

**Determinación de las propiedades del concreto a partir de la
sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido**

TRABAJO DE GRADO

presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

Eulises Alfredo Velásquez Díaz

Youssef Antonio Zakhia Dahdad

TUTOR

María Victoria Bolívar Sánchez

FECHA

Noviembre, 2021

Dedicatoria

*A mi difunto Abuelo Orange Díaz, que siempre
confió y estuvo pendiente de mí, y a mis padres
Eulise Velásquez Y Jacqueline Díaz, que
Siempre me han apoyado.*

Eulises Velásquez

*A mi difunta Abuela Ghorra Antoun, que siempre
me vio como un ingeniero, y a mis padres
Antoine Zakhia y Lina Dahdah, que
siempre han creído en mí.*

Youssef Zakhia

Agradecimientos

Primeramente, agradezco a Dios por darme la sabiduría y la perseverancia para lograr esta meta, además de siempre estar cuando lo necesito.

A mis padres y hermano, Eulise Velásquez, Jacqueline Díaz y Eliezer Velásquez, y a mi abuela, mis tías y mis tíos, por brindarme siempre su apoyo en las buenas y en las malas, por ayudarme a salir adelante y por siempre dar todo por mí.

A la Universidad Católica Andrés Bello, por apoyarme con su repertorio de becas desde el primer semestre. A los profesores Yolanda Montesinos, Maxwell Martínez y Adolia Rosales, por ayudarme a optar por estas becas y darme sus consejos.

A mi compañero de tesis y amigo Youssef Zakhia, porque siempre me ha brindado su apoyo así no lo pida y su ayuda me ha permitido terminar esta carrera.

A nuestra tutora, María Bolívar, y al técnico de laboratorio Juan Granados (Sr. Juan), por su dedicación, sus enseñanzas y su apoyo en el desarrollo de este trabajo.

A mi compañera, amiga y hermana, Minerva González, por su paciencia y no olvidarse de mi nunca. A mi compañero, amigo y hermano, Juan Osorio, por sus ideas y locuras que sacan siempre risas.

A mis compañeros Andrés Muñoz, Laura García, Vanessa Salazar, Miguel Perozo, Rafael Parra y Luis González (Kike), por esos momentos de estudio.

A mi novia Disbelk Pinto, por mandarme a estudiar cuando no quería y por estar siempre que la necesito.

Eulises Velásquez

Agradecimientos

A mis padres Antoine y Lina, los cuales además de darme la vida, me llenaron de valores y conocimientos los cuales me han servido para alcanzar mis metas.

A mi hermana Tatiana, la cual incontables veces ha sido mi apoyo y mi compañera para todo.

A mis amigos Luís González y Miguel Perozo, los cuales me han acompañado desde el principio de este camino y se han vuelto parte importante de mi vida, ayudándome en mis momentos más difíciles y disfrutando de los mejores.

A mi primo Antoine Zakhia, por ser el que me guiaba en el inicio aconsejándome para que mi camino universitario se hiciera más ameno, y apoyándome innumerables veces.

A mi compañero de tesis y amigo Eulises Velásquez, por apoyarme desde el principio en todo lo que tiene que ver con la universidad, por guiarme más de una vez, tener fe en mí y ayudarme en todo este proceso.

Youssef Zakhia

Índice de contenido

	pp.
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Índice de Tablas	ix
Índice de Figuras	xi
Resumen	xiii
Introducción	14
Capítulo I	16
El Problema	16
Planteamiento del problema.....	16
Objetivos	18
Objetivo general.....	18
Objetivos específicos	18
Justificación.....	19
Alcance y limitación	20
Capítulo II	21
Marco Teórico	21
Antecedentes	21
Bases teóricas	26
Concreto	26
Tipos de concreto.	27
Diseños de mezcla.....	30
Proporción entre agregados.....	31
Datos de entrada.....	31
Relación triangular.....	36
Concreto en estado fresco	38
Consistencia.....	38
Trabajabilidad.....	39

Exudación.....	39
Segregación.....	39
Contracción.....	40
Cohesividad.....	40
Peso unitario.....	40
Asentamiento.....	40
Elaboración y curado de muestras cilíndricas.....	41
Concreto en estado endurecido.....	42
Resistencia a compresión.....	42
Tracción o Resistencia a tensión por compresión diametral.....	43
Flexión.....	43
Densidad.....	44
Elasticidad.....	44
Caracterización de los materiales tradicionales.....	45
Agua.....	45
Cemento.....	46
Agregados.....	49
El Vidrio.....	52
Tipos de Vidrios.....	53
Composición del vidrio.....	56
Propiedades Físicas del vidrio.....	56
Propiedades Mecánicas del vidrio.....	58
Fabricación del vidrio.....	58
Usos del vidrio.....	60
Reciclaje del vidrio.....	64
Bases legales.....	65
Terminología básica.....	67
Capítulo III.....	72
Marco Metodológico.....	72
Tipo de investigación.....	72

Diseño de la investigación	73
Unidad de análisis	73
Sistema de variables	74
Técnicas e instrumentos de recolección de información.....	76
Procedimiento	76
Fase 1: obtención de los componentes del concreto	77
Fase 2: ensayos de los componentes del concreto	78
Ensayo de peso unitario de los agregados.....	78
Ensayo de densidad y absorción de los agregados.....	80
Ensayo de granulometría de los agregados.....	82
Ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso.....	83
Ensayo de consistencia normal del cemento.....	83
Ensayo del tiempo de fraguado del cemento.....	85
Fase 3: mezcla de concreto	85
Elaboración de los cilindros.....	85
Ensayos de asentamiento.....	87
Ensayos de resistencia a compresión de las probetas.....	88
Capítulo IV	89
Presentación y análisis de resultados	89
Ensayos de peso unitario de los agregados	89
Calibración de recipientes.....	89
Peso unitario suelto	91
Peso unitario compacto	93
Ensayos de densidad y absorción de los agregados	95
Densidad y absorción de la arena.....	95
Densidad y absorción del vidrio.....	97
Densidad y absorción del agregado grueso.....	98
Ensayos de granulometría de los agregados.....	100
Granulometría del agregado fino (arena)	101
Granulometría del agregado grueso	104

Ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso.....	108
Ensayo de la consistencia normal del cemento Portland	110
Ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland	112
Diseños de mezclas elaborados	115
Ensayos de asentamiento.....	116
Ensayos de resistencia a la compresión y modos de falla.....	118
Concreto patrón.....	122
Concreto con sustitución del 10%	128
Concreto con sustitución del 15%	137
Resumen de las resistencias a compresión y fallas de las probetas	146
Posibles usos en la construcción del concreto con agregado de vidrio.....	148
Conclusiones y Recomendaciones.....	151
Conclusiones	151
De la caracterización del vidrio molido	151
De los diseños de mezclas de concreto con adiciones de vidrio molido.....	152
De las propiedades en estado fresco de las dosificaciones preparadas	152
De la resistencia a compresión del concreto endurecido	153
Del uso del concreto con sustitución de agregado fino por vidrio molido	155
Recomendaciones.....	156
Referencias.....	158
Anexos	164

Índice de Tablas

Tabla	pp.
1. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.	33
2. Resistencia promedio a la compresión requerida cuando no hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.	34
3. Kr factor para corregir α por tamaño máximo.	36
4. Ka factor para corregir α por tipo de agregado.	36
5. C ₁ factor para corregir C por tamaño máximo.	38
6. C ₂ factor para corregir C por tipo de agregado.	38
7. Consistencia y trabajabilidad según el asentamiento.	39
8. Componentes principales del cemento y sus funciones.	47
9. Ecuaciones para el cálculo de las distintas densidades.	51
10. Elementos del vidrio común.	56
11. Colorantes del vidrio.	57
12. Operacionalización de las variables.	75
13. Peso unitario del agua.	90
14. Resultado del factor de calibración para el Recipiente N°1.	90
15. Resultado del factor de calibración para el Recipiente N°2.	91
16. Peso unitario suelto del agregado fino (arena).	92
17. Peso unitario suelto del agregado fino (vidrio).	92
18. Peso unitario suelto del agregado grueso.	93
19. Peso unitario compacto del agregado fino (arena).	93
20. Peso unitario compacto del agregado fino (vidrio).	94
21. Peso unitario compacto del agregado grueso.	94
22. Valores usuales de las relaciones peso/volumen de los agregados no livianos. ...	95
23. Resultados de la de densidad y absorción del agregado fino (arena).	96
24. Resultados de la de densidad y absorción del agregado fino (vidrio).	97
25. Resultados de la de densidad y absorción del agregado grueso.	99

26. Resultados de la granulometría del agregado fino (arena).....	101
27. Límites en la granulometría del agregado fino.	103
28. Resultados de la granulometría del agregado grueso.....	105
29. Límites de los porcentajes en peso que pasan los dos cedazos de aberturas cuadradas.....	106
30. Gradaciones de muestras de ensayo.....	109
31. Resultados del porcentaje de desgaste del agregado grueso.	110
32. Penetración de la aguja de Vicat en función del tiempo.	113
33. Identificación de las mezclas.	115
34. Diseños de mezclas.	116
35. Asentamientos obtenidos por cada mezcla.	117
36. Resultados de la resistencia a compresión.	119
37. Resultados probetas del concreto patrón a los 7 días.....	122
38. Resultados probetas del concreto patrón a los 28 días.....	124
39. Resultados probetas del concreto patrón a los 90 días.....	126
40. Resultados probetas del concreto con sustitución del 10% de vidrio a los 7 días.	128
41. Resultados probetas del concreto con sustitución del 10% de vidrio a los 28 días.	131
42. Resultados probetas del concreto con sustitución del 10% de vidrio a los 90 días.	134
43. Resultados probetas del concreto con sustitución del 15% de vidrio a los 7 días.	137
44. Resultados probetas del concreto con sustitución del 15% de vidrio a los 28 días.	140
45. Resultados probetas del concreto con sustitución del 15% de vidrio a los 90 días.	143
46. Tabla resumen de los tipos de fallas obtenidas.	146

Índice de Figuras

Figura	pp.
1. Representación gráfica de la ley de Abrams	35
2. Representación gráfica de la relación triangular	37
3. Flexión en vigas. Tomado de Ensayo Flexión de Vigas	44
4. Esfuerzos y deformaciones	45
5. Escala de Mohs	53
6. Descripción del proceso de fabricación del vidrio	60
7. Muestras de arena lavada y piedra picada utilizados	77
8. Compactación para obtener el peso unitario compacto.....	79
9. Procedimiento para obtener arena saturada con superficie seca	81
10. Cernidora mecánica con tamices.....	82
11. Mezclado de la pasta de cemento para obtener la consistencia normal.	84
12. Proceso de llenado de los cilindros, desacoplado de los mismos y curado de las probetas	87
13. Determinación del asentamiento	88
14. Curva granulométrica del agregado fino (arena)	104
15. Curva granulométrica del agregado grueso.....	107
16. Cantidad de cemento para ensayo de consistencia normal	111
17. Descenso de la aguja de Vicat a los 30 segundos de ensayo	112
18. Curva de ajuste para la obtención del tiempo de fraguado inicial	114
19. Gráfico de barras de la variación del asentamiento	118
20. Gráfico de los resultados de la resistencia a compresión por mezcla	120
21. Modos de falla del concreto patrón (G1) a 7 días	123
22. Modos de falla del concreto patrón (G1) a 28 días	125
23. Modos de falla del concreto patrón (G1) a 90 días	127
24. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G2) a 7 días	129
25. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G4) a 7 días	130
26. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G2) a 28 días	132

27. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G4) a 28 días	133
28. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G2) a 90 días	135
29. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G4) a 90 días	136
30. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G3) a 7 días	138
31. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G5) a 7 días	139
32. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G3) a 28 días	141
33. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G5) a 28 días	142
34. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G3) a 90 días	144
35. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G5) a 90 días	145
36. Tipos de falla en los cilindros	147
37. Factores de modificación para la desviación estándar cuando se dispone de menos de 30 ensayos	166
38. Relación agua/cemento permisible cuando no existen datos de ensayos en obra	166
39. Máximos valores de α para distintas condiciones de servicio o ambientales	166
40. Esquema de los pasos del diseño de mezcla	167
41. Separación de la muestra de agregado fino para ensayo de peso unitario	169
42. Calibración del recipiente para agregado fino	170
43. Muestra de agregado fino para peso unitario suelto.....	171
44. Muestra de agregado grueso para peso unitario suelto	172
45. Muestra de agregado grueso en cesta.....	174
46. Muestra de agregado fino para ensayo de densidad y absorción	175
47. Procedimiento de ensayo de densidad con picnómetro.....	176
48. Secado de las muestras para obtener la absorción	177
49. Transporte de arena al lugar de mezclado.....	179
50. Transporte de grava al lugar de mezclado.....	180
51. Agregando el vidrio molido a la mezcla	181
52. Mezclado de los componentes del concreto sin agua	182
53. Limpieza de los cilindros	183
54. Tipos de fracturas de esfuerzo a compresión	185

**Determinación de las propiedades del concreto a partir de la sustitución parcial
de agregado fino por vidrio molido**

Autores: Eulises Alfredo Velásquez Díaz
Youssef Antonio Zakhia Dahdah
Tutor: María Victoria Bolívar Sánchez
Fecha: Noviembre, 2021

Resumen

El uso del vidrio como agregado fino para la elaboración del concreto es una de las alternativas existentes para mitigar los efectos negativos causados por la producción de este compuesto debido a su alto impacto en la atmósfera terrestre gracias a la emisión de CO₂. Con su uso se pudiera lograr una reducción importante ya que se utilizará como materia prima un material reciclado, tratando dos problemáticas al mismo tiempo como lo son la búsqueda por lograr un concreto sustentable que pueda cumplir las exigencias requeridas por las empresas constructoras, y la reducción de vidrio en las calles como parte de un plan de reciclaje masivo en la zona. Para ello fue necesario la realización de distintas pruebas de laboratorio con la finalidad de estudiar cada una de las propiedades obtenidas mediante distintas mezclas hechas a partir del uso de vidrio molido como agregado fino distribuidas en distintas concentraciones y elaboradas en distintos tiempos para abarcar todas las posibilidades y estadísticas necesarias. Como resultado, se obtuvo de que es factible el uso de vidrio molido en condiciones en donde resulte difícil la obtención de arena sin representar una disminución importante de sus propiedades, ya que los datos arrojaron estadísticas similares a cuando se utiliza la arena común, colaborando a su vez con el medioambiente al hacer uso de un material reciclado sin la necesidad de movimientos de tierra.

Palabras clave: Concreto, Vidrio, Reciclaje, Desecho, Resistencia, Compresión.

Introducción

Se puede afirmar que el concreto es uno de los avances más importantes en la historia de la evolución del ser humano, ya que ha servido durante años para levantar a las grandes ciudades las cuales le dan vida al ecosistema existente en el mundo.

Desde la antigüedad se han usado diversas variaciones de este material, con el cual se han construido desde los pueblos más pequeños, hasta los imperios más grandes, pasando por un sinnúmero de evoluciones hasta llegar a lo que conocemos hoy en día como hormigón.

Conocemos al hormigón como un material compuesto de áridos (agregados finos y gruesos), un aglomerante como el cemento, agua y aditivos que lo dotan de diversas propiedades las cuales lo convierten en un material bastante resistente a los ataques atmosféricos y que puede durar con facilidad más de 40 años sin perder sus propiedades. Sin duda no seríamos nada como sociedad si no fuera por la ayuda que nos proporciona el concreto a la hora de construir, no obstante, esto también produce un fuerte impacto negativo el cual contrarresta su potencial de desarrollo, haciendo que su uso deba ser regulado.

La producción de cemento, uno de los materiales fundamentales para la elaboración del concreto, representa alrededor de un 8% de la emisión de CO₂ a la atmósfera, haciendo de este uno de los agentes más contaminantes que tenemos en el planeta tierra, colaborando así con la problemática actual del calentamiento global. Cada año se producen 4.000 millones de toneladas de cemento, lo cual es un número bastante grande para tener en cuenta.

Muchas han sido las nuevas tecnologías que se han implementado para contrarrestar esta problemática, haciendo usos de materiales renovables para reducir el impacto que pueda tener el producto final sobre el ecosistema, y de esta manera seguir

con el desarrollo de las poblaciones actuales, y a su vez, colaborar con el medio ambiente al no utilizar materiales tan contaminantes o hacer uso de materiales reciclados.

Muchas han sido las pruebas realizadas para determinar cuáles de estos materiales son en realidad los más capacitados para dotar de propiedades al concreto de manera que se pueda usar de manera normal en las obras, ayudando así también al reciclaje de muchos compuestos que hoy en día se consideran agentes contaminantes del medioambiente. Entre ellos se destacan el plástico, el vidrio, el caucho, entre otros.

El trabajo de grado se desarrolló en cuatro capítulos. El capítulo uno describe la problemática existente con el efecto negativo del concreto hacia el ecosistema y su posible reducción gracias a la utilización del vidrio como material renovable.

El capítulo dos muestra los antecedentes utilizados en donde se resalta su importancia y relación que comparten con el presente trabajo de investigación, así como las bases teóricas que dotan de conceptos relacionados a todo lo que tiene que ver con concreto, material renovable como el vidrio, y las leyes de los materiales que se tienen presentes en la realización de los ensayos.

En el capítulo tres se muestra el marco metodológico, en el cual se explica de manera corta pero precisa el tipo de investigación que se realizó, su unidad de análisis y las distintas técnicas e instrumentos para la realización del mismo.

Y para el capítulo cuatro, se desarrollan los distintos ensayos realizados para el estudio del vidrio como agregado en la elaboración del concreto y sus propiedades, así como las distintas tablas y resultados finales de cada uno de los ensayos realizados en el laboratorio.

Capítulo I

El Problema

Planteamiento del problema

La humanidad está en constante crecimiento, el avance demográfico con el consecuente aumento de la población, puede ocasionar un aumento en la contaminación. El crecimiento poblacional puede traer consigo muchas ventajas, pero también problemáticas y consecuencias inesperadas, tales como: aumento de la demanda de bienes y servicios, aumento en la cantidad de obras necesarias para dar sustento a todas las necesidades requeridas por cada nuevo ser humano. Desde el punto de vista de la construcción, se ha dado lugar al desarrollo de nuevas tecnologías amigables al ambiente, con facilidad de ejecución, en un menor tiempo, con menor costo y que logre satisfacer todas las necesidades para la que fue concebida.

Debido a los diferentes impactos adversos que la industria genera, como pueden ser la pérdida de la diversidad biológica, menor productividad laboral, agotamiento de recursos, vertido de residuos, calentamiento global, entre otros, se está afectando el futuro del ser humano y los procesos de transformación sociales y culturales. Según Pertuz (2010, p. 109), debe haber un compromiso en las sociedades industrializadas, a fin de revertir el impacto ambiental, promoviendo un cambio de técnicas para la producción de materiales y sus procesos constructivos.

El mundo de la ingeniería por la naturaleza de sus actividades, debe cumplir con los requisitos técnicos de la construcción, a la vez que debe garantizar la calidad

de los materiales que utiliza, y el reto actual es el que se compaginen ambas fronteras con la preservación ambiental. Mucho se discute sobre los materiales tradicionalmente usados, como el caso del concreto.

El concreto u hormigón es un material que se puede considerar constituido por dos partes: una es un producto pastoso y moldeable, que tiene la propiedad de endurecer con el tiempo, y la otra son trozos pétreos que quedan englobados en esa pasta. A su vez, la pasta está constituida por agua y un producto aglomerante o conglomerante, que es el cemento. El agua cumple la doble misión de dar fluidez a la mezcla y de reaccionar químicamente con el cemento dando lugar, con ello, a su endurecimiento. (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, p.31).

El hormigón siendo uno de los materiales más usados en la construcción a nivel mundial, sus componentes básicos no han cambiado a lo largo del tiempo, pero si se han desarrollado tecnologías, para adicionar aditivos especiales que mejoran sus propiedades, a la vez que garantizan su uso según las especificaciones de proyecto.

Ahora bien, en la actualidad se están realizando propuestas para utilizar materiales de desecho en la fabricación del concreto, de forma de responder a los innumerables debates y necesidades para minimizar el impacto negativo al ambiente. En ese mismo sentido, cada vez son más los países que se unen a los estudios que tienen como finalidad comprobar cuáles materiales reciclados pueden ser usados para realizar concreto, tal es el caso del caucho, vidrio, plástico, e incluso la reutilización del mismo material de desecho de obra. En Venezuela cabe destacar que esto no solo sirve de ayuda al ambiente, ya que también es un punto a favor en la industria de la construcción debido a los problemas económicos que está viviendo el país, por lo que usar materiales reciclables reduciría el costo de construir una obra, ayudando al ahorro de capital de las empresas, siempre y cuando cumplan los requisitos técnicos establecidos en las normas de construcción.

Específicamente en Ciudad Guayana, se puede observar la acumulación de desechos en las calles, y muchos de estos desechos podrían resultar ser buenos

materiales de estudio para realizar una mezcla de concreto, tal es el caso del vidrio, con este material Vásquez y Girón (2019) realizaron diferentes pruebas para ver si podía funcionar como adición para elaborar hormigón. También han sido realizados algunos análisis en diferentes partes del mundo sobre su potencial uso en este aspecto constructivo.

En consecuencia, a la problemática ambiental que se presenta en los diferentes niveles territoriales, la cual es producto de la industria constructiva, se puede plantear una interrogante: *¿Cómo afecta la sustitución del agregado fino por cierta cantidad de vidrio molido a las propiedades del concreto?*, tomando como referencia diseño de mezclas usados habitualmente por los profesionales, y también basándose en investigaciones familiares a este tema.

Objetivos

Objetivo general

Determinar las propiedades de resistencia a compresión del concreto, a partir de la sustitución de cierta cantidad de agregado fino por vidrio molido.

Objetivos específicos

- Caracterizar el material de vidrio molido a utilizar en los diseños de mezcla del concreto.
- Proponer diseños de mezclas de concreto con distintos porcentajes de adiciones de vidrio molido.
- Determinar las propiedades en estado fresco de las dosificaciones preparadas.
- Determinar la resistencia a compresión del concreto endurecido, tanto la de la mezcla patrón, como las pertenecientes a las mezclas con adiciones de vidrio molido.

- Indicar en qué aspectos de la industria de la construcción puede ser usado el concreto proveniente de la sustitución de agregado fino por vidrio molido.

Justificación

La contaminación al ambiente es un punto muy tocado hoy en día, debido a todos los efectos negativos que está produciendo sobre el planeta, en vista de esto cada día se implementan nuevas tecnologías que no solo sirvan de desarrollo al ser humano, sino que también, busquen mitigar los impactos que ocasionan al medio ambiente, muchas de estas tecnologías usan el método de reciclar el cual permite reutilizar distintos materiales que simplemente son considerados desechos, produciendo grandes acumulaciones de basura en las calles y al mismo tiempo seguir dañando el planeta, por lo tanto a través del reciclaje se les da un uso.

La generación de concreto a pesar de ser un proceso contaminante, no puede ser detenida debido a que es un material de excelentes propiedades y por tanto es necesario para los proyectos de construcción en cualquiera de sus facetas. Por esta razón se plantea estudiar el cambio de algún componente del concreto por otro material que provenga de la reutilización de desechos, en este caso, dicho material es el vidrio.

El vidrio es un material proveniente de botellas y otros tipos de productos, y puede ser conseguido en las calles como desechos basura y contaminando el mundo de manera excesiva, por lo tanto, la idea de esta investigación es moler ese vidrio para reutilizarlo como un porcentaje de intercambio del agregado fino para realizar concreto. Esto reduciría el impacto que el concreto le genera al ambiente, y también se espera que reduzca los costos de producción de hormigón ya que parte de uno de sus componentes vendría del reciclaje de otro material.

Alcance y limitación

Se espera elaborar un diseño de mezcla de concreto en donde se utilizarán adiciones de vidrio molido, el cual será previamente caracterizado a través del análisis granulométrico para verificar la distribución de tamaño de partículas. Se realizarán las mezclas de concreto y se elaborarán las probetas cilíndricas normalizadas, una vez transcurrido el tiempo de curado establecido, serán evaluadas en su propiedad de resistencia a compresión. El alcance de este proyecto es solo hasta determinar las propiedades de resistencia a compresión de las mezclas de concreto.

La limitación de este estudio está dada, por el uso de vidrio molido proveniente de los desechos en las cristalerías ubicadas en la Ciudad de Upata. Se desconocen otras especificaciones del material.

Capítulo II

Marco Teórico

Antecedentes

De acuerdo al tema planteado en esta investigación cuyo objetivo general es Determinar las propiedades de resistencia a compresión del concreto, a partir de la sustitución de cierta cantidad de agregado fino por vidrio molido, se encontraron las siguientes investigaciones:

Soroushian, (2011), profesor de ingeniería civil y ambiental en la Universidad Estatal de Michigan, realiza un estudio titulado: *Field investigation of concrete incorporating milled waste glass*, analizando la sustitución parcial del cemento en el hormigón por una mezcla de residuos de vidrio, donde sustituyen el 15%, 20% y 23% del cemento por vidrio molido reciclado el cual se utiliza para realizar un hormigón, el estudio arrojó que el hormigón con la variación de la mezcla utilizando el vidrio molido se obtenía una versión mejorada, más fuerte, más duradera y resistente al agua y que el vidrio molido entra en una reacción beneficiosa con los componentes del cemento, por lo que las características químicas del cemento mejoran, y además que en esa práctica se producen importantes beneficios energéticos y de costes que repercuten favorablemente para el medio ambiente, ya que el cemento se procesa a altas temperaturas, el uso de vidrio molido reduce significativamente la cantidad de energía que se utilizaba, así como también las emisiones de CO₂. Este trabajo aportó las bases para llevar a cabo sustituciones de los componentes del concreto por vidrio de desecho y establece un rango donde estos cambios pueden ser favorables.

Por otro lado, esta forma del concreto también se ha visto implementada en la elaboración de adoquines, obteniendo diferentes estudios, como por ejemplo uno donde agregaron cantidades de vidrio de 5%, 15%, 25% y 35% a la mezcla, este material fue insertado en estado fino y luego triturado, obteniendo como resultado que el vidrio fino ofrece mayor resistencia a compresión que el vidrio granular. Esta investigación fue realizada por Hidalgo y Poveda, (2013), a través del trabajo de grado que lleva por nombre: *Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado*, en la Escuela Politécnica Nacional, Ecuador. Cuyo objetivo se ve reflejado en el título, señalando que “Se recomienda emplear vidrio como agregado entre diez y veinte por ciento (10%-20%) del peso de la mezcla total.” (p. 115).

También recomiendan el uso de este material como herramienta para fabricar adoquines, explicando que se debe realizar el cambio entre vidrios y agregados para obtener mejores resultados, además indican que las cantidades de adición del vidrio no deben pasar de 25% para el agregado fino y de 15% para el grueso, además, el vidrio empleado por ellos resultó más costoso que la arena, por lo que en este ámbito señalaron que era preferible cambiarlo por agregado grueso aunque fuera lo contrario lo que arrojaba mejores resultados. Esto aportó a la presente investigación un posible uso del concreto elaborado con adiciones de vidrio de desecho.

Vargas, (2015), elaboró la Tesis titulada: *Reutilización del vidrio plano como agregado fino en la elaboración de morteros de cemento y concreto*, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, con la finalidad de obtener el título de Licenciado en Ingeniería Ambiental, presentando como principal objetivo evaluar el uso de vidrio plano desechado como parte del agregado fino para la realización de concretos y morteros de cemento para ser utilizado en el sector de la construcción.

Vargas, evalúa tres tipos de vidrios planos y se realiza cuatro mezclas de morteros y cuatro de concretos con variaciones entre la arena y el vidrio molido como agregados finos, para cada mezcla se implementó un tipo de vidrio diferente y una

mezcla convencional. Los resultados indican que en los morteros las resistencias a compresión a los 28 días de ensayo para las muestras con vidrios planos son superiores al compararlas con las del concreto patrón, por lo tanto, es posible emplear este tipo de morteros. En el caso de los concretos la resistencia a la compresión los valores obtenidos de las mezclas a los 28 días se mantuvieron similares entre todas las mezclas. Este trabajo de grado aporta diversos estudios sobre la preparación de concretos con vidrio.

Suque, (2016), realizó el trabajo de grado titulado: *Utilización de desecho de vidrio como árido grueso para la elaboración de concreto*, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, como parte de los requisitos para optar por el título de Ingeniero Civil, cuyo objetivo general es analizar si las características y propiedades mecánicas del concreto se ven afectadas de manera significativa al sustituir el árido natural con vidrio triturado. Los resultados arrojados por esta investigación indican que se obtiene un problema al sustituir el agregado grueso por el vidrio como material reciclable, esto se debe a la falta de adherencia de este último, por lo tanto, este tipo de concreto no debe usarse para elementos estructurales. De este trabajo de grado se tomó como aporte para la presente investigación, las bases teóricas referidas al vidrio.

Espinoza, (2017), elaboró la tesis titulada *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*, en el Instituto Tecnológico de Costa Rica, para optar por el título de Licenciado en Ingeniería de Construcción, donde planteó el uso del vidrio reciclado para la elaboración de cementos terciarios, su objetivo fundamental en la investigación es contribuir con las mejoras de la producción de cemento hidráulico en Costa Rica, para reducir el efecto invernadero del cual el cemento es responsable de un 9% aproximadamente de estos gases, la investigación arrojó resultados de una alternativa ambiental con cementales potenciales para la construcción civil, se utilizaron polvos de vidrio reciclado de un tamaño por partícula de 75 μm . Los resultados muestran que las resistencias de las mezclas compuestas de cemento y el polvo de vidrio son adecuadas para una cantidad importante de

aplicaciones en construcción civil, y aunque en varios casos las muestras de vidrio triturado no presentan las mismas propiedades mecánicas que sus homólogos, los resultados obtenidos mostraron un gran potencial para determinadas aplicaciones industriales. Esta investigación realiza un aporte en la forma de cómo analizar los resultados obtenidos.

