valor de 33,09 Kgf/cm², teniendo una diferencia con respecto a la mezcla patrón para este mismo estudio del 87,15%, que al ser de gran tamaño influye a gran escala en la construcción. Sin embargo, los cilindros elaborados con la mezcla de sustitución del 2% (S2%-1) se posicionaron cercanos al 75% requerido por la norma con un valor de 156,31 Kgf/cm², restando solo 0,57% para alcanzar al mismo pero diferenciándose de la mezcla patrón con mayor capacidad para este caso en un 39,30%. Del mismo modo, los valores presentados por las mezclas con sustitución del 5% (S5%-1 y S5%-2) también se encontraron cercanos a dicha condición, en donde con valores de 148,21 Kgf/cm² y 147,73 Kgf/cm², restaron solo 9,29 Kgf/cm² y 9,77 Kgf/cm² para alcanzar el 75% mínimo, diferenciándose a su vez de la mezcla patrón en un 42,45% y 42,63%.

Seguidamente, se analizaron los cilindros cuya compresión fue medida al cumplir los 28 días de curado; los cuales presentaron el mismo comportamiento que para el caso anterior, la capacidad de resistencia a compresión de cada una de las probetas fue disminuida por la adición de plástico Polietileno Tereftalato, de manera que la mezcla con menor resistencia a compresión correspondió nuevamente a el diseño con sustitución del 10% (S10%-2) adoptando un valor de 40,33 Kgf/cm², diferenciándose de la mezcla patrón en un 87,45%, considerándose una diferencia bastante grande y afectando la construcción drásticamente. Por otro lado, ninguna de las mezclas con sustitución por plástico PET consiguieron alcanzar la resistencia a compresión propuesta en el diseño de 210 Kgf/cm²; el valor más cercano al propuesto correspondió a la mezcla de sustitución del 5% (S5%-1) adoptando 199,41 Kgf/cm² de resistencia a compresión representando un 94,95% del porcentaje total diseñado.

Seguidamente se presentó el diseño con sustitución del 2% (S2%-1) con un valor de resistencia a compresión de 198,55 Kgf/cm² equivalente al 94,54%.

En general, las mezclas con menor capacidad de resistencia a compresión correspondieron al diseño con sustitución del 10% (S10%-2 y S10%-1), seguidas del diseño con sustitución del 5% (S5%-2 y S5%-1) y por último por el diseño con sustitución del 2% (S2%-2 y S2%-1). Como se mencionó anteriormente el Polietileno tereftalato al ser un material no común en este tipo de mezcla, tiende a comportarse de distintas maneras al ser añadido al concreto; pero si siguió un patrón en el que perjudica de manera significativa al mismo.

Ensayo de durabilidad de las probetas de concreto y ensayo de compresión.

Continuando con la línea de investigación, se elaboró el ensayo de durabilidad a probetas de concreto patrón y con sustitución parcial de agregado grueso a 2%, 5% y 10%, previamente elaboradas. Para llevar a cabo dicho estudio, se siguieron los lineamientos plantados en la Norma ASTM C1012 adaptándolos tal y como se explica en las investigaciones elaboradas por Pico (2012) presentadas en los antecedentes del presente trabajo.

Los cilindros (transcurridos los 28 días de curado), se secaron previo estudio y se introdujeron en recipientes con una solución de Sulfato de sodio anhidro para iniciar el primer ciclo de la prueba, en donde se dejaron reposar por 24 horas para luego secarlos en el horno por 8 horas y al aire libre por 16 horas. En todo el proceso, se pesaron las probetas en cada etapa de los ciclos, se hizo inspección y registro de sus cambios externos y por último, se midió la resistencia a compresión para su posterior comparación con los cilindros que no fueron expuestos al ambiente químico. Los datos de esta práctica se muestran a continuación:

Concreto patrón.

A continuación se presentan los resultados de los pesos tomados a las probetas elaboradas con concreto patrón (MP-1 Y MP-2), antes y después de la inmersión, así como antes y después del secado.

Tabla 48.

Pesos probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 a lo largo del ensayo de durabilidad.

Pesos promedios probetas con concreto patrón MP-1 y MP-2							
Fecha	Ciclo	MP-1			MP-2		
		Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado	Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado
		(gr)			(gr)		
28/2/2023	0	12425,0	-	-	12565,0	-	-
1/3/2023	1	12425,0	12612,5	12397,5	12565,0	12725,5	12558,5
3/3/2023	2	12395,0	12629,0	12447,0	12547,5	12735,0	12610,0
7/3/2023	3	12427,5	12610,0	12428,5	12598,5	12736,0	12627,5
10/3/2023	4	12392,5	12614,0	12434,0	12585,5	12722,5	12610,5
13/3/2023	5	12387,5	12616,5	12456,5	12600,0	12730,0	12630,0
15/3/2023	6	12442,5	12622,5	12450,0	12610,5	12731,0	12641,0
20/3/2023	7	12435,0	12650,0	12490,0	12635,0	12735,5	12652,5

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La tabla anterior destaca los valores promediados que se obtuvieron al pesar la masa de los cilindros de concreto en distintas etapas del ensayo de ataques por sulfato, para las probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2. En el intervalo antes de sumergir, se pudo observar cómo en ambos casos el peso de las probetas se encuentra aumentando y disminuyendo en cada uno de los ciclos, hasta alcanzar los últimos dos en donde la tendencia se vio en aumento, finalizando con valores de masa de 12435,0

gr y 12635,0 gr para las mezclas MP-1 y MP-2. Los valores expuestos al momento de evaluar el peso después de sumergir y antes del secado permanecen cercanos unos de otros en cada ciclo para ambas mezclas, tomando su valor máximo en el 7mo ciclo con 12650,0 gr y 12735,5 gr para MP-1 y MP-2.

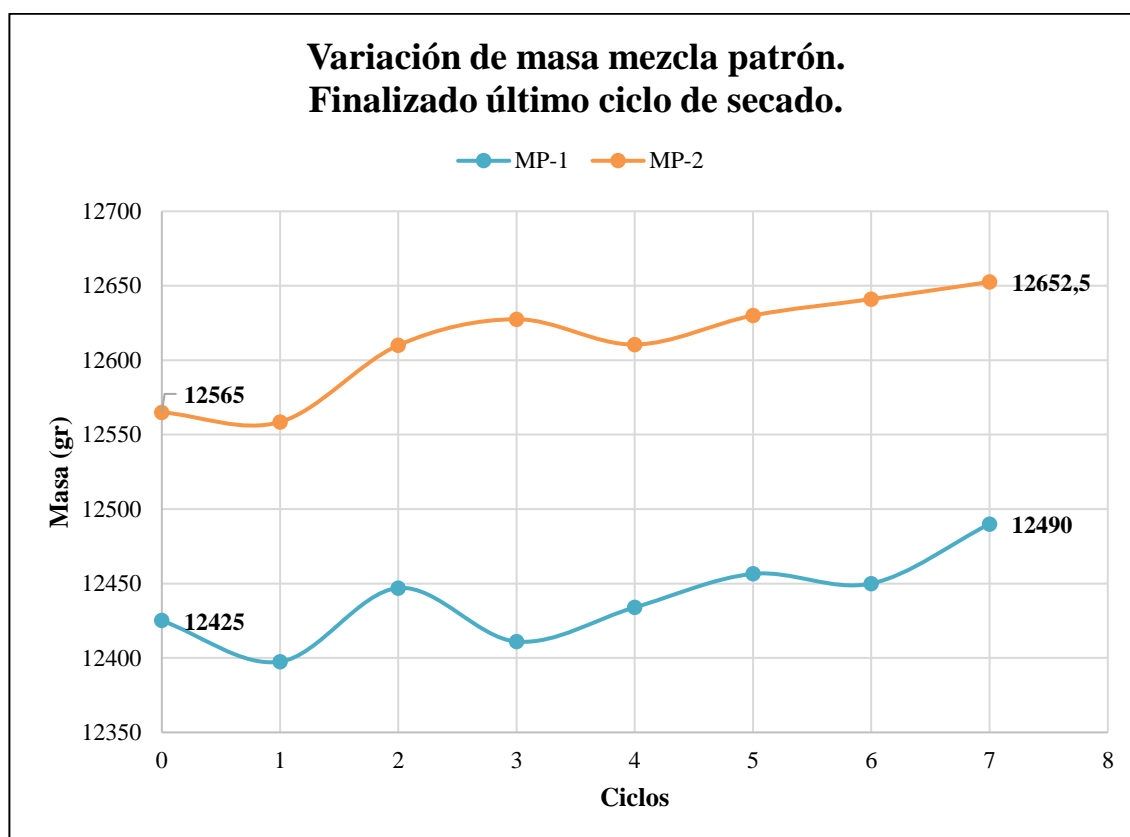


Figura 36. Variación de masa mezcla patrón al finalizar el último ciclo de secado. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Por otro lado una vez se finaliza la etapa de secado, se evidenció un aumento de la masa en comparación con el peso inicial de las probetas detallándose en la curva de variación de masa anterior. Este aumento cuenta con diferentes cambios en el peso de los cilindros a lo largo del ensayo; en donde para ambas mezclas, una vez alcanzan el 4to ciclo, se nivelan para aumentar hasta su pesado final, alcanzando para la mezcla MP-1 12490,0 gr y para la mezcla MP-2 12652,5 gr; donde existió un aumento del peso inicial del 0,52% y 0,70% respectivamente.



Figura 37. Aspecto de las probetas MP-1 luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 38. Aspecto de las probetas MP-2 luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Las figuras mostradas anteriormente establecen la apariencia que adoptaron las probetas MP-1 y MP-2 una vez terminó el último ciclo de secado de las mismas. Como puede apreciarse, para ambos casos, los cilindros no presentaron cambios muy bruscos, sin embargo, se pueden observar algunas manchas salteadas alrededor de ellos y una fina capa de cristales en la parte superior; además, es posible encontrarse con pequeñas grietas en distintas zonas de los cilindros.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de compresión aplicados a las probetas una vez finalizó el último ciclo de secado:

Tabla 49.

Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto patrón MP-1 y MP-2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
21/03/23	MP-1	1	15,00	29,90	12445,0	175,93	39870	226,62	230,34	5,25
			15,00	29,90						
			14,90	29,90						
		2	15,00	30,00	12500,0	176,71	41360	234,05		
15,00	29,90									
15,00	30,00									
15/05/23	MP-2	1	15,00	30,00	12665,0	175,93	52030	295,74	300,06	6,10
			15,00	29,90						
			14,90	29,90						
		2	15,00	29,90	12625,0	175,15	53310	304,37		
14,90	30,00									
14,90	30,00									

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Según los resultados descritos en la tabla anterior, se observó que para las probetas elaboradas con la mezcla MP-1 la resistencia a compresión promedio alcanzó un valor de 230,34 Kgf/cm² que al compararlo con el valor obtenido a los 28

días de curado, se puede evidenciar un aumento de la resistencia a compresión en un 5,36%; por otro lado para el caso de las probetas elaboradas con la mezcla MP-2, se obtuvo una resistencia a compresión promedio de 300,06 Kgf/cm² que al compararla con su resultado a los 28 días, se produjo una disminución de la resistencia a compresión en un 6,65%.

Para ambos casos, la desviación estándar de las pruebas no superó los 8 Kgf/cm² que establece la Norma Venezolana COVENIN, por lo que se puede asumir que los datos presentados son confiables.



Figura 39. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-1 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 40. Fallas en los cilindros de concreto patrón MP-2 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Con respecto a las fallas presentadas al realizar el ensayo de compresión a las probetas patrón luego del ataque por sulfatos, se observó que el primer cilindro de la mezcla MP-1, presenta una falla de compresión #2 con grietas verticales que se distribuyen a lo largo de la muestra con desprendimiento de su masa; mientras que para el segundo cilindro, se presentó una falla de corte #3 iniciando en la parte inferior de la probeta y distribuyéndose diagonalmente a lo largo de la misma desprendiendo su masa en su zona central.

Del mismo modo, los cilindros elaborados con la mezcla MP-2, para el caso del primer cilindro se presentó una falla de corte #4 en donde se distingue una ruptura en la esquina inferior derecha de la probeta con un desprendimiento considerable de su masa; por otro lado, el segundo cilindro de esta mezcla adoptó una falla de compresión #2, en donde la probeta quedó totalmente destruida por la fuerza generada por la máquina dividiéndola en la mitad, de igual manera con una gran cantidad de desprendimiento de su masa.

Concreto con sustitución de 2%.

En este apartado se destacan los resultados obtenidos mediante el estudio por ataque de sulfatos de las probetas con 2% de sustitución. En la tabla siguiente se muestran las variaciones de peso medidas antes, durante y después del secado de los cilindros:

Tabla 50.

Pesos probetas de concreto con sustitución 2% S2%-1 y S2%-2 a lo largo del ensayo de durabilidad.