Una investigación más cercana a la presentada en este proyecto es la realizada por Diaz y Ramos, (2018), por medio del trabajo de investigación titulado: *Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas de concreto empleando diferentes proporciones de vidrio reciclado y triturado como sustituto de la arena*. En la Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia. Teniendo como objetivo observar el comportamiento mecánico de este concreto con adiciones de vidrio reciclado.

Ellos tomaron el vidrio triturado y lo intercambiaron por la arena en cantidades de 10%, 15% y 20%. Obtuvieron como resultado que el concreto con mayor resistencia a compresión era el de 15% de adición de vidrio, mientras que en los otros no se presentaban variaciones significativas, demostrando que entre el vidrio y el agregado fino existe similitud con respecto a la densidad y por lo tanto el vidrio podría sustituir a la arena como agregado fino y obtener resultados provechosos en el proceso. Elaboraron análisis en la resistencia a compresión de suma relevancia para la presente investigación.

Rodríguez y Rodríguez, (2019), elaboraron un trabajo de grado que lleva por título: *Efecto del vidrio molido en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, Trujillo 2019*, en la Universidad Privada de Trujillo, con la finalidad de optar por título profesional de Ingeniero Civil, donde se presenta como objetivo fundamental determinar el efecto del vidrio molido en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, preparado con agregados pétreos de la cantera “El Milagro” en Trujillo. Para llevar a cabo la investigación realizaron ensayos específicos a los componentes del

concreto, y luego hicieron 36 probetas cilíndricas y 8 rectangulares, englobando una mezcla convencional y otros diseños con adiciones de vidrio molido del 1%, 3% y 5%.

Los resultados arrojados por el trabajo de grado mencionado indican que en los ensayos a compresión del concreto con adiciones de vidrio aumentó la resistencia con respecto al concreto patrón, obteniéndose sus mayores valores al añadir 5% de vidrio molido a la mezcla, además, obtienen que a medida que aumentan los porcentajes de vidrio también aumenta su trabajabilidad, por otro lado, la resistencia a la flexión es mucho menor alcanzando sólo el 21.72% de la resistencia inicial. Como aporte a la investigación coloca las bases de los ensayos requeridos para obtener las propiedades de los componentes del hormigón y las del concreto en sí.

Huapaya y Valdivia, (2019), realizaron un Trabajo de Grado que lleva por título: *Uso de vidrio reciclado como adición en la elaboración de concreto $f'c=315$ kg/cm² para obras portuarias*, en la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Cuyo objetivo consistió en desarrollar un concreto HS con escoria de alto horno $f'c=315$ kg/cm² con vidrio reciclado como adición en el concreto para obras portuarias para reducir el impacto ambiental generado por los residuos sólidos de vidrio, indicando:

Cuando se utiliza vidrio pulverizado para las mezclas de concreto se favorece al incremento del $f'c$, valor que está relacionado directamente con la cantidad de cemento utilizado. Por consecuencia se daría una reducción de las cantidades de cemento y de las emisiones de CO₂ que se producen, además de disminuir las cantidades de energía las cuales no se utilizarían. (p. 68).

Ellos partieron de un concreto para obras portuarias con resistencia de 315 Kg/cm² empleando un cemento con alta resistencia a los sulfatos, su finalidad era agregar porciones de vidrio reciclado en cantidades de 6%, 7%, 8% y 9% con respecto al cemento, para observar si las propiedades finales de la mezcla se mantenían lo suficiente como para seguir siendo aplicada en este tipo de obras, en este proceso obtuvieron que la cantidad de vidrio que mejor se ajusta a las solicitudes requeridas

es la de 7%, con un valor en el asentamiento de 4'' e indican que esta proporción es la que produce costos más bajos para la mezcla, por lo tanto, ellos concluyen que esta es una forma de uso bastante viable, siempre y cuando el vidrio empleado no esté compuesto por elementos químicos que puedan dañar la mezcla. Esta investigación propone información sobre el uso que se le puede dar al concreto con adiciones de vidrio.

Bases teóricas

Concreto

También denominado hormigón, es el material manufacturado elaborado netamente por los seres humanos, cuya composición no es más que una mezcla entre cemento, agua, agregados y/o aditivos, con la finalidad de obtener un producto con características prefijadas en el diseño. En las que se destacan la versatilidad, durabilidad, la facilidad de colocación, la adaptabilidad de su forma y la rapidez con la que adquiere una capacidad de resistencia a compresión que posee luego del endurecimiento de sus componentes. En tal sentido, se ha convertido en el recurso más utilizado por el hombre luego del agua, sobresaliendo en la industria constructiva debido al amplio uso que se le puede dar en la elaboración de muros, vigas, columnas, cimentaciones, placas, entre otros.

Las propiedades del concreto varían dependiendo de la calidad y proporciones de su composición, y al mismo tiempo de las condiciones ambientales a lo largo del proceso de fabricación, compactación y fraguado. Por otro lado, si bien se puede recalcar la gran resistencia a compresión que se adquiere, todo lo contrario, ocurre con la resistencia a la tracción, flexión y cortante, donde su efectividad es casi nula, por ello, se suele juntar el hormigón con acero, obteniendo un gran aprovechamiento de la combinación de las características de ambos materiales y de esta forma llevando la construcción a otro nivel.

Tipos de concreto.

El concreto al ser uno de los materiales más necesarios para el hombre, se encuentra en constantes estudios para obtener un mayor aprovechamiento de sus características, más específicamente de cómo obtener este material a través de otros componentes u otros procesos sin que varíe demasiado sus propiedades, por lo tanto, a lo largo de los años se han generado distintas formas en que se pueda presentar un concreto, diferenciándose de acuerdo al uso que se le dará. Al existir tantos tipos de este material no se pueden resumir todos en esta investigación, sin embargo, se enlistan los conocidos por los autores, los cuales son los siguientes:

Concreto simple o convencional. Consiste en una mezcla del cemento portland con agregado grueso, agregado fino y agua. En dicha mezcla la pasta de cemento debe envolver totalmente al agregado grueso y el agregado fino debe rellenar los espacios del agregado grueso y a su vez estar cubierto con la misma pasta de cemento. (Rodríguez y Rodríguez, 2019, p. 7). Este tipo de concreto no es más que el utilizado comúnmente en las construcciones, empleándose en pisos, losas, cimentaciones, banquetas, entre otros. Además, posee una excelente trabajabilidad.

Concreto polimérico. Es un tipo de concreto donde se utilizan más agregados de los habituales con la única condición de que deben estar secos y, además, se sustituye el cemento por algún polímero para aumentar la resistencia química y generar una estabilidad térmica. Suele ser usado en alcantarillados, red de drenajes, piscinas o alguna estructura que esté expuesta a productos químicos.

Concreto ciclópeo. Se trata de un concreto simple, pero con la diferencia de que el tamaño de las partículas de agregado grueso aumenta considerablemente su tamaño. Su uso está enfocado en cimentaciones, pisos rústicos, en construcciones cerca del agua ya que presenta una alta resistencia a la humedad y en muros de contención. (Construyendo.co, s.f., párr. 10).

Concreto hidráulico. Es un tipo de concreto que no presenta permeabilidad entre sus partículas o por lo menos es casi nula, haciendo de este un recurso provechoso para construir estructuras que entren en contacto con el agua como presas o tanques, además, posee una excelente resistencia a la corrosión de agentes externos presentes en agua. (Construyendo.co, s.f., párr. 12).

Concreto bombeable. Se trata de un tipo de concreto que es conducido o como su nombre lo indica bombeado a través de tuberías hasta su lugar de vaciado, por lo tanto, este presenta una excelente trabajabilidad. Su uso va enfocado a construcciones donde se requiera llevar la mezcla a grandes alturas. (CEMEX, s.f., párr. 2).

Concreto premezclado o prefabricado. Como se puede deducir de acuerdo a su nombre, es una mezcla de concreto ya elaborada en la planta y que se encuentra lista para su vaciado, tiende a usarse muy comúnmente retardadores para mantener las propiedades necesarias para la obra. Este tipo de concreto puede ser usado en la mayoría de los ámbitos de la construcción, sin embargo, se utiliza comúnmente en tapas, losas y objetos públicos.

Concreto armado o estructural. Es un concreto simple que lleva armadura de acero como refuerzo para resistir los esfuerzos de tracción. (Rodríguez y Rodríguez, 2019, p. 7). Este cuenta con unas especificaciones para diseñar su mezcla, con la finalidad de obtener un producto que cuente con la dosificación, mezclado y transportación exactos requeridos, además de tener la resistencia a compresión necesaria para la obra. Su uso gira en torno a las construcciones de edificios como: centros comerciales, hospitales, bibliotecas, escuelas, entre otros.

Concreto de vacío. Es un concreto que se vierte en un molde denominado encofrado equipado con una alfombra al vacío, que permite que la mezcla pueda acoplarse y crear diferentes formas luego del secado, este molde elimina la necesidad de utilizar agua. (Construyendo.co, s.f., párr. 16).

Concreto outinord. Tipo de concreto que presenta una alta fluidez alcanzando de forma acelerada el fraguado y la resistencia requerida. Es usado en obras de construcción rápida como en un sistema túnel, donde es necesario que el concreto sea capaz de sostenerse así mismo lo más pronto posible. (Cementos Cibao, 2017, párr. 6).

Concreto arquitectónico y decorativo. Mezcla enfocada a brindar distintos acabados decorativos, para lograr esto, se emplean agregados brillantes o que cambien el color de la mezcla, también pueden cambiar la textura de esta a voluntad. Este es un tipo de concreto dedicado al arte o resultado arquitectónico, se usa para elaborar pisos, paredes y construir obras como museos. (Cementos Cibao, 2017, párr. 7).

Concreto contech. Se trata de concretos fluidos, de fraguado y resistencia acelerada, es decir, posee las mismas características que el concreto outinord con la diferencia de que este puede ser usado para una mayor variedad de estructuras. Se puede emplear tanto en edificaciones como en infraestructura, siendo ideal para reparar las pistas de aterrizajes y las carreteras, también es usado en sistemas industrializados. (Cementos Cibao, 2017, párr. 8).

Concreto reforzado con fibras. En su elaboración se emplean fibras que compenentran más la mezcla, de esta forma resiste mayores deformaciones que un concreto convencional, es decir, las grietas aparecen al transcurrir mayor tiempo de lo normal y prácticamente no se propagan. Se puede apreciar su uso en obras subterráneas como túneles, sótanos, entre otros. (Santillán, 2020, párr. 2).

Concreto antibacteriano. Es un hormigón resistente a las bacterias, por lo tanto, se usa para construir laboratorios, hospitales, restaurantes y cualquier otra estructura expuesta a agentes bacterianos. (Cementos Cibao, 2017, párr. 10).

Concreto autocompactante. Para elaborar este concreto se elimina la mayoría del aire contenido y se emplean aditivos plastificantes que hacen a la mezcla más fluida,

permitiendo que se nivele automáticamente sin necesidad de emplear algún otro instrumento como vibradores. Su uso va enfocado a pisos de grandes extensiones u obras horizontales extensas. (Cementos Cibao, 2017, párr. 11).

Concreto poroso o permeable. Este concreto al contrario que el hidráulico presenta una excelente permeabilidad permitiendo que el agua pase a través de él, reduciendo de esta forma inundaciones. Suelen ser usados en estacionamientos o construcciones de andadores. (Cementos Cibao, 2017, párr. 13).

Concreto compactado con rodillo (CCR). Se trata de una forma de construir los pavimentos, donde luego de vaciar el concreto se compacta con rodillos vibratorios, posee resistencia a la abrasión y al agua a grandes velocidades. (Cementos Cibao, 2017, párr. 13).

Diseños de mezcla

Es el procedimiento empleado para calcular las cantidades necesarias de cada material que componen una mezcla de concreto, con la finalidad de obtener tanto en estado fresco como endurecido las propiedades requeridas por la obra a elaborar. También se debe tomar en cuenta la factibilidad económica.

Para diseñar una mezcla de concreto se pueden tomar en cuenta muchas variables como: la manejabilidad que tendrá, la resistencia, las propiedades de los materiales, el asentamiento, entre otras. Esto, solo hace que realizar una mezcla de concreto sea algo bastante complejo, ya que se puede tomar las variables que desee el diseñador, como resultado de esto existen numerosos métodos para elaborar un diseño de hormigón, los cuales pueden ser aplicados entre ellos o ser totalmente diferentes, por lo tanto, ninguna mezcla es perfecta, sin embargo, estos métodos disminuyen los errores al mínimo. Sobre el método empleado en esta investigación Porrero, Ramos, Grases y Velazco, (2012), señalan:

El método considera, en primer término, un grupo de variables que constituyen su esqueleto fundamental: dosis de cemento, trabajabilidad, relación agua/cemento y resistencia. Estas se vinculan a través de dos leyes básicas: Relación Triangular y Ley de Abrams. Mediante factores de corrección, también toma en cuenta la influencia de variables que tienen carácter general, tales como tamaño máximo y tipo de agregado (p. 124).

Proporción entre agregados.

Para aplicar con éxito esta forma de diseñar el concreto, lo primero es realizar el cálculo de la proporción entre agregados finos y gruesos, ya que en la mezcla estos materiales actúan de manera combinada, donde uno resuelve las fallas del otro. Este cálculo se conoce como:

Relación Beta (β). Se define como la proporción expresada en porcentaje del cociente entre la masa de agregado fino y la masa de agregado total combinado, es decir, la arena más la grava. Esto se puede expresar como: $\beta = (100 \times A) / (A + G) (\%)$. (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, p. 127).

Además, es necesario realizar los ensayos de granulometría de cada agregado, para constatar que cumplan con los límites establecidos de acuerdo a la norma utilizada, que de no ser el caso se puede modificar insertando proporciones de cada uno hasta obtener la combinación deseada, obteniendo agregado fino y agregado grueso de calidad.

Datos de entrada.

En segundo lugar, se debe tener los datos de entrada para diseñar la mezcla, es decir, todas las variables que arrojen la información requerida por el método empleado, con la finalidad de llegar a las propiedades finales provistas. Los datos de entrada tomados en cuenta en este proyecto son los siguientes:

Condiciones ambientales de la obra. Al momento de llevar a cabo cualquier construcción hay que tomar en cuenta las condiciones del terreno, porcentaje de humedad, predicciones sísmicas, temperatura, etc. Esto porque las condiciones ambientales es uno de los factores más importantes a tomar en cuenta al momento de empezar a levantar una obra ya que, haciendo un buen estudio de las mismas se establece el tipo de mezcla más adecuado a utilizarse; el tipo y cantidad de materiales que se emplearán en la mezcla, consiguiendo de esta forma la preparación de un concreto de mejor calidad y resistente al ambiente al que será expuesto

Tipo de obra. Antes de diseñar la mezcla se deben revisar las especificaciones técnicas de la obra y los planos, los cuales fueron fijados por el proyectista para que la construcción cumpla ciertos parámetros durante su vida útil. El plano estructural de obra indica la resistencia requerida para cada estructura de dicha construcción, lo que indica que cada estructura existe un diseño de mezcla de concreto ideal, es decir por ejemplo que el diseño de mezcla de concreto para utilizar en las columnas es diferente para construir un falso piso en la misma obra.

Tipo de agregado y tipo de cemento. Pueden ser naturales o industrializados de acuerdo al tipo de concreto a preparar. Estos materiales representan gran parte del volumen del concreto, así que conviene vigilar la cantidad de cada agregado para no comprometer la trabajabilidad, rigidez, permeabilidad y asentamiento deseado del concreto, su durabilidad y resistencia.

Por otro lado, el cemento es el material que ejerce la función de unión entre los componentes usados para elaborar concreto, por lo tanto, este cuenta con la capacidad de adaptarse a cualquier tipo de mezcla. Así, tomando en cuenta sus características y composición es clasificado en distintos tipos y le son atribuidas a cada clasificación el tipo de construcción en la cual se obtienen mejores resultados, esto se explicará en el apartado de “cemento”.

Resistencia promedio requerida (Fcr). Cedeño, (2018), señala “Cuando se obtiene un valor de resistencia menor que la especificada (F’c), se disminuye el factor de seguridad de una estructura, para evitar esto la mezcla deberá dosificarse para obtener una resistencia a la compresión promedio (Fcr) mayor que F’c” (p. 1), es decir, la resistencia promedio requerida es una medida de seguridad para que la mezcla no disminuya su resistencia a valores por debajo a los esperados por el proyectista.

Existen dos formas de cálculo de la resistencia promedio requerida, una para cuando se tiene registros de por lo menos 30 ensayos del concreto a elaborar, obteniendo de esta forma una desviación estándar (Tabla 1). Y otra para cuando no se tiene ningún registro, es decir, no se tiene desviación estándar (Tabla 2).

Tabla 1.

Resistencia promedio a la compresión requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar de la muestra.

Resistencia especificada. F'c, Kg/cm² (psi)	Resistencia promedio requerida. Fcr Kg/cm² (psi)
Menos de 350 (5000)	Escoger el mayor valor obtenido de las siguientes ecuaciones: $F_{cr} = F'c + 1.34s$ $F_{cr} = F'c + 2.33s - 35(F'c + 2.33s - 500)$
Mayor de 350 (5000)	Escoger el mayor valor obtenido de las siguientes ecuaciones: $F_{cr} = F'c + 1.34s$ $F_{cr} = 0.90F'c + 2.33s$

Nota: Adaptado de *Resistencia promedio requerida del concreto (Fcr)*, (p. 1), por A. Cedeño, 2018, Venezuela. Derechos reservados por Ana María Cedeño Gudiño.

En caso que no se dispongan de las 30 muestras de ensayo, se puede realizar una corrección con coeficientes de modificación dependiendo de la cantidad de datos que se tengan (ANEXO A, *Figura 37*).

Tabla 2.

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

Resistencia especificada a la compresión F'c (Kgf/cm ²)	Resistencia requerida a la compresión Fcr (Kgf/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
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, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Ley de Abrams.

Una vez obtenidos los datos mencionados anteriormente, se aplica la “Ley de Abrams”, la cual establece una relación entre la resistencia esperada por el concreto y la relación agua/cemento de la mezcla. Teniendo como finalidad obtener esta última relación para calcular las cantidades de agua y cemento necesarias en la mezcla de hormigón.

Relación agua/cemento. Es una variable que relaciona dos componentes del concreto como son el agua y el cemento, esta relación se expresa como: $\alpha = a/C$, es decir para determinarla se debe dividir una cantidad de agua con otra de cemento, el resultado arrojado se trata de una de las variables más importantes en el diseño de mezcla, esto se debe a que sus variaciones modifican la durabilidad, la trabajabilidad, la resistencia y el asentamiento. (Debe cumplir con el ANEXO A, *Figura 38 y 39*).

El cálculo de “ α ” se puede realizar de forma gráfica, a partir de las resistencias requeridas por la mezcla a 7, 28 y 90 días (*Figura 1*). Esta gráfica se obtiene por medio

de múltiples ensayos elaborados con distintas proporciones de sus componentes, y de esta forma se obtuvieron tres relaciones entre la resistencia y alfa para cada cantidad de días mencionada. Además, se puede realizar el cálculo inversamente y a partir de la relación agua/cemento se obtiene la resistencia de diseño.

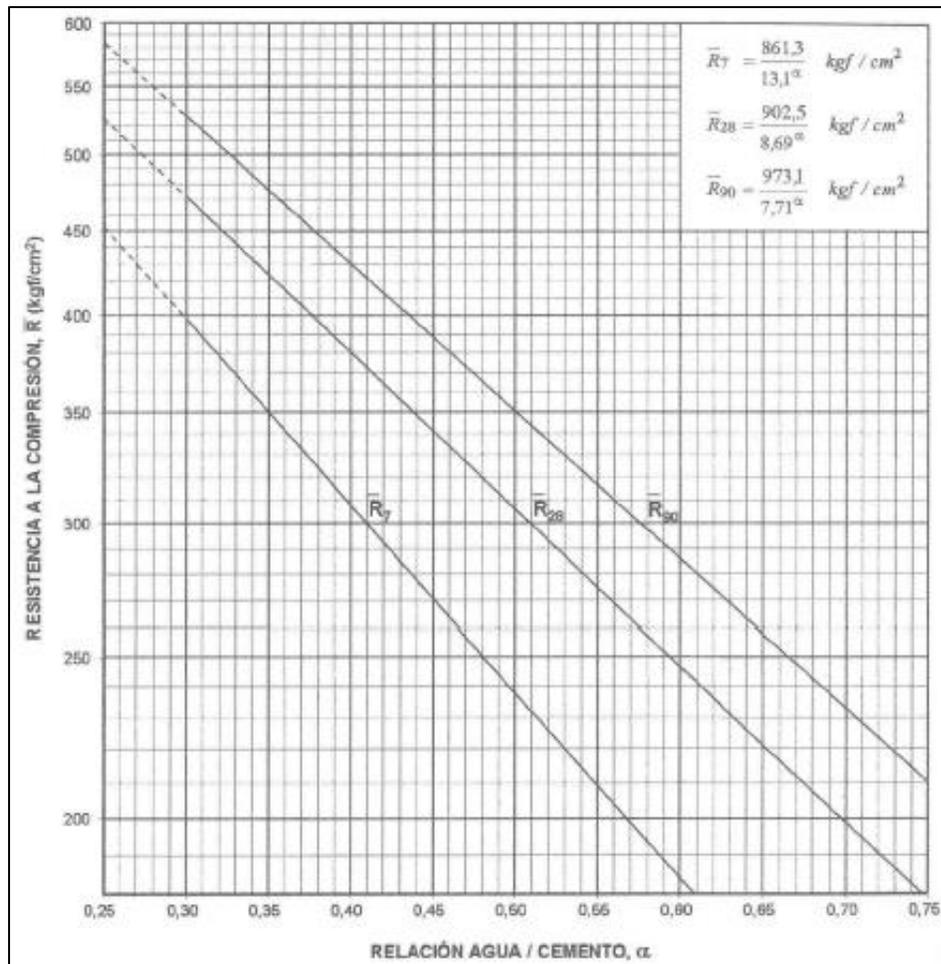


Figura 1. Representación gráfica de la ley de Abrams. Tomado de *Manual del concreto estructural*, (p. 137), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Sin embargo, debido a que los ensayos con los que se construyó la figura anterior, no necesariamente se utilizaron los mismos tipos de agregados para cualquier otra obra, en vista se presentan dos factores de corrección para los agregados usados en el diseño de mezcla. El primero simbolizado como “Kr”, es utilizado para corregir

la relación agua/cemento a partir del tamaño máximo de los granos de la grava (Tabla 3), y el segundo “Ka”, se usa para corregir por el tipo de agregado empleado (Tabla 4).

Tabla 3.

Kr factor para corregir α por tamaño máximo.

Tamaño máximo en mm (pulg.)	6.35 (1/4)	9.53 (3/8)	12.7 (1/2)	19.1 (3/4)	25.4 (1)	38.1 (1 1/2)	50.8 (2)	63.5 (2 1/2)	76.2 (3)
Factor Kr	1.60	1.30	1.10	1.05	1.00	0.91	0.82	0.78	0.74

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 136), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Tabla 4.

Ka factor para corregir α por tipo de agregado.

AGREGADOS	TRITURADOS	SEMITRITURADOS	CANTO RODADO
Arena natural	1.00	0.97	0.91
Arena triturada	1.14	1.10	0.93

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 137), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Relación triangular.

Relaciona la trabajabilidad (T) con la relación agua/cemento (α) y la dosis de cemento (C), de estos tres parámetros recibe el nombre de “Relación Triangular”. Se usa con la finalidad de obtener la cantidad exacta de la masa de cemento a utilizar en la mezcla, este cálculo puede realizarse de manera gráfica luego de haber aplicado la ley de Abrams, ya que es necesario conocer primeramente la relación agua/cemento y la trabajabilidad requerida de la mezcla. La gráfica empleada es la siguiente:

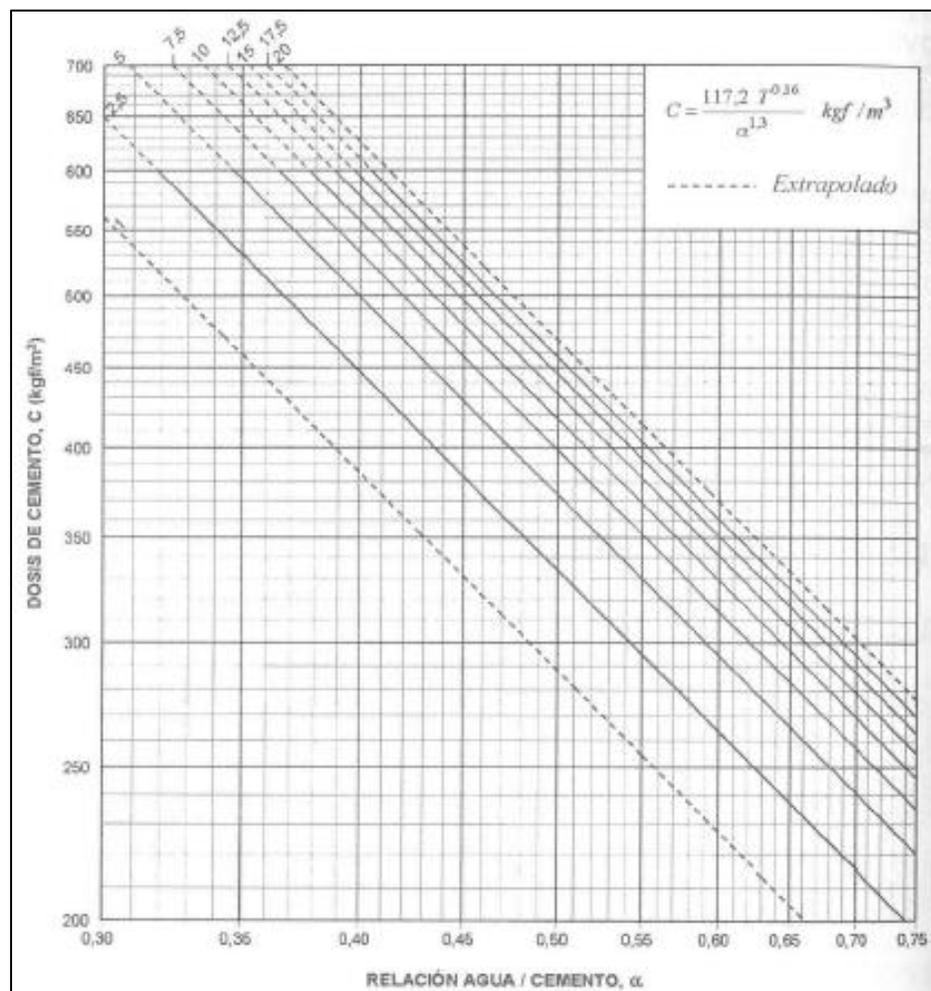


Figura 2. Representación gráfica de la relación triangular. Tomado de *Manual del concreto estructural*, (p. 140), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Al igual que lo sucedido con la Ley de Adams, debido a que los ensayos con los que se construyó la figura anterior, no necesariamente se utilizaron los mismos tipos de agregados para cualquier otra obra, se presentan dos factores de corrección para los agregados usados en el diseño de mezcla. El primero simbolizado como “C₁”, es utilizado para corregir la dosis de cemento a partir del tamaño máximo de los granos de la grava (Tabla 5), por otro lado, el segundo “C₂”, se usa para corregir por el tipo de agregado empleado (Tabla 6). Como resumen de este procedimiento se tiene la *Figura 40* del ANEXO A.

Tabla 5.

C_1 factor para corregir C por tamaño máximo en mm (pulg.).

Tamaño máximo	6.35 (1/4)	9.53 (3/8)	12.7 (1/2)	19.1 (3/4)	25.4 (1)	38.1 (1 1/2)	50.8 (2)	63.5 (2 1/2)	76.2 (3)
Factor Kr	1.33	1.20	1.14	1.05	1.00	0.93	0.88	0.85	0.82

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 141), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Tabla 6.

C_2 factor para corregir C por tipo de agregado.

AGREGADOS	TRITURADOS	SEMITRITURADOS	CANTO RODADO
Arena natural	1.00	0.93	0.90
Arena triturada	1.28	1.23	0.96

Nota: Adaptado de *Manual del concreto estructural*, (p. 137), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Concreto en estado fresco

Las propiedades del concreto cuando se encuentra en su estado blando incluyen la consistencia, trabajabilidad, exudación, segregación, contracción, cohesividad, peso unitario y asentamiento.

Consistencia.

Según Rivva, (2000), “Propiedad que define la humedad de la mezcla por el grado de fluidez de la misma; entendiéndose con ello que cuanto más húmeda es la mezcla mayor será la facilidad con la que el concreto fluirá durante su colocación” (p. 208).

Trabajabilidad.

Según Guevara, (2008), “Es aquella propiedad del concreto que determina su capacidad para ser manipulado, transportado, colocado y consolidado adecuadamente, con un mínimo de trabajo y un máximo de homogeneidad; así como para ser acabado sin que se presente segregación.” (p. 317).

Se puede establecer una relación entre la consistencia y la trabajabilidad a partir del asentamiento como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7.

Consistencia y trabajabilidad según el asentamiento.

Consistencia	Asentamiento (cm)	Trabajabilidad
Seca	0 – 5	Baja
Plástica	7.5 – 10	Media
Fluida o húmeda	12.5 a más	Alta

Nota: Adaptado de *Estudio de un concreto fluido de $f'c=250 \text{ Kg/cm}^2$ con superplastificante para estructuras en la ciudad de Jaén*, (p. 14), por A. Flores, 2016, Perú. Derechos reservados por Abel Hilmer Flores Añorga.

Exudación.

Es cuando parte del agua utilizada se separa de la masa y asciende hacia la superficie del hormigón, por ser el componente de menor densidad de todo el conjunto y a la poca capacidad de la estructura granular para retenerla. (Carrasco, 2013, p. 2).