Pesos promedios probetas con sustitución 2% S2%-1 y S2%-2							
Fecha	Ciclo	S2%-1			S2%-2		
		Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado	Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado
		(gr)			(gr)		
20/04/2023	0	12193,5	-	-	12195,5	-	-
21/4/2023	1	12193,5	12429,5	12237,0	12195,5	12484,0	12315,0
25/4/2023	2	12220,5	12427,5	12272,5	12297,5	12483,0	12307,5
27/4/2023	3	12257,5	12427,5	12291,5	12292,5	12486,5	12315,0
2/5/2023	4	12237,5	12422,5	12281,0	12287,5	12483,0	12337,5
4/5/2023	5	12271,0	12431,5	12304,0	12332,5	12490,0	12362,5
8/5/2023	6	12277,5	12430,0	12321,5	12206,0	12513,0	12386,5
10/5/2023	7	12312,0	12433,0	12329,0	12375,5	12499,5	12372,5

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tal como se observa en la tabla previa, para las mediciones antes de sumergir, se distinguió un aumento de masa hasta alcanzar el 4to ciclo en donde disminuye, para luego intercaladamente aumentar y disminuir, adoptando su mayor peso en el 7mo ciclo con 12312,0 gr. Por otro lado, para la mezcla S2%-2 se destaca un aumento en sus primeros dos ciclos, que luego se convierte en una disminución de su peso

hasta alcanzar el 4to ciclo, en donde intercaladamente aumenta y disminuye la masa alcanzado en el último ciclo un valor de 12375,5 gr.

En ambas mezclas el comportamiento en el intervalo de medición luego de la sumersión y antes del secado es constante al igual que en casos anteriores, los valores se mantuvieron cercanos entre sí en la primera parte del ensayo, para luego aumentar a mayor cantidad en los últimos ciclos; cerrando con valores de 12433 gr y 12499,5 gr tanto para la mezcla S2%-1 como para la mezcla S2%-2.

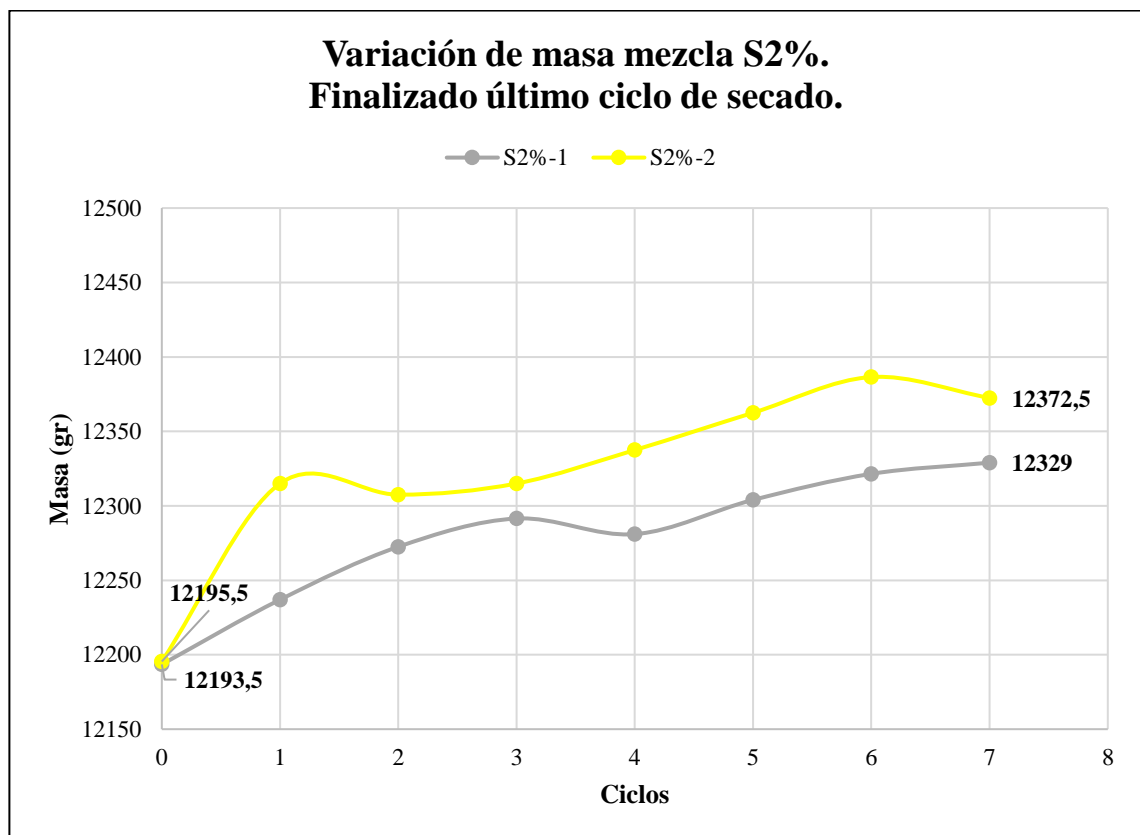


Figura 41. Variación de masa mezcla sustitución 2% al finalizar el último ciclo de secado. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La figura anterior muestra la curva de variaciones de masa con respecto a las probetas en estudio de sustitución 2%. Para este caso, el aumento de masa en ambas mezcla se mostró constante con pocas disminuciones entre ciclos, sin embargo se

detalló que para la mezcla S2%-1 el crecimiento continuo de la masa inició a partir del 4to ciclo (tal y como ocurre en las mezclas patrón); mientras que para la mezcla S2%-2 se inició el crecimiento de la masa desde el 2do ciclo hasta que alcanza la última medición en donde presentó una leve disminución. En ambos casos la masa final resultó mayor que la masa inicial, presentando aumentos del 1,11% para la primera mezcla (S2%-1) y del 1,45% para la segunda mezcla (S2%-2).



Figura 42. Aspecto de las probetas S2-1% luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 43. Aspecto de las probetas S2-2% luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Examinando la apariencia de las probetas, para el caso de la mezcla S2%-1 no se presentaron cambios externos evidentes como en los cilindros de mezcla patrón; sin embargo, se notaron leves manchados a lo largo de los mismos y una coloración más opaca en comparación con los cilindros sin el ataque de sulfatos. En el caso de las probetas con la mezcla S2%-2, de igual manera no se presentaron cambios exteriores drásticos, los manchados fueron leves en ambos cilindros y los poros se evidenciaron más profundos.

Seguidamente, se evalúa la capacidad de compresión que soportan las probetas al terminar con el ensayo de ataques por sulfatos, los resultados se expresan a continuación:

Tabla 51.

Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto con sustitución 2% S2%-1 y S2%-2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
11/05/23	S2%-1	1	14,90	30,00	12350,0	174,37	30930	177,39	179,84	3,48
			14,90	30,00						
			14,90	29,90						
		2	15,00	30,00	12297,0	175,15	31930	182,30		
14,90	30,00									
14,90	29,90									
11/05/23	S2%-2	1	15,00	30,00	12332,0	175,93	31110	176,83	171,32	7,80
			15,00	29,90						
			14,90	30,00						
		2	14,90	30,00	12402,0	175,15	29040	165,80		
14,90	29,90									
15,00	29,90									

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Como se puede apreciar, la resistencia a compresión promedio obtenida para las probetas elaboradas con la primera mezcla con sustitución del 2% (S2%-1) adoptaron un valor de resistencia a compresión promedio de 179,94 Kgf/cm², comparando dicho resultado con su resistencia a compresión a los 28 días de curado, se presenció que existe una disminución del 9,42%; mientras que para los cilindros elaborados con la segunda mezcla (S2%-2) obtuvieron una resistencia a compresión promedio de 171,32 Kgf/cm² que al compararla con la resistencia a compresión obtenida por las probetas sin el ataque de sulfatos, se evidenció una disminución del 11,14%.

Tal y como se evalúa en apartados anteriores, las probetas no superan la desviación estándar establecida de 8 Kgf/cm² por lo que los resultados presentados se consideran confiables.



Figura 44. Fallas en los cilindros de concreto patrón S2%-1 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

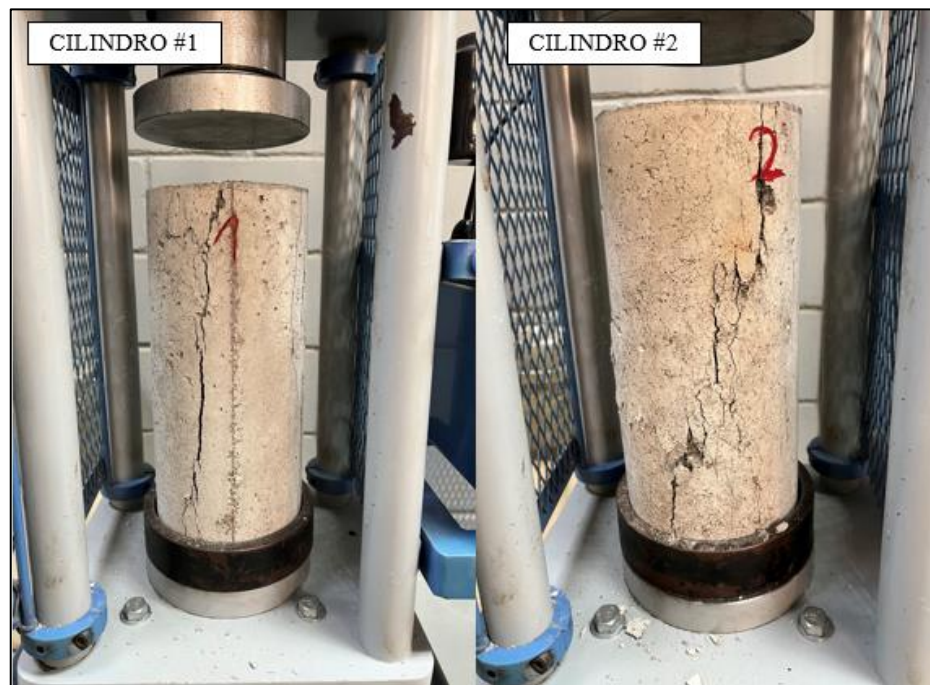


Figura 45. Fallas en los cilindros de concreto patrón S2%-2 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Como se puede presenciar en las figuras previas, la primera probeta de la mezcla S2%-1 adoptó una falla de corte #3, iniciando la ruptura desde la parte inferior del cilindro y ascendiendo diagonalmente a lo largo del mismo hasta alcanzar su zona superior, el desprendimiento de su masas es poco. Del mismo modo, la falla adoptada por la segunda probeta de esta misma mezcla, se caracteriza como una falla de corte #4, iniciando también desde su parte inferior y generando la ruptura en la esquina inferior izquierda de la misma, evidenciándose un mayor desprendimiento de su masa.

Por otro lado, la primera probeta de la mezcla S2%-2, presentó una falla de compresión #2, caracterizada por una fractura vertical que en este caso inició desde la parte superior del cilindro extendiéndose a la zona inferior del mismo; por otra parte el segundo cilindro elaborado con dicha mezcla, adoptó una falla de corte #3, iniciando igualmente con una fractura en la zona superior de la probeta y desplazándose hasta la parte inferior de esta. En ambos casos, no se presentó gran desprendimiento de su masa, sin embargo, la fractura en la segunda probeta se notó más pronunciada.

Concreto con sustitución de 5%

En la tabla siguiente se destacan los cambios de masa presentados en las probetas con sustitución del 5% expuestas al ataque de sulfatos mediante el ensayo de durabilidad:

Tabla 52.

Pesos probetas de concreto con sustitución 5% S5%-1 y S5%-2 a lo largo del ensayo de durabilidad.

Pesos promedios probetas con sustitución 5% S5%-1 y S5%-2							
Fecha	Ciclo	S5%-1			S5%-2		
		Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado	Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado
		(gr)			(gr)		
11/5/2023	0	11977,5	-	-	12144,5	-	-
12/5/2023	1	11977,5	12199,0	12038,5	12144,5	12305,0	12147,5
16/5/2023	2	12025,0	12199,0	12029,0	12137,5	12307,5,0	12156,0
18/5/2023	3	12020,5	12200,0	12035,5	12151,5	12312,0	12165,0
22/5/2023	4	12017,5	12200,0	12060,0	12150	12310,0	12182,5
24/5/2023	5	12053,5	12207,5	12092,0	12176,5	12317,5	12213,0
26/5/2023	6	12083,5	12241,0	12115,0	12352,5	12340,5	12230,0
30/5/2023	7	12107,0	12220,0	12102,5	12223,5	12329,0	12212,0

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Mediante los resultados expuestos en la tabla anterior, se observó que los pesos antes de sumergir no siguieron un comportamiento uniforme, aumentando y disminuyendo de manera intercalada a lo largo de los ciclos; alcanzando su mayor peso en el ciclo #7 con 12107,0 gr para la mezcla S5%-1 y con 12223,5 gr para la mezcla S5%-2. Detallando las mediciones de masa en el intervalo después de sumergir y antes del secado, para ambas mezcla se encontraron en peso constante con variaciones mínimas hasta que alcanzaron los dos últimos ciclos en donde aumentaron en gran tamaño en el sexto ciclo para disminuir en su último ciclo, adoptando valores de 12102,5 gr y 12212,0 gr para las mezclas S5%-1 y S5%-2 respectivamente.