Segregación.

Carrasco, (2013), define esta propiedad como:

La separación de los contribuyentes de una mezcla heterogénea de modo que la distribución del tamaño de las partículas componentes deja de ser uniforme. Las diferencias en tamaño y densidad de las partículas son las causas principales de la segregación, pero su magnitud puede disminuirse con la selección de una granulometría adecuada y un manejo cuidadoso del material. (p. 1).

Contracción.

Produce cambios de volumen en el concreto debido a la pérdida de agua por evaporación, causada por las variaciones de humedad y temperatura del medio ambiente. Es importante controlar la contracción porque puede producir problemas de fisuración.

Cohesividad.

Es aquella propiedad del concreto en estado blando que permite un control sobre la segregación durante el proceso de colocación de la mezcla, además de contribuir a prevenir la aspereza y facilitar el manejo en la compactación. (Rivvia, 2008, p. 211).

Peso unitario.

De acuerdo a Rivva, (2000), “Densidad del concreto a la relación del volumen de sólidos al volumen total de una unidad cúbica. Puede también entenderse como el porcentaje de un determinado volumen del concreto que es material sólido.” (p. 213).

Asentamiento.

Es un ensayo que se realiza al concreto fresco para determinar su fluidez o consistencia. Este consiste en llenar el cono de Abrams (molde metálico troncocónico de dimensiones normalizadas) en tres diferentes capas, con una muestra de concreto

recién mezclada. En cada capa se utiliza una varilla normada, según especificaciones de Norma para consolidar el material por medio de 25 golpes. El exceso de concreto en la parte superior del cono se elimina con la varilla. Luego se retira el cono en forma lenta y vertical y sin ser ladeado. La medida del asentamiento se obtiene al medir la distancia vertical entre la altura original y la desplazada en el centro de la superficie superior del concreto.

Elaboración y curado de muestras cilíndricas

Este es un proceso que se lleva a cabo para luego obtener las propiedades del concreto en estado endurecido, es decir, la elaboración y curado de las muestras parten de un diseño de mezcla y consiste en obtener probetas cilíndricas de hormigón como muestra para los ensayos finales de la mezcla. Estas probetas son creadas con moldes metálicos de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.

Este procedimiento permite obtener los resultados de resistencia del concreto a la cantidad de días necesitada, de esta manera se crea un registro para analizar el comportamiento del hormigón antes de la construcción de la obra, evitando posibles accidentes. Además, permite la obtención de cualquier otra propiedad de concreto tanto en estado fresco como endurecido.

Para elaborar las muestras, primeramente se debe realizar la mezcla, luego se procede a llenar cada cilindro, el proceso de llenado se lleva a cabo en tres capas, se coloca la inicial y se compacta con una barra propinándole 25 golpes sin tocar el fondo para eliminar las burbujas de aire atrapadas, seguidamente se vierte la segunda y se repite el procedimiento pero esta vez sin limitaciones y por último se realiza el proceso una tercera vez, inmediatamente se elimina lo sobrante en la parte superior del cilindro y se procede a verter la mezcla en otro, hasta obtener la cantidad de muestras deseadas. En todo este procedimiento la mezcla siempre estuvo en un proceso de fraguado, el cual continua hasta que se observa un endurecimiento en la mezcla, por esta razón las

probetas se dejan dentro de los moldes y se almacenan por un periodo de 24 horas, luego se retira el molde, se le coloca una identificación a la probeta y se lleva al siguiente proceso.

Una vez obtenidas las probetas estas deben ser curadas dentro de un recipiente, donde el agua debe sobrepasar la parte superior de estas cubriéndolas completamente hasta que sean requeridas para las posteriores pruebas. Todo este procedimiento puede variar de acuerdo a las normas empleadas.

Concreto en estado endurecido

Luego del proceso de endurecimiento del concreto se obtiene un material homogéneo que aporta distintos beneficios a la humanidad, cuyas propiedades pueden ser clasificadas como: Resistencia a compresión, Resistencia a tracción, flexión, densidad y elasticidad.

Resistencia a compresión.

El hormigón es un material que se somete a los esfuerzos de compresión, tracción y flexión, de los cuales sus mejores valores se encuentran en la resistencia que ofrece a los esfuerzos a compresión, siendo diez veces mayor a la de tracción. Las especificaciones del concreto exigen una resistencia a la compresión determinada a los 28 días, obteniéndose esta de forma fácil a través del ensayo a compresión. (Estrada y Páez, 2014, p. 71).

De acuerdo a lo anterior, la importancia de elaborar concreto para la construcción de diferentes estructuras radica en la resistencia a compresión que ofrece, ya que es el valor más elevado entre todas sus propiedades, colocando al hormigón como el material más utilizado en el ámbito constructivo, obteniendo además calidad – precio.

La resistencia a compresión se mide a través de ensayos con una máquina que aplica una fuerza axial sobre la cara superior de las probetas cilíndricas mencionadas anteriormente. Esta medida se expresa generalmente en Kg/cm^2 , obteniendo de esta manera una forma de verificar que los resultados cumplan con las especificaciones iniciales del diseño de mezcla.

Tracción o Resistencia a tensión por compresión diametral.

El hormigón ofrece una resistencia a la tracción, la cual depende de la tensión de la pasta de cemento, los agregados y de la adherencia que se genera, para obtener las medidas se realizan ensayos a cilindros, sujetos a una carga de compresión diametral. Debido a la baja resistencia que presenta el concreto en esta propiedad, cuando se diseñan las estructuras el concreto no debe trabajar a tensión, sin embargo, esto no es posible, porque el concreto debe soportar ciertos esfuerzos a tensión, que puede ser como consecuencia de la aplicación de alguna carga que lleve flexión y cortante. (Huamán, 2015, p. 33).

Flexión.

Castillo y Quispe, (2019), explican

La resistencia a la flexión del concreto es una medida de la resistencia a la tracción del concreto (hormigón). Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga o losa de concreto no reforzado. Se mide mediante la aplicación de cargas a vigas de concreto de 6 x 6 pulgadas (150 x 150 mm) de sección transversal y con luz de como mínimo tres veces el espesor. Los resultados se calculan y reportan como el módulo de rotura. La resistencia que se determina variará si existen diferencias en el tamaño de espécimen, su preparación, condiciones de humedad, o si la viga ha sido moldeada o cortada al tamaño requerido. (p. 88).

La siguiente figura muestra cómo es que teóricamente se flexiona una viga de concreto:

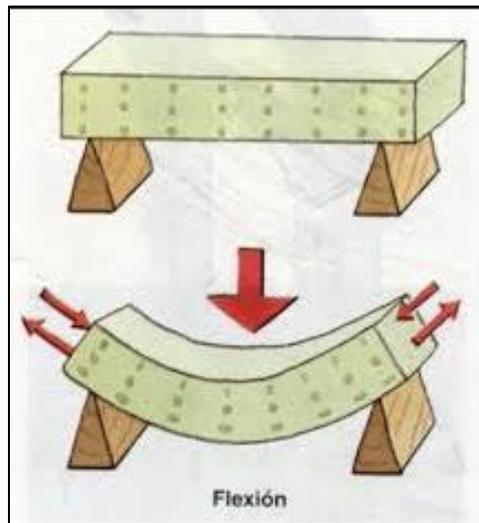


Figura 3. Flexión en vigas. Tomado de Ensayo Flexión de Vigas. por J. Riveros, Rescatado en 2021. Derechos reservados por Jorge Riveros.

Densidad.

Según Huamán, (2015), “Se define como el peso por unidad de volumen.” (p. 80). Esta depende de la densidad real y de la proporción en que se encuentra cada material que compone al concreto. La densidad puede verse afectada a través del tiempo debido a la evaporación del agua sufriendo variaciones en su medida inicial.

Elasticidad.

Según Osorio, (2011), “El módulo de elasticidad del hormigón representa la rigidez de este material ante una carga impuesta sobre el mismo.” (párr. 7). Además, explica que posee dos fases:

La primera fase se denomina como zona plástica, y se refiere a cuando el esfuerzo y la deformación unitaria se extienden entre el 0% al 40% y 45% de la resistencia a compresión. Por otro lado, la segunda fase se encuentra a partir de una línea curva en la gráfica de esfuerzo – deformación, esto debido a la micro - fisuración en el concreto al ser cargado, estas fisuras se encuentran en la interfase agregado-pasta

y se extiende entre el 45 % y 98% de la resistencia del concreto. La siguiente gráfica muestra estas dos fases mencionadas:

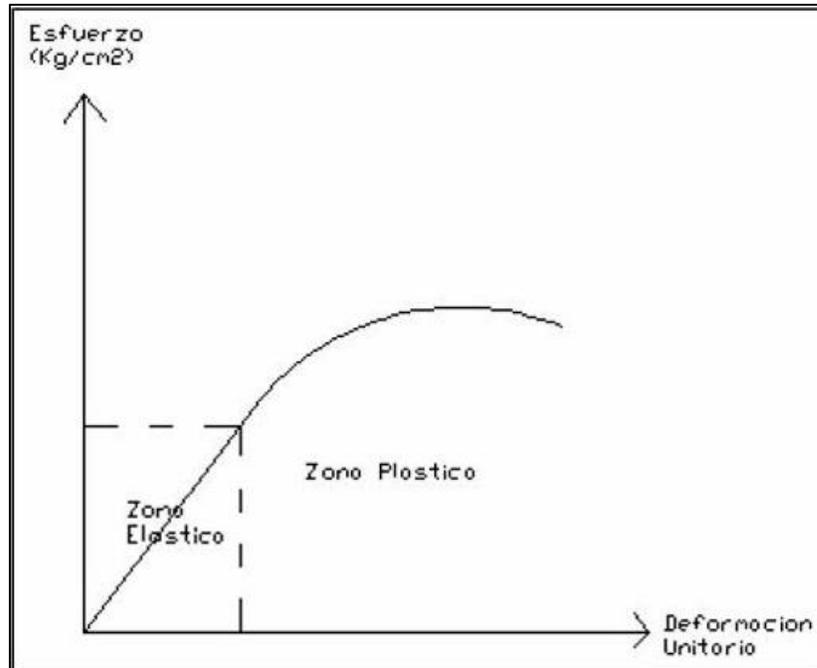


Figura 4. Esfuerzos y deformaciones. Tomado de *¿Qué es el modo de elasticidad del concreto?*, por J. Osorio, Rescatado en 2021. Derechos reservados por Jesús David Osorio.

Caracterización de los materiales tradicionales

Agua.

Se sabe que el concreto es el segundo material más usado por el hombre, encontrándose solo por debajo del agua, y este último es tan importante que incluso para realizar el concreto se necesita de esta sustancia sumamente necesaria para la vida.

En lo que se refiere al concreto el agua es utilizadas en dos casos, el primero es para elaborar la mezcla, donde este vital líquido se encarga de reaccionar con el cemento para que empiece el proceso de endurecimiento, además de aportar la fluidez a la mezcla, es decir, mientras más agua se obtiene más asentamiento y por ende más

trabajabilidad y consistencia. El segundo caso donde se emplea el H_2O , es en el proceso de curado con la finalidad de que el agua contenida en la mezcla no se evapore y que el concreto elaborado siempre esté provisto de este líquido para seguir reaccionando y aumentando sus propiedades.

El agua empleada para la elaboración de concreto, puede ser natural, sin ningún sabor u olor, sin embargo, esta no debe estar contaminada con alguna sal o materia orgánica, por esta razón, debe pasar primeramente por un proceso de eliminación de impurezas.

Cemento.

Este material es el componente de la mezcla de concreto que se encarga de juntar todos los demás por medio de una pasta que se crea cuando reacciona con el agua, en este momento la mezcla empieza a fraguar y de esta forma aumenta su endurecimiento.

El cemento con más uso en la industria es el Portland, Rivera, (2013), señala “Producto que se obtiene por la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio. Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante” (p. 18). El Clinker Portland es una forma granular compuesta básicamente de aluminatos, silicatos, y ferro aluminatos de calcio, obtenida por medio del aumento de temperatura de sus elementos hasta que se obtenga una mezcla homogénea.

En el proceso empleado para obtener el cemento se usan como principales elementos la cal, sílice, alúmina y hierro. Estos componentes y sus funciones se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 8.

Componentes principales del cemento y sus funciones.

Nombre (Abreviatura)	Funciones
Silicato dicálcico (C_2S)	Contribuye en gran parte al aumento de resistencia a edades mayores de una semana
Silicato tricálcico (C_3S)	El factor principal del fraguado inicial y de rápido endurecimiento, además de resistencia durante el primer mes.
Aluminato tricálcico (C_3A)	Facilita la reacción de la sílice con la cal con un bajo contenido de (C_3A), el cemento es más resistente a los sulfatos.
Aluminoferrito tetracálcico (C_4AF)	Reduce la temperatura de calcinación en el horno rotatorio, ayudando en la fabricación del cemento

Nota: Adaptado de *concreto simple*, (p. 24), por G. Rivera, 2013, Colombia. Derechos reservados por Gerardo Rivera.

Motivado a la necesidad que se presenta de obtener concreto con distintas propiedades, cada una de ellas adecuada para ciertos tipos de construcciones, se crearon cinco tipos de cemento Portland, con sus ventajas y desventajas.

Cemento Portland Tipo I. Es de uso general en la construcción, mientras la obra no requiera que se emplee alguno de los otros tipos. Proviene de la molienda conjunta de Clinker Tipo I y yeso, por lo tanto, se obtiene mayor resistencia inicial en menor tiempo de fraguado. Se aplica en: Obras de concreto y concreto armado en general, estructuras que requieren un rápido desencofrado, productos prefabricados, concreto en clima frío, entre otros. (Huamán, 2015, p. 11).

Cemento Portland Tipo II. Este tipo de cemento es medianamente resistente al ataque de los sulfatos y al calor de hidratación, además, alcanza una resistencia similar al cemento Tipo I pero con mayores tiempos de fraguado. (Huamán, 2015, p. 11).

Cemento Portland Tipo III. Es un tipo de cemento que desarrolla resistencias altas en tiempos cortos. Debido a que, al momento del fraguado produce altas temperaturas es más aplicable en climas fríos. (Huamán, 2015, p. 11).

Cemento Portland Tipo IV. Este tipo de cemento al contrario que el Tipo III es de fraguado lento, posee bajas resistencias en un periodo corto de tiempo, por lo tanto, produce un bajo calor, se recomienda su uso para obras que no requieran una alta resistencia inicial. (Huamán, 2015, p. 11).

Cemento Portland Tipo V. Este cemento tiene una alta resistencia al ataque de sales, es recomendable en obras hidráulicas expuestas a gran concentración de álcalis o estructuras expuestas al mar. (Huamán, 2015, p. 12).

Las propiedades del cemento se separan en finura, peso específico, tiempo de fraguado, falso fraguado y la consistencia normal, explicadas a continuación:

Finura. Es una propiedad muy importante del cemento, ya que a mayor finura mayor es la resistencia obtenida, esto se debe a que mientras más pequeñas son las partículas de cemento el área para que este entre en contacto con el agua es mayor, llegando a reaccionar casi en su totalidad desprendiendo grandes cantidades de calor, por otro lado, cuando se tienen partículas gruesas en el cemento estas no consiguen mezclarse completamente con el agua, teniendo de esta forma una pérdida del material que puede reaccionar y bajos valores en la resistencia final. (Rivera, 2013, p. 27).

Peso específico. La densidad o peso específico del cemento según Guzmán, 2001, “Es la relación existente entre la masa de una cantidad dada y el volumen

absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco y en un cemento portland normal cuando no hay adiciones referidas al yeso, suele estar comprendida entre 3.10 y 3.15 g/cm³.” (p. 41). Esta propiedad no tiene nada que ver con la calidad del cemento, la única función es usarla cuando sea requerida por el método de diseño de mezcla aplicado.

Tiempo de fraguado. El fraguado del cemento es el proceso de endurecimiento de la pasta a medida que pasa el tiempo, aumentando los valores de resistencia. Existen dos tipos de fraguado denominados como fraguado inicial y fraguado final, el primero es la cantidad de tiempo transcurrido desde que el cemento empieza a reaccionar con el agua que pierde su viscosidad; y el segundo es el tiempo transcurrido hasta que se obtiene la mayor temperatura, es decir, cuando la pasta se encuentra dura e indeformable por cambios pequeños. Se mide con una mezcla de consistencia normal y tomando diferentes lecturas con la aguja de Vicat hasta obtener la cantidad de tiempo en que penetra 25 mm.

Falso fraguado. Es cuando la mezcla de cemento se endurece de forma anticipada y anormal, Este se puede observar en los primeros minutos luego de adicionar el agua sin existir un desprendimiento de calor. Se puede recuperar la plasticidad de la pasta de cemento volviendo a mezclar la pasta endurecida sin agregarle más agua. (Guzmán, 2001, p. 46).

Consistencia normal. Es la relación obtenida entre el cemento y el agua cuando la aguja de Vicat penetra 10 mm a los 30 segundos.

Agregados.

Los agregados son los componentes del concreto que se encuentran en mayor cantidad representando el 75-90% del peso total del concreto, por esta razón la calidad final de la mezcla depende de las propiedades de los agregados. Huamán, (2015), explica lo siguiente:

Los agregados de calidad deben cumplir ciertas reglas para darles un uso óptimo: deben consistir en partículas durables, limpias, duras, resistentes y libres de productos químicos absorbidos, recubrimientos de arcillas y otros materiales finos que pudieran afectar la hidratación y la adherencia de la pasta al cemento. Las partículas de agregado que sean desmenuzables o susceptibles a resquebrajarse son indeseables. (p. 12).

Los agregados se dividen en dos grupos de acuerdo a su tamaño, estos son: agregado fino y agregado grueso.

Agregado fino. Son aquellos que pasa en un 100% el tamiz 3/8, es decir se encuentra retenidos entre el tamiz #4 y el tamiz #200. Estos se pueden clasificar según el tamaño de sus partículas y según su procedencia. La primera se divide en: Arenas gruesas con tamaños de partículas entre el tamiz #4 y #10 y el módulo de finura mayor a 3.0; Arenas medias con tamaños de partículas entre el tamiz #10 y #40 y el módulo de finura igual a 2.5; Arenas finas con tamaños de partículas entre el tamiz #40 y #200 y el módulo de finura menor a 2.0. La segunda se divide en: Arenas de río, redondas, uniformes y limpias; Arena de mina, generalmente heterogéneas y sucias; Arena de playa, con alto contenido de cloruros. (Walhoff, 2017, p. 22).

Agregado Grueso. Son aquellos en que la mayor parte del material es retenido por el tamiz #4, Se pueden obtener de forma natural o por la explotación de cantera y remodelando su estructura. Deben ser homogéneos y compactos, carecer de grietas y restos orgánicos, no deben ser absorbentes ni permeables, ser resistente al fuego, ser resistentes a las cargas que han de soportar, al desgaste y los procesos abrasivos, tener adherencia a los morteros, entre otros. (Walhoff, 2017, p. 23).

Antes de diseñar la mezcla de concreto, se debe contar con información de todos los componentes que esta tendrá, por esto ambos grupos de agregados son sometidos a diversos ensayos, con la finalidad de obtener las propiedades correspondientes de cada uno de ellos para tener datos relevantes con los que diseñar. Estos ensayos buscan determinar las siguientes variables:

Granulometría. Es la distribución de acuerdo al tamaño de las partículas de los agregados para realizar el concreto. Esto se determina haciendo pasar el material a través de unos tamices que van reteniendo la cantidad de partículas de su tamaño que se encuentra en la muestra. Los cedazos requeridos se encuentran regulados por norma.

Densidad. Existen tres tipos de densidad para los agregados: densidad aparente, densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca (SSS) y la densidad nominal. Se pueden determinar de diferentes maneras entre el agregado fino y el grueso. La siguiente tabla muestra las fórmulas que se emplean para obtener cada una.

Tabla 9.

Ecuaciones para el cálculo de las distintas densidades.

Densidad	Agregado Grueso	Agregado fino
Aparente	$p_a = (d) (M_1) / (M_2 - M_3)$	$p_a = (d) (M_1) / (M_a + M - M_p)$
SSS	$p_s = (d) (M_2) / (M_2 - M_3)$	$p_a = (d) (M) / (M_a + M - M_p)$
Nominal	$p = (d) (M_1) / (M_1 - M_3)$	$p_a = (d) (M_1) / (M_a + M_1 - M_p)$

Nota: Adaptado de COVENIN 268:1998 y COVENIN 269:1998, (p. 6 y 5), por FONDONORMA, 1998, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

De la tabla anterior: M_1 es la masa en el aire secada al horno, M_2 es la masa en el aire de la muestra saturada y de superficie seca del agregado grueso, M_3 es la masa en el agua saturada, M_a es la masa del picnómetro lleno con agua, M masa saturada y de superficie seca del agregado fino, M_p es la masa del picnómetro.

Absorción. La Norma Venezolana 269:1998, establece “Es el aumento en el peso de los agregados debido al agua en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas expresado como un porcentaje de la masa seca.” (p. 2). Se calcula como: $A = [(M_2 - M_1) / M_1] \times 100$, donde M_2 y M_1 son iguales a las presentadas en la Tabla 9.

Humedad. Es la cantidad de agua que se encuentra retenida en los poros de las partículas de los agregados.

Peso unitario. La masa o peso unitario de cualquier material es la masa que se necesita para llenar un recipiente de volumen unitario. Esta masa además del volumen de las partículas del agregado toma en cuenta los vacíos que hay entre partículas. Se puede determinar de dos formas, la primera denominada peso unitario compacto se emplea en algunos métodos de dosificación de mezclas y la segunda que se conoce como peso unitario suelto permite estimar la cantidad de agregados a comprar si estos se venden por volumen. (Rivera, 2013, p. 66).

El Vidrio

Es un material totalmente inorgánico, de cuerpo sólido, transparente y frágil que se origina de la fusión a 1200 °C de una arena de sílice mezclada con potasa o sosa. A temperatura ambiente constituye una masa amorfa, frágil, dura y sonora. El vidrio por lo general es transparente, o bien dispone de una variedad de tonalidades variadas que dependen de la composición química con la que haya sido fundido. (Suque, 2016, p. 1).

Como se ha mencionado, el vidrio es un material duro y este indicador puede ser medido de acuerdo a la resistencia que tiene a la penetración, abrasión, cortadura, rayado, deformaciones permanentes, entre otras, siendo la forma más conocida de medida la dureza de acuerdo a su rayado, esta se obtiene a partir de la escala de Mohs creada en 1823 por el alemán Friedrich Mohs, se basa en que una sustancia cualquiera puede ser rayada por otra más dura pero no puede ser rayada por una más blanda.

Mohs enumera la escala del 1 al 10, posicionando como número más bajo al material más blando y en la décima posición el mineral más duro. El puesto más blando lo ocupa el talco, el cual puede ser rayado con una uña y por el resto de los materiales

de la escala, y como sustancia más dura está el diamante. En esta escala, el vidrio ocupa la posición 5.5 como se puede observar en la siguiente figura:

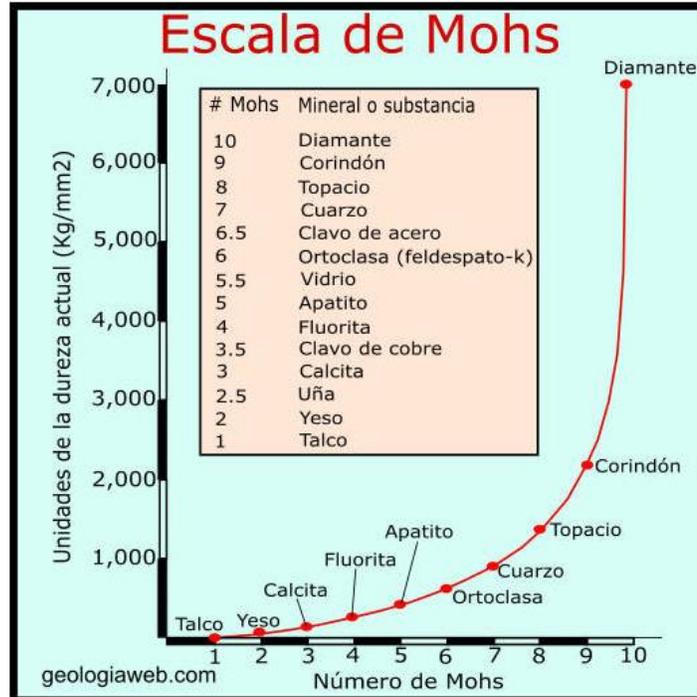


Figura 5. Escala de Mohs. Rescatado de *¿Qué es la escala de Mohs?*, por geologiaweb.com, 2021. Derechos reservados por geologiaweb.com.

Tipos de Vidrios.

Cuando en el proceso de fabricación del vidrio se les agregan otros compuestos químicos a las materias primas utilizadas, se puede obtener distintos tipos de vidrio. Existen elevadas variaciones de estos, sin embargo, se explican las más conocidas, obtenidas de las investigaciones realizadas con el material bibliográfico de este trabajo de investigación, estos tipos son los siguientes:

Vidrio de Seguridad. Este tipo de vidrio se obtiene por medio de un enfriamiento brusco desde temperaturas próximas al reblandecimiento, con lo que las superficies exteriores adquieren un estado de tensión, permitiendo que en caso de rotura del vidrio este se reduzca a fragmentos pequeños no cortantes. (Suque, 2016, p. 13).

El vidrio Sódico- cálcico. Representan la mayor parte de los vidrios fabricados, por la fácil obtención de las materias primas y por su composición. Está conformado por sílice, sodio y calcio. Existe una gran variedad de vidrios transparentes e incoloros con esta composición. Grande, Hernández y Renderos, (2017), lo definen como:

“Es el vidrio ordinario que se emplea para elaborar vidrios planos, botellas, frascos y otros objetos similares. Tienen siempre un ligero color verde debido al hierro de las materias primas. Resisten a la acción de disolventes del agua y los ácidos y tiene poco brillo.”. (p. 36).

Vidrios Potásicos. Este tipo de vidrio está formado por silicato de potasio que reemplaza el sodio y calcio, son más duros que los vidrios sódico - cálcico, son brillantes, resisten muy bien las variaciones de temperatura y muy resistentes a la acción del agua y ácidos. (Grande, Hernández y Renderos, 2017, p. 36).

Vidrio de Plomo. Este tipo de vidrio está formado por silicato de potasio y plomo, son transparentes como los vidrios sódico-cálcicos, de peso específico elevado, teniendo mayor poder de refracción y dispersión. (Catalan, 2013, p. 21). Por su alto contenido de plomo se utilizan en ventanas, lámparas fluorescentes y lámparas de televisión que sufren ataques por radiación energética, también son usados en vidrios ópticos y decorativos.

Vidrio de Borosilicato. Está conformado por sílice y óxido de boro en mayor proporción, es un vidrio inerte, el cual es más difícil de trabajar y fundir. Son resistentes al calor y a los cambios bruscos de temperatura. (Castillo y Quispe, 2019, p. 20). Este tipo de vidrio es utilizado en la fabricación de equipos de laboratorio, hornos y faros.

Vidrio de uso farmacéutico. Como el vidrio es un material inerte, es higiénico y es utilizado como envases de productos de farmacias, porque no causa ninguna reacción química con sus contenidos, protegiéndoles de alguna contaminación o alteración. (Suque, 2016, p. 14).

Vidrio de Sílice. Este tipo de vidrio es el más difícil de trabajar, está formado por 96% de sílice. Su fabricación es costosa donde se emplea la técnica de vacío para obtener productos para usos especiales, los cuales transmiten energía radiante e infrarroja con menor pérdida de energía. Este tipo de vidrios son altamente estables que soportan temperaturas hasta de 900 °C. durante largo tiempo. (Castillo y Quispe, 2019, p. 21).

Vidrio duro. Están formados por carbonato potásico y tienen un punto de fusión elevado, con este tipo de vidrio se fabrican tubos y utensilios de laboratorio, resistentes a las altas temperaturas. (Suque, 2016, p. 13).

Fibra de vidrio. Consisten en filamentos utilizados en láminas en la construcción de pequeñas embarcaciones. (Suque, 2016, p. 13).

Vidrio ligero. Este tipo de vidrio se utiliza en la fabricación de envases.

Vidrio Flint. Son utilizados con fines decorativos y en óptica, este tipo de vidrio tiene un elevado índice de refracción. (Suque, 2016, p. 13).

Vidrio Pyrex. Este tipo de vidrios son muy resistentes a las altas temperaturas y tienen un coeficiente de dilatación térmica pequeño. Pyrex es el nombre comercial dado a este tipo de vidrio. (Suque, 2016, p. 13).

Vidrio de jena. Este tipo de vidrio se utiliza en la fabricación de utensilios para laboratorios, son resistentes a los agentes químicos y poseen un coeficiente de dilatación bajo. (Suque, 2016, p. 13).

Vidrio Calizo. Este tipo de vidrio está formado principalmente por sílice, además de calcio y sodio. Es un vidrio común que se utiliza en la fabricación de vasos, mesas, vajillas, ventanas y otros tipos de enseres. (Suque, 2016, p. 14).

Composición del vidrio.

El vidrio común (silicato sodocálcico), está compuesto por los siguientes elementos y sus proporciones como lo indica la tabla.

Tabla 10.

Elementos del vidrio común.

ELEMENTO	PORCENTAJE (%)
Sílice (SiO ₂), material vitrificante	De 69 a 74
Óxido de sodio (Na ₂ O), fundente	De 12 a 16
Óxido de calcio (CaO), estabilizante	De 5 a 12
Óxido de magnesio (MgO)	De 0 a 6
Óxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	De 0 a 3

Nota: Adaptado de *Utilización de desecho de vidrio como árido grueso para la elaboración de concreto*, (p. 4), por C. Suque, 2016, Guatemala. Derechos reservados por Carlos Eduardo Suque Soc.