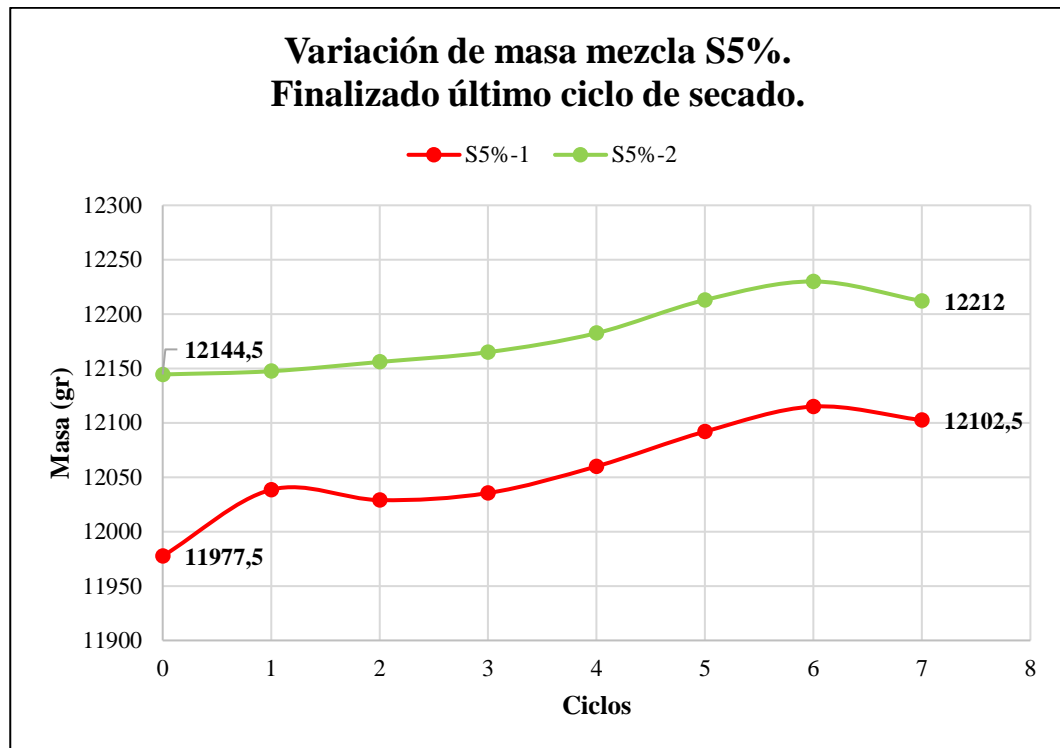


Figura 46. Variación de masa mezcla sustitución 5% al finalizar el último ciclo de secado. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La figura mostrada previamente, destaca la variación de masa de las probetas en estudio una vez se finaliza el secado en cada uno de los ciclos; detallándose que para ambos casos de mezcla, existió un crecimiento en el peso de las probetas que inició en el segundo ciclo de secado hasta alcanzar el sexto ciclo en donde disminuyó para alcanzar en su última medición valores de 12102,5 gr para la mezcla S5%-1 y de 12212,0 gr para la mezcla S5%-2, lo que se traduce en un aumento del peso en comparación con su masa inicial de 1,04% y 0,56% respectivamente.



Figura 47. Aspecto de las probetas S5-1% luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 48. Aspecto de las probetas S5-2% luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La apariencia de las probetas al finalizar el ensayo de ataque de sulfatos para la sustitución del 5% es bastante similar entre mezclas. En ambos casos no se presentó desprendimiento de masa, ni cristalización por las sales. Se evidenció una decoloración característica presentada en casos anteriores pero esta vez con manchado leve en diferentes zonas de los cilindros. El desgaste se destacó mayormente en el centro de los cilindros donde se encontraba la unión del molde, presentándose en las probetas #1 de cada una de las mezclas.

Al finalizar con el ensayo de durabilidad de las probetas en estudio, se realizó el ensayo de compresión para determinar la resistencia a compresión de las mismas, los resultados se destacan a continuación:

Tabla 53.

Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto con sustitución 5% S5%-1 y S5%-2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
01/06/23	S5%-1	1	14,90	29,90	12130,0	174,37	29000	166,32	170,04	5,26
			14,90	30,00						
			14,90	30,00						
01/06/23	S5%-1	2	15,00	30,00	12063,0	175,93	30570	173,76	170,04	5,26
			15,00	29,90						
			14,90	30,00						
01/06/23	S5%-2	1	15,00	29,90	12225,0	176,71	31680	179,27	176,32	4,18
			15,00	30,00						
			15,00	30,00						
01/06/23	S5%-2	2	15,00	30,00	12187,0	175,93	30500	173,36	176,32	4,18
			15,00	29,90						
			14,90	29,90						

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

La tabla anterior presenta los resultados obtenidos al evaluar la compresión en las probetas con sustitución del 5% al terminar con el ensayo de ataque por sulfatos. Como se detalla, la resistencia a compresión promedio obtenida para las probetas elaboradas con la primera mezcla (S5%-1) fue de 170,04 Kgf/cm², que al hacer la comparación con el valor adquirido al ensayar a 28 días, se presentó una disminución en esta característica del 14,73%; por otro lado, en el caso de las probetas fabricadas con la segunda mezcla (S5%-2) soportaron una resistencia a compresión promedio de 176,32 Kgf/cm², al comparar este valor con el obtenido a los 28 días se evidenció una disminución del 4,92% para esta característica.

Otro dato que se tomó en cuenta fue la desviación estándar presente entre probetas de la misma mezcla, las cuales no superaron los 8 Kgf/cm² para ninguno de los casos, entendiéndose que los resultados son confiables según lo expresa la Norma Venezolana COVENIN.

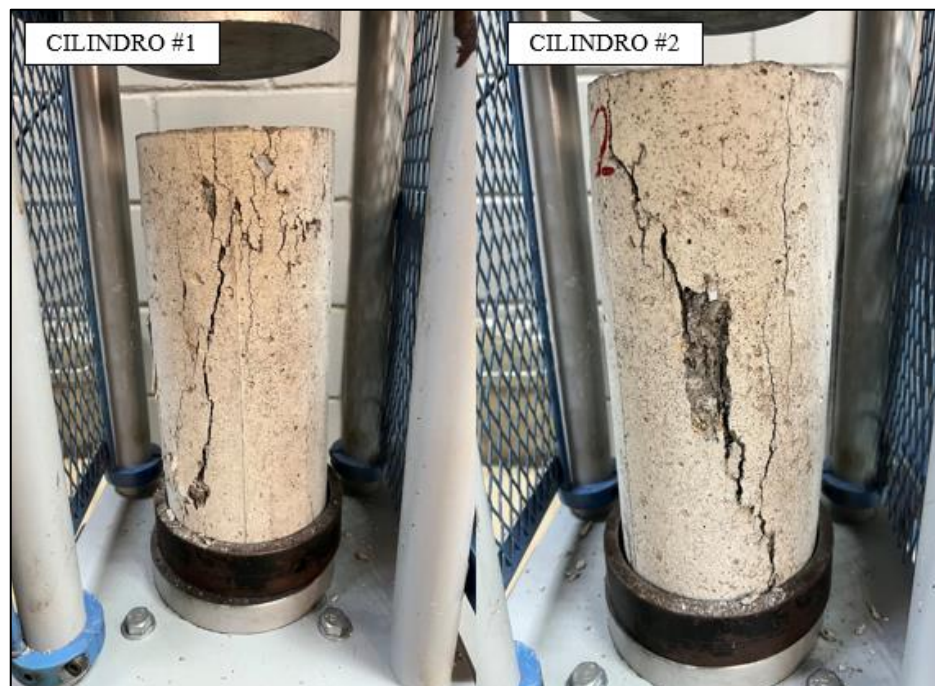


Figura 49. Fallas en los cilindros de concreto patrón S5%-1 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

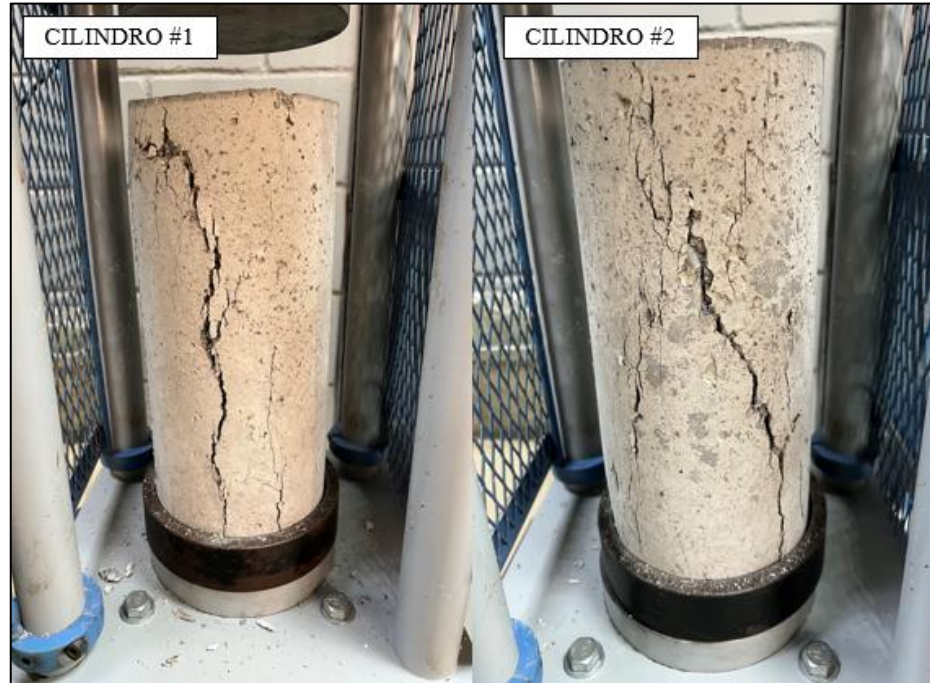


Figura 50. Fallas en los cilindros de concreto patrón S5%-2 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Las imágenes anteriores detallan las fallas obtenidas mediante el ensayo de compresión de las probetas con sustitución 5% al finalizar el ensayo de ataque por sulfatos. Como se muestra, los cilindros elaborados con la mezcla S5%-1 presentaron ambos un falla por corte #3 en donde se puede presenciar la ruptura con inicio desde una de las esquinas de la probeta, extendiéndose a la esquina opuesta de la misma; para el primer cilindro se evidenció poco desprendimiento de su masa, mientras que para el segundo cilindro el desprendimiento de la masa fue un poco mayor en el centro de la probeta.

Observando el caso de las probetas elaboradas con la segunda mezcla (S5%-2), el primer cilindro presentó una falla de compresión #2, demostrando una ruptura vertical que inicia desde la zona inferior del cilindro y se distribuye a lo largo del mismo; mientras que el segundo cilindro presentó una falla de corte #3, iniciando

también en la esquina inferior derecha de la probeta y extendiéndose diagonalmente hasta la esquina superior izquierda de la misma.

Concreto con sustitución de 10%

La tabla siguiente refleja los resultados obtenidos mediante la medición de las masas de las probetas con sustitución del 10% a lo largo del ensayo de ataque por sulfatos:

Tabla 54.

Pesos probetas de concreto con sustitución 10% S10%-1 y S10%-2 a lo largo del ensayo de durabilidad.

Pesos promedios probetas con sustitución 10% S10%-1 y S10%-2							
Fecha	Ciclo	S10%-1			S10%-2		
		Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado	Antes de sumergir	Después de sumergir/Antes del secado	Después del secado
		(gr)			(gr)		
20/03/23	0	11555,0	-	-	10136,0	-	-
21/03/23	1	11555,0	11844,0	11612,5	10136,0	10576,0	10200,0
23/03/23	2	11595,0	11875,0	11635,0	10180,0	10591,0	10200,0
27/03/23	3	11592,0	11882,5	11682,5	10168,5	10605,0	10258,5
29/03/23	4	11666,0	11891,5	11730,0	10245,0	10619,5	10320,0
12/04/23	5	11602,5	11886,5	11692,0	10205,0	10637,5	10287,5
14/04/23	6	11681,5	11925,0	11726,0	10276,0	10655,0	10273,5
18/04/23	7	11712,5	11926,0	11700,0	10261,0	10661,0	10327,0

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Tal y como se observa anteriormente, el comportamiento para las probetas con sustitución del 10% también fue bastante variado, y no siguió un patrón constante como en casos anteriores. Las masas antes de sumergir, para los cilindros S10%-1, se

encontraron en aumento hasta su ciclo #5 donde se produjo una disminución de esta propiedad para luego retomar nuevamente el aumento de masa, finalizando con un valor de 11712,5 gr; mientras que para el caso de los cilindros con la mezcla S10%-2, se produjo un aumento y disminución intercalado de la masa entre cada uno de los ciclos, sin embargo finalizó con un valor de 10261,0 gr.