Además de estos componentes el vidrio puede contener también pequeñas cantidades de otras sustancias.

Propiedades Físicas del vidrio.

El vidrio tiene un aspecto macroscópico, es un sólido típico y es uno de los materiales más duros que se conoce. Desde el punto de vista molecular un líquido sobre enfriado. Entre sus propiedades físicas tenemos:

Color. El color en el vidrio se origina por elementos colorantes que se agregan al momento de su fundición, de acuerdo al color que se desea se le agrega los siguientes elementos. (Ver tabla).

Tabla 11.

Colorantes del vidrio.

ELEMENTO	COLOR
Óxido de cobalto	Rojo azulado
Óxido ferroso	Azul
Óxido férrico	Amarillo
Óxido de cromo	Verde grisáceo
Trióxido de cromo	Amarillo
Óxido de cobre	Verde Azulado
Óxido de uranio	Verde amarillento fosforescente
Selenio elemental	Rosa
Sulfuro de cadmio coloidal	Amarillo

Nota: Adaptado de *Utilización de desecho de vidrio como árido grueso para la elaboración de concreto*, (p. 7), por C. Suque, 2016, Guatemala. Derechos reservados por Norma IRAM 12 565.

Textura. Una vez que el vidrio está completamente fundido, tiene una textura suave y uniforme, presenta un brillo único y es fácil de limpiar. La textura puede cambiar el brillo del vidrio según el proceso de fusión realizado. Cuando el vidrio tiene una textura rugosa, es el resultado de una fusión incompleta durante el proceso de cocción. Debido a su superficie rugosa, es un vidrio opaco.

Peso. No se tiene valores en específico, ya que el peso de los vidrios varía de acuerdo a su densidad y a su composición.

Maleabilidad. Esta propiedad física del vidrio se produce en su fase de fundición. La maleabilidad del vidrio es cuando se le da la forma deseada, ya sea por moldes o por cualquier otro método utilizado para dar forma al vidrio. Los principales métodos de moldeo del vidrio son: fundición, soplado, prensado, estirado y laminado.

Propiedades Mecánicas del vidrio.

El vidrio durante su uso puede estar sometido a diferente tipo de esfuerzos mecánicos como: flexión, compresión, tensión y dureza.

Flexión. En la mayoría de los casos, el vidrio está expuesto a esfuerzos de flexión y es una de las formas de probar su resistencia. El vidrio que se somete a esfuerzos de flexión tiene esfuerzos de compresión en un lado y esfuerzos de tracción en el otro lado.

Compresión. El vidrio tiene una resistencia a la compresión muy alta, siendo esta resistencia media a la compresión 1000 MPa (10197.16 Kgf/cm²).

Tensión. El vidrio en el proceso de fabricación puede tener imperfecciones como grietas invisibles, que cuando se aplica presión acumula tensiones de tracción en estos puntos y produce un doble aumento en la tensión aplicada.

Dureza. La propiedad de dureza del vidrio depende de su densidad y composición química. Se presenta como la dificultad de romperse, de ser penetrado y rayado por otro material.

Fabricación del vidrio.

El proceso de fabricación del vidrio prácticamente no se ha visto modificado desde su creación, y el uso de las principales materias primas y la temperatura de fusión no han cambiado. Sin embargo, con el pasar de los años y la mayor implementación de este material, se hace necesario obtenerlo a una velocidad mucho mayor, entonces con el fin de obtener un proceso de fabricación más acelerado, las técnicas utilizadas se han transformado para que pueda tener una forma de vidrio adecuada para diversas aplicaciones.

Este proceso de fabricación de vidrio se realiza en un reactor de fusión, donde se mezclan previamente las materias primas como arena de sílice y óxidos metálicos secos triturados, luego se obtiene un líquido viscoso del proceso de fusión a una temperatura superior a 1.000 ° C, volviendo la masa uniforme y transparente. Después de la etapa de fusión, el vidrio se saca del reactor y obtiene un endurecimiento que permite su funcionamiento y conformación. Los pasos de este proceso de fabricación de vidrio los describe Suque, (2016), de la siguiente manera:

- Paso 1: las materias primas para la producción moderna de una gran variedad de vidrios se emplea una mezcla de materias primas, que se introducen en un depósito llamado tolva.
- Paso 2: los ingredientes se funden en un horno para obtener cristal líquido (entre 1500 y 2000 °C). El fuego lo mantiene caliente y fluido.
- Paso 3: el flujo de cristal fundido varía según se desee que sea el grosor de la lámina final.
- Paso 4: el vidrio flota sobre el estaño a 1000 °C. En este depósito se va enfriando y solidificando.
- Paso 5: el vidrio es ahora pegajoso y viscoso, pero tiene la suficiente consistencia para permitir el resto del proceso.
- Paso 6: en un horno-túnel se vuelve a calentar el vidrio sin llegar a fundirlo.
- Paso 7: se deja enfriar lentamente para que no se agriete.
- Paso 8: un diamante corta el cristal.
- Paso 9: resultado final: vidrio de tres metros de ancho y diferentes espesores. (p. 5).

La *Figura 6* muestra el recorrido que realiza la materia prima para la obtención de vidrio, indicando de acuerdo a los números observados, los pasos llevados a cabo en la fabricación de vidrio.

Por otro lado, las letras representan la materia prima utilizada de la siguiente manera: con la letra “A” se representa la arena la cual es el componente principal de la mezcla; con la letra “B” el carbonato de sulfato de sodio, cual permite la fundición de la arena a menos temperaturas; La letra “C” se utiliza para representar la piedra caliza que no permite que el vidrio se descomponga en el agua; y la letra “D” es vidrio reciclado, esto ahorra el gasto de otras materias primas.

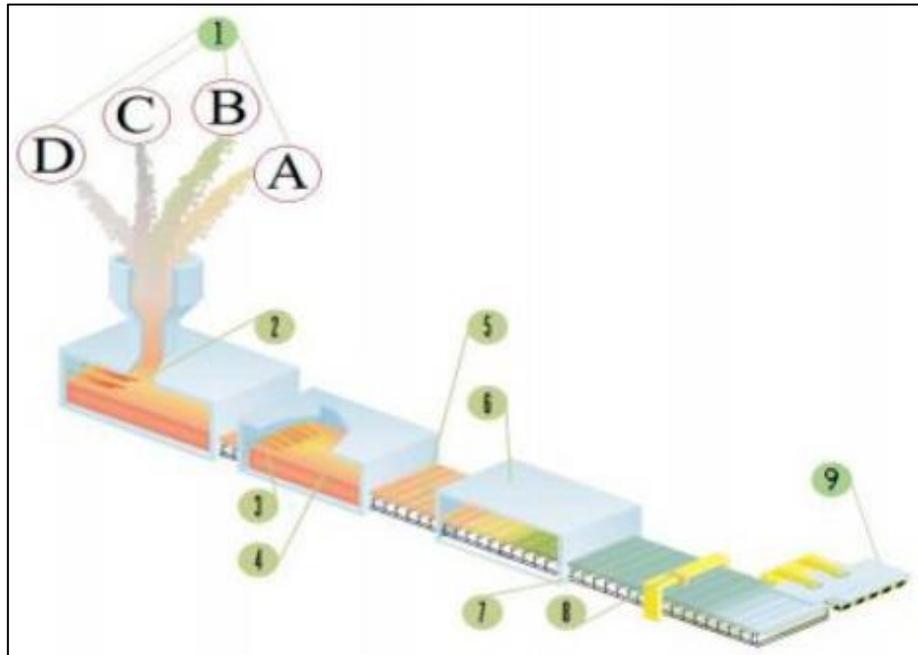


Figura 6. Descripción del proceso de fabricación del vidrio. Tomado de *Utilización de desecho de vidrio como árido grueso para la elaboración de concreto*, (p. 6), por C. Suque, 2016, Guatemala. Derechos reservados por IRUSTA, Manuel.

Usos del vidrio.

Desde hace muchos siglos se ha utilizado el vidrio en construcciones de diferentes tipos, donde este material ha conservado sus características desde sus inicios. Entre sus propiedades se tiene que son transparentes y translúcidos, brindan un aislamiento acústico y térmico, los cuales los hacen más beneficiosos que otros materiales. Tienen una amplia variedad de tipos que son utilizados conjuntamente con otros materiales en la construcción, teniendo su uso un aumento de las proyecciones de crecimiento al futuro.

El vidrio se ha utilizado como material en las construcciones y como piezas decorativas y artísticas desde sus orígenes, los cuales datan desde unos 5000 años antes de la era cristiana, ubicadas en Mesopotamia, Asia Menor y en Egipto. Se han encontrado piezas completamente hechas de vidrio con una data de 2.100 a C. donde se utilizó la técnica de moldeo. Los romanos utilizaban pequeñas láminas de vidrio

como ventanas de las viviendas, sin embargo, este era un material lujoso y no se utilizaba con frecuencia en obras hasta un tiempo después que se desarrolló el método de soplado a caña para fabricar vidrio. Para el año 200 a C. se inició la técnica del soplado del vidrio por medio de la caña del vidriero por parte de los egipcios, la cual se sigue utilizando en la actualidad. Unos años más tarde, para la conservación y almacenamiento de algunos productos los romanos utilizaron colorantes para oscurecer el vidrio por medio de óxidos metálicos. En el periodo de la edad media se usó el vidrio en la fabricación de envases y elaboración de piezas de lujo para la decoración.

Del siglo XV en adelante, se seguía utilizando la técnica de soplado a boca para la fabricación del vidrio, pero con la variante que se comenzó a producir vidrios planos de menor grosor con el método antes mencionado. Se fabricaron vidrios más grandes y delgados con el perfeccionamiento de la técnica del soplado a boca, se comenzó a utilizar la soda en la composición del vidrio lo que permitía que éste ofreciera mayor resistencia al daño químico, mejorando así la calidad del vidrio.

Otro de los usos dados en la época era la elaboración de mosaicos que consistía en una decoración de distintos materiales y colores organizados para crear figuras, iniciando lo que sería el uso arquitectónico del vidrio. Posteriormente, ocurre la creación de las vidrieras, Morales, (2017), explica:

La técnica clásica de la vidriería parte de tres elementos esenciales: el vidrio, el emplomado y la pintura. Estos tres elementos establecen un paralelismo, por el que el vidrio es el elemento básico (por su aspecto funcional, por su aislamiento y por qué deja pasar la luz), el emplomado es la parte más técnica, mientras que la pintura nos aporta los aspectos formales. (p. 17).

De esta manera se inició un periodo en la utilización del vidrio que abarcaría muchos años, obteniendo las vidrieras del romántico, góticas, cisterciense, renacentistas hasta el surgimiento del modernismo, en todo ese tiempo también era usado como material de adorno. Durante las épocas del Renacimiento y Barroco se

caracterizó por la elaboración de vidrios con artes pictóricas sobre vidrios translúcidos o en una vidriera incolora.

En la evolución de la arquitectura que ofrece el vidrio, se destacan dos momentos importantes. El primero es cuando se pasa de la creación de ventanas empleada por los romanos a la arquitectura gótica, donde se crearon por primera vez los muros traslúcidos. El segundo momento se tiene luego de la revolución industrial, donde se hizo posible la elaboración de láminas de vidrios con mayores dimensiones a las conocidas en la época, obteniendo elevadas producciones y bajos precios en el proceso, esto abrió el conocimiento a las grandes fachadas de vidrio en la actualidad. (Acosta, Bujato, Carey y Díaz, 2018, p. 3).

A medida que fue pasando las épocas se realizaron avances en la fabricación del vidrio, hasta que en la actualidad el uso del vidrio en la construcción abarca más que todo la arquitectura a través de la implementación de fachadas acristaladas, que permiten a la construcción tener un aspecto atractivo como se pueden observar en estadios, edificios, piscinas en terrazas, escaleras e incluso en la elaboración de pasarelas peatonales como es el caso de la pasarela de vidrio más grande del mundo en Washeng, China. Además, la implementación del vidrio en edificaciones contribuye al ahorro de energía debido a la entrada de luz, Por otro lado, cada vez se realizan más estudios para implementar este material en otros ámbitos constructivos, como en el presente trabajo de investigación donde se intenta obtener un concreto con sustitución de agregado fino por vidrio molido.

El vidrio es un material que tiene múltiples aplicaciones en diferentes campos, tales como: arquitectura, industria, vida cotidiana y ciencia. La importancia y uso del vidrio se debe a la serie de cualidades que presenta, como transparencia óptica, resistencia eléctrica, aislamiento y facilidad de producción. En la actualidad, es un elemento importante en la edificación y construcción, donde se busca obtener el mejor efecto visual y la máxima iluminación natural a través de una mayor superficie

acristalada, lo que contradice la necesidad de una mayor eficiencia energética y mayores estándares de seguridad. Lo único en que este material presenta su punto débil es en los altos costos que puede poseer alguno de sus tipos.

Debido a la resistencia química que posee el vidrio puede contribuir en la elaboración de adoquines, ayudando en caso de estar sometido a condiciones ambientales extremas como la lluvia ácida. Este material es resistente a la degradación y al desgaste, sin embargo, otras propiedades del vidrio pueden ser perjudiciales, por lo tanto, se debe analizar previamente. (Poveda, Granja, Hidalgo y Ávila, 2015, p. 8).

Si se elige el vidrio adecuado, puede haber altos costos, pero puede reducir el costo final de otros aspectos, como aire acondicionado, carpintería, equipos de seguridad y oscurecimiento.

En términos generales, el vidrio puede dar soluciones a problemas como el aislamiento acústico y térmico, el ahorro de energía, la seguridad física, la resistencia estructural, la decoración (vidrio: doblado, serigrafiado, satinado, pulido con chorro de arena) y la protección de personas y propiedades (vidrio antirrobo, antibalas). Es un recipiente ideal para alimentos, ya que se puede almacenar durante mucho tiempo sin cambiar su sabor y aroma, por eso el vidrio es sano y puro. Es resistente pero también muy frágil y peligroso cuando se rompe. Se debe evitar su uso irresponsable, es decir, utilizarlo en aspectos que no sea adecuado para su uso.

Cada tipo de vidrio tiene una aplicación diferente, ejemplo el vidrio sílico - sódico - cálcico, dentro sus aplicaciones más comunes tienen su uso como elemento constructivo en ventanas, puertas, vitrinas espejos, entre otros; en recipientes y en objetos decorativos como botellas, vasos, jarros, etc. En el caso de los vidrios borosilicato son usados en aplicaciones donde se necesita una alta resistencia a la temperatura, como en utensilios de cocina y de laboratorio. Los vidrios de plomo son usados en ventanas de radiación, lámparas fluorescentes y vidrios de cristal.

Otras aplicaciones del vidrio pueden ser: en la fabricación de lentes de antejo, microscopio, objetos decorativos y ornamentales, aislante en forma de lana de vidrio, telescopio, material dieléctrico y no conductores en forma de vitrocerámica, focos y reflectores

Reciclaje del vidrio.

Este es uno de los materiales reciclables más implementados en el mundo, tal es el caso de Europa, donde se generan 1.2 toneladas de vidrio, esto equivale al 7% de todos los desechos, por lo tanto, representa un recurso aprovechable para el desarrollo de tecnologías. (Mora, 2018, p. 17).

El vidrio se puede reciclar el 100% de las veces sin perder su rendimiento original durante el procesamiento. Después del reciclaje, se puede utilizar como materia prima para la fabricación de vidrio nuevo o como componente de otros productos. El reciclaje de vidrio comienza con la recolección de este previamente desechado y su transporte a una planta de reciclaje, donde se separan las materias extrañas y se clasifican por color. Luego, se tritura y se somete a un proceso de fundición, donde se agregan materias primas (piedra caliza, arena, etc.) u otros materiales para cambiar su calidad. Para realizar la reutilización del vidrio, es muy importante que la industria promueva en general el diseño de productos reciclables.

En el proceso de fabricación de vidrio, los desechos de vidrio se producen en forma de polvo, que se pueden utilizar en mezclas de concreto después de ser desechados. Además, en la mayoría de los casos, el vidrio no se reciclará para su producción durante su ciclo de vida, por lo que puede ser obtenido en distintos lugares como desecho. Es por eso que se propone usarlo en el hormigón para que tenga diferentes efectos, que serán útiles y ayudarán a reducir los gases contaminantes, y la reducción de los residuos de vidrio en los vertederos ayudará a reducir los impactos ambientales. El uso de vidrio en mezclas de hormigón puede aportar propiedades útiles

en la industria de la construcción y, para ello, pretende probar, estudiar y analizar estas propiedades.

Bases legales

Las bases legales señalan toda la normativa y argumentos legales del proyecto de investigación. Estos permiten obtener una guía para la elaboración de los ensayos pertinentes. La presente investigación se basa en las Normas Venezolanas COVENIN, las cuales se encuentran elaboradas a partir de estudios realizados al hormigón convencional y sus componentes, teniendo de esta forma las bases para implementarlas a un nuevo diseño de mezcla no convencional y ver las reacciones que conlleva. Las normas utilizadas son las siguientes:

Norma Venezolana COVENIN 263-78

Establece un método de ensayo para determinar el peso unitario de todos los agregados, es decir, el agregado fino, grueso y mezclado, utilizando como instrumentos principales una balanza, dos moldes, una pala y una barra compactadora

Norma Venezolana COVENIN 269:1998

Establece un método de ensayo para determinar la densidad aparente, la densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca (densidad aparente SSS), la densidad nominal y la absorción del agregado grueso.

Norma Venezolana COVENIN 268:1998

Establece un método de ensayo para determinar la densidad aparente, la densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca (densidad aparente SSS), la densidad nominal y la absorción del agregado fino.

Norma Venezolana COVENIN 255:1998

Contempla un procedimiento para la determinación por cernido de la composición granulométrica de todos los agregados (finos y gruesos), es decir, la distribución de los agregados por tamaño de sus partículas.

Norma Venezolana COVENIN 266-77

Establece el método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste u abrasión en agregados gruesos menores de 38.1 mm (1 ½”) a través de la Máquina de los Ángeles.

Norma Venezolana COVENIN 494:1994

Indica el método de ensayo empleado para determinar la cantidad de agua necesaria que se mezcla con el cemento, para obtener pastas de cemento portland de consistencia normal.

Norma Venezolana COVENIN 493-92

Establece el método de ensayo empleado para determinar el tiempo de fraguado del cemento portland utilizando como instrumento la aguja de Vicat, es necesario tener la consistencia normal del cemento previamente.

Norma Venezolana COVENIN 338:2002

Establece el método de ensayo empleado para la elaboración, curado y determinación de la resistencia a compresión de las probetas cilíndricas de hormigón, además de indicar los límites aceptables para cada prueba.

Norma Venezolana COVENIN 339:2003

Indica el método de ensayo empleado para determinar el asentamiento de las mezclas de concreto fresco (en las obras y en el laboratorio), partiendo de la utilización del Cono de Abrams. Cabe destacar que, el rango de valores de asentamiento adecuado para aplicar el método va desde 1/2" (1.27 cm) a 8" (20.32 cm) y no se debe aplicar para mezclas donde existan cantidades de agregados mayores de 1 1/2" (3.81 cm).

Norma Venezolana COVENIN 277:2000

Establece los requisitos mínimos que debe de cumplir los agregados empleados en las mezclas de concreto, tanto finos como gruesos.

Terminología básica

Absorción: excluyendo el agua presente en la superficie, es el acumulo de agua en los poros del material, lo cual supone un aumento de su masa, expresado como porcentaje de la masa seca.

Adoquín: puede ser de distintas formas y colores, son procesados industrialmente por vibro compresión cuya mezcla contiene arena, cemento, piedra y agua. Además, es compatible con todo tipo de pavimentos para ser utilizado como capa de rodadura.

Compresión: es la presión generada cuando se ejerce una fuerza opuesta sobre algún cuerpo y este tiende a disminuir su tamaño.

Concreto: también conocido como hormigón, es el resultado de integrar en una mezcla: agua, material aglutinante, agregado y algunas veces materiales aditivos que al secar y endurecerse son capaces de resistir un alto nivel de compresión.

Consistencia Normal: puede expresarse como aquella consistencia donde la aguja de Vicat a los 30 segundos de ser liberada penetra en la mezcla (10 ± 1) mm.

Curado: consiste en someter a hidratación constante al concreto a base de cemento, con el fin de que el mismo, al ser expuesto a suficiente agua y calor, madure y endurezca perfectamente

Densidad: es la masa por unidad de volumen.

Densidad Aparente: es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluidos los poros saturados e insaturados y la masa de un volumen equivalente de agua destilada sin gas a la temperatura especificada.

Densidad nominal: es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, sin incluir los poros saturables, pero sí los no saturables, y la masa de un volumen equivalente de agua destilada sin gas a una temperatura especificada.

Densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca (SSS): es la relación entre la masa en el aire de un volumen dado de agregado, incluyendo la masa del agua dentro de los poros saturables, pero sin los vacíos entre las partículas, y la masa de un volumen equivalente de agua destilada libre de gas a una temperatura especificada.

Desechos: son todos aquellos productos que no poseen o han perdido su utilidad y por lo tanto deben ser eliminados.

Dimensión: valor relacionado con la medición de las magnitudes de un objeto en un espacio físico para determinar su extensión.

Dosificación: es el proceso de determinar la dosis o proporción específica de cada uno de los elementos que componen una mezcla.

Durabilidad: Hace referencia a la vida operativa de un material mientras estos conserven la calidad prevista, es decir, que estén entre el rango de características establecidas para considerarlos aptos para su funcionamiento.

Fraguado: es el endurecimiento del concreto mediante la generación de una reacción exotérmica cuando el cemento y el agua entran en contacto. Es un proceso donde ocurre una pérdida progresiva de la manejabilidad del concreto con el tiempo.

Granulometría: es el estudio del tamaño de los granos sedimentarios, proceso mediante el cual es posible obtener otro tipo de informaciones como origen y propiedades

Pasta de cemento: es un compuesto de consistencia espesa que se obtiene a partir de la unión del cemento con el agua.

Peso: es la fuerza ejercida en los cuerpos por acción de la gravedad. Se calcula tomando en cuenta la masa de los cuerpos por la aceleración de la gravedad.

Propiedad: son las particularidades o características propias de cada elemento con los que se hace posible establecer diferencias entre los grupos

Propiedades físicas: se trata de todas aquellas propiedades capaces de ser medidas y detectables a simple vista las cuales pueden sufrir cambios con el tiempo. Además, nos permite describir los objetos, basándonos en el color, textura, forma, tamaño, entre otros.

Propiedades mecánicas: son esas particulares de la composición de los materiales que describen sus reacciones cuando se ven sometidos a la acción de una fuerza externa.

Reciclaje: es un proceso de recolección de materiales de desechos para transformarlos, convirtiéndolos en nuevos productos o materia prima útil para fabricar materiales de provecho con la finalidad de reducir la cantidad de desechos sólidos presentes en nuestra sociedad.

Relación a/c: trata de la relación que existe entre el peso de la cantidad de agua y el peso del cemento empleados en la elaboración de mezcla. Su importancia radica en que este valor expresa la resistencia y durabilidad que tendrá el hormigón, así, a menor relación a/c, mayor resistencia por parte del hormigón

Resistencia: es una propiedad mecánica de los cuerpos que les da la capacidad de aguantar la acción de fuerzas externas sobre ellos sin deformarse.

Resistencia a la compresión: es la capacidad máxima de un material para soportar la aplicación de fuerzas que actúan en un mismo sentido.

Reproducibilidad: es cuando se obtiene diferentes valores en mediciones realizadas por diferentes operadores, pero empleando el mismo procedimiento.

Textura: se refiere a la organización de los elementos que componen un cuerpo cualquiera, especificando su superficie, lo que le da su apariencia y puede ser apreciada por los sentidos de la vista y el tacto.

Tiempo de Fraguado: es la cantidad de tiempo mediante el cual se endurece el hormigón y pierde su plasticidad a través de reacciones químicas exotérmicas que generan otros compuestos capaces de endurecer la mezcla.

Vidrio: es un material inorgánico presente en la naturaleza sin forma definida, cuyo principal constituyente es la sílice, obtenido al someterse a 1500 °C de fusión.

Vidrio molido: se obtiene a partir de cualquier tipo de vidrio cuando por acción mecánica es disminuido hasta obtener sus partículas más pequeñas. Posee la particularidad de que, a pesar de este proceso, es capaz de conservar sus propiedades, por lo que se presenta como un excelente candidato para emplearse en el proceso del reciclaje.

Capítulo III

Marco Metodológico

Tipo de investigación

Al efectuar un trabajo de investigación es de vital importancia el conocimiento de la metodología con la cual dicho trabajo será desarrollado, con la finalidad de obtener una correcta estructuración que permita una obtención de los resultados con gran exactitud. De acuerdo a los objetivos presentados en este trabajo se puede afirmar que el tipo de investigación utilizada es exploratoria.

En tal sentido, Arias, (2012), señala que “La investigación exploratoria es aquella que se efectúa sobre un tema u objeto desconocido o poco estudiado, por lo que sus resultados constituyen una visión aproximada de dicho objeto, es decir, un nivel superficial de conocimientos” (p. 23). Expresado de otra forma, esta investigación se encargará de la recolección de todos los datos posibles sobre el tema en estudio para plantar las bases a futuros experimentos.

Este trabajo tiene como finalidad determinar las propiedades del concreto a partir de la sustitución de cierta cantidad de agregado fino por vidrio molido, para proceder a realizar una comparación de estos resultados con otros estándares usados frecuentemente en el ámbito de la construcción y al mismo tiempo presentar propuestas en donde pueda ser utilizado esta investigación. Todo esto en vista de un mejor aprovechamiento del medio ambiente para preservar el futuro del ser humano.

Diseño de la investigación

Se presenta un diseño de investigación experimental, de acuerdo a Palella y Martins, (2012).

El diseño experimental es 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).

La determinación de las propiedades del concreto a partir de la sustitución de agregado fino por vidrio molido está comprendida en un diseño experimental debido que es necesario la realización de pruebas al material en estudio y hacer una recolección de los distintos datos in situ, con la alteración o manipulación de las diferentes variables en situaciones de total control, con la finalidad de presentar resultados significativos de gran provecho para la industria de la construcción.

Unidad de análisis

De acuerdo a Hernández, Fernández y Baptista, (2014), “Aquí el interés se centra en qué o quiénes, es decir, en los participantes, objetos, sucesos o comunidades de estudio (las unidades de muestreo), lo cual depende del planteamiento y los alcances de la investigación” (p. 172). En este trabajo de investigación, la unidad de análisis está comprendida por la mezcla de concreto, específicamente en el vidrio molido, el cual impactará el comportamiento mecánico del diseño de mezcla de concreto, al sustituir al agregado fino en diferentes proporciones.

Sistema de variables

Según Hernández, Fernández y Baptista, (2014), una variable es “una propiedad que puede fluctuar y cuya variación es susceptible de medirse u observarse” (p. 105). Para llevar a cabo el objetivo general del presente trabajo, se elaboró la tabla a continuación que explica cada variable implementada por objetivos específicos.

Tabla 12.

Operacionalización de las variables.

Objetivo general: Determinar las propiedades de resistencia a compresión del concreto, a partir de la sustitución de cierta cantidad de agregado fino por vidrio molido.						
Objetivos específicos	Variable	Dimensión	Indicador	Técnica	Instrumento	Fuente
Caracterizar el material de vidrio molido a utilizar en los diseños de mezcla del concreto.	Vidrio molido como agregado fino de la mezcla de concreto	Aplicación de las pruebas de laboratorio realizadas para un agregado fino convencional	- Peso unitario suelto - Peso unitario compacto - Densidad aparente - Densidad aparente SSS - Densidad nominal - Absorción	Análisis de contenido	Ficha técnica	No aplica
Proponer diseños de mezclas de concreto con distintos porcentajes de adiciones de vidrio molido.	Diseño de mezcla de concreto	Elaboración de tres diseños de mezclas	- Diseño patrón - Diseño con 10% de vidrio - Diseño con 15% de vidrio	Análisis de contenido	Ficha técnica	No aplica
Determinar las propiedades en estado fresco de las dosificaciones preparadas.	Mezclas de concreto en estado fresco	Medidas del asentamiento de cada mezcla	- Asentamiento	Análisis de contenido	Ficha técnica	No aplica
Determinar la resistencia a compresión del concreto endurecido, tanto la de la mezcla patrón, como las pertenecientes a las mezclas con adiciones de vidrio molido.	Probetas cilíndricas	Ensayos a compresión de todas las probetas	- Resistencia a compresión - Carga soportada	Análisis de contenido	Ficha técnica	No aplica
Indicar en qué aspectos de la industria de la construcción puede ser usado el concreto proveniente de la sustitución de agregado fino por vidrio molido.	Usos del concreto	El concreto con adición de vidrio en el ámbito constructivo	Usos del hormigón con sustitución de vidrio como agregado fino	Análisis de contenido	Análisis documental	Material bibliográfico

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Técnicas e instrumentos de recolección de información

Luego de haber definido el tipo y diseño de investigación, y también la unidad de análisis es necesario explicar las técnicas e instrumentos que permitirán una correcta recolección de resultados para dar conclusión a los objetivos planteados. En este sentido Arias, (2012), afirma que la técnica de investigación es "el procedimiento o forma particular de obtener datos o información", (p. 67), y el instrumento de investigación es "cualquier recurso, dispositivo o formato (en papel o digital), que se utiliza para obtener, registrar o almacenar información" (p. 68).

Con la finalidad de cumplir con todos los objetivos planteados es de vital necesidad realizar pruebas en situ para determinar las propiedades del concreto luego de haber realizado la sustitución de agregado fino por vidrio molido, y también es requerido con anterioridad la manipulación de la mezcla y los materiales con los que se trabajará, en tal sentido se usará la técnica de observación directa. Palella y Martins, (2012), la definen como la técnica en la cual "el investigador se pone en contacto personalmente con el hecho o fenómeno que trata de investigar" (p. 118). El uso de aparatos de laboratorio, registro de datos y una memoria fotográfica, serán los instrumentos utilizados para cumplir los objetivos del tema en estudio.