Para el intervalo de masas después de la sumersión y antes del secado, la primera mezcla (S10%-1) destacó un aumento de su peso hasta alcanzar el 4to ciclo, en donde disminuyó brevemente para luego continuar en aumento hasta su masa inicial de 11926 gr; por otro lado, la segunda mezcla (S10%-2) se encontró en constante aumento para este intervalo, finalizando con una masas de 10661 gr.

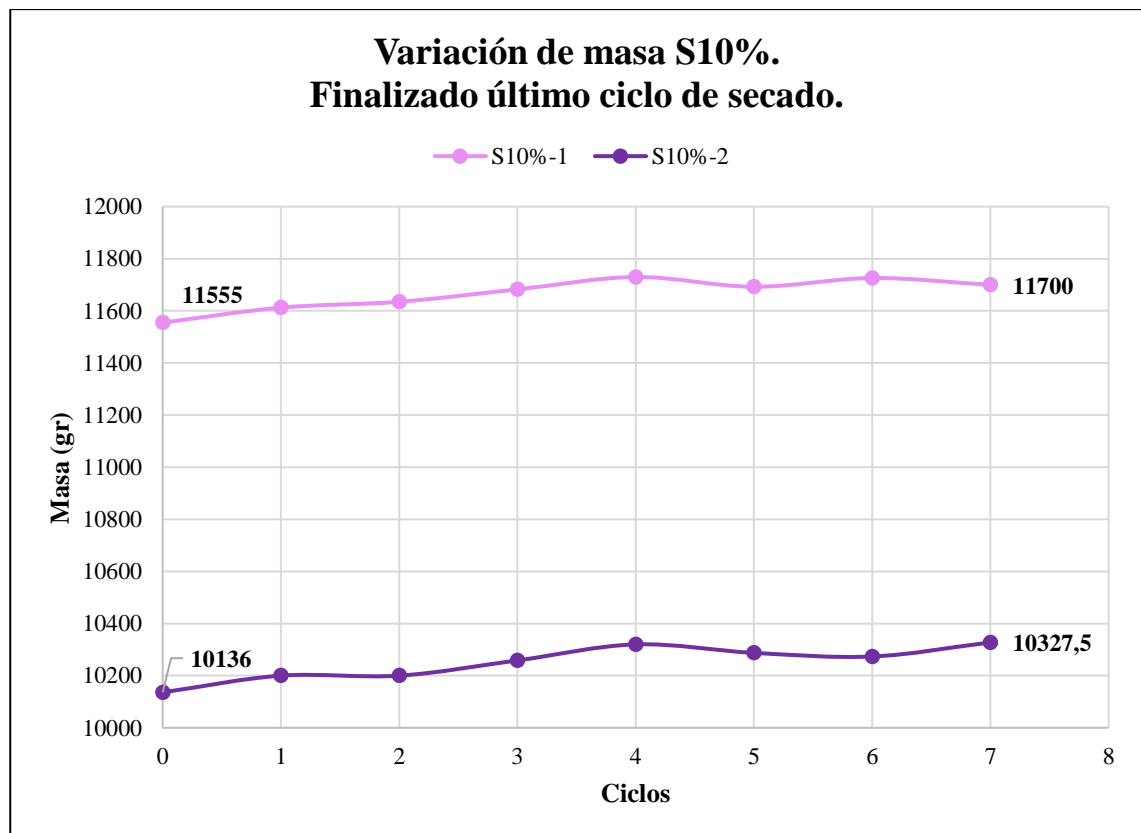


Figura 51. Variación de masa mezcla S10% al finalizar el último ciclo de secado. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Una vez terminado el secado, es posible observar en la figura anterior como las muestras de la mezcla S10%-1 se encontraron en aumento de masa hasta su ciclo #4 (de igual manera que antes de sumergir) para luego descender y aumentar hasta su pesado final con un valor de 11700,0 gr, lo que equivale a un 1,25% de crecimiento en masa en comparación con su peso inicial. De igual manera, las muestras de la mezcla S10-2% se encontraron en aumento hasta su ciclo #4, para luego disminuir en sus ciclos 5 y 6, retomando su aumento hasta el pesado final donde cerró con un valor de 10327,5 gr, equivalentes a un 1,89% de aumento con respecto a su masa inicial.



Figura 52. Aspecto de las probetas S10%-1 luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 53. Aspecto de las probetas S10%-2 luego del último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Mediante la inspección visual no se destacaron cambios drásticos. Los cilindros de la mezcla S10%-1 presentaron el manchado característico que se ha venido observando en los distintos casos de este ensayo, además de pequeñas grietas a lo largo de la probeta. Mientras que para el caso de los cilindros de la mezcla S10%-2, solo se evidenció el manchado común en ciertas zonas de las probetas, específicamente en donde se encuentra más uniforme, pero si se puede observar un recubrimiento de color blanco en el interior de los poros, pudiéndose atribuirse al inicio de cristalización de las sales.

Seguidamente, se evaluó la resistencia a compresión de dichas muestras, cuyos resultados se expresan a continuación:

Tabla 55.

Resultados ensayo de compresión a probetas de concreto con sustitución 10% S10%-1 y S10%-2 luego de ser expuestas al ataque de sulfatos.

Fecha	Mezcla	Probeta	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Área (cm ²)	Carga (Kg)	Resistencia (Kgf/cm ²)	Resistencia Promedio (Kgf/cm ²)	Desviación Estándar (Kgf/cm ²)
21/04/23	S10%-1	1	15,00	30,00	11717,0	175,93	20350	115,67	119,93	6,03
			15,00	29,90						
			14,90	29,90						
		2	15,00	29,90	11790,0	175,93	21850	124,20		
14,90	29,90									
15,00	30,00									
21/04/23	S10%-2	1	15,00	30,00	10425,0	176,71	5910	33,44	32,74	1,00
			15,00	29,99						
			15,00	29,99						
		2	14,90	29,99	10210,0	175,15	5610	32,03		
14,90	29,99									
15,00	29,99									

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Analizando los resultados expuestos anteriormente correspondientes a la resistencia a compresión de las probetas con sustitución del 10% medido luego del ataque de sulfatos, es posible observar que para la mezcla S10%-1 obtuvo una resistencia a compresión promedio de 119,93 Kgf/cm², que al comparar con los resultados de resistencia a compresión a los 28 días se presentó una disminución del 26,59%. Del mismo modo, se observó que la resistencia a compresión promedio para la mezcla S10%-2 adoptó un valor de 32,74 Kgf/cm²; comparando el mismo con la resistencia a compresión a los 28 días de ella, se evidenció una disminución del 18,82%.

En ambas situaciones la desviación estándar para el ensayo no fue mayor a 8 Kgf/cm² (límite establecido por la Norma Venezolana COVENIN 338), por lo que se pueden analizar los resultados como confiables.



Figura 54. Fallas en los cilindros de concreto con sustitución S10%-1 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

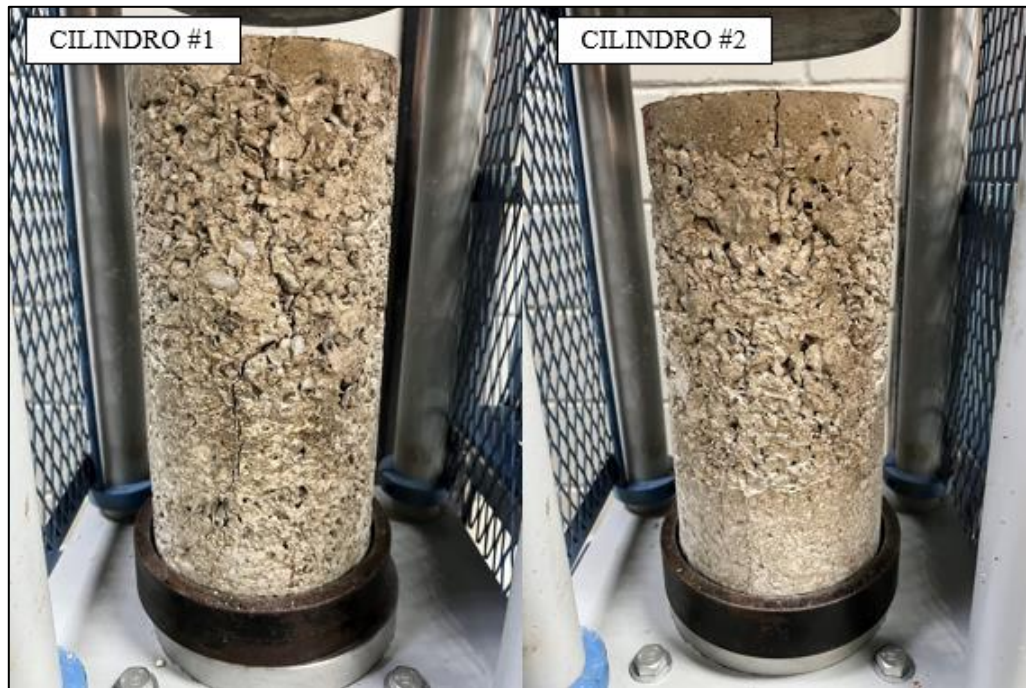


Figura 55. Fallas en los cilindros de concreto con sustitución S10%-2 finalizado el último ciclo de secado. Tomado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Haciendo una evaluación a los cilindros finalizado el ensayo a compresión, se pueden observar las fallas adoptadas por los mismos. Para el caso de los cilindros elaborados con la mezcla S10%-1, el primer cilindro adoptó una falla a compresión #2, iniciando con una ruptura vertical desde la zona inferior de la probeta que al llegar a la mitad de la misma continua hasta la zona superior en forma diagonal; mientras que para el segundo cilindro, se presentó una falla por corte #3 iniciando en la parte superior y distribuyéndose hasta la parte inferior de la misma. Para ambos cilindros se evidenció poco desprendimiento de su masa.

Las probetas elaboradas con la mezcla S10%-2 presentaron fallas similares entre ellas, en donde se evidenció en una más que en la otra. El primer cilindro presentó una clara falla por compresión #2 en donde se observó como inicia desde la parte superior de la probeta y termina en la parte inferior de la misma, con poco desprendimiento de su masa. Por otro lado, la falla en el segundo cilindro es difícil de

determinar pues no se observa claramente, sin embargo, se puede ver una grieta grande en la parte superior y grietas pequeñas a lo largo del cilindro que pueden similar a una falla por compresión #2, caracterizada por una ruptura vertical a lo largo de la probeta. Del mismo modo, para este último se evidenció poco desprendimiento de su masa.

Resumen y análisis de los resultados obtenidos

Siguiendo con el estudio de durabilidad de las distintas probetas, se agrega a continuación un resumen de los resultados obtenidos luego de evaluar el ataque por sulfatos, analizando e interpretando cada uno de ellos.

Tabla 56.

Resumen resultados de variación de masa en cada ciclo del ataque por sulfatos.

Mezcla	Variación de masa por ciclos (%)						
	1	2	3	4	5	6	7
MP-1	-0,22	0,18	0,03	0,07	0,25	0,20	0,52
MP-2	-0,05	0,36	0,50	0,36	0,52	0,60	0,70
S2%-1	0,36	0,65	0,80	0,72	0,91	1,05	1,11
S2%-2	0,98	0,92	0,98	1,16	1,37	1,57	1,45
S5%-1	0,51	0,43	0,48	0,69	0,96	1,15	1,04
S5%-2	0,02	0,09	0,17	0,31	0,56	0,70	0,56
S10%-1	0,50	0,69	1,10	1,51	1,19	1,48	1,25
S10%-2	0,63	0,63	1,21	1,82	1,49	1,36	1,89

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

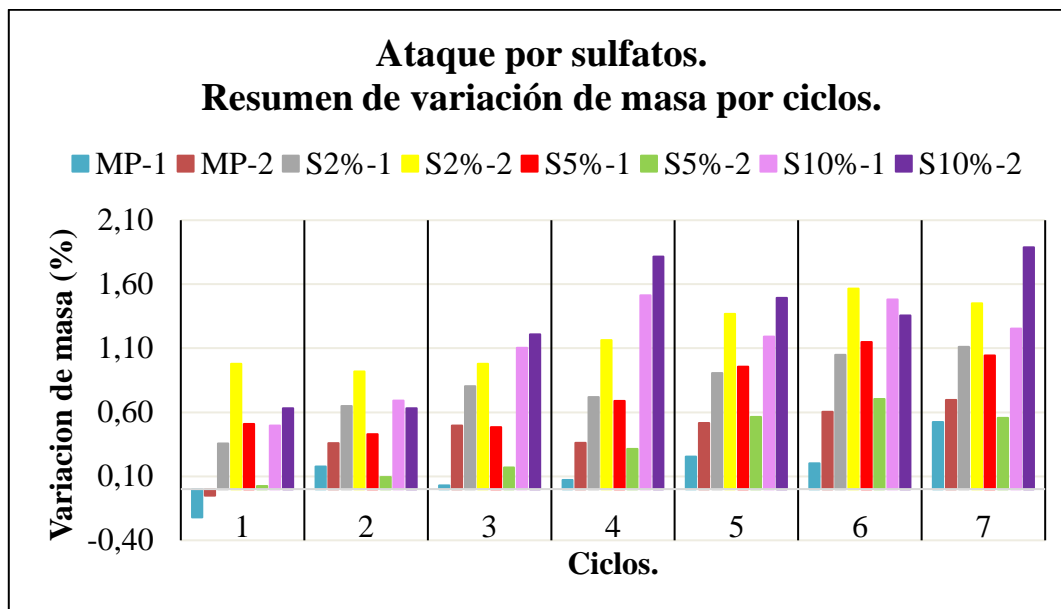


Figura 56. Representación gráfica de los resultados de variación de masa en cada ciclo del ataque por sulfatos. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

En la tabla y la figura anteriores, se evidenciaron las variaciones de masa de cada una de las probetas con distintos grados de sustitución al ser sometidas al ensayo de ataque por sulfatos, divididas en cada uno de los ciclos y pesadas al finalizar el secado. Como se mencionó en apartados anteriores, la variación de masa no siguió una estructura definida, contando con aumentos y disminuciones de pesos que varían en cada ciclo; sin embargo la tendencia que se obtuvo fue que en la mayoría de las probetas existió un aumento de su masa al terminar el secado en comparación con el peso inicial antes del ensayo.

Al finalizar el primer ciclo se detalló que las mezclas patrón fueron las únicas con porcentaje negativo, indicando una disminución de su masa con respecto a la inicial en un 0,22% y 0,05%. Este comportamiento pudo atribuirse a que las probetas no se encontraban totalmente secas al iniciar el ensayo, disponiendo de menos cantidad de poros para ser llenados, introduciendo menor cantidad de solución en ellos, que al momento de secarse varió el resultado final. Por otro lado, la mezcla S2%-2 obtuvo la mayor variación de masa en este ciclo en comparación con el resto,

donde aumentó en 0,98% en comparación con su masa inicial; seguida de las mezclas S10%-2, S5%-1, S10%-1 y S2%-1 con aumentos de 0,63%, 0,51%, 0,50% y 0,36%. Por último, se encontró la mezcla S5%-2 quien obtuvo el menor aumento de 0,02%.

Avanzando en el análisis, se notó que los cilindros comenzaron a ganar mayor cantidad de masa al alcanzar la mitad del ensayo en el cuarto ciclo. Se detalló que para este caso, las probetas con mayor aumento de masa fueron las elaboradas con las mezclas S10%-2 y S10%-1 adquiriendo 1,82% y 1,51% si son comparadas con su peso inicial. Continuando con la tendencia de aumento, se presentaron las probetas elaboradas con las mezclas S2%-2, S2%-1, S5%-1 y MP-2, quienes adquirieron mayor masa en comparación con la inicial en un 1,16%, 0,72%, 0,69% y 0,36% respectivamente. Y los cilindros que contaron con menor ganancia de masa fueron los elaborados con las mezclas S5%-2 Y MP-1, con valores de aumento en 0,31% y 0,07%. Cabe destacar que en este ciclo ninguna de las probetas analizadas presentó desprendimiento de su masa.

El estudio finaliza con las mediciones de los cilindros al alcanzar el secado en el séptimo ciclo, en donde se observó que las probetas con mayor aumento de masas fueran las elaboradas con las mezclas S10%-2 y S2%-2, adquiriendo 1,89% y 1,25% más masa con respecto a su peso inicial. Seguidamente se encontraron las mezclas S10%-1, S2%-1, S5%-1 quienes aumentaron en un 1,25%, 1,11% y 1,04%. Por último, las mezclas que recibieron menos aumento de masa fueron MP-2, S5%-2 y MP-1, adoptando porcentajes de 0,70%, 0,56% y 0,52% en comparación con su masa al inicio del ensayo.

Según planteamientos expuestos en apartados anteriores y comparando con los resultados presentados en los estudios de los antecedentes, el incremento de masa de las probetas en general se atribuyó al desarrollo de la etringita secundaria dentro de las mismas; siendo este proceso beneficiado por el constante secado y humedecimiento de las muestras en el horno y en la solución de sulfato de sodio

anhidro, esta última que reaccionó con los componentes del concreto con 28 días de curado y generó expansiones.

La inclusión de material polimérico a la mezcla generó una mayor cantidad de poros una vez el concreto ha endurecido, permitiendo que gran contenido de solución penetre en ellos; es por esto que las probetas que presentaron un porcentaje alto de aumento de masa tendieron a ser a su vez las que tuvieron mayor porcentaje de sustitución, tal como fueron las mezclas S10%-2 y S10%-1; sin embargo, dentro de las que adquirieron mayor cantidad de masa se encontraron también las mezclas con sustitución del 2%, probablemente siendo influenciadas por la irregularidad del PET permitiéndole introducir mayor cantidad de solución en ellas.

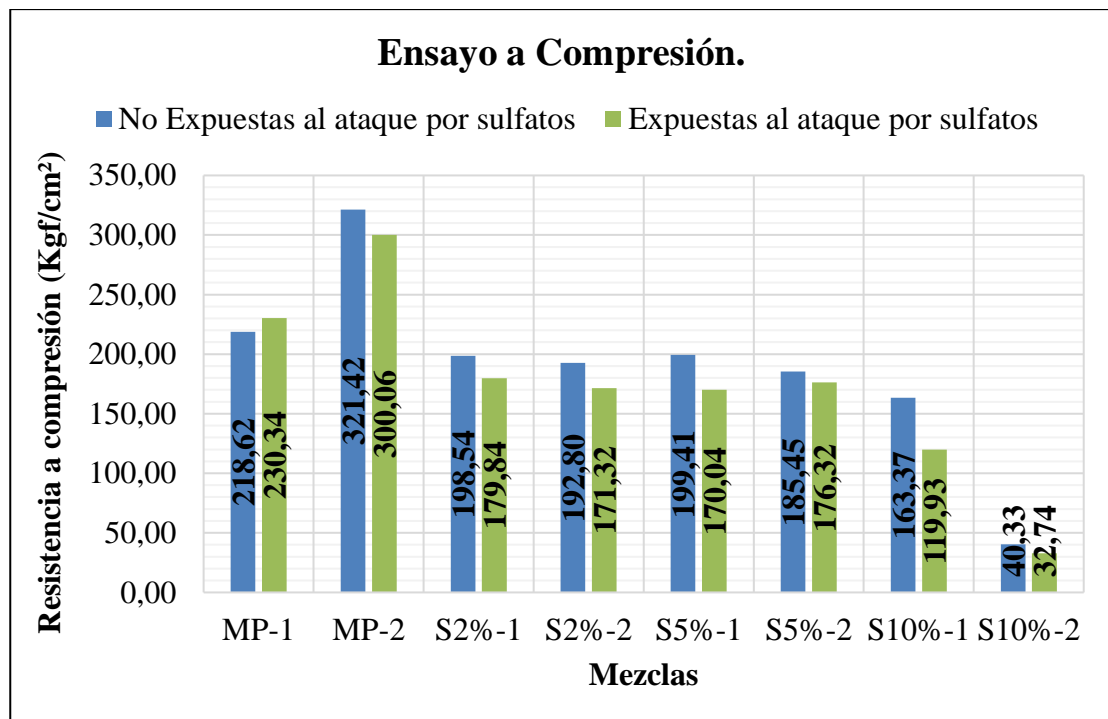


Figura 57. Representación gráfica de los resultados de resistencia a compresión para probetas expuestas al ataque por sulfatos y no expuestas al ataque por sulfatos. Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

A través de la figura presentada anteriormente, se destacan los resultados que se obtuvieron al medir la resistencia a compresión de las probetas finalizado el ensayo

de ataque por sulfatos, comparándolos con los resultados de resistencia a compresión a 28 días de las probetas que no fueron expuestas al sulfato de sodio anhidro.

En general, las probetas siguieron la tendencia de disminuir su capacidad de resistencia a compresión al exponerse al ensayo de durabilidad, exceptuando las probetas de la primera mezcla patrón (MP-1) que obtuvieron un leve aumento en esta característica. Dentro de los cilindros que sufrieron mayor daño se encontraron los elaborados con las mezclas S10%-1 y S10%-2, reduciendo su resistencia a compresión en un 26,59% y 18,82%; las cuales al mismo tiempo fueron las que adquirieron mayor cantidad de masa. Luego continuaron las mezclas S5%-1, S2%-2, S2%-1 con reducción de su capacidad de resistencia a compresión en 14,73%, 11,14% y 9,42% comparado con su resistencia a compresión a los 28 días. Por último, se encontraron las mezclas patrón MP-1, MP-2 y la segunda mezcla con sustitución del 5% (S5%-2), quienes se redujeron en menor porcentaje siendo estos de 6,65%, 5,36% y 4,93%.

En principio se pudo establecer una relación entre la cantidad de masa adquirida y la capacidad de resistencia a compresión, en donde entre mayor es la cantidad de masa mayor reducción se tendrá en la característica de resistencia a compresión. Es por ello que se observó encabezando la lista, las mezclas con mayor sustitución de material polimérico quienes obtuvieron un mayor aumento de masa, lo que estuvo estrechamente relacionado con la capacidad de absorber mayor cantidad de solución de sulfato de sodio anhidro.

Con respecto a las mezclas con sustitución del 2% y 5%, se presentó una variación del planteamiento mencionado anteriormente, puesto que primeramente la mezcla S5%-1 adquirió menor masa pero se encontró por encima de las mezclas de 2% en el caso de resistencia a compresión, obteniendo un valor de reducción de esta propiedad del 14,73% mientras que las de 2% recibieron una reducción del 11,14% y 9,42%.

Finalizando el análisis, se pudo observar que las mezclas patrón y la segunda mezcla con sustitución del 5% son las que recibieron menor aumento de masa y además se redujo su resistencia a compresión en menor escala con respecto a la resistencia a compresión a los 28 días; se evidenciaron valores de reducción del 6,65% y 5,36% para las mezclas patrón y del 4,93% para la mezcla S5%-2.

Durante todo el proceso de elaboración del diseño de mezcla y la fabricación de los cilindros de concreto, se tomaron en cuenta que los mismos fueran capaces de soportar el ambiente agresivo al que fueron expuestos, de manera que tuvieran una excelente durabilidad.

Las especificaciones presentadas en la Norma FONDONORMA NTF 4015-12, califican el tipo de exposición al que estuvieron sometidas las probetas, como un ataque químico moderado que tiende a la degradación del concreto conocido como Q3 (tabla 60 en anexos). De esta manera, el diseño de mezcla se elaboró tomando en cuenta 2 de los 3 requisitos que esta misma Norma expone (tabla 61 en anexos), en donde se estableció una relación agua/cemento del 0,50 y un contenido mínimo de cemento de 340 kg/m³.

Después de las consideraciones anteriores, se dedujo que los cilindros elaborados con las mezclas sin sustitución parcial del agregado grueso por Polietileno Tereftalato, fueron quienes soportan de manera más eficaz los ambientes agresivos a los que se les expongan; tomando en cuenta que sus poros se encontraron más reducidos evitando la introducción de sustancias no deseadas del medio ambiente, traduciéndose en una menor expansión por causa de las reacciones de dichas sustancias y los materiales propios del concreto, por lo que su peso permaneció constante. Anudado a esto, la resistencia a compresión no se vio afectada drásticamente en este tipo de probetas en comparación con sus compañeras; lo que de igual manera afirma que a largo plazo, las probetas elaboradas con mezcla patrón

serán más durables y tendrán un tiempo de vida útil más largo, siempre y cuando se tomen las consideraciones necesarias para cada caso de ambiente agresivo.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

De la caracterización del Polietileno Tereftalato (PET)

- Se planteó el estudio del plástico Polietileno Tereftalato (PET) como un material no convencional para la elaboración de concreto, con miras a que el mismo pueda ser utilizado en obra; tomando en cuenta que pudiese beneficiar a la reducción de la contaminación provocada por dicho producto, el cual posee un largo período de degradación.
- En cuanto al peso unitario suelto, las características del material polimérico no siguieron el comportamiento establecido por las Normas Venezolanas COVENIN, diferenciándose en un 83,34% con respecto al agregado grueso convencional; y ocurriendo la misma característica en el caso del peso unitario compactado, reduciéndose en un 82,86% del agregado grueso convencional. Los valores obtenidos del peso unitario tanto suelto como compactado del Polietileno Tereftalato, se encontraron por fuera de los límites establecidos en la Norma COVENIN correspondiente.