Procedimiento

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados, este trabajo tuvo su desarrollo principalmente en tres fases totalmente prácticas, la primera corresponde a la obtención y traslado de todos los componentes con lo que se realizaría la mezcla de concreto; la segunda es la realización de los ensayos correspondientes a estos componentes adquiridos, con la intención de tener las características de estos para realizar los diseños de mezcla; y la tercera corresponde netamente a todo lo que tenga que ver con la mezcla de concreto. A partir de aquí se presentan en el "Capítulo IV" de este documento todos los resultados logrados y sus respectivos análisis.

Fase 1: obtención de los componentes del concreto

El origen del cemento, el agregado grueso (piedra picada) y el agregado fino (arena lavada) proviene de la ferretería “La Fuerte” en la avenida principal de castillito en Ciudad Guayana, Venezuela, estos componentes fueron adquiridos por gastos monetarios de los autores de esta investigación. En el caso del vidrio molido, se realizó un recorrido por todas las tiendas de cristalerías en Upata, solicitando donaciones de recortes y pedazos de este material que ya no podrían ser útiles para la venta, partiendo de que este no es un elemento convencional para elaborar concreto, no se tiene un procedimiento definido para su implementación, por lo tanto, fueron introducidos en un cuñete metálico de pintura y con la ayuda de un pico se empezaron a triturar hasta obtener el tamaño y la cantidad necesaria para elaborar este trabajo de investigación.

Posteriormente, se transportaron todos los elementos conseguidos hasta el Laboratorio de Materiales de Construcción de la Universidad Católica Andrés Bello, espacio que fue acondicionado para el almacenamiento de estos componentes hasta su requerimiento. La siguiente imagen corresponde a dos de los materiales adquiridos en este proceso.



Figura 7. Muestras de arena lavada y piedra picada utilizados. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Fase 2: ensayos de los componentes del concreto

Los ensayos para obtener las características de los agregados y el cemento con lo que se realizó la mezcla de concreto, se llevaron a cabo tomando como guía las Normas Venezolanas COVENIN presentadas en el apartado de “Bases legales” que corresponde al “Capítulo II” de este documento. Aquí se expondrá el procedimiento exacto que se llevó a cabo en los ensayos de campo.

Ensayo de peso unitario de los agregados.

Primeramente, se seleccionaron muestras por material a ensayar, los cuales son: la arena lavada, la piedra picada y el vidrio molido; estas fueron sometidas a un proceso de secado en un horno a temperatura de 105 °C hasta alcanzar una masa constante y mezclarse completamente. A partir de aquí el ensayo se dividió en tres partes, presentadas a continuación:

Primera parte: calibración del recipiente. Este ensayo se elaboró con la implementación de dos recipientes para cada tipo de agregado, es decir, se utilizó un recipiente para el agregado fino y otro para el grueso, luego se procedió a pesar cada recipiente cilíndrico vacío sin gota alguna de agua y se seleccionó uno de los recipientes para comenzar a trabajar vertiendo agua a temperatura ambiente dentro de él, evitando que se mojara el recipiente por la parte externa, seguidamente se pesó aparte una lámina de vidrio para colocarla encima del recipiente con agua con la finalidad de eliminar las burbujas y el exceso que se pueda encontrar en este líquido, inmediatamente se determinó el peso total de todo el conjunto y por medio de los cálculos se obtuvo una calibración del molde. Posteriormente de haber culminado el proceso se procedió a realizar los mismos pasos con el otro recipiente.

Segunda parte: determinación del peso suelto. Una vez calibrado los recipientes se tomó una primera muestra de agregado fino y con ayuda de una pala se vertió en el

molde pequeño desde una altura no mayor a 5 cm de la parte superior de éste, de forma tal que el agregado se acoplara por sí solo en el interior del recipiente hasta el momento en que se llenara completamente, para luego enrasar el agregado con ayuda de una barra metálica. Seguidamente se procedió a calcular el peso neto del agregado con la balanza y luego repetir este mismo procedimiento para las cinco muestras restantes, cambiando en su debido momento al recipiente de mayor tamaño.

Tercera parte: determinación del peso compacto. En este caso se empezó tomando una muestra del agregado grueso descargándola en el recipiente de mayor tamaño con ayuda de la pala con cuidado de hacerlo aproximadamente en tres partes iguales, separando el vertido en tres capas y en cada una de ellas se tomó la barra compactadora y con la punta redondeada se proporcionó 25 golpes sobre la muestra (como se muestra en la *Figura 8*), por medio de este método las partículas se acomodaron de modo compacto, cuando se terminó de llenar y compactar se procedió a enrasar para luego pesar todo el conjunto y obtener el peso neto del agregado. Este mismo proceso fue realizado con cinco muestras más, cambiando al recipiente pequeño cuando correspondiera. El ANEXO B muestra partes de este procedimiento.



Figura 8. Compactación para obtener el peso unitario compacto. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Ensayo de densidad y absorción de los agregados.

Esta prueba se elaboró individualmente por tipo de agregado, es decir, para el agregado grueso se siguió un proceso mientras que para el agregado fino (arena y vidrio) se utilizaron otros pasos. En el caso del agregado grueso se adoptó un procedimiento separado en dos partes, las cuales son las siguientes:

Primera parte: Preparación de la muestra. Se sumergió la muestra en agua a temperatura ambiente durante un periodo de (24 ± 4) horas, luego se extrajo el material del agua y se hizo rodar sobre un paño grande absorbente hasta hacer desaparecer toda la cantidad de agua visible, obteniendo de esta forma un estado de masa saturada con superficie seca. Por otro lado, se secaron separadamente las partículas más grandes evitándose la evaporación de agua en los poros de las mismas.

Segunda parte: Medición de las masas. Se obtuvo la masa en la balanza de la muestra bajo condición saturada y de superficie seca, se colocó el agregado en un recipiente o cesta de alambre (ver ANEXO C), y se determinó su masa en el agua con un valor de densidad de 1g/ml, luego de estas dos medidas de masas se secó la muestra introduciéndola en el horno a temperatura entre 100 °C y 110 °C hasta obtener un peso constante, a partir de aquí se dejó enfriar la muestra al aire a temperatura ambiente y se determinó su masa nuevamente. Es importante destacar que todas las masas se determinaron con una aproximación entre 0.5% y 0.05% de la masa de la muestra.

Al igual que para el agregado grueso, se siguió un procedimiento separado en dos partes que nos permite la elaboración del ensayo para el agregado fino, este procedimiento es el siguiente:

Primera parte: Preparación de la muestra. Se sumergió la muestra en agua a temperatura ambiente durante un periodo de (24 ± 4) horas, a partir de aquí se extendió la muestra húmeda sobre una superficie plana no absorbente y se expuso a una corriente

de aire caliente mientras se revolvía con frecuencia. Con la finalidad de obtener el estado saturado y de superficie seca se utilizó el método del cono, donde se sostuvo firmemente el molde tronco-cónico sobre una superficie lisa no absorbente con el mayor diámetro hacia abajo, para luego llenarlo hasta el rebose con el agregado fino parcialmente seco y se enrasó la parte superior con una barra metálica, luego se dejó caer ligeramente el compactador 25 veces desde una altura aproximada de 5 mm sobre la superficie superior del cono, para seguidamente levantar el molde verticalmente sin girarlo como se observa en la *Figura 9*. Se repitió este procedimiento hasta que al retirar el molde el agregado se derrumbara ligeramente, es decir hasta lograr la muestra saturada y de superficie seca.



Figura 9. Procedimiento para obtener arena saturada con superficie seca. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Segunda parte: Medición de las masas. Luego de haber preparado la muestra de agregado fino a ensayar, se llenó el picnómetro parcialmente con agua y se introdujo la muestra de (500 ± 10) g de la arena lavada saturada y con superficie seca, y se añadió agua gradualmente en un 50%, luego se completó hasta 75% hasta finalmente llegar al 100%, procurando agitar la muestra del picnómetro y con un extractor se iban eliminando las impurezas, Seguidamente se determinó la masa total del picnómetro con la muestra y el agua, para luego sacar el agregado fino del picnómetro y secarlo en el horno hasta masa constante a una temperatura entre $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $110\text{ }^{\circ}\text{C}$, a partir de este momento se dejó enfriar la muestra al aire a temperatura ambiente y se determinó su masa nuevamente y por otra parte, se determinó la masa del picnómetro lleno de agua hasta su capacidad de calibración a una temperatura de $(23 \pm 2)\text{ }^{\circ}\text{C}$. (ver ANEXO C).

Ensayo de granulometría de los agregados.

Este ensayo se elaboró por separado para el agregado fino y el agregado grueso, en el caso del agregado fino solo se utilizó la arena lavada, ya que como se ha visto el vidrio es un material de alta dureza y puede dañar los cedazos utilizados en el laboratorio. El procedimiento seguido para cada agregado es el siguiente:

Granulometría del Agregado fino. Se tomó una muestra de agregado fino y se colocó en la balanza para saber su masa total, calculando primero la masa del recipiente seguido de la masa del recipiente junto a la muestra para poder realizar las operaciones necesarias, luego se procedió a colocar de forma descendente los tamices seleccionados (se verán en el “Capítulo IV”) en cuanto al tamaño de su apertura, es decir, desde la apertura más grande hasta la más pequeña, momento después se vertió la muestra en el primer tamiz y se instalaron los tamices en la cernidora mecánica (ver *Figura 10*) haciéndola funcionar por tres minutos, cuando se detuvo la cernidora se fue sacando cedazo por cedazo y determinando la masa de muestra retenida en cada uno de ellos.

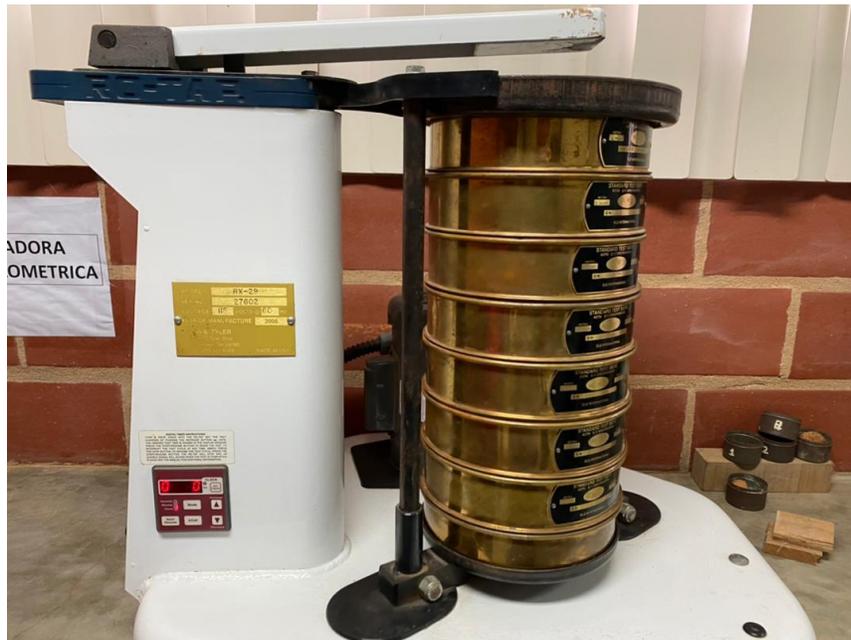


Figura 10. Cernidora mecánica con tamices. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Granulometría del Agregado grueso. El proceso es similar al anterior, se tomó una muestra de agregado grueso y se colocó en la balanza para saber su masa total de igual manera en cómo se hizo con el agregado fino, luego se tomaron los tamices de acuerdo a la norma y se colocaron de manera descendiente, seguidamente se colocó una primera parte de la muestra en los cedazo y se llevó a la cernidora mecánica por 3 minutos, luego de que finalizó el proceso en la cernidora se recolectó el material retenido en cada tamiz clasificándolo por tamaño, seguidamente se siguió el mismo proceso con las 2 partes restantes de la muestra, y al final con todas las muestras retenidas recolectadas de cada cedazo se procedió a determinar en la balanza la masa en conjunto de cada clasificación de tamaños.

Ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso.

Antes de empezar el ensayo, se pesó la muestra y luego se colocó en la máquina de abrasión “Los Ángeles”, junto a la carga abrasiva y se hizo rotar el cilindro de la máquina a una velocidad de 30 rpm durante 500 revoluciones, Seguidamente de que la maquina culminó su trabajo (aproximadamente 10 minutos después), se descargó el material en una bandeja y se separó en dos partes de la siguiente manera: se pasó la muestra por el tamiz #12, y el material pasante se pasó por el cedazo #4. La muestra que logró pasar el primer tamiz y quedó retenido en el segundo se le determinó su masa.

Ensayo de consistencia normal del cemento.

Este ensayo se divide en dos partes, la primera corresponde a la preparación de la muestra, mientras que la segunda es la prueba en sí, se explica el procedimiento llevado a cabo en ambas partes a continuación:

Primera parte: preparación de la muestra. Inicialmente se separa una masa de 650 g de cemento y se mide la cantidad de agua correspondiente al 23% de este cemento añadiéndola al recipiente a utilizar para la mezcla, luego se agrega el cemento al agua

y se deja que absorba por 30 segundos para empezar a mezclar ambos materiales (ver *Figura 11*). Con la pasta de cemento ya preparada y con las manos cubierta con guantes de goma se procede a formar rápidamente una bola y se arroja seis veces de una mano a otra manteniéndolas separadas alrededor de 15 cm, de manera de producir una masa aproximadamente esférica, esta se introduce por el extremo mayor del anillo tronco cónico llenándose completamente y quitando el exceso de pasta del extremo mayor del anillo, para posteriormente colocar el anillo con su extremo mayor sobre la placa de vidrio y se enrasa la pasta en exceso en el extremo menor del anillo.



Figura 11. Mezclado de la pasta de cemento para obtener la consistencia normal. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Determinación de la consistencia normal. La muestra ya preparada se coloca en el aparato Vicat para medir la penetración de la aguja Vicat en la pasta de cemento a los 30 segundos, se anota la medición. Se repite el procedimiento para pastas de pruebas con cantidades de agua variables, hasta que se obtenga la consistencia normal. Hay que tomar en cuenta que para cada prueba hay que hacer una mezcla nueva. Como se ha visto anteriormente la pasta será de consistencia normal, cuando la aguja penetra (10 ± 1) mm a los 30 segundos de haberse liberado.

Ensayo del tiempo de fraguado del cemento.

Se utilizó la muestra obtenida en la prueba anterior que corresponde a una pasta de cemento de consistencia normal, dividiendo este ensayo en dos partes. La primera fue determinar el tiempo de fraguado inicial, mientras que la segunda parte consistió en obtener el tiempo de fraguado final, en cada una se implementó un procedimiento similar que se describe a continuación:

Tiempo de fraguado inicial. Se coloca la aguja de Vicat sobre el extremo menor del anillo tronco – cónico, realizando las mediciones de penetración cada 15 minutos hasta obtener una penetración menor de 25 mm, se anotan todos los resultados de los ensayos de penetración y luego se determina el tiempo de fraguado inicial, realizando una interpolación.

Tiempo de fraguado final. Una vez obtenido los datos necesarios para calcular el tiempo de fraguado inicial, se colocó el molde con la aguja de Vicat sobre el extremo mayor del anillo tronco – cónico, y nuevamente se tomaron medidas de penetración cada 15 minutos hasta que no hubo penetración alguna.

Fase 3: mezcla de concreto

En esta fase se presenta el procedimiento implementado desde el momento que se tienen los diseños de mezclas hasta la realización de los ensayos a compresión, este proceso conlleva la elaboración de los cilindros, los ensayos de asentamiento y los ensayos de resistencia a compresión, como se explican a continuación:

Elaboración de los cilindros.

Luego de realizar todos los ensayos para obtener las propiedades de los componentes del concreto, se elaboró un diseño de mezcla patrón para seis cilindros y

a partir de este se hicieron dos diseños más para una sustitución de 10% y 15% del vidrio molido por el agregado fino. Todos estos diseños son presentados en el “Capítulo IV” de este documento.

Para el concreto patrón se elaboró una mezcla mientras que para los otros dos diseños se realizaron dos mezclas por cada porcentaje de sustitución, obteniendo cinco mezclas en total, cada una de ellas se realizó de la siguiente manera: primero se pesó la cantidad requerida de agregado grueso y fue vaciada en un lugar plano, luego se realizó lo mismo con el agregado fino depositándolo sobre el agregado grueso y se procedió a mezclar con una pala, seguidamente se llevó a cabo el mismo proceso con el vidrio (en los casos necesarios) y el cemento, depositando cada material encima de la mezcla de los anteriores, posteriormente se agregó el agua y se removió todo el conjunto hasta obtener un nuevo material homogéneo fresco, en este momento se realiza el ensayo de asentamiento el cual será detallado en el siguiente punto presentado. Ver ANEXO D para observar parte del procedimiento.

Una vez realizado el mezclado se procedió a vaciar en los moldes cilíndricos que previamente habían sido preparados, seguidamente se procede a vaciar la mezcla de concreto fresco en tres capas realizando el vibrado con ayuda de la barra compactadora, propinando 25 golpes por cada capa insertada en el cilindro, pero procurando que en la primera capa estos golpes no debían tocar el fondo, después de la elaboración, las probetas se retiraron de sus moldes luego de transcurrido las 24 horas.

Una vez obtenidas las probetas, para protegerlas de la pérdida de agua por evaporación se colocaron en una piscina dentro del laboratorio, iniciando el proceso de curado, hasta que estén listas para los ensayos a compresión. En la siguiente imagen se puede observar los procesos de llenado de los cilindros, desacoplado de los cilindros y curado, en este mismo orden visto de izquierda a derecha.



Figura 12. Proceso de llenado de los cilindros, desacoplado de los mismos y curado de las probetas. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Ensayos de asentamiento.

Luego de preparar la mezcla de concreto fresco, se procedió a humedecer el interior del cono de Abrams y colocarlo en una superficie plana de metal con el anillo menor hacia arriba, seguidamente se vació la muestra de concreto en el molde en 3 capas, cada capa fue compactada con 25 golpes de la barra compactadora, en la primera capa estos golpes no debían tocar el fondo de esta, mientras que en las otras dos capas no había ningún problema con esto.

Finalmente, se enrasó el material sobrante por encima del molde con ayuda de la misma barra, posteriormente de realizar el llenado del cono se alzó el mismo poco a poco implementando como ayuda un conteo del uno hasta el ocho, al finalizar el retiro se volteó el molde y se colocó al lado de la mezcla con la barra encima para proceder a medir el asentamiento, el cual es la distancia entre la barra compactadora y el lado superior de la mezcla.

El resultado obtenido de este procedimiento se observa en la siguiente figura:



Figura 13. Determinación del asentamiento. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Ensayos de resistencia a compresión de las probetas.

Una vez retiradas las probetas de la piscina de curado se procedió a realizar la determinación de su sección transversal y su altura, a cada uno de los cilindros a ensayar, seguidamente se colocó el cilindro en la máquina de ensayo, centrándose cuidadosamente y se procedió a activar la máquina, obteniendo la resistencia a compresión. En total fueron 30 cilindros distribuidos en 5 mezclas los cuales fueron ensayados a la edad de 7, 28 y 90 días.

Capítulo IV

Presentación y análisis de resultados

Ensayos de peso unitario de los agregados

Estas pruebas fueron desarrolladas a partir de la norma COVENIN 263-78, con la finalidad de obtener el peso unitario correspondiente a los agregados analizados con los cuales se realizaría la mezcla de concreto.

Las muestras estudiadas son las pertenecientes al agregado grueso y el agregado fino, para este último se realizaron los experimentos correspondientes a la arena y también se efectuaron los mismos ensayos descritos por la norma para el vidrio que se usó como sustitución parcial de agregado fino, puesto que, al ser un material no común para elaborar concreto, no cuenta con ensayos especiales.

Calibración de recipientes

Se seleccionaron dos moldes para poder realizar este ensayo, donde uno se utilizó netamente para las pruebas con el agregado fino y el otro para las correspondientes al agregado grueso, denominados “Recipiente N°1” y “Recipiente N°2” respectivamente. Sin embargo, la norma antes mencionada establece que los recipientes empleados deben ser primeramente calibrados antes de poder hacer algún uso de ellos, esta calibración se basa en la relación que existe entre el peso unitario del agua a la temperatura in situ (ver Tabla 13) y la cantidad de este líquido que puede contener cada molde utilizado.

Tabla 13.

Peso unitario del agua.

Temperatura °C	Kg/m ³
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 263-78*, (p. 3), por FONDONORMA, 1978, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

Se puede observar en la Tabla 14, el resultado obtenido de la calibración del recipiente empleado para estudiar el peso unitario del agregado fino, de igual forma se puede ver en la Tabla 15, el factor de calibración perteneciente al molde utilizado para ensayar el agregado grueso.

Tabla 14.

Resultado del factor de calibración para el Recipiente N°1.

	Peso		Temperatura (°C)	Factor de Calibración (1/m ³)
	(g)	(Kg)		
Recipiente N°1 (Rn1)	1620	1.62	27	348.43
Lamina de vidrio (Lv)	2180	2.18		
Peso total (Pt1) (Pt1 = Rn1 + agua + Lv)	6660	6.66		
Peso neto del agua (Pn1) (Pn = Pt1 - Rn1 - Lv)	2860	2.86		

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Tabla 15.

Resultado del factor de calibración para el Recipiente N°2.

	Peso		Temperatura (°C)	Factor de Calibración (1/m ³)
	(g)	(Kg)		
Recipiente N°2 (Rn2)	4860	4.86	27	105.56
Lamina de vidrio (Lv)	2180	2.18		
Peso total (Pt2) (Pt2 = Rn2 + agua + Lv)	16480	16.48		
Peso neto del agua (Pn2) (Pn2 = Pt2 - Rn2 - Lv)	9440	9.44		

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Las tablas anteriores muestran la misma temperatura de ensayo, esto debido a que ambas pruebas fueron elaboradas en el mismo ambiente con poca diferencia de tiempo. Se puede notar que, aunque los moldes son del mismo material y se encuentran en las mismas condiciones atmosféricas, el factor de calibración varía ya que este va a depender de la cantidad de agua que pueda encajar en cada recipiente.

Peso unitario suelto

Se aplicó el procedimiento para dos muestras similares de cada material en estudio, con el fin de constatar que los resultados no posean gran discrepancia entre ellos, ya que de lo contrario indicaría algún error en la toma de medidas o que el material utilizado tendría demasiadas inconsistencias con su masa. Sin embargo, como se puede visualizar en las siguientes tablas (Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18), las muestras cuyas medidas de masa poseen mayor diferencia son las correspondiente al agregado grueso, con una variación de 0,19 Kg entre ellas, lo que conlleva a un error del 0.92%, el cual se encuentra por debajo del 1% aceptable por la norma.

Tabla 16.

Peso unitario suelto del agregado fino (arena).

Muestra #	Masa suelta + Molde (Kg)	Masa suelta neta (Kg)	Promedio de masa suelta neta (Kg)
1	6.22	4.60	4.62
2	6.25	4.63	
Peso Unitario Suelto, Agregado Fino (Arena, Kg/m³)			1608.02

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Tabla 17.

Peso unitario suelto del agregado fino (vidrio).

Muestra #	Masa suelta + Molde (Kg)	Masa suelta neta (Kg)	Promedio de masa suelta neta (Kg)
1	5.90	4.28	4.32
2	5.98	4.36	
Peso Unitario Suelto, Agregado Fino (Vidrio, Kg/m³)			1505.24

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Se puede notar que el agregado usado para realizar sustituciones parciales de la arena, posee una variación en su peso unitario de 102,78 Kg/m³ con respecto a esta última, lo que corresponde a una aproximación del 6,39% entre ambos resultados. Por lo tanto, en lo que respecta al peso unitario suelto se puede decir que solo se cuenta con una diferencia mínima entre los dos agregados finos usados para realizar las pruebas expuestas en este proyecto de investigación y por ello puede ser viable utilizar el vidrio molido como material reciclable para elaborar mezclas de concreto. Por otro lado, el peso unitario suelto del agregado grueso cuenta con un resultado similar al esperado por este material en mezclas generales.

Tabla 18.

Peso unitario suelto del agregado grueso.

Muestra #	Masa suelta + Molde (Kg)	Masa suelta neta (Kg)	Promedio de masa suelta neta (Kg)
1	20.72	15.86	15.96
2	20.91	16.05	
Peso Unitario Suelto, Agregado Grueso (Kg/m³)			1684.27

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Peso unitario compacto

El procedimiento utilizado para realizar los ensayos de peso unitario compacto es similar al del apartado anterior, con la única diferencia de que antes de hacer las mediciones de masa de cada muestra el material debe ser compactado dentro del molde. Igualmente, que para el peso unitario suelto las muestras con más diferencia en su masa pertenecen al agregado grueso, con una variación de 1,00 Kg entre ellas, produciendo un error del 0.87%, el cual se encuentra por debajo del 1% mencionado anteriormente.

Tabla 19.

Peso unitario compacto del agregado fino (arena).

Muestra #	Masa compacta + Molde (Kg)	Masa compacta neta (Kg)	Promedio de masa compacta neta (Kg)
1	6.48	4.86	4.88
2	6.52	4.90	
Peso Unitario Compacto, Agregado Fino (Arena, Kg/m³)			1700.36

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Tabla 20.

Peso unitario compacto del agregado fino (vidrio).

Muestra #	Masa compacta + Molde (Kg)	Masa compacta neta (Kg)	Promedio de masa compacta neta (Kg)
1	6.13	4.51	4.54
2	6.18	4.56	
Peso Unitario Compacto, Agregado Fino (Vidrio, Kg/m³)			1580.15

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Tabla 21.

Peso unitario compacto del agregado grueso.

Muestra #	Masa compacta + Molde (Kg)	Masa compacta neta (Kg)	Promedio de masa compacta neta (Kg)
1	22.88	18.82	17.92
2	22.68	17.82	
Peso Unitario Compacto, Agregado Grueso (Kg/m³)			1891.70

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Al compactar los materiales aumenta la cantidad de masa que se puede introducir en el mismo recipiente, por lo tanto, el peso unitario compacto será mayor que el suelto, este hecho se puede evidenciar en las tablas anteriores (Tabla 19, Tabla 20 y Tabla 21), donde todos los pesos unitarios compactos obtenidos resultaron mayores a los pesos unitarios sueltos expuestos anteriormente, observándose que el material con el mayor aumento en su masa promedio entre muestras es el agregado grueso con 1,96 Kg, lo que representa a un aumento del 12,32% de su peso unitario. Por otro lado, la diferencia entre el vidrio y la arena se hizo más pronunciada con una

variación de 120,21 Kg/m³. Se considera este ensayo para el vidrio, ya que no se tiene una referencia con respecto al agregado fino, debido a que la norma no está especificada para este tipo de material.

Ensayos de densidad y absorción de los agregados

Se determinó la densidad aparente, la densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca, la densidad nominal y la absorción de cada uno de los agregados utilizados para la mezcla. En este caso se trató el vidrio molido al igual que con el peso unitario, es decir, para este material se realizaron las pruebas que corresponden al agregado fino, ya que como se mencionó anteriormente este es un material no común para elaborar concreto, por lo tanto, no cuenta con su propio procedimiento de ensayo. Para el estudio de las densidades se realizó una comparación con la Tabla 22. La cual indica los valores usuales de densidades para agregados no livianos.

Tabla 22.

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, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

Densidad y absorción de la arena

Para determinar la absorción y las diferentes densidades de la arena se utilizó como referencia la norma COVENIN 268:1998, la cual detalla dos procedimientos de uso para este ensayo, de los cuales se tomó únicamente el que emplea el picnómetro,

el cual indica que luego de preparar el material al que se realizarían las pruebas, se debía seleccionar una muestra con una masa que se encontrara alrededor de los 500 g, donde se obtuvo como resultado exacto 500,04 g al pesarla en una balanza con precisión de 0,01 g, en este mismo instrumento se tomaron todas las medidas de masa requeridas. Además, para el cálculo del porcentaje de absorción fue necesario emplear un horno que logra mantener temperaturas entre 100 °C a 110 °C, donde se secó la muestra, la cual al colocarla nuevamente en la balanza se consiguió una nueva medida de 494.10 g, lo que significa que la muestra redujo su masa en 5.94 g, es decir, esta era la cantidad de agua que se había introducido en los poros de la arena. Todas las mediciones mencionadas se pueden observar en la siguiente tabla (Tabla 23) como “DATOS TOMADOS IN SITU”.

Tabla 23.

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

DATOS TOMADOS IN SITU	Masa del agregado fino SSS (g)	500.04
	Masa del picnómetro (g)	158.33
	Masa del picnómetro + agua hasta aforo (g)	653.83
	Masa del picnómetro + muestra después del vacío total (g)	957.03
	Masa del agregado fino seco (g)	494.10
CÁLCULOS	Densidad aparente (g/ml)	2.510
	Densidad aparente SSS (g/ml)	2.540
	Densidad nominal (g/ml)	2.588
	Absorción (%)	1.20

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Si se toma como referencia la densidad aparente, se puede observar que la densidad aparente SSS se diferencia por 0.030 g/ml y la densidad nominal 0.078 g/ml, lo que representa unas variaciones de 1.20% y 3.11% respectivamente. La primera

puede ser considerada como mínima, pero en caso de la segunda pasa a ser significativa, por lo que no se hizo uso de esta para diseñar la mezcla. Además, se puede notar que las densidades obtenidas entran en el rango presentado en la Tabla 22, en consecuencia, la arena utilizada es un agregado no liviano. De los tres materiales utilizados como agregados, el agregado fino presentó la mayor absorción, por lo tanto, la cantidad de agua de la mezcla está influenciada por este material.