De los diseños de mezclas de concreto con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno Tereftalato.

- Se elaboró un diseño de mezcla considerando un asentamiento de 7", para cumplir con una resistencia a compresión de 210 kg/cm², tomando en cuenta además los resultados de peso unitario, densidad, absorción y humedad de los agregados según corresponda. El diseño se ajustó en tres oportunidades modificando su dosificación, donde inicialmente se sustituyó parcialmente el agregado grueso por material polimérico en 10% y 15%, para luego realizar una modificación al observar el comportamiento de la primera sustitución; llevando a un reemplazo en 2%, 5% y 10%.

De las propiedades en estado fresco de los diferentes diseños de mezcla.

- Las mezclas elaboradas con el diseño patrón obtuvieron el asentamiento al cual se diseñó, incluso una de ellas superó dicho valor estando de igual manera dentro del rango, permitiendo realizar correctamente la comparación entre las mezclas con sustitución y las mezclas convencionales.
- Se evidenció una disminución del asentamiento a medida que se incluye mayor porcentaje de Polietileno Tereftalato, causado posiblemente por la densidad del material, resultando en una falta de compacidad entre los agregados, el PET y la pasta de cemento, y por ende una mezcla cada vez más espesa, pesada y con rápido tiempo de secado, además de poseer poca fluidez.

De la determinación de las propiedades de resistencia a compresión en concreto endurecido.

- Los resultados obtenidos para la resistencia a compresión de las diferentes probetas adoptaron un comportamiento variable entre cada uno de los diseños

de mezcla, pero siguieron un patrón en donde a mayor cantidad de material polimérico agregado, la misma disminuye su resistencia a compresión. Esta característica se pudo predecir a partir de los resultados obtenidos en la práctica de asentamiento por el cono de Abrams, en donde se detalla la disminución de esta característica al añadir PET, causando menor capacidad de resistencia a compresión.

- Según los resultados a los 7 días de curado, se pudo observar que solo las mezclas patrón alcanzan el 75% de resistencia a compresión requerido por la norma; sin embargo, la primera mezcla con sustitución del 2% arrojó un resultado cercano a este límite por lo que pudiese tomarse en cuenta. Seguidamente se presentan las demás mezclas que se encontraron por debajo del límite, siendo la de menor resistencia a compresión las mezclas con sustitución del 10% del agregado grueso por material polimérico.
- Los resultados obtenidos a los 28 días de curado, continúan con la tendencia expuesta anteriormente, los cilindros de mezcla patrón alcanzaron la resistencia propuesta en el diseño, mientras que el resto ellos quedaron por debajo de lo diseñado, teniendo como valores más cercanos los obtenidos por las mezclas con sustitución del 2%. Por último, se encontraron con el menor valor las probetas con sustitución del 10% con una disminución de 42,75% y 80,8%.
- En general, se concluyó que las mezclas con sustitución parcial por Polietileno Tereftalato no cumplieron con los requisitos mínimos establecidos para un diseño de concreto con resistencia a compresión de 210 kg/cm².
- La adición de material polimérico afecto la trabajabilidad, que aunado al relativo al valor de la finura del cemento, pudo generar un incremento en la

demanda de agua; y como se mantuvo la relación agua/cemento, la mezcla no cumplió con los valores de asentamiento especificados.

De la determinación de las propiedades de durabilidad de las probetas de concreto mediante el ensayo acelerado de ataques por sulfatos.

- Según los resultados obtenidos, las probetas elaboradas con mezcla patrón fueron capaces de resistir el ataque de sulfatos, traduciéndose en una menor expansión de su masa y una menor reducción en resistencia a compresión; características que concordaron con las especificaciones propuestas en la norma FONDONORMA NTF 4015-12. Por otro lado, las mezclas con sustitución parcial de agregado grueso por Polietileno tereftalato en un 10% fueron las más afectadas por el ataque de sulfatos, respaldándose por el crecimiento en masa y su reducción ante la resistencia a compresión.
- Existió una relación entre el contenido de polietileno tereftalato, el incremento de masa adquirida durante el ensayo y la capacidad de resistencia a compresión una vez termina el mismo; en donde el material polimérico generó mayor cantidad de poros dentro de las probetas, permitiendo la fácil entrada de la solución de sulfato de sodio anhidro, el cual reaccionó formando etringita secundaria, lo que conlleva a un aumento de la masa traducido en la expansión interior de las probetas, perjudicando a su vez la capacidad de resistencia a compresión de la estructura.
- Al analizar los valores obtenidos al comparar la resistencia a compresión de las probetas a 28 días con la resistencia a compresión de las probetas luego del ensayo de durabilidad, se evidenció una disminución de dicha propiedad, presentándose en mayor grado en los cilindros elaborados con la mezcla de sustitución del 10% por PET.

- A pesar de no presenciarse gran desprendimiento de masa, la dirección observada en la realización del ensayo indica que si se extendiese el mismo por un período de tiempo más largo, la expansión interna generada provocaría rupturas, propiciando el inconveniente mencionado inicialmente.
- En conclusión, el añadir material polimérico a la mezcla de concreto generó una mayor cantidad de poros que al estar expuestos a un ambiente químico, permitió la fácil entrada del mismo, perjudicando a gran escala la estructura deteriorando la misma con su capacidad expansiva y disminuyendo su capacidad de resistencia a compresión; acortando por consiguiente su durabilidad y vida útil.

Recomendaciones

Al momento de vaciar las mezclas de concreto con alto contenido de material polimérico, se invita a implementar algún método de vibrado con instrumentos tal y como se expone en la Norma COVENIN 338:2002, de manera que en el interior del molde se distribuya correctamente el contenido líquido y los sólidos, reduciendo la segregación y evitando la porosidad presentada.

Con respecto a la trabajabilidad de las mezclas, se aconseja analizar la adición de algún aditivo que permita mejorar significativamente esta característica; analizando si la baja trabajabilidad en la mezcla es sinónimo de menor capacidad de resistencia a compresión para el caso de mezclas con sustitución parcial de agregado grueso.

Se recomienda aplicar la técnica de capping propuesto en la Norma Venezolana COVENIN 338:2002, a fin de volver aún más planas las caras de las probetas garantizando el paralelismo entre ellas.

Se invita a incrementar el tiempo de exposición de las probetas ante el sulfato de sodio anhidro, así como la cantidad de ciclos presentados en el ensayo, a fin de observar el comportamiento de los cilindros a tiempos prolongados y extender la data obtenida con respecto a la durabilidad.

Se recomienda realizar microscopia electrónica de barrido a fin de observar tanto la microestructura de la etringita primara y secundaria, así como también los elementos presentes en las muestras a cualquiera edad del análisis.

Se recomienda extender el tiempo de estudio de las probetas con el ataque de sulfatos, de forma que se establezca un patrón en los cambios de ellas, con respecto a las características tanto exteriores como interiores, chequeando su apariencia exterior, la evolución del peso y la capacidad de resistencia a compresión.

Referencias

- Apaza, D. (2018). *“DURABILIDAD DEL CONCRETO ELABORADO EN BASE A LA CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR (CBCA) CON CEMENTO PORTLAND, ANTE AGENTES AGRESIVOS*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional Federico Villarreal, Lima, Perú.
- Arias, F. (2012). *EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: Introducción a la metodología científica* (Sexta ed.). Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- ASTM C1012-04. (2004). *Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EEUU.
- ASTM C642-21. (2021). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, EEUU.
- Bolaños, J. (2019). *Reciclado de Plástico PET*. Trabajo de Grado, Universidad Católica San Pablo, Arequipa, Perú.
- Construyendo.co. (s.f.). *Concreto*. Obtenido de : <https://construyendo.co/concreto/tipoconcreto.php>
- COVENIN 1375:1979. (1979). *Método de ensayo para determinar por secado, el contenido de humedad total y superficial en el agregado*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 255:1998. (1998). *Agregados. Determinación de la composición granulométrica*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 263:1978. (1978). *Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado*. FONDONORMA, Venezuela.

- COVENIN 268:1998. (1998). *Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 269:1998. (1998). *Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 270:1998. (1998). *Agregados. Extracción de muestras para Morteros y Concretos. (1ra Revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 273:1998. (1998). *Concreto, Mortero y Componentes. Terminología. (1era Revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 277:2021. (2021). *Concreto. Agregados. Requisitos. (4ta Revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 28:1993. (1993). *Cemento Portland. Especificaciones. (5ta revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 338:2002. (2002). *Método para la Elaboración, Curado y Ensayo a compresión de Cilindros de Concreto. (2da revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 487:1993. (1993). *Cemento Portland. Determinación de la finura por medio del aparato Blaine de permeabilidad. (3era Revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 493:1992. (1992). *Cemento portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat. (3ra revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- COVENIN 494:1994. (1994). *Cemento portland. Determinación de la consistencia normal (2da revisión)*. FONDONORMA, Venezuela.
- Díaz, o., Beltrán, E., & Mendoza, D. (2016). *Cimentación, nivelación y construcción de viga y placa para casa modelo bioecológico en mampostería estructural*

con bloques y su respectiva cubierta a base de PET. Trabajo de Grado, Universidad Cooperativa de Colombia, Medellín, Colombia.

Fernández, J. (2015). *Propuesta de un plan de gestión ambiental para una empresa dedicada al reciclaje de botellas PET.* Trabajo de Grado, Universidad de Costa Rica, San Pablo, Costa Rica.

Ferreindustrialdelvalle.com. (s.f.). *Concretos Argos Livianos.* Obtenido de <https://ferreindustrialdelvalle.com/producto/concretos-argos-livianos/>

FONDONORMA 1753:2006. (2006). *Proyecto y construcción de obras en concreto estructural. (1ra revisión).* FONDONORMA, Venezuela.

FONDONORMA 4015:2012. (2012). *Concreto. Durabilidad.* FONDONORMA, Venezuela.

García, R. (2004). *Análisis comparativo de mezcla de concreto patrón tipo faria con mezcla de concreto rheomac uw-450.* Trabajo de Grado, Universidad Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela.

González, O., & Robles, F. (2005). *Aspectos Fundamentales del Concreto Reforzado.* Ciudad de México, México: Editorial LIMUSA.

González, R., & Ortiz, C. (2022). *Determinación de las Propiedades Mecánicas del concreto elaborado con sustitución parcial del agregado grueso por Materiales Poliméricos reciclables.* Trabajo de Grado, Universidad Católica Andrés Bello - Guayana, Bolívar, Venezuela.

Guzmán, E. (2007). *Los aires contaminados de Ciudad Guayana.* Obtenido de <http://elmonoauallador.blogspot.com/2007/04/los-airescontaminados-de-ciudad.html>

Hernández, E., & Gil, L. (2007). *Hormigón armado y Pretensado (Segunda ed.).* España: Editorial Garceta.

- Hernández, R. (2008). *Metodología de la investigación*. Ciudad de México, México: McGraw-Hill.
- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). Ciudad de México, México: McGraw-Hill.
- Hernandez, S. (2017). *Manual De Prácticas De Concreto Ajustado A Las Normas Covenin, Dirigido A Los Estudiantes De Tsu En Construcción Civil*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Apure, Venezuela.
- Herrera, J., & Valencia, A. (2021). *Mezcla asfáltica modificada con PET, Características que aporta el PET (polietileno tereftalato) en la Mezcla de Asfalto*. Trabajo de Grado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Huanca, S. (2006). *Diseño de mezcla de concreto*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú.
- Hurtado de Barrera, J. (2015). *El proyecto de investigación: Comprensión holística de la metodología y la investigación* (Octava ed.). Caracas, Venezuela: Editorial Ediciones Quirón.
- Malanca, R. (2003). *Diseño de un Ensayo Acelerado para la Determinación del Ataque por Acción de los Sulfatos a Estructuras de Hormigón y Alternativa propuesta para el Diseño de un Contenedor*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de Cuyo, Comisión Nacional de Energía Atómica, Mendoza, Argentina.
- Martinez, A., & Cote, M. (2014). *Diseño y Fabricación de Ladrillo Reutilizando Materiales a Base de PET*. Trabajo de Grado, INGE CUC, Bucaramanga, Colombia.