Densidad y absorción del vidrio

Para el vidrio molido se observa que ahora la muestra tomada en un principio poseía una masa de 500,07 g y posteriormente al pasarla por el horno esta se redujo en 1.05 g alcanzando una medida de 499,02 g, por lo que se obtuvo una baja absorción de 0.21%, indicando que el vidrio es un material de muy baja higroscopicidad y esto no afecta la dosificación del agua, por lo tanto, puede haber cambios en el comportamiento del mezclado en cuanto a la lubricación del conjunto y su trabajabilidad.

Tabla 24.

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

DATOS TOMADOS IN SITU	Masa del agregado fino SSS (g)	500.07
	Masa del picnómetro (g)	158.33
	Masa del picnómetro + agua hasta aforo (g)	653.83
	Masa del picnómetro + muestra después del vacío total (g)	940.57
	Masa del agregado fino seco (g)	499.02
CÁLCULOS	Densidad aparente (g/ml)	2.339
	Densidad aparente SSS (g/ml)	2.344
	Densidad nominal (g/ml)	2.351
	Absorción (%)	0.21

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Como no se tienen datos de anteriores análisis de densidad para el vidrio exacto utilizado en este proyecto, no se pueden comparar con otros resultados, sin embargo, se pueden apreciar las diferencias que posee este nuevo material reciclado con las obtenidas para la arena, donde se observa que la densidad aparente se reduce en 0.171 g/ml lo que representa una disminución del 6.81%, además las densidades aparente SSS y nominal, bajan su valor en 0.196 g/ml y 0.237 g/ml respectivamente, obteniendo disminuciones para cada una de 7.72% y 9.16%.

De todo esto se sintetiza que una masa de vidrio igual a la arena ocupará más volumen que esta última, esto debido en parte al bajo porcentaje de absorción que posee este nuevo agregado en estudio.

Densidad y absorción del agregado grueso

Para seleccionar la muestra a ensayar se aplicó el método de cuarteo descrito en la norma COVENIN 270:1998, además, se rechazó todo el material que pasara el cedazo #4.

Luego el procedimiento para determinar la densidad aparente, la densidad aparente con muestra saturada y de superficie seca (densidad aparente SSS), la densidad nominal y la absorción del agregado grueso, se basó en la norma COVENIN 269:1998, la cual señala que se debía hacer uso de una balanza con capacidad mayor a 5 Kg, un recipiente, un tanque de agua, el cedazo #4 y un horno de secado, con la finalidad de obtener seis mediciones en campo.

Para calcular las distintas densidades y el porcentaje de absorción se eliminaron los resultados pertenecientes a los instrumentos utilizados obteniendo tres masas diferentes que corresponden netamente al agregado. Si de estos resultados se toma como referencia la masa saturada con superficie seca en el aire por ser la primera medición, se observa que al saturarse y medir su masa dentro del agua su valor

desciende en 978 g representando un 36.59% del obtenido antes de sumergirla, esto se debe a que gran parte de las partículas contenidas en la muestra poseen una densidad menor a la del agua, por lo tanto, tienden a elevarse dentro de esta disminuyendo su peso gravitacional. Por otro lado, al secar completamente la muestra y obtener su masa en el aire se puede notar que su valor bajo en 13 g respecto al inicial los cuales serían la cantidad de agua que contenía la muestra, que representa una disminución del 0.49% indicado como el porcentaje de absorción del agregado, el cual se puede considerar como un valor aceptable para el agregado grueso.

Los datos obtenidos en campo y los resultados finales pueden ser visualizados en la siguiente tabla.

Tabla 25.

Resultados de la densidad y absorción del agregado grueso.

DATOS TOMADOS IN SITU	Masa de la cesta en el aire (g)	962
	Masa del agregado grueso + cesta en el aire (g)	3635
	Masa del agregado grueso sumergido + cesta (g)	2544
	Masa de la cesta en el agua (g)	849
	Masa del agregado grueso seco + bandeja (g)	3130
	Masa de la bandeja (g)	470
CÁLCULOS	Masa seca en el aire (g)	2660
	Masa SSS en el aire (g)	2673
	Masa saturada (g)	1695
	Densidad aparente (g/ml)	2.720
	Densidad aparente SSS (g/ml)	2.733
	Densidad nominal (g/ml)	2.756
	Absorción (%)	0.49

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Si se hace un análisis similar al realizado con el agregado fino y se toma la densidad aparente como referencia, se puede notar que la densidad aparente saturada con superficie seca aumenta su valor en 0.013 g/ml lo que representa una variación del 0.48% considerada como pequeña. Por otro lado, la densidad nominal varía en 0.036 g/ml, cuyo aumento en porcentaje es del 1.32%, el cual puede ser considerado mínimo al igual que el primero. También, se observa que las densidades obtenidas se encuentran un poco por encima del rango presentado en la Tabla 22, por ello, la piedra utilizada puede ser considerada como un agregado no liviano.

Ensayos de granulometría de los agregados

Las pruebas correspondientes a la determinación de la distribución del tamaño de los granos que componen el agregado fueron desarrolladas usando como referencia la Norma Venezolana COVENIN 255:1998. Así como detalla la norma antes mencionada se utilizó como instrumento unos cedazos que cumplen la Norma Venezolana COVENIN 254:1998, luego para realizar la distribución de los granos se contó con una cernidora mecánica, y por último se usó una balanza para obtener las masas luego del cernido de los agregados que cuenta con una aproximación de 0.01 g.

Como se puede deducir el ensayo se realizó para ambos agregados, es decir, para el agregado grueso y para el agregado fino, sin embargo, para este último solo se usó como muestra la arena, ya que el vidrio en la escala de dureza de Mohs se encuentra entre la posición cinco que corresponde al apatito y la seis perteneciente a la ortoclasa (ver *Figura 5*), por lo tanto, puede dañar los cedazos utilizados que se encuentran en el laboratorio.

Además de obtener la composición granulométrica con este ensayo, se calculó el módulo de finura y el tamaño máximo del agregado, con la finalidad de realizar el diseño de mezcla tomando en cuenta estos valores, ya que pueden hacer la diferencia en el resultado final.

Granulometría del agregado fino (arena)

Para determinar la composición granulométrica del agregado fino se dispuso de los cedazos de la serie normalizada COVENIN: #4 (4.76 mm), #8 (2.38 mm), #16 (1.19 mm), #30 (595 μm), #50 (297 μm), #100 (149 μm) y #200 (75 μm). Los cuales con ayuda de la cernidora mecánica distribuyeron a través de ellos una muestra de 568.70 g, obteniendo las masas retenidas en cada cedazo. A partir de aquí fue calculado para cada uno de los tamices la masa retenida acumulada, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje pasante, este último fue comparado con ciertos límites que se abordarán más adelante, además, se realizó el cálculo del módulo de finura, obteniendo los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 26.

Resultados de la granulometría del agregado fino (arena).

Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Límites	
						Min	Max
Nº 4	4.760	7.65	7.65	1.35	98.65	85	100
Nº 8	2.380	38.60	46.25	8.13	91.87	60	95
Nº 16	1.190	172.83	219.08	38.52	61.48	40	80
Nº 30	0.595	248.53	467.61	82.22	17.78	20	60
Nº 50	0.297	65.35	532.96	93.72	6.28	8	30
Nº 100	0.149	22.48	555.44	97.67	2.33	2	10
Nº 200	0.075	11.85	567.29	99.75	0.25	0	5
Fondo		1.41	568.70	100.00	0.00		
Módulo de Finura				3.22			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Se observa que el tamiz #30 con una abertura de 0.595 mm posee la mayor cantidad de masa retenida con 248.53 g, la cual representa el 43.70% de la muestra inicial, casi la mitad de esta. Por otro lado, la menor cantidad de masa retenida por un cedazo se encuentra en el #4 con una abertura de 4.76 mm, el cual retiene 7.65 g que equivale al 1.35% de la muestra en estudio, es decir las celdas más grandes utilizadas en el ensayo dejan pasar el 98.65% del material, además, se observa una cantidad que pasa el tamiz con menor tamaño y es retenida en el fondo de 1.41 g, lo que equivale al 0.25% de la muestra tomada al principio, notándose que este es exactamente el porcentaje pasante del cedazo #200, dando un porcentaje retenido acumulado del 100%, lo que indica que no se obtuvieron pérdidas de material. Al tener una cantidad tan baja que pasa el tamiz #200 se puede decir que esta arena posee una baja cantidad de ultrafinos, esto es la cantidad de arcillas y limos presentes en la arena.

Los valores adecuados del módulo de finura de una arena para producir concreto, se encuentran entre el rango de 2.3 y 3.1, donde valores menores a 2.0 indica una arena fina, 2.5 una arena media y mayores a 3.0 una arena gruesa. (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, p. 71). En los resultados obtenidos se puede visualizar que el módulo de finura posee un valor de 3.22 y por lo tanto se trata de una arena gruesa, este hecho refleja que al ser más gruesa se puede tratar de una arena pesada, lo cual se puede confirmar con lo explicado anteriormente en el apartado “Densidad y absorción del agregado fino (arena)”, donde se señala que esta arena no es liviana o dicho de otra forma, esta arena es pesada.

A través de diversos ensayos que se han realizado a diferentes agregados, se establecieron ciertos límites referentes a la granulometría del agregado fino, exponiendo un porcentaje pasante mínimo y uno máximo en los distintos cedazos de la serie COVENIN, esto con la finalidad de presentar un rango adecuado en la gradación de los agregados usados para elaborar concreto y así obtener una mezcla con excelentes propiedades. Se puede visualizar estos límites en la tabla siguiente:

Tabla 27.

Límites en la granulometría del agregado fino.

Cedazos COVENIN	Porcentaje que pasa		
9.51 mm; (3/8")	100		
4.76 mm; (#4)	85	-	100
2.38 mm; (#8)	60	-	95
1.19 mm; (#16)	40	-	80
595 μm ; (#30)	20	-	60
297 μm ; (#50)	8	-	30
149 μm ; (#100)	2	-	10
75 μm ; (#200)	0	-	5

Nota: Adaptado de *Norma Venezolana COVENIN 277:2000*, (p. 2), por FONDONORMA, 2000, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

En la Tabla 26, se observa que los límites utilizados van desde el cedazo #200 hasta el #4, en este caso no se presentó el tamiz 3/8'' debido a que por aquí pasó el 100% de la muestra, lo que no lo hace relevante al momento del análisis y solo entorpece el gráfico elaborado. Luego con esta tabla se realizó un gráfico (*Figura 14*) donde se ve la curva de la composición granulométrica del ensayo elaborado, además de mostrar una curva para cada límite usado (mínimo y máximo).

Se puede notar que la curva obtenida se encuentra casi en su totalidad dentro del rango adecuado propuesto por la norma en la separación de la arena por tamaños, obteniendo su punto más alto en el cedazo #4 con un pasante de 98.65% y rozando el límite superior hasta el tamiz #8 que deja pasar 81.87%, a partir de aquí la curva cae hasta salirse del límite inferior cuando aún falta por gradar aproximadamente el 21% de la muestra, pero manteniéndose cerca del rango hasta volver a ingresar en la abertura de 0.149 mm.

A partir de aquí se extrae que la arena se encontraba bien gradada por lo tanto estaba en buenas condiciones para elaborar una mezcla de hormigón.

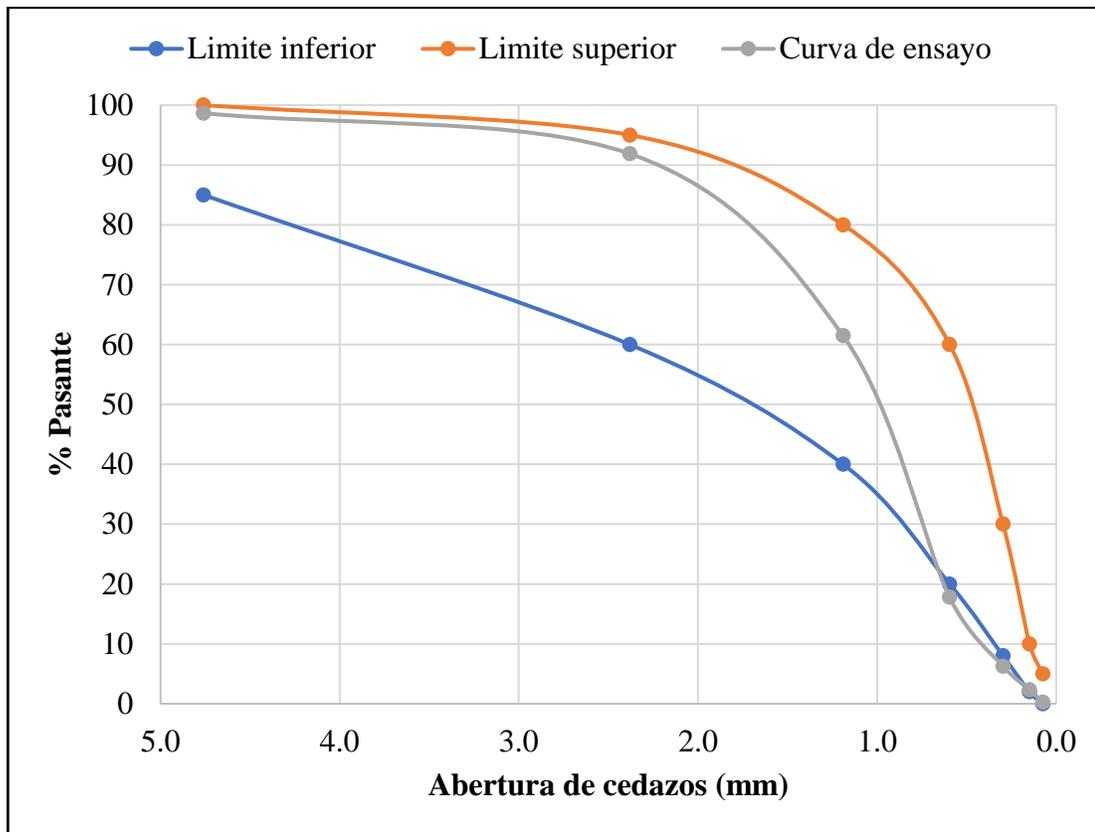


Figura 14. Curva granulométrica del agregado fino (arena). Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Granulometría del agregado grueso

La distribución por tamaños de los granos del agregado grueso se determinó a partir de los cedazos de la serie normalizada COVENIN: 1'' (25.40 mm), 3/4'' (19.00 mm), 1/2'' (12.70 mm), 3/8'' (9.51 mm) y #4 (4.76 mm). Al igual que para el agregado fino se dispuso de una cernidora mecánica para elaborar el tamizado, en este caso de una muestra de 4730 g, de los cuales quedó cierta cantidad retenida en cada uno de los cedazos. Obteniendo similarmente a como se calculó con la arena la masa retenida acumulada, el porcentaje retenido acumulado y el porcentaje pasante, este último fue comparado con nuevos límites que se tienen para el agregado grueso los cuales se abordarán más adelante, además, se determinó el tamaño máximo del agregado, obteniendo los resultados mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 28.

Resultados de la granulometría del agregado grueso.

Tamiz	Abertura (mm)	Masa retenida (g)	Masa retenida acumulada (g)	Retenido acumulado (%)	Pasante (%)	Límites	
						Min	Max
1"	25.40	0	0	0	100	90	100
3/4"	19.00	1512.42	1512.42	31.98	68.02	50	90
1/2"	12.70	1287.65	2800.07	59.20	40.80	15	45
3/8"	9.51	524.19	3324.26	70.28	29.72	0	20
Nº 4	4.76	577.7	3901.96	82.49	17.51	0	7
Fondo		828.04	4730	100.00	0.00		

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Realizando un análisis similar al elaborado en el apartado anterior se observa que la mayor cantidad de masa retenida es de 1512.42 g que representa el 31.98% de la muestra tomada inicialmente y quedó ubicada en el tamiz de 3/4'', esta cantidad en porcentaje es 11.72% menor que la mayor retenida en el ensayo de la arena. Por otro lado, el cedazo de 3/8'' que equivale 9.51 mm retiene la menor cantidad de masa de la grava, quedando atrapado 524.19 g que representa el 11.08% de la muestra en estudio, en porcentaje 9.73% mayor que la menor cantidad retenida en la prueba granulométrica del agregado fino. Las celdas más grandes utilizadas en el ensayo dejan pasar el 100% del material, también, se visualiza una cantidad que pasa el tamiz con menor tamaño y es retenida en el fondo de 828.04 g, lo que equivale al 17.51% de la muestra tomada al principio, notándose que es exactamente el porcentaje pasante del cedazo #4, dando un porcentaje retenido acumulado del 100%, lo que indica que no se obtuvieron pérdidas de material. Al tener una cantidad tan alta que pasa el tamiz #4 se puede decir que la grava empleada en este proyecto de investigación posee un porcentaje significativo de arena alojado en sus poros.

El tamaño máximo de un agregado se determina a partir del tamaño de sus partículas más gruesas, medido como abertura del cedazo de mayor tamaño que deje pasar el 95% o más del material. (Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, p. 68). En este caso el tamaño máximo del agregado es de 1'' (25.40 mm), ya que por este cedazo pasa el 100% de la muestra, observándose que es el único tamiz por donde pasa tal cantidad de agregado, siendo el siguiente el que corresponde a 3/4'' que deja pasar el 68.02% del material.

Así como se presentó en el apartado anterior, se tiene que a través de diversos ensayos que se han realizado a distintos agregados, la norma estableció unos límites referentes a la cantidad de porcentaje pasante de cada cedazo de la serie COVENIN para el agregado grueso, con la finalidad de tener un rango adecuado en la gradación de los agregados gruesos usados para elaborar concreto y así obtener una mezcla con mejores propiedades a la que se obtendría sin tener las bases comparativas. Se puede ver estos límites en la tabla siguiente:

Tabla 29.

Límites de los porcentajes en peso que pasan los dos cedazos de aberturas cuadradas.

Piedra picada o grava COVENIN	75 mm	64.0 mm	50.8 mm	38.1 mm	25.4 mm	19.0 mm	12.7 mm	9.51 mm	6.35 mm	4.76 mm	2.38 mm	1.19 mm	595 μ m	297 μ m
Nº 0						100	100	85	60	40	20	10	5	
							a	a	a	a	a	a	a	
							80	50	25	15	5	0	0	
Nº 1				100	100	90	45	20	7					
					a	a	a	a	a					
					90	50	15	0	0					
Nº 2			100	90	70	30	10	5						
			a	a	a	a	a	a						
			95	75	35	5	0	0						
Nº 3	100	100	95	60	10	5								
		a	a	a	a	a								
		90	65	20	0	0								

Nota: Adaptado de *Norma Venezolana COVENIN 277:2000*, (p. 6), por FONDONORMA, 2000, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

De acuerdo a la Tabla 29 los límites usados para este ensayo granulométrico corresponden a una piedra picada o grava COVENIN N° 1, ya que este rango es el que mejor se ajusta a los porcentajes pasantes expuestos en la Tabla 28. Con esta última tabla se realizó un gráfico (*Figura 15*) donde se ve la curva de la composición granulométrica de la prueba elaborada, mostrando también una curva para el rango máximo y otra para el mínimo.

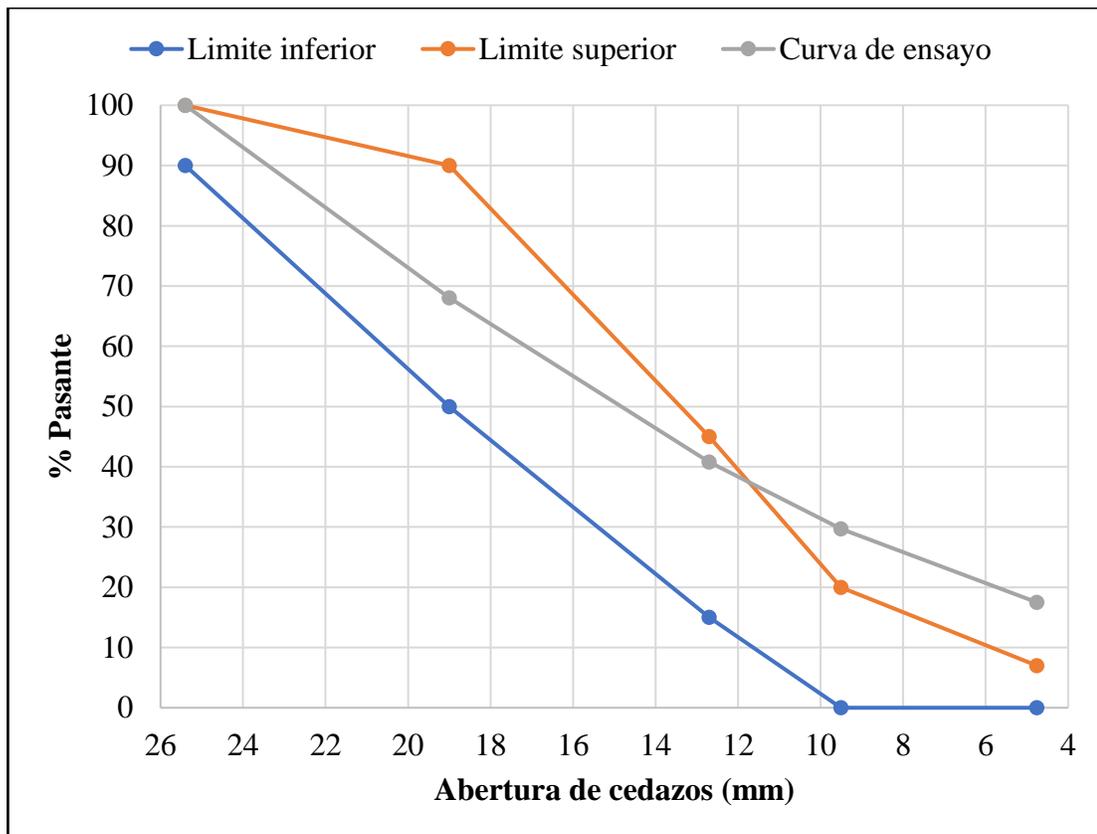


Figura 15. Curva granulométrica del agregado grueso. Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En la figura anterior se puede notar que la curva granulométrica presentada, se encuentra contenida en los límites desde el cedazo de mayor denominación (1") hasta aproximadamente una abertura de 11.8 mm que deja pasar 38% del material, a partir de aquí la curva pasa por encima del límite superior con una diferencia ascendente hasta el tamiz de 3/8" (9.51 mm), momento en el cual esta diferencia es de aproximadamente

un 10% y se mantiene más o menos constante hasta el cedazo de menor denominación, observándose este evento como un paralelismo aproximado entre las curvas del ensayo y el rango máximo adecuado. Un poco más del 60% del agregado grueso se encuentra bien gradada, sin embargo, el otro casi 40% está por encima del rango adecuado para el elaborar una mezcla de hormigón.

Tomando como referencia estos resultados, se puede notar que ninguna de las dos curvas cumple con las especificaciones. En el caso del agregado fino, la variación con respecto a los límites es casi insignificante, por lo tanto, esto no conlleva a grandes fluctuaciones en la mezcla, incluso como se ha mencionado anteriormente este material puede ser considerado como bien gradado. Sin embargo, el agregado grueso presenta variaciones más significativas, indicando que requiere de una parte de la pasta que se encarga de unir para cohesionar, lo que se traduce en que la piedra utilizada reduciría un poco la calidad del producto final, pudiendo seguir con el proyecto ya que esta diferencia se encuentra en los menores tamaños de granos del agregado grueso.

Ensayo de resistencia al desgaste del agregado grueso

La obtención del porcentaje de desgaste de un agregado puede ser muy útil al momento de definir el uso que se le dará a dicho agregado, sobre todo cuando este se utiliza para hacer los diseños de mezcla del concreto.

Para realizar el experimento correspondiente a la resistencia al desgaste (abrasión) se tomó como guía la Norma Venezolana COVENIN 266-77, que emplea como instrumento principal la máquina de abrasión “Los Ángeles”, que se encargará de desgastar el agregado con una carga abrasiva de 12 esferas cuya masa se encuentra entre 390 g a 445 g, también fue indispensable el uso de los cedazos que cumplen con la Norma Venezolana COVENIN 254:1998 y una balanza que cuenta con una apreciación de 1 g.

No se realiza pruebas para la resistencia al desgaste de los finos, por lo tanto, el ensayo es netamente para el agregado grueso pasante del cedazo 1 ½’’ (38.1 mm), cumpliéndose con este requisito puesto que como se ha visto, el tamaño máximo de la grava utilizada en este proyecto es de 1’’. La muestra utilizada para realizar el ensayo, se encontraba completamente seca, y se seleccionó una cantidad cuya masa total es de 5000 g inicialmente, escogidos de forma equitativa entre los pasantes y retenidos de los tamices del 3/8’’ hasta el 1 ½’’, de acuerdo a la gradación tipo “A”, presentada en la siguiente tabla:

Tabla 30.

Gradaciones de muestras de ensayo.

TAMAÑO DEL CEDAZO Aberturas Cuadradas		PESO DE LOS TAMAÑOS INDICADOS (g)			
Pasa	Retenido en	A	B	C	D
38.1 mm (1 1/2")	25.4 mm (1")	1250 ± 25			
25.4 mm (1")	19.0 mm (3/4")	1250 ± 25			
19.0 mm (3/4")	12.7 mm (1/2")	1250 ± 10	2500 ± 10		
12.7 mm (1/2")	9.51 mm (3/8")	1250 ± 10	2500 ± 10		
9.51 mm (3/8")	6.35 mm (1/4")			2500 ± 10	
6.35 mm (1/4")	4.76 mm (# 4)			2500 ± 10	
4.76 mm (# 4)	2.38 mm (# 8)				5000 ± 10
TOTAL		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Nota: Adaptado de *Norma Venezolana COVENIN 266-77*, (p. 3), por FONDONORMA, 1977, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

Luego de obtenida la muestra, se realizó el ensayo con la máquina de abrasión “Los Ángeles” haciéndola girar a 30 rpm durante 500 revoluciones, y se pesó el material resultante con un tamaño en sus granos mayor al cedazo N° 12 (1.68 mm), obteniéndose que la masa final del ensayo se redujo a 3412 g, lo que equivale a 1588 g menos que la masa inicial, representándose como un 31.76% de la muestra tomada

primeramente, siendo este el porcentaje de desgaste calculado. Estos números se pueden observar en la tabla presentada seguidamente.

Tabla 31.

Resultados del porcentaje de desgaste del agregado grueso.

Masa inicial de la muestra (g)	5000
Masa final de la muestra (g)	3412
Desgaste (%)	31.76

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

El resultado de desgaste obtenido, indica que este agregado posee una alta resistencia a la abrasión, por lo tanto, es apto para realizar una mezcla de hormigón, ya que garantiza resultados muchos mayores al promedio en cuanto a la dureza. Este porcentaje de desgaste resulta provechoso en la fabricación de pisos, losas y estructuras de concreto.

Ensayo de la consistencia normal del cemento Portland

Con la finalidad de determinar la cantidad de agua necesaria para obtener pastas de cemento Portland de consistencia normal se empleó como guía la Norma Venezolana COVENIN 494:1994, la cual expone un método de ensayo utilizando como instrumentos una balanza para la cantidad de cemento, cilindros graduados para medir los valores de agua, un aparato de Vicat para penetrar la mezcla y un cronómetro para tomar el tiempo, puesto que la pasta se considera de consistencia normal cuando la aguja de Vicat penetra (10 ± 1) mm a los 30 segundos de haber sido liberada.

Esta prueba está completamente enfocada al cemento Portland, por lo tanto, no requiere de ningún agregado, el único instrumento que se usó de una mezcla de

concreto aparte del cemento fue el agua, para poder realizar las pastas. La muestra de cemento utilizada contaba con una masa de 650 g como se puede observar en la *Figura 16*, y a partir de aquí fue necesario realizar diferentes ensayos variando la relación agua cemento, es decir, agregando cierto porcentaje de agua con respecto a la muestra de cemento hasta obtener la consistencia normal de la pasta. Esta prueba se realizó de manera manual, sin el uso de equipos como una mezcladora por lo que el resultado obtenido puede tener una diferencia mínima de la realidad.



Figura 16. Cantidad de cemento para ensayo de consistencia normal. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

El resultado final de la consistencia normal del cemento utilizado en esta práctica se encuentra entre una relación de agua del 22.5% y cemento del 77.5% es decir, que la muestra de 650 gr de cemento alcanzará una plasticidad ideal y una fluidez óptima cuando se mezcle con una cantidad de agua de 146.25 ml.

En la siguiente figura se observa el momento exacto cuando la aguja de Vicat descende 10 mm al haber transcurrido los 30 segundos, dando por concluida la prueba.



Figura 17. Descenso de la aguja de Vicat a los 30 segundos de ensayo. Tomada por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Ensayo del tiempo de fraguado del cemento Portland

El experimento correspondiente al tiempo de fraguado del cemento Portland se desarrolló tomando como guía la Norma Venezolana COVENIN 493-92, la cual expone un método de ensayo utilizando como instrumentos los mismos requeridos en el apartado anterior, siendo estos: una balanza para la cantidad de cemento, cilindros graduados para medir la cantidad de agua, un aparato de Vicat para penetrar la mezcla y un cronómetro para tomar el tiempo.

El tiempo de fraguado es el momento exacto cuando la aguja de Vicat penetra 25 mm en una pasta de cemento de consistencia normal. Esto indica que se debía elaborar primero el ensayo correspondiente a la consistencia normal para poder obtener la pasta a usar en esta prueba. Esta prueba se realizó de manera manual, sin el uso de equipos como una mezcladora.

La muestra empleada fue la de una pasta de consistencia normal obtenida en el apartado anterior, compuesta por 650 g de cemento y 146.25 ml de agua. A partir de aquí se colocaba la aguja en un punto en la superficie de la pasta y se dejaba descender, repitiendo esto cada 15 minutos, hasta obtener un valor por debajo de 25 mm. Los resultados obtenidos in situ se pueden observar en la tabla siguiente:

Tabla 32.

Penetración de la aguja de Vicat en función del tiempo.

Tiempo (min)	Penetración (mm)	
	Fraguado inicial	Fraguado final
0.0	40.5	4.0
15.0	40.0	3.0
30.0	39.5	1.0
45.0	37.0	0.0
60.0	29.0	-
75.0	12.0	-

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Se puede notar que la penetración de la aguja de Vicat a través del tiempo no mantiene un valor constante, ya que al principio se obtienen valores altos de penetración que luego van descendiendo sin ninguna distancia fija entre ellos, obteniéndose como mayor diferencia entre dos datos 17 mm que corresponde a la penetración entre los últimos 15 minutos y medio del ensayo. El tiempo de fraguado final se obtuvo a los 45 minutos, mientras que el valor del tiempo para una penetración de 25 mm se determinó por medio de una gráfica que permite interpolar los datos obtenidos, la cual es la siguiente:

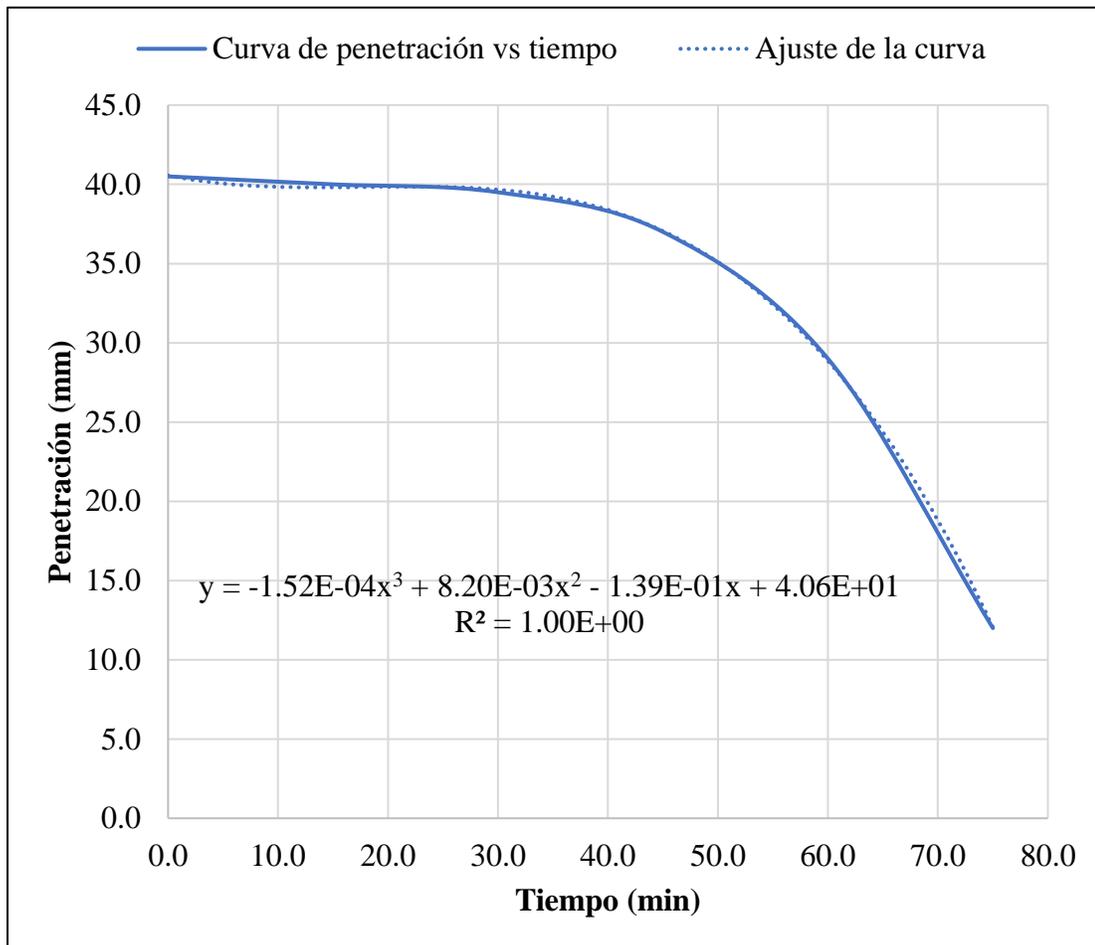


Figura 18. Curva de ajuste para la obtención del tiempo de fraguado inicial. Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Despejando “x” y haciendo “y” igual a 25 en la ecuación de ajuste presentada en el gráfico, se obtiene como resultado 64.46, este valor corresponde al tiempo de fraguado inicial en minutos del cemento Portland estudiado, es decir, a los 64 minutos con 27 segundos y 600 milisegundos, la aguja de Vicat penetra 25 mm de la pasta de consistencia normal elaborada con el cemento utilizado en este trabajo de investigación. Cabe destacar que, aunque se tenga el tiempo en que la pasta de cemento inicia su endurecimiento, no necesariamente el concreto elaborado en los distintos diseños de mezclas tendrá el mismo tiempo de fraguado, ya que en estos casos influyen otros factores.

Diseños de mezclas elaborados

Primeramente, se elaboró un diseño de mezcla para un concreto patrón, es decir, un diseño realizado de acuerdo a los conocimientos generales que se tienen para crear hormigón, el cálculo se llevó a cabo para que la mezcla final contará con un asentamiento de 7'' (177.80 mm) y una resistencia a compresión de 210 Kg/cm², y también se usó todos los resultados obtenidos de las propiedades de los agregados y el cemento, ya que de estos depende las características finales de la mezcla. A partir de aquí, se cambió por vidrio molido el 10% y el 15% de la cantidad utilizada de arena, obteniendo así dos nuevos diseños de mezcla.

Aunque se elaboraron tres diseños, en total se realizaron 5 mezclas de hormigón, una para el concreto patrón y dos para cada porcentaje de adición de vidrio, cada una debía llenar seis cilindros, de los cuales dos se ensayaron a siete días, dos más a 28 días y los últimos dos a 90 días, esto con la finalidad de tener dos resultados por ensayo para poder verificarlos. Las mezclas se identificaron como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 33.

Identificación de las mezclas.

Identificación	Mezcla
G1	Concreto Patrón
G2	1 ^{era} Sustitución de 10%
G3	1 ^{era} Sustitución de 15%
G4	2 ^{da} Sustitución de 10%
G5	2 ^{da} Sustitución de 15%

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Los resultados presentados en la siguiente tabla corresponden a las cantidades necesarias para que la mezcla de concreto logre llenar seis cilindros de 30 cm de alto y 15 cm de diámetro, para un volumen total de 5301.44 cm³ por cada cilindro.

Tabla 34.

Diseños de mezclas.

Materiales	1 m³	Patrón	10%	15%
Cemento (Kg)	362.92	11.54	11.54	11.54
Agua (Lt)	202.36	6.44	6.44	6.44
Piedra (Kg)	1095.41	34.84	34.84	34.84
Arena (Kg)	679.97	21.63	19.47	18.38
Vidrio (Kg)	-	-	2.16	3.24

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Se puede apreciar que el cemento, agua y piedra no varían para ninguna de los tres diseños, el único que cambia su valor es la arena con respecto al porcentaje de vidrio suministrado. El material que ocupa más cantidad en cuanto a masa es la grava con 34.84 g para cada mezcla y en total se obtiene una suma por diseño de 74.45 g que corresponde a la masa total de concreto obtenido. En este cálculo se consideró el porcentaje de absorción, mientras que la humedad se asume constante.

Ensayos de asentamiento

El asentamiento de la mezcla se tomó con el cono de Abrams en campo 30 s después de haberla elaborado, midiendo la distancia entre el cono y el descenso de la mezcla, obteniendo así el asentamiento. Todo esto se realizó de acuerdo a la Norma Venezolana COVENIN 339:2003, la cual también indica que el ensayo no debía durar más de 1 min y 30 s desde el momento en que se introduce la mezcla en el cono.

Se utilizaron como muestra las cinco mezclas de hormigón que se elaboraron para el estudio de este proyecto, obteniendo un asentamiento diferente para cada una. Las medidas fueron tomadas en pulgadas como se puede observar en la tabla siguiente:

Tabla 35.

Asentamientos obtenidos por cada mezcla.

Mezcla de concreto		Asentamiento (Pulg.)	
		In situ	Promedio
Patrón	G1	6.00	6.00
Sustitución de 10%	G2	6.50	6.65
	G4	6.80	
Sustitución de 15%	G3	7.00	7.25
	G5	7.50	

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Aunque el diseño inicial presentado anteriormente era para un concreto de 7'' de asentamiento, se puede notar que el asentamiento base obtenido corresponde a 6'', esto se puede deber a que la mezcla no fue realizada con una máquina de mezclado, por lo tanto, al utilizar una pala como instrumento para juntar los materiales se puede obtener un pérdida de agua, haciendo la mezcla menos líquida y como consecuencia de esto se reduce su trabajabilidad, sin embargo, como todos los diseños están basados en el patrón, no se ve afectado las comparaciones finales de este nueva mezcla estudiada ya que están también perdieron asentamiento por la misma razón.

Siguiendo con lo expuesto anteriormente, solo se obtuvo una mezcla que pasará las 7'' de asentamiento diseñadas inicialmente. Por otro lado, Se realizó un promedio entre los ensayos de sustitución de 10% y otro para los de 15%, con la finalidad de tener un solo valor para comparar con el diseño base, elaborándose así el gráfico siguiente:

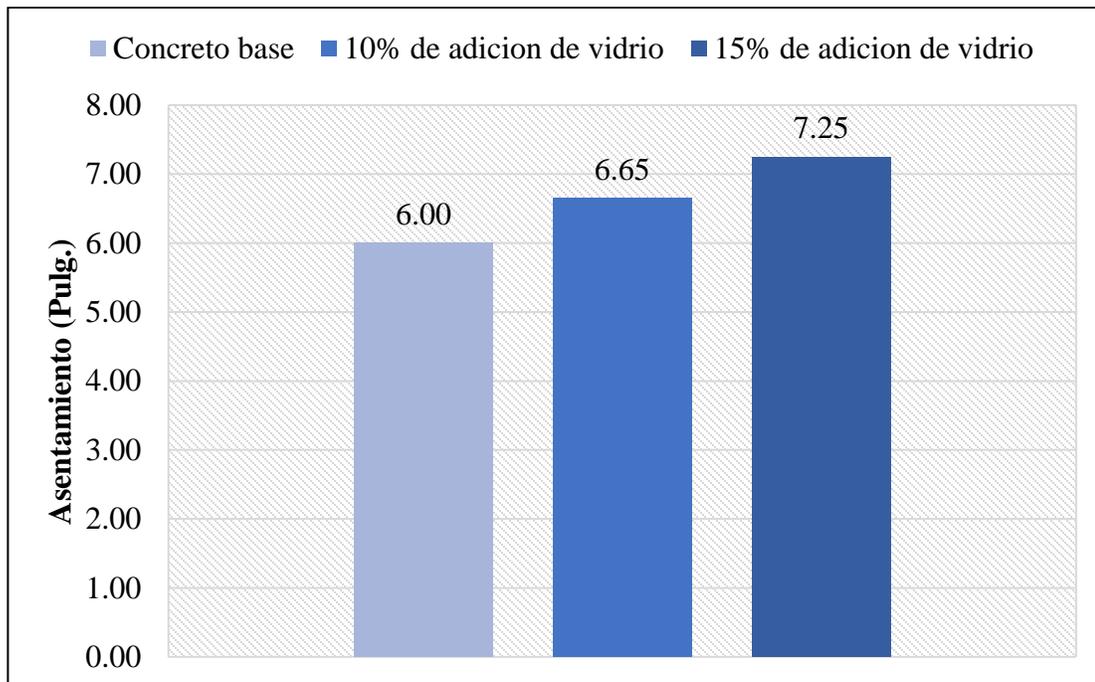


Figura 19. Gráfico de barras de la variación del asentamiento. Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Se puede notar que a medida que se adiciona el vidrio molido el asentamiento aumenta, sin embargo, no lo hace a valores constantes. Este ascenso en los valores de asentamiento se puede deber a la baja higroscopicidad del nuevo material agregado, ya que como se ha visto anteriormente el vidrio cuenta con una muy baja absorción, por lo tanto, el agua total que era absorbida por la arena en el diseño base, disminuye una cantidad al ser repelida por las adiciones de vidrio, obteniendo un aumento en el asentamiento, indicando una mejora de la trabajabilidad y mayor consistencia.

Ensayos de resistencia a la compresión y modos de falla

Luego de diseñar las mezclas, prepararlas, realizar el llenado de cilindros, posteriormente el desacople de las probetas, el proceso de curado y transcurridos los días necesarios, se llevó a cabo las pruebas correspondientes a la resistencia a compresión de cada probeta. Para la elaboración de este ensayo se tomó como guía la Norma Venezolana COVENIN 338:2002, la cual indica que se debe implementar una

máquina con capacidad suficiente para producir la rotura de las probetas. Estas pruebas se llevaron a cabo a los 7, 28 y 90 días de haberse realizado cada una de las mezclas vistas anteriormente.

La máquina arroja directamente la resistencia a compresión y la carga soportada, como se elaboró seis probetas por cada mezcla, se sometieron a prueba dos para cada día a ensayar, obteniendo dos resultados, donde el segundo permite la confirmación del primero, o en todo caso la observación de errores. Estos dos resultados fueron promediados entre sí para obtener las resistencias exactas correspondientes a cada mezcla, y, además, fueron verificadas por medio de los cálculos llevados a cabo a partir de la carga soportada y el área transversal de cada cilindro, obteniendo los resultados presentados en la siguiente tabla:

Tabla 36.

Resultados de la resistencia a compresión.

Mezcla	Resistencia a compresión promedio (Kgf/cm ²)		
	7 días	28 días	90 días
G1	194.02	277.11	354.76
G2	182.83	260.51	323.27
G3	179.02	267.44	346.25
G4	185.27	280.06	356.73
G5	180.71	271.48	359.81

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Los resultados obtenidos son los correspondientes al cálculo promedio entre los dos cilindros estudiados por mezcla. Con los cálculos se elaboró el siguiente gráfico, permitiendo obtener un mejor análisis entre mezclas.

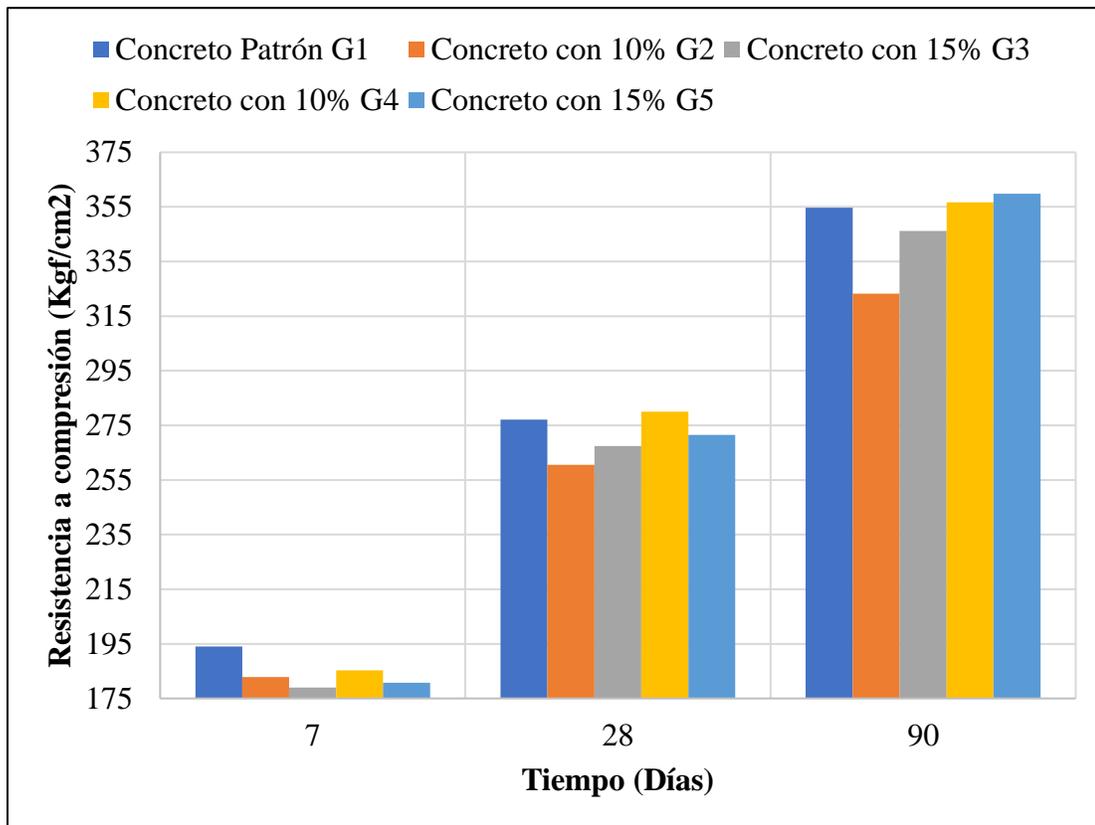


Figura 20. Gráfico de los resultados de la resistencia a compresión por mezcla. Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la figura anterior se puede resaltar que para el caso de los primeros 7 días del curado de cada una de las mezclas de concreto, los ensayos de sus resistencias a compresión indican que a medida que se adiciona el vidrio el hormigón reduce la resistencia que posee de oponerse a la compresión respecto a la mezcla patrón, sin embargo, cumplen con el 75% del valor de la resistencia especificada por la norma a los 7 días. Observándose que la mezcla con el menor resultado corresponde al diseño “G3”, cuya diferencia con el concreto patrón es de 15.00 Kgf/cm², lo equivale a una reducción del 7.73%, que puede ser significativo al momento de construir. En el concreto con 10% de vidrio la mayor diferencia obtenida con respecto al diseño principal es de 8.75 Kgf/cm², significando una variación en su resistencia del 4.51%. Además, se tienen desviaciones estándar de 1.22 Kgf/cm² y 0.85 Kgf/cm², entre las mezclas de 10% y 15% de adición de vidrio respectivamente, por lo tanto, se puede comprobar la reproducibilidad de los resultados.

Continuando con el análisis, para los ensayos correspondientes a la edad de 28 días, se observa que las mezclas de sustitución de agregado fino por 10% de vidrio molido obtuvieron el valor más bajo y el más alto en cuanto a la resistencia a compresión de todas las mezclas, el menor presentó una variación de 5.99% con respecto al concreto patrón y el mayor lo superó con una diferencia de 2.95 Kgf/cm², esto equivale a un aumento del 1.06%, indicando que estas mezclas de presentan grandes diferencias entre ellas de una cantidad igual a 16.60 Kgf/cm², lo que representa una variación del 5.99%, donde al calcular la desviación estándar se obtiene un valor de 9.78 Kgf/cm², por lo tanto, no se puede comprobar la reproducibilidad de los valores obtenidos. Por otro lado, los ensayos para las mezclas de 15% de sustitución de arena por vidrio presentaron diferencias entre ellos de 4.04 Kgf/cm², equivalente una variación del 1.51% y cuentan con una desviación estándar de 2.02 Kgf/cm² comprobando la reproducibilidad de los resultados, ambas mezclas obtuvieron valores de resistencia a compresión por debajo del concreto convencional, siendo la más baja la muestra “G3” con una diferencia de 9.67 Kgf/cm². Se puede notar que todas las mezclas cumplieron con el diseño inicial correspondiente a un concreto con resistencia a compresión de 210 Kgf/cm².

En las pruebas realizadas a la edad de 90 días, se obtiene una mayor distorsión entre las resistencias de las mezclas, llegando incluso dos mezclas de distinto diseño a superar en resistencia a compresión al concreto original pero las otras dos muestran lo contrario, el primer ensayo con adición de 10% de vidrio por agregado fino muestra una disminución del 8.88% con respecto al concreto convencional, mientras que la segunda prueba lo supera por 0.56%, obteniendo una desviación estándar de 16.76 Kgf/cm² entre mezclas con diseños iguales, por otro lado, en la sustitución de 15% se obtuvo una desviación estándar de 6.78 Kgf/cm², donde la primera mezcla también se encontró por debajo del concreto patrón con una variación del 2.40% y la segunda lo superó por 1.42%. Por lo tanto, no se pudo comprobar la reproducibilidad en ninguno de los diseños presentados a la edad de 90 días, sin embargo, se puede notar que a medida que pasa el tiempo el diseño con sustitución de 15% tiende a aumentar sus

valores de resistencia a compresión, este hecho es similar al obtenido en el estudio realizado por Diaz y Ramos, (2018).

En los siguientes puntos presentados se desglosan los resultados obtenidos en laboratorio y sus respectivas verificaciones manuales para cada una de las 30 probetas elaboradas en este trabajo.

Concreto patrón

Las medidas de la altura y el diámetro fueron tomadas tres veces con la finalidad de realizar un promedio y reducir los errores humanos.

Tabla 37.

Resultados probetas del concreto patrón a los 7 días.

Mezcla (7 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm ²)
G1	#1	29.70	14.90	12685	34390	196.3
		29.75	14.90			
		29.80	15.00			
		29.75	14.93			
	#2	29.90	14.80	12687	33200	191.7
		29.85	14.85			
		29.85	14.90			
		29.87	14.85			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Ambos cilindros presentados en la tabla anterior fueron elaborados de una misma mezcla, sin embargo, se puede notar que esto no quiere decir que todas sus medidas sean iguales. La probeta #1 presenta una menor altura y un mayor diámetro

que la segunda, estos valores nos muestran que el peso de cada probeta no varía con el tamaño ya que la primera posee uno mayor que la otra y aun así pesa menos, entonces se deduce que este peso cambia de acuerdo a la concentración de los componentes internos con los que se haya elaborado la mezcla.

Por otra parte, se puede notar que la resistencia a compresión posee una diferencia entre ensayos de 4.6 Kg/cm^2 , lo que equivale a una variación del 2.34%. La norma indica que la desviación estándar no debe ser mayor a 8 Kg/cm^2 entre los resultados de la resistencia a compresión de las probetas para una misma mezcla, en este caso se obtiene una desviación estándar de 2.3 Kg/cm^2 , lo que se puede traducir como que los valores son aceptables. Además, ambos resultados son mayores al 75% de la resistencia de diseño requerida a los 7 días, obteniendo para la primera probeta 93.48% y para la segunda 91.29%.



Figura 21. Modos de falla del concreto patrón (G1) a 7 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Los resultados de las fallas en el concreto patrón a la edad de 7 días se pueden observar en la imagen anterior, detallando que ambas probetas presentaron en la parte superior una separación superficial de su material, la segunda un poco más pronunciada que la primera, siendo esta un tipo de falla por corte, indicando que las caras donde se aplicó la carga se encontraban cerca del límite de tolerancia. La norma presenta este tipo de falla como corte N°4, el cual se puede observar en la *Figura 36*.

Tabla 38.

Resultados probetas del concreto patrón a los 28 días.

Mezcla (28 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm²)
G1	#1	29.80	14.90	12640	47660	272.1
		29.75	14.90			
		29.85	15.00			
		29.80	14.93			
	#2	29.90	14.80	12683	48970	282.1
		29.85	14.90			
		29.90	14.90			
		29.88	14.87			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Realizando un análisis similar al anterior para los ensayos llevados a cabo a la edad de 28 días en la mezcla patrón, se observa que la resistencia a compresión posee una diferencia más pronunciada entre probetas de 10.0 Kgf/cm², representando una variación del 3.68%, lo equivale a un aumento de 1.34% con respecto al ensayo de 7 días, La desviación estándar posee un valor de 5.0 Kgf/cm², indicando que este valor sigue entrando dentro de la normativa. También, se observa que ambos resultados se encontraron por encima del diseño inicial mínimo de 210 Kgf/cm² a los 28 días, en el caso del primero lo superó por 62.1 Kgf/cm², lo que equivale a un aumento del 29.57%,

mientras que el segundo cilindro se diferencia a este diseño en 72.1 Kg/cm^2 , representando un aumento del 34.33%, indicando que ambas muestras son aceptables en este aspecto.



Figura 22. Modos de falla del concreto patrón (G1) a 28 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el ensayo a compresión realizado a la edad de 28 días del concreto base se puede notar que el cilindro #1 se quiebra de una forma similar a las obtenidas para las muestras a la edad de 7 días, por lo tanto, el lugar donde se aplicó la carga estaba en el límite de las especificaciones, indicando un modo de falla por corte N° 4, donde se observa que se desprendió aproximadamente $1/4$ del volumen total de la probeta. Por otro lado, el cilindro #2 muestra una rotura diferente a las anteriores, ya que se aprecia

como se agrieta la probeta desde una esquina hasta la que se encuentra totalmente opuesta, indicando un tipo de falla de cono y corte inverso, la cual puede deberse a que las caras donde se aplica la carga poseen cierta desviación en las tolerancias de paralelismo, o que el centro de la probeta se desvió ligeramente en el momento de aplicación de la carga, la norma establece este tipo de falla como corte N° 3.

Tabla 39.

Resultados probetas del concreto patrón a los 90 días.

Mezcla (90 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm²)
G1	#1	29.90	14.90	12782	61650	352.0
		29.90	14.90			
		29.95	15.00			
		29.92	14.93			
	#2	29.80	14.90	12681	62620	357.5
		29.85	15.00			
		29.90	14.90			
		29.85	14.93			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Se puede notar que el segundo cilindro a pesar de tener un menor peso logró soportar una mayor carga de compresión e indicando que posee una mayor resistencia. Se visualiza que la resistencia a compresión tiene una diferencia entre probetas de 5.5 Kgf/cm², que equivale al 1.56%, siendo esta la menor diferencia obtenida entre probetas en todos los ensayos del concreto patrón. La desviación estándar posee un valor de 2.75 Kgf/cm², lo que indica que este ensayo también se encuentra dentro de los límites de la norma confirmando que este valor es aceptable. También se puede obtener un promedio de 354.76 Kgf/cm² representado en la tabla 36, el cual proporciona una referencia para todos los ensayos a 90 días.



Figura 23. Modos de falla del concreto patrón (G1) a 90 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el caso del ensayo a compresión a la edad de 90 días en el concreto patrón se observa que el primer cilindro presenta una falla de tipo columnar y como inversa (ver ANEXO E) indicando una cara de aplicación de carga convexa o también puede deberse a deficiencias en el material de refrentado, a rugosidades en el plato cabeceador o placas de carga, la norma conoce este tipo de falla como compresión N° 2. Por otro lado, el segundo cilindro presenta un modo de falla por corte donde la cara de aplicación de la carga había alcanzado el límite de tolerancia, en este caso se presenta un corte de cara superior hasta la cara inferior, de acuerdo a la *Figura 36*, esto se conoce como falla por corte N° 3.

Concreto con sustitución del 10%

Para este caso se ensayaron la misma cantidad de probetas a un tiempo igual que en apartado anterior, es decir, dos probetas para siete días, dos para 28 días y dos para 90 días, para dos mezclas, siendo en total 12 probetas.

Tabla 40.

Resultados probetas de concreto con sustitución del 10% de vidrio a los 7 días.

Mezcla (7 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm ²)
G2	#1	29.90	14.90	12590	31260	180.1
		29.75	14.80			
		29.85	14.90			
		29.83	14.87			
	#2	29.80	15.00	12606	32650	185.6
		29.85	14.90			
		29.80	15.00			
		29.82	14.97			
G4	#1	29.80	14.90	12670	30970	176.8
		29.80	15.00			
		29.80	14.90			
		29.80	14.93			
	#2	29.90	15.00	12661	34080	193.7
		29.85	14.90			
		30.00	15.00			
		29.92	14.97			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la tabla anterior se obtiene para “G2” que: la diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas es de 5.5 Kgf/cm², esto representa una variación del 3.05% entre ellas y poseen una desviación estándar de 2.75 Kgf/cm², además, el

cilindro #1 alcanza el 85.76% del diseño inicial y el #2 un 88.38%, superando el 75% requerido. Por otro lado, la diferencia entre las probetas de “G4” es de 16.9 Kgf/cm², esto representa una variación del 9.56% entre ellas y poseen una desviación estándar de 8.45 Kgf/cm², este valor se encuentra ligeramente por encima del establecido por la norma, ambas probetas superaron el 75% del diseño inicial por norma, alcanzando el 84.19% de la resistencia a los 7 días para el primer caso y el 92.24% para el segundo.



Figura 24. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G2) a 7 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En la figura anterior se puede observar la ruptura de las probetas obtenidas en los ensayos a la edad de 7 días para el concreto con adición de 10% de vidrio por agregado fino, notándose que ambos cilindros presentan características muy similares,

donde hubo un desprendimiento superficial cerca de la cara superior de la probeta, manteniéndose el resto de esta intacta en su parte externa, obteniendo que su tipo de falla es igual entre ellos y corresponde a corte N° 4, cuyas posibles causas ya se han expuesto en las fallas de este tipo vistas anteriormente.



Figura 25. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G4) a 7 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Para la imagen anterior se puede observar un caso parecido al obtenido para el ensayo a 7 días del concreto patrón e incluso similar a la muestra “G2”, donde el primer cilindro presenta en la parte superior una separación superficial de su material, esta se trata de un tipo de falla por corte, y el segundo presenta un modo de falla del mismo tipo, sin embargo, esta vez se encuentra más pronunciado llegando alcanzar casi la

mitad de la altura de la muestra. Ambas fallas indican que las probetas se encontraban cercanas a las limitaciones especificadas para la cara donde recibió la carga y producto de ello ocurre el corte, identificado en la norma como corte N° 4.

Tabla 41.

Resultados probetas de concreto con sustitución del 10% de vidrio a los 28 días.