- Palella, S., & Martins, F. (2010). *Metodología de la investigación cualitativa* (Segunda ed.). Caracas, Venezuela: Editorial FEDUPEL.
- Parker, H. (2008). *Diseño Simplificado De Concreto Reforzado*. México: Editorial Limusa Wiley.
- Pico, C. (2012). *Propuesta de concreto con agregado fino de escoria de cubilote como aporte al estudio de la durabilidad y propiedades acústicas*. Tesis de Grado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J., & y Velazco, G. (2009). *Manual Del Concreto Estructural*. Caracas Venezuela.
- Rivva, E. (2000). *Naturaleza y Materiales del Concreto* (Primera ed.). Lima, Perú: Editorial aci PERU.
- Romero, L. (2012). *Evaluación de factores que afectan la aparición de etringita secundaria como simulación del envejecimiento de mezclas de concreto y su papel dentro de procesos de expansión y agrietamiento*. Trabajo de Grado, ITESM, Monterrey, México.
- Saikia, N., & Brito, J. (2012). *Waste Polyethylene Terephthalate as an Aggregate in Concrete*. Obtenido de <https://www.scielo.br/j/mr/a/Pd9mw5B73Ht4QqZZ7dZmPyG/?format=pdf&lang=en>
- Sánchez, L. (2009). *Que es el Clinker*. España.
- Sánchez, Y. (2019). *América Latina y la “maldita circunstancia” del plástico por todas partes*. Obtenido de <https://www.dw.com/es/am%C3%A9rica-latina-y-la-maldita-circunstancia-delpl%C3%A1stico-por-todas-partes/a-49368140>
- Watts, J. (s.f.). *Cemento: el material más destructivo de la Tierra*. Obtenido de https://www.eldiario.es/internacional/theguardian/cemento-material-destructivotierra_1_1675968.html

Anexos

Anexos A

Tablas empleadas para la caracterización de los materiales en los ensayos de laboratorio.

Tabla 57.

Requisitos físicos para la finura del cemento Portland para el ensayo de permeabilidad al aire de Blaine.

TABLA 2. REQUISITOS FÍSICOS						
REQUISITOS	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V	METODO DE ENSAYO COVENIN
Finura superficie específica. m ² /kg						
Ensayos de permeabilidad al aire (Blaine)						487
Valor promedio, mínimo	280	280	-	280	280	
Valor mínimo, cualquier muestra	260	260	-	260	260	

Nota: Tomado de Norma Venezolana COVENIN 28:1993, (p. 7), por Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), 1958, Venezuela. Derechos reservados por COVENIN.

Tabla 58.

Requisitos físicos para el tiempo de fraguado del cemento Portland mediante el ensayo de la aguja de Vicat.

TABLA 2. REQUISITOS FÍSICOS						
REQUISITOS	TIPO I	TIPO II	TIPO III	TIPO IV	TIPO V	METODO DE ENSAYO COVENIN
Tiempo de fraguado						
Ensayo de Vicat						
Tiempo inicial (minutos)	> 45	> 45	> 45	> 45	> 45	493
Tiempo final (minutos)	< 480	< 480	< 480	< 480	< 480	

Nota: Tomado de Norma Venezolana COVENIN 28:1993, (p. 7), por Comisión Venezolana de Normas Industriales (COVENIN), 1958, Venezuela. Derechos reservados por COVENIN.

Tabla 59.

Tolerancia en los valores del asentamiento medido mediante el cono de Abrams.

Asentamiento	Tolerancias
Menor de 5 cm	± 1,5 cm
entre 5 – 12,5 cm	± 2,5 cm
mayor de 12,5 cm	± 4,0 cm

Nota: Tomado de *Norma Venezolana COVENIN 633:2001*, (p. 10), por FONDONORMA, 1978, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

Tabla 60.

Clases de exposición relacionadas con las condiciones ambientales.

Clase general de exposición				Descripción
Clase	Subclase	Tipo de proceso	Designación	
No agresiva	Seco	Ninguno	C0	Interiores de edificios, no expuestos a condensaciones.
Rural / Urbana	Humedad relativa (HR) media a alta y protegidos de la lluvia	Corrosión por carbonatación	C1	Concreto en el interior, expuesto a HR mayor a 70% (promedio anual) o a condensaciones frecuentes.
	Humedad media y expuesto a la lluvia		C2	Concreto en exteriores protegido de la lluvia en zonas de HR media anual inferior al 70%.
	Humedad alta y expuesto a la lluvia		C3	Concreto en exteriores expuesto a la acción del ambiente (alta temperatura y agua de la lluvia), en zonas con HR media anual superior al 70%.
Marina	En zona Sumergida	Corrosión por cloruros	M1	Miembros de estructuras marinas sumergidas permanentemente, por debajo del nivel mínimo de bajamar.
	En zona de mareas		M3	Miembros de estructuras marinas situadas en la zona de mareas.
	En zona aérea con distancias de 5 a 500 m a la línea de costa		M4	Miembros exteriores de estructuras en las proximidades de la línea de costa (de 5 a 500 m.)
	En zona aérea con distancias de 0 a 5 m		M5	Miembros de estructuras marinas por encima del nivel de pleamar (salpique) a menos de 5 m de la superficie del agua.
Con cloruros de origen diferente del medio marino	En zona húmeda, raramente seca		C14	Piscinas y otras estructuras expuestas a escurrimientos directos de aguas salobres.
	Zona sometida a ciclos de humedad y secado		C15	Estructuras afectadas por el escurrimiento, no continuo, de aguas salobres de procesos industriales.
Ataque químico	Débil	Degradación del concreto	Q2	Miembros situados en ambientes con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar la alteración del concreto con velocidad lenta. Instalaciones industriales con sustancias débilmente agresivas. Construcciones en proximidades de áreas industriales, con agresividad débil. Ver tabla 2.
	Moderado		Q3	Miembros en contacto con el agua de mar. Elementos situados en ambiente con contenidos de sustancias químicas capaces de provocar degradación del concreto con velocidad media de acuerdo a la tabla 2. Estructuras marinas en general. Instalaciones industriales con sustancias de agresividad media.
	Severo		Q4	Miembros expuestos a degradación severa del concreto. Instalaciones industriales con sustancias de alta agresividad de acuerdo a la tabla 2. Instalaciones de conducción y tratamiento de aguas residuales.

Nota: Tomado de *Norma FONDONORMA 415:2012*, (p. 6), por Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad, 1978, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

Tabla 61.

Valores límites recomendados para la composición y propiedades del concreto.

	Sin riesgo de corrosión	Corrosión inducida por carbonatación					Corrosión inducida por cloruros					Ambientes químicamente agresivos		
							Provenientes de agua de mar				Origen distinto del agua de mar			
	CO	C0	C1	C2	C3	M1	M3	M4	M5	CL4	CL5	Q2	Q3	Q4
máxima relación a/c	---	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,45	0,45	0,4	0,45	0,40	0,55	0,50	0,45
contenido mínimo de cemento kg/m ³	---	260	280	280	300	300	340	380	420	380	420	300	340	380
recubrimiento mínimo mm		20	20	30	40	50	50	50	70	50	70	50	50	50
otros requerimientos												Usar ^(B) cemento resistente a sulfatos		
<p>(A) El contenido de esta tabla está enfocado en criterios actualizados de durabilidad del concreto; no obstante, el lector puede tener en cuenta las prescripciones de la tabla 7.2.4 de la norma NVF 1753 y adoptar, de preferencia, aquellos valores que sean más conservadores.</p> <p>(B) Se debe utilizar cemento Portland tipo II y V si la exposición es a un ambiente Q3 y Q4, respectivamente. Existen algunos países donde el cemento tipo I posee un contenido bajo de C3A (< 5 %), lo cual también podría utilizarse.</p>														

Nota: Tomado de *Norma FONDONORMA 415:2012*, (p. 7), por Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad, 1978, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

Anexos B

Ensayos elaborados en el laboratorio.



Figura 58. Cuarteo o separación de la muestra de agregado grueso (piedra) para ensayo de peso unitario. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 59. Muestra de agregado grueso (piedra) para peso unitario suelto y compactado. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 60. Cuarteo o separación de la muestra de agregado grueso (plástico) para ensayo de peso unitario. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.

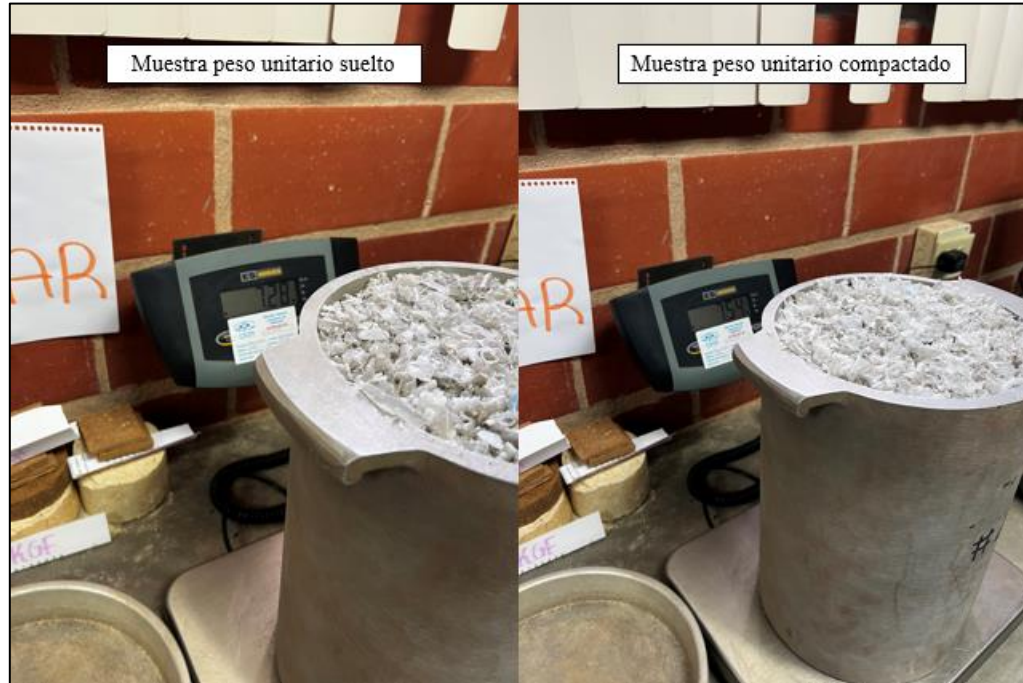


Figura 61. Muestra de agregado grueso (plástico) para peso unitario suelto y compactado. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.

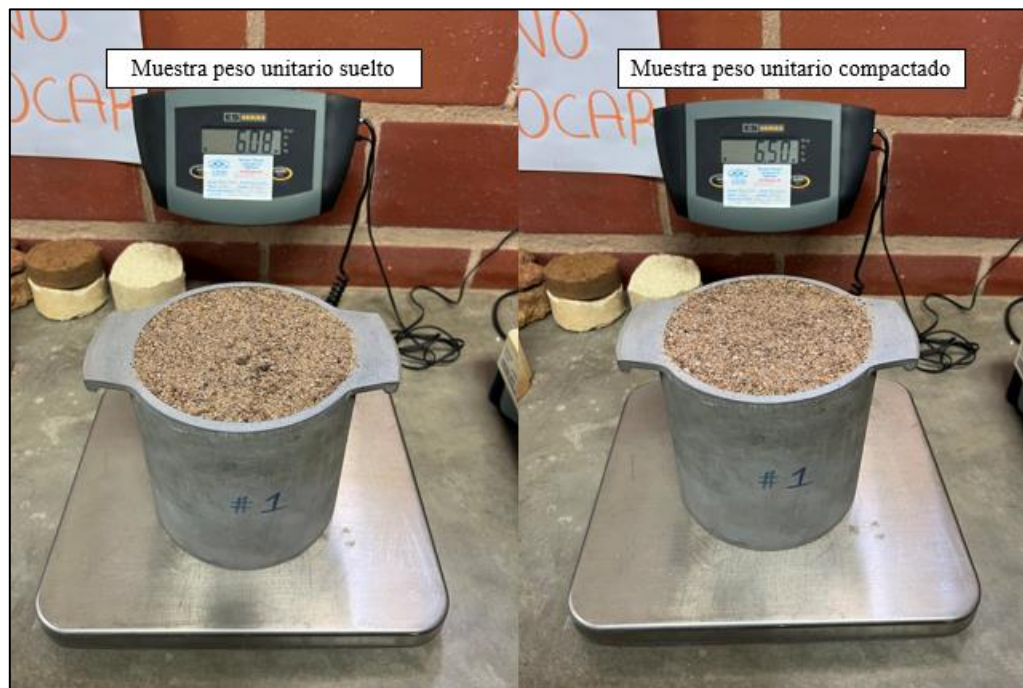


Figura 62. Muestra de agregado fino (arena) para peso unitario suelto y compactado. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 63. Preparación y secado de agregado grueso (piedra) para ensayo de densidad y absorción. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 64. Preparación de agregado fino (arena) para ensayo de densidad y absorción. Tomada por Perdomo, 2022, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 65. Introducción de muestra y esferas para ensayo de resistencia al desgaste de agregado grueso. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 66. Preparación de muestra y medición de ensayo de Finura de Blaine. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Anexos C

Elaboración de mezclas



Figura 67. Preparación de mezcla de concreto con sustitución por material polimérico Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.