Mezcla (28 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm²)
G2	#1	29.80	14.90	12670	42730	245.1
		29.75	14.85			
		29.80	14.95			
		29.78	14.90			
	#2	29.75	14.90	12625	48120	276.0
		29.80	14.90			
29.85		14.90				
G4	#1	30.00	14.90	12700	46280	264.8
		29.75	14.95			
		29.80	14.90			
		29.85	14.92			
	#2	29.85	14.90	12560	51490	295.3
		29.85	14.90			
		29.85	14.90			
		29.85	14.90			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la tabla anterior se obtiene para “G2” que: la diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas es de 30.9 Kgf/cm², esto representa una variación del 11.20% entre ellas y poseen una desviación estándar de 15.45 Kgf/cm², además, el cilindro #1 supera al diseño inicial para 28 días en 16.71% y el #2 un 31.43%. Por otro lado, La diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas para “G4” es de

30.5 Kgf/cm², esto representa una variación del 11.52% entre ellas y poseen una desviación estándar de 15.25 Kgf/cm², ambas probetas superaron el diseño inicial por un 26.10% de la resistencia a los 28 días para el primer caso y un 40.62% para el segundo. Las desviaciones estándar de ambas mezclas están por encima del límite.



Figura 26. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G2) a 28 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el ensayo a compresión realizado a 28 días de la primera mezcla de concreto con sustitución de 10% de vidrio (G2) se puede notar que el cilindro #1 se quiebra verticalmente, y sus grietas trazan distintos recorridos a través de él, siendo este una falla de tipo columnar y cono inversa, debida posiblemente a defectos en el material de refrentado, a rugosidades en el plato cabeceador o una aplicación de carga en una cara

convexa, identificándose esta falla como compresión N° 2. Por otro lado, el segundo cilindro presentó un completo desprendimiento de aproximadamente la mitad de su estructura, desde la cara superior hasta la inferior, notándose algún tipo de falla por corte, específicamente la N° 3.



Figura 27. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G4) a 28 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el ensayo a compresión realizado a 28 días de la segunda mezcla de concreto con sustitución de 10% de vidrio (G4) se observa que el primer cilindro se quiebra de un modo muy inusual, obteniéndose una falla por corte, pero en la parte inferior de la probeta, lo cual no se encuentra en la *Figura 36*. Por otro lado, el cilindro #2 presentó un agrietamiento alrededor de la circunferencia central de su estructura, tratándose de

un tipo de falla por compresión N° 1, lo que indica que la carga se aplicó correctamente, obteniendo la falla ideal.

Tabla 42.

Resultados probetas de concreto con sustitución del 10% de vidrio a los 90 días.

Mezcla (90 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm²)
G2	#1	30.00	14.80	12704	56900	327.8
		29.90	14.90			
		29.95	14.90			
		29.95	14.87			
	#2	29.90	15.00	12676	55830	318.8
		29.85	14.90			
		29.85	14.90			
		29.87	14.93			
G4	#1	29.90	15.00	12760	63780	364.2
		29.80	14.90			
		29.85	14.90			
		29.85	14.93			
	#2	29.90	15.00	12750	61180	349.3
		29.90	14.90			
		29.85	14.90			
		29.88	14.93			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la tabla anterior se obtiene para “G2” que: la diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas es de 9.0 Kgf/cm², esto representa una variación del 2.75% entre ellas y poseen una desviación estándar de 4.5 Kgf/cm², además, ambos cilindros arrojaron valores por debajo del concreto convencional a la edad de 90 días obteniendo una variación con respecto a este del 7.60% para el primero y 10.14% para el segundo. Por otro lado, La diferencia entre las resistencias a compresión de las

probetas para “G4” es de 14.9 Kgf/cm², esto representa una variación del 4.09% entre ellas y poseen una desviación estándar de 7.45 Kgf/cm², la primera probeta superó al concreto convencional por un 2.66% de la resistencia a la edad de 90 días, mientras que la segunda se encontró por debajo con una variación del 1.54%. Las desviaciones estándar de ambas mezclas cumplieron con el límite establecido por norma.



Figura 28. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G2) a 90 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En la imagen anterior correspondiente a los modos de falla de la mezcla de concreto “G2” a los 90 días, se observa que la probeta #1 se destruye desde la mitad de la parte superior de forma diagonal hasta la mitad de su altura en uno de los lados, obteniendo un tipo de falla por corte N° 4 explicado anteriormente. Sin embargo, el

segundo cilindro presenta un agrietamiento a lo largo de su altura, lo que provocó desprendimiento de la capa externa del material, debido posiblemente a que la carga se aplicó en una cara convexa o a posibles defectos en el material de refrentado, como ya se ha visto anteriormente, por lo tanto, esto se trata de un tipo de falla columnar y cono, o conocida por la norma como compresión N° 2.



Figura 29. Modos de falla del concreto con sustitución de 10% (G4) a 90 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el caso del ensayo a 90 días presentado en la figura anterior se observa que el primer cilindro presenta una falla por corte, la cual se ha obtenido seguido en las pruebas anteriores, por otro lado, el segundo cilindro explotó, destruyéndose más de la mitad de la estructura de la probeta y apenas se mantuvo firme en su base, notándose

que luego de aproximadamente la mitad de su altura el desprendimiento fue tanto que provocó una inclinación de la parte superior restante. Esta última falla solo pudo deberse a que la carga aplicada se encontraba centrada creando la falla ideal en forma de cono dos conos, siendo este un tipo de falla por compresión N° 1.

Concreto con sustitución del 15%

La cantidad de muestras llevadas a cabo en este ensayo corresponde al mismo valor que las del apartado anterior, desglosándose de igual forma en dos mezclas.

Tabla 43.

Resultados probetas de concreto con sustitución del 15% de vidrio a los 7 días.

Mezcla (7 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm ²)
G3	#1	29.90	14.80	12536	31220	180.7
		29.85	14.90			
		29.80	14.80			
		29.85	14.83			
	#2	30.00	14.90	12595	30790	177.4
		29.90	14.90			
		29.85	14.80			
		29.92	14.87			
G5	#1	29.70	14.80	12475	30790	178.2
		29.75	14.90			
		29.80	14.80			
		29.75	14.83			
	#2	29.70	14.90	12455	31810	183.3
		29.80	14.90			
		29.75	14.80			
		29.75	14.87			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la tabla anterior se obtiene para “G3” que: la diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas es de 3.3 Kgf/cm^2 , esto representa una variación del 1.83% entre ellas y poseen una desviación estándar de 1.65 Kgf/cm^2 , además, el cilindro #1 alcanza el 86.05% del diseño inicial y el #2 un 84.48%, superando el 75% requerido. Por otro lado, la diferencia entre las probetas de “G5” es de 5.1 Kgf/cm^2 , esto representa una variación del 2.86% entre ellas y poseen una desviación estándar de 2.55 Kgf/cm^2 , ambas mezclas cumplen con el límite de desviación estándar de la norma y superaron el 75% del diseño inicial por norma, alcanzando el 84.85% de la resistencia a los 7 días para el primer caso y el 87.29% para el segundo.

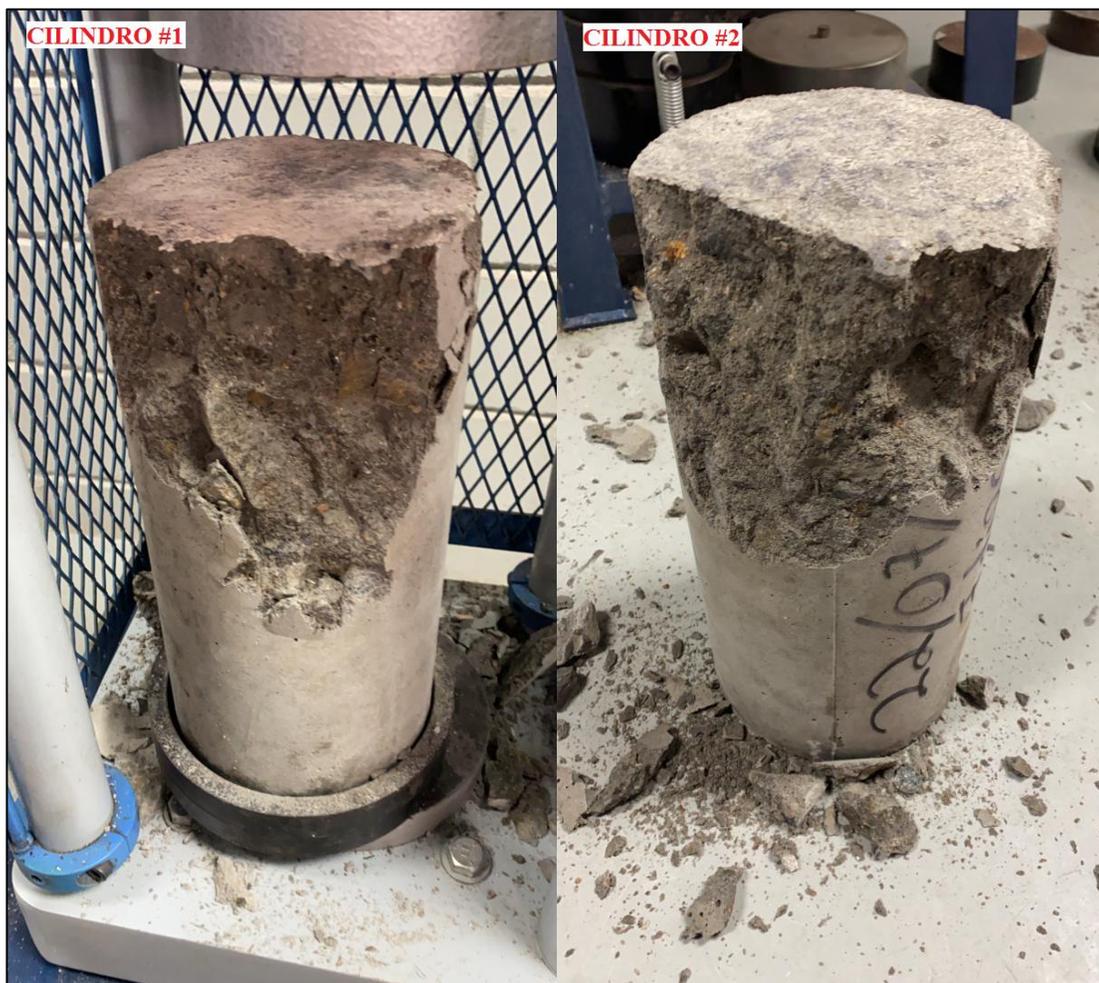


Figura 30. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G3) a 7 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Al igual que todos los cilindros ensayados a los 7 días de realizada la mezcla, en la figura anterior, ambas probetas presentan una rotura con características similares, donde se puede notar que su tipo de falla es igual entre ellos y corresponde a un corte desde la cara superior en diagonal hacia la mitad de su altura.



Figura 31. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G5) a 7 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

El cilindro #1 del ensayo a compresión del concreto con agregado de vidrio del 15% (G5) a 7 días presentó en la parte superior una separación superficial de su material, obteniéndose un tipo de falla por corte N° 4, cuyas posibles causas ya se ha detallado en probetas anteriores. El segundo cilindro ensayado al alcanzar su límite de rotura falla de forma columnar observándose un cono inverso, este tipo de falla

corresponde a la obtenida en el primer cilindro de la mezcla “G2” a la edad de 28 días, por lo tanto, sus posibles causas son iguales. De acuerdo a la norma es una falla a compresión N° 2.

Tabla 44.

Resultados probetas de concreto con sustitución del 15% de vidrio a los 28 días.

Mezcla (28 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm²)
G3	#1	29.70	14.80	12685	45870	263.7
		29.70	14.95			
		29.75	14.90			
		29.72	14.88			
	#2	29.80	14.85	12670	47080	271.2
		29.85	14.90			
29.80		14.85				
G5	#1	29.70	14.80	12598	47030	271.5
		29.75	14.95			
		29.75	14.80			
		29.73	14.85			
	#2	29.75	14.80	12525	47220	271.4
		29.85	14.90			
		29.70	14.95			
		29.77	14.88			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la tabla anterior se obtiene para “G3” que: la diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas es de 7.5 Kgf/cm², esto representa una variación del 2.84% entre ellas y poseen una desviación estándar de 3.75 Kgf/cm², además, el cilindro #1 supera al diseño inicial para 28 días en 25.57% y el #2 un 29.14%. Por otro lado, La diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas para “G5” es de

0.1 Kgf/cm², esto representa una variación del 0.04% entre ellas y poseen una desviación estándar de 0.05 Kgf/cm², ambas probetas superaron el diseño inicial por un 29.29% de la resistencia a los 28 días para el primer caso y un 29.24% para el segundo. Las desviaciones estándar de ambas mezclas están dentro del límite.



Figura 32. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G3) a 28 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el caso de la prueba a compresión realizada a 28 días de la primera mezcla de concreto con sustitución de vidrio del 15% se puede apreciar que el cilindro #1 se quiebra de forma vertical, obteniendo un tipo de falla columnar, debido a una aplicación de la carga en una cara cóncava o por deficiencias en el material de refrentado, también puede deberse a concavidad en una de las placas de carga, la norma

indica que este es un tipo de falla a compresión N° 2. Este mismo fenómeno se puede observar para el segundo cilindro.



Figura 33. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G5) a 28 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

Los resultados en cuanto al tipo de falla de las probetas ensayadas a 28 días de la mezcla “G5” son similares a los obtenidos para la mezcla “G4”, observándose que el cilindro #1 se quiebra en forma de cono mientras se presenta un corte, esto es debido a que las caras donde se aplica la carga poseen variaciones en su paralelismo o también a posibles desviaciones en el centro de la probeta, de acuerdo a la norma este es un corte N° 3. El cilindro #2 presentó un agrietamiento en forma de cono vertical cuyas causas son iguales a cuando está inverso, siendo esta una falla por compresión N° 2.

Tabla 45.

Resultados probetas de concreto con sustitución del 15% de vidrio a los 90 días.

Mezcla (90 días)	Probeta	Altura (cm)	Diámetro (cm)	Peso (g)	Carga de compresión (Kgf)	Resistencia a compresión (Kgf/cm²)
G3	#1	29.80	14.90	12608	59070	337.3
		29.75	15.00			
		29.80	14.90			
		29.78	14.93			
	#2	29.90	14.90	12622	62220	355.2
		29.85	15.00			
29.90		14.90				
		29.88	14.93			
G5	#1	29.90	14.90	12576	62090	357.7
		29.85	14.80			
		29.80	14.90			
		29.85	14.87			
	#2	29.90	14.90	12605	63390	361.9
		29.85	15.00			
		29.85	14.90			
		29.87	14.93			

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

De la tabla anterior se obtiene para “G3” que: la diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas es de 17.9 Kgf/cm², esto representa una variación del 5.31% entre ellas y poseen una desviación estándar de 8.95 Kgf/cm², además, el primer cilindro arrojó un valor por debajo del concreto convencional a la edad de 90 días obteniendo una variación con respecto a este del 4.92%, mientras que el segundo estuvo por encima con un 0.12%. Por otro lado, La diferencia entre las resistencias a compresión de las probetas para “G5” es de 4.2 Kgf/cm², esto representa una variación del 1.17% entre ellas y poseen una desviación estándar de 2.1 Kgf/cm², ambas probetas superó al concreto convencional con un 0.83% para la primera y un 2.01% para la otra

La desviación estándar de la primera mezcla no cumple con el límite, por otro lado, la segunda si lo hace.



Figura 34. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G3) a 90 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En el caso del ensayo a 90 días del concreto con sustitución del 15% de la arena por vidrio molido se observa que ambos cilindros fallan de forma similar entre ellos, produciéndose un corte en diagonal desde la cara superior hasta una de las caras laterales, siendo este un tipo de falla por corte N° 4. Para el cilindro #1 el corte es tan profundo que casi puede considerarse un tipo de falla por corte N° 3, sin embargo, al mantenerse el corte hasta una de las caras laterales no se considera como tal. El segundo cilindro se destruye de un modo igual a lo visto en casi todos los ensayos a 7 días.



Figura 35. Modos de falla del concreto con sustitución de 15% (G5) a 90 días. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

En la prueba a compresión realizada a 90 días de la mezcla de concreto “G5” se puede ver que la probeta #1 cede de una forma similar a las obtenidas para las muestras de 7 días, por lo tanto, su modo de falla es por corte N° 4, donde se observa que se desprendió aproximadamente 1/4 del volumen total de la probeta, pero con cierta cantidad aún sostenida por la estructura completa. Por otro lado, el cilindro #2 muestra una rotura completamente diagonal, ya que se nota como se destruye la probeta desde la parte superior hasta una esquina inferior dejando visible el interior de ésta, observándose que los agregados están tan unidos y concentrados que casi no se encuentra señal de ellos, siendo este un tipo de falla por corte N° 3, ambas fallas son debidas a lo explicado hasta ahora en las probetas cuya rotura fue a corte.

Resumen de las resistencias a compresión y fallas de las probetas

Debido al bajo porcentaje de absorción del vidrio molido, este pudiera incidir directamente en la lubricación de la mezcla, es decir, haciendo necesario una mayor cantidad de agua para homogenizar la mezcla, esto puede indicar que mientras más tiempo se mantenga el cilindro en el curado mayor adherencia habrá entre los componentes del concreto, sin embargo, es necesario realizar pruebas especificadas en este sentido para obtener una confirmación.

Tabla 46.

Tabla resumen de los tipos de fallas obtenidas.

Mezcla de concreto		Cilindros	Tipo de falla		
			7 días	28 días	90 días
Patrón	G1	#1	Corte N° 4	Corte N° 4	Compresión N° 2
		#2	Corte N° 4	Corte N° 3	Corte N° 3
Sustitución de 10%	G2	#1	Corte N° 4	Compresión N° 2	Corte N° 4
		#2	Corte N° 4	Corte N° 3	Compresión N° 2
	G4	#1	Corte N° 4	-	Corte N° 3
		#2	Corte N° 4	Compresión N° 1	Compresión N° 1
Sustitución de 15%	G3	#1	Corte N° 4	Compresión N° 2	Corte N° 4
		#2	Corte N° 4	Compresión N° 2	Corte N° 4
	G5	#1	Corte N° 4	Corte N° 3	Corte N° 4
		#2	Compresión N° 2	Compresión N° 2	Corte N° 3

Nota: Elaborado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

La tabla anterior presenta un resumen de todos los tipos de falla obtenidos para los 30 cilindros ensayados en este trabajo de investigación, donde se puede notar que, en los 7 días transcurridos para cada elaboración de las mezclas, todas las probetas presentaron cortes superficiales en una de las esquinas superiores a excepción del segundo cilindro de la mezcla “G5”.

Para los 28 días transcurridos en la realización de cada una de las mezclas, se observan distintos tipos de fallas; para el concreto patrón se sigue con la tendencia a una ruptura superficial en una de las esquinas superiores, pero que cambia en un corte más pronunciado en su otra probeta; para la mezcla de 10% de sustitución de agregado fino por vidrio se obtuvieron cuatro tipos de fallas diferentes, teniendo uno que no se encuentra en la norma; y en la sustitución del 15% las fallas son en su mayoría por compresión agrietándose la probeta a lo largo de su altura.

En el caso de los ensayos a los 90 días de curado, se puede notar que el concreto patrón presentó dos fallas diferentes y el hormigón elaborado con 10% de sustitución de vidrio obtuvo una falla distinta para cada probeta, abarcando los cuatro modos de fallas que establece la norma. Por otro lado, todas las probetas con adición de vidrio del 15% por agregado fino fallaron por corte.

Cuando se realizaron los ensayos a compresión los cilindros fallaron de forma diferente. La Norma Venezolana COVENIN 338:2002 expone dos tipos de fallas, una a compresión y otra por corte, estas a su vez se dividen en dos fallas más cada una, obteniendo en total cuatro modos de fallas presentadas en la siguiente figura:

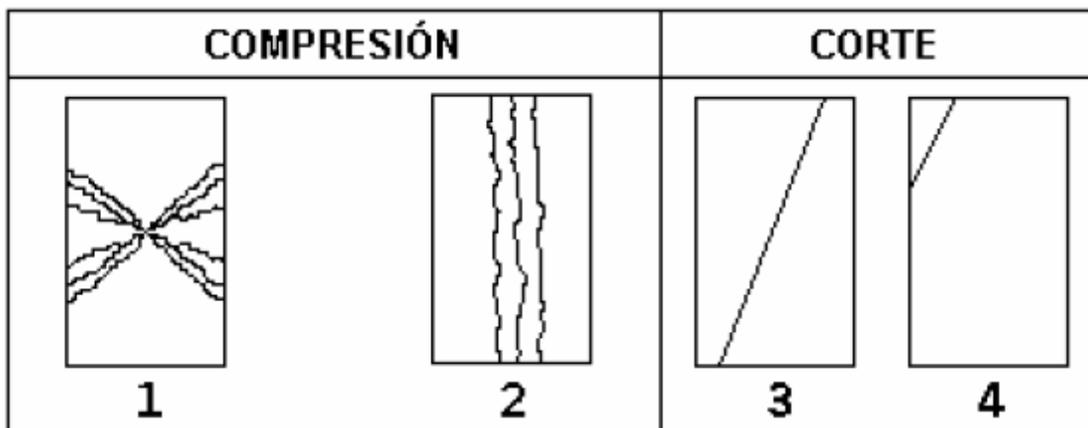


Figura 36. Tipos de falla en los cilindros. Tomado de *Norma Venezolana COVENIN 338:2002*, (p. 6), por FONDONORMA, 2002, Venezuela. Derechos reservados por FONDONORMA.

La primera corresponde a una falla a compresión a lo largo del diámetro en la altura media del cilindro; la segunda también se identifica como una falla a compresión, pero esta vez es un agrietamiento a lo largo de la altura de la probeta; la tercera pasa a ser un modo de falla por corte en diagonal a través de toda la altura del cilindro; y por último la cuarta también se identifica como una falla por corte pero solo en una de las esquinas superiores de la probeta ensayada. Aunque la norma presente estos cuatro tipos de fallas generales, también se puede obtener cinco divisiones.

En cuanto a los valores obtenidos para la resistencia a compresión de las probetas estudiadas, se tiene que el concreto convencional sigue obteniendo un mejor comportamiento, con mayor resistencia que los otros dos diseños estudiados.

Posibles usos en la construcción del concreto con agregado de vidrio

Se analizaron diversas fuentes donde implementan el vidrio como adición al concreto, las cuales, al compararlas con los resultados obtenidos en este trabajo de investigación, destacándose que la adquisición de este nuevo material puede ser provechoso, esto va a depender de la calidad de los componentes del concreto incluyendo al vidrio. El uso de esta mezcla estudiada se ve influenciada de acuerdo a diversos factores, algunos de estos pueden ser: las variaciones obtenidas en la resistencia a compresión con respecto a un concreto convencional, las propiedades que ofrece la mezcla en su estado fresco, el tiempo de endurecimiento requerido para este material, e incluso el aspecto que se le pueda otorgar.

En cuanto a los resultados obtenidos en este proyecto de investigación referidos a la resistencia a compresión, hubo variaciones al compararlos con respecto a un concreto convencional, donde se notó que para las resistencia obtenidas a la edad de 7 y 28 días, las dos mezclas con adición del 15% vidrio por agregado fino se encontraron por debajo de esta referencia comparativa, observándose que se pudo verificar la reproducibilidad de los resultados, esto indica que no se debe dar un uso estructural a

este nuevo tipo de concreto si se quiere alcanzar valores iguales a los de un concreto normal, por lo tanto, se puede emplear en el revestimiento de paredes o para rellenar los bloques tomando este nuevo material como una especie de mortero, también puede ser utilizado en la fabricación de bloques labrados para pavimentos (adoquines) o en la elaboración de pisos no industriales, ya que estos no pueden estar sometidos a valores de pesos elevados.

Si a la disminución de la resistencia a compresión de las mezclas con adiciones de vidrio con respecto a un concreto convencional, se suma la baja higroscopicidad que posee el vidrio, puede llevar a que la mezcla resultante también obtenga esta baja higroscopicidad, por lo tanto, otro posible uso que se le puede dar a este material es en la elaboración de cunetas, las cuales son canales a los lados de las vías de comunicación como medio de transporte de las aguas pluviales, también puede ser implementado en la construcción de alcantarillas de concreto para aguas residuales, sin embargo, para este caso se le deben hacer análisis químicos a la mezcla para asegurarse que no se obtenga una pérdida temprana del material, producto de la corrosión por las aguas.

A la edad de 7 días, las mezclas con sustitución del 10% de agregado fino por vidrio presentaron un comportamiento similar a las de 15% pero con valores por encima de estas, pero a edad de 28 y 90 días, no se pudo verificar la reproducibilidad de sus resultados, llegando una mezcla a superar los valores de resistencia del concreto patrón y la otra se encontró por debajo. En el caso de la primera, también se pudo observar a la edad de 90 días en la mezcla de 15% de adición del material de reciclaje por agregado fino, esto es un indicio de que esta mezcla tal vez pueda ser utilizada como concreto estructural obteniendo mejores resultados que un concreto patrón, sin embargo, al no tener una verificación en sus resultados se deben realizar más ensayos con la finalidad de observar si se logra repetir este hecho, ya que esto sería una forma ventajosa de elaborar concreto de alta resistencia con material de desecho y de esta manera reducir los costos. En el caso de la segunda, se puede aplicar a lo visto anteriormente para la adición de 15% de vidrio por agregado fino.

Por otro lado, aunque se obtuvo variaciones en las mezclas con adición de vidrio con respecto al concreto convencional, se puede observar que todos los resultados de la resistencia a compresión en este proyecto estuvieron por encima del diseño principal de 210 Kgf/cm², esto también indica un posible uso estructural, ya que si solo es requerida una resistencia a compresión por diseño para la construcción y se puede obtener resultados mayores a esta reduciendo los costos al usar material de desecho, no afectaría negativamente a la estructura elaborada, también se pudiera aumentar la sustitución de vidrio por agregado fino y observar si aún se obtienen resistencias por encima a las requeridas, obteniendo de esta forma un costo mucho menor en la fabricación de hormigón. Además, el aumento del asentamiento conlleva una mejora en la trabajabilidad y mayor fluidez de la mezcla, por lo tanto, tal vez se pueda utilizar mezclas con adiciones mayores de vidrio como una especie de concreto bombeable, el cual permitiría construir columnas o muros de contención.

Se observa que a medida que pasa el tiempo la diferencia entre el concreto convencional y las mezclas con adiciones de vidrio en cuanto a la resistencia a compresión se van reduciendo, este hecho se hace más notable en las adiciones de 15% de vidrio molido por agregado fino, esto puede indicar que al incluir el material de desecho en las mezclas, estas pueden alcanzar los valores de resistencia de un concreto base pero a mayor tiempo, esto podría usarse en estructuras que requieran altos valores de resistencia a edades tardías.

Cabe destacar, que posiblemente la sustitución de agregado fino por vidrio molido no tenga porqué ser la mejor combinación que se le pueda dar a este material de desecho implementado, ya que tal vez puedan obtenerse mejores resultados sustituyéndolo parcialmente por el agregado grueso o incluso por el cemento, para este último se han hecho estudios obteniendo resultados de provecho para la industria, sin embargo, el material de vidrio molido empleado en esta investigación no es igual a los utilizados en dichos estudios, por lo tanto, se debe verificar para este caso y observar si se puede aplicar el resultado obtenido en mayor diversidad de obras.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

De la caracterización del vidrio molido

- Se presenta el vidrio molido reciclado como material no convencional para la elaboración de hormigón, afianzando la teoría de poder utilizarlo en el ámbito de la construcción, reduciendo de esta manera el impacto que genera el concreto al medio ambiente al aprovechar un material utilizado anteriormente en otro tipo de aspecto. Además, se añade la idea de poder obtener una reducción de costos en las mezclas de concreto, ya que este material al ser reutilizable se puede conseguir en las calles como desecho o como en el caso de esta investigación se adquirió por donación de las cristalerías de Upata del Estado Bolívar en Venezuela.
- En cuanto al peso unitario suelto, el vidrio molido empleado posee un valor similar al del agregado fino usado generalmente para elaborar concreto, ya que solo se reduce un 6,39% con respecto a la arena, de esta forma se encuentra dentro de los valores estandarizados. También se obtiene que el peso unitario compacto cumple con estos requisitos, ya que, aunque para este caso la variación aumenta con respecto a la anterior, obteniéndose una variación entre el vidrio molido y la arena de 7.07%, esta se sigue manteniendo dentro del rango de valores estandarizados para un agregado convencional. Además, se deduce de ambos resultados que una cantidad de masa de vidrio igual a una de arena ocuparía más volumen con respecto a esta última.
- En cuanto a los resultados presentados de densidad aparente, densidad aparente saturada con superficie seca y densidad nominal, el material reciclable

estudiado presenta unas reducciones de 6.81%, 7.72% y 9.16% respectivamente en base a las obtenidas para la arena lavada, estas afirman la deducción anterior, sin embargo, los valores obtenidos en este caso se encuentran fuera del rango estándar para agregado fino convencional, siendo su mayor diferencia la densidad aparente encontrándose alejado de este rango por 6.44%. Por otro lado, el porcentaje de absorción obtenido para el vidrio afirma la teoría de que este es un material de baja higroscopicidad, por lo tanto, alberga baja cantidad de agua en sus poros.

De los diseños de mezclas de concreto con adiciones de vidrio molido

- Para los diseños de mezclas se toma un asentamiento de 7'' como base y se utiliza los resultados de absorción de los materiales, mientras que la humedad se toma constante, por lo tanto, la cantidad de agua empleada para cada diseño es la misma. Como el vidrio es un material con baja higroscopicidad al no cambiar la cantidad de agua requerida a medida que se adiciona este material reciclable, es probable que la lubricación entre los componentes de la mezcla se lleva a cabo con mayor dificultad, obteniendo de esta forma un proceso de adherencia más lento y menor desprendimiento de calor.

De las propiedades en estado