Figura 68. Probetas en moldes cilíndricos para su posterior secado, desmoldado y curado. Tomada por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Anexos D

**Diseño de mezcla de concreto patrón de resistencia 210 kg/cm^2 para
 1 m^3**

Según el segundo objetivo del presente trabajo de grado, se deben realizar diseños de mezclas para la elaboración de cilindros de concreto; para ello, fue necesario utilizar como guía el libro Manual del concreto estructural de los autores Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco (2009) y la Norma propuesta por la American Concrete Institute que lleva por nombre “Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)” (2002), las cuales disponen de todos los elementos necesarios para la elaboración de diseños de mezclas de concreto.

Como se mencionó anteriormente en esta tesis de grado, como inicio se buscó realizar un diseño de mezcla que contara con resistencia a compresión de 210 kg/cm^2 y para ello se especificaron las siguientes características:

- ✓ El tamaño máximo de los agregados es de 1”; siendo el agregado grueso piedra picada y el agregado fino arena lavada.
- ✓ Para el asentamiento del concreto en esta fresco, se seleccionó un valor de 7” (177 mm), buscando obtener una mezcla trabajable y fluida.
- ✓ Tomando como referencia el libro mencionado anteriormente, se establece que el peso específico del cemento es $3,15 \text{ gr/cm}^3$.
- ✓ El módulo de finura calculado para los agregados ensayados es de 3,61
- ✓ El peso específico del agregado grueso (piedra) tiene un valor de $2,68 \text{ gr/ml}$ (2680 kg/m^3) y el peso específico del agregado fino (arena) de $2,57 \text{ gr/ml}$ (2570 kg/m^3), tomando en consideración las tablas 20 y 18 respectivamente del presente trabajo.
- ✓ Los cilindros de concreto se encuentran estandarizados, teniendo unas dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.

Resistencia promedio requerida (F_{cr})

Para el cálculo de la resistencia promedio requerida se presentan dos alternativas, cuando se conoce la desviación estándar y cuando no se conoce; en el caso del presente proyecto de grado, no se poseen datos que puedan establecer una desviación estándar, por lo tanto se debe asumir un control de calidad a partir de la siguiente tabla:

Tabla 62.

Resistencia promedio a la compresión requerida, F_{cr} , cuando no se dispone de datos para establecer la desviación estándar.

Resistencia especificada a la compresión F_c (Kg/cm^2)	Resistencia requerida a la compresión F_{cr} (Kg/cm^2)		
	Control de calidad excelente	Control de calidad intermedio	Sin control de calidad
Menor de 210	$F_c + 45$	$F_c + 80$	$F_c + 130$
De 210 a 350	$F_c + 60$	$F_c + 95$	$F_c + 170$
Mas de 350	$F_c + 75$	$F_c + 110$	$F_c + 210$

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p.134) por J. Porrero, C. Ramos, J. Grases, G. Velazco, 2009, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases, Gilberto Velazco.

Asumiendo un control de calidad intermedio y habiendo propuesto una resistencia de $210 \text{ kg}/\text{cm}^2$, se obtiene el siguiente resultado:

$$f'_{cr} = f_{cr} + 95 = 305 \text{ kgf}/\text{cm}^2$$

Contenido de aire

Una vez establecida la resistencia promedio requerida, es necesario determinar el contenido de aire que tendrá la mezcla, en donde se toma en cuenta esencialmente el tamaño máximo de los agregados; el cual para el presente trabajo se trata de 1 pulgada. El valor del porcentaje de aire atrapado se extrae de la Norma ACI 211.1-91 y se presentan a continuación:

Tabla 63.

Requerimientos aproximados de contenido de aire según el tamaño máximo del agregado.

Tamaño máximo Nominal	Contenido de aire
(pulg)	(%)
3/8"	3,0
1/2"	2,5
3/4"	2,0
1	1,5
1 1/2"	1,0
2"	0,5
3"	0,3
4"	0,2

Nota: Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, (p. 8) por American Concrete Institute, 2002, Estados Unidos. Derechos reservados por American Concrete Institute

Tomando en consideración el tamaño máximo seleccionado, se adopta un porcentaje de aire atrapado de 1,5%.

Contenido de agua

Otro dato relacionado con el tamaño máximo de los agregados es el contenido de agua que se necesita para la mezcla, el cual se selecciona a través de tablas expuestas por la Norma ACI 211.1-91 y se muestra a continuación:

Tabla 64.

Requerimientos aproximados de agua de mezclado según el tamaño máximo del agregado.

Agua en Lts/m³ para los tamaños máximos nominales de agregados gruesos y consistencia indicada								
Asentamiento (pulg)	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	4"
Concreto sin aire incorporado								
1 a 2	207	149	190	179	166	154	130	113
3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
5 a 7	243	228	216	202	190	178	160	-
Concreto con aire incorporado								
1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107
3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119
5 a 7	216	205	197	184	174	166	154	-

Nota: Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, (p. 8) por American Concrete Institute, 2002, Estados Unidos. Derechos reservados por American Concrete Institute

De esta manera para un tamaño máximo de 1" y un asentamiento propuesto para 7", se adopta un valor de cantidad de agua estimada de 202 Lts/m³.

Relación agua/cemento.

Conocer el estimado para el valor de la relación agua/cemento es de suma importancia, y es uno de los factores que condiciona la resistencia final de la mezcla. El mismo se selecciona a partir de la resistencia a compresión a los 28 días propuesta, siendo de 210 kgf/cm², tal como se muestra a continuación:

Tabla 65.

Relación agua cemento y la resistencia del concreto.

RESISTENCIA ESPECIFICADA Fc (kg/cm ²)	α (Relación agua/cemento) por peso.	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0,80	0,71
200	0,70	0,61
250	0,62	0,53
300	0,55	0,46
350	0,48	0,40
400	0,43	-
450	0,38	-

Nota: Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, (p. 9) por American Concrete Institute, 2002, Estados Unidos. Derechos reservados por American Concrete Institute

La resistencia especificada Fc propuesta para este diseño de mezcla es de 210 kg/cm² a los 28 días de haberse curado los cilindros. Ingresando a la tabla se puede observar que no se encuentra el valor propuesto específicamente, se asume entonces un valor de $\alpha = 0,5$

Contenido de cemento

Una vez establecido la relación agua cemento, es posible utilizar su ecuación para determinar el contenido de cemento, gracias a que anteriormente se seleccionó el contenido de agua requerido, se determina de la siguiente manera:

$$\alpha = \frac{a}{C}$$

$$C = \frac{a}{\alpha} = \frac{202}{0,5} = 404 \text{ kg}$$

El contenido de cemento requerido para la elaboración de la mezcla de concreto será de 404 kg.

Contenido de agregado grueso.

El contenido de agregado grueso se determina también mediante valores tabulados, establecidos por prácticas anteriores y que en este caso toma en cuenta el tamaño máximo nominal del agregado grueso y el módulo de finura que se obtuvo por la granulometría de los agregados, se identifican en la tabla anexa:

Tabla 66.

Volumen del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.

Tamaño máximo nominal del agregado grueso (pulg.)	Volumen de Agregado grueso seco y compactado.			
	Módulo de Fineza del agregado fino.			
	2,4	2,6	2,8	3
3/8"	0,50	0,48	0,46	0,44
1/2"	0,59	0,57	0,55	0,53
3/4"	0,66	0,64	0,62	0,60
1"	0,71	0,69	0,67	0,65
1 1/2"	0,75	0,73	0,71	0,69
2"	0,78	0,76	0,74	0,72
3"	0,82	0,80	0,78	0,76
6"	0,87	0,85	0,83	0,81

Nota: Adaptado de *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)*, (p. 12) por American Concrete Institute, 2002, Estados Unidos. Derechos reservados por American Concrete Institute.

Al ubicar el tamaño máximo nominal de 1" y el módulo de finura obtenido de 3,61, es posible observar que este último no se encuentra en la tabla debido a que es bastante alto; la norma recomienda tomar el valor más cercano para estos casos, por tanto se adopta $(b/b_o) = 0,65$ y se calcula el peso del agregado grueso a continuación:

$$\text{Peso A. Grueso} = \frac{b}{b_o} \times \text{Peso Unitario Compactado}$$

$$\text{Peso A. Grueso} = 0,65 \times 1641,18 = 1066,77 \text{ kg}$$

Hasta este punto, ya se han determinado todos los componentes del concreto excepto el agregado fino, el cual debe determinarse por diferencia. Partiendo de que el cálculo se realizará para 1 m³ de concreto, se deben sumar los volúmenes absolutos de todos los componentes, es por ello que se llevan los mismos a unidades de volumen de la siguiente forma:

$$\text{Cemento} = \frac{404}{3,15 \times 1000} = 0,128 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua} = \frac{202 \text{ lts}}{1000} = 0,202 \text{ m}^3$$

$$\text{Aire} = \frac{1,5}{100} = 0,015 \text{ m}^3$$

$$\text{Agregado Grueso} = \frac{1066,77}{2680} = 0,398 \text{ m}^3$$

Conocidos los volúmenes de los componentes del concreto, se sustituyen en la siguiente ecuación a fin de poder despejar el volumen de agregado fino, siendo el valor faltante:

$$V_c + V_a + V + V_{ag} + V_{af} = 1 \text{ m}^3$$

$$0,128 + 0,202 + 0,015 + 0,398 + V_{af} = 1 \text{ m}^3$$

$$V_{af} = 1 - 0,743 = 0,257 \text{ m}^3$$

Con el volumen del agregado fino conocido, es posible determinar su peso de la siguiente forma:

$$\text{Peso A. Fino} = Vol_{af} \times PE_{af}$$

$$\text{Peso A. Fino} = 0,257 \times 2572 = 661 \text{ kg}$$

Corrección por humedad y absorción

Un aspecto que se debe considerar es que en los cálculos realizados hasta el momento se ha asumido que los materiales no absorben y no contienen humedad, es decir, se encuentran en condiciones ideales; es por ello que se debe aplicar una corrección para evitar que estos factores perjudiquen la consistencia de la mezcla. A continuación se muestran los resultados de los porcentajes de absorción y humedad para cada uno de los agregados ensayados en apartados anteriores del presente trabajo de grado:

Tabla 67.

Porcentaje de Absorción y porcentaje de Humedad de los agregados.

	Absorción (%)	Humedad (%)
Agregado Fino (arena)	0,853	0,7
Agregado Grueso (piedra)	0,56	0,1

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.

Se realiza la corrección de cada uno de los agregados utilizando la siguiente ecuación:

$$\text{Corrección por humedad} = \text{Peso seco agregado} \times \left(\left(\frac{\%W}{100} \right) + 1 \right)$$

$$\text{Correc Humed A. Fino} = 661 \times \left(\left(\frac{0,7}{100} \right) + 1 \right) = 665,63 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Correc Humed A. Grueso} = 1066,77 \times \left(\left(\frac{0,1}{100} \right) + 1 \right) = 1067,84 \text{ kg/m}^3$$

Una vez se efectúa la corrección por humedad de los agregados, se debe determinar además el aporte de agua a la mezcla de cada uno de los agregados empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Aporte de agua} = (\%W - \%Abs) \times \frac{\text{Peso seco}}{100}$$

$$\text{Aport agua A. Fino} = (0,7 - 0,853) \times \frac{661}{100} = -1,04 \text{ lts}$$

$$\text{Aport agua A. Grueso} = (0,1 - 0,56) \times \frac{1066,77}{100} = -4,91 \text{ lts}$$

Por último se debe realizar el cálculo del agua efectiva, la cual es simplemente la diferencia entre los litros de agua calculados anteriormente y la sumatoria del aporte de agua a la mezcla, la ecuación y el resultado se muestran a continuación:

$$\text{Agua Efectiva} = 202 \text{ lts} - (-1,04 - 4,91) = 207,95 \text{ lts}$$

Se presenta a continuación una tabla resumen de las dosificaciones calculadas para el diseño de mezcla con sus correcciones necesarias.

Tabla 68.

Resumen de dosificaciones de material para un diseño de mezcla de 210 kg/cm² equivalente a 1 m³ (1000 lts).

Material	Peso específico (kg/m³)	Volumen (m³)		Peso (kg/m³)	
Cemento	3150	0,128		404	
Agua	1	0,202		207,95	
Aire	-	0,015		-	
Arena	2570	0,655	0,257	1732,95	665,63
Piedra	2680		0,398		1067,84
		1		2345,42	

Nota: Elaborado por Perdomo, 2023, Venezuela. Derechos reservados por autor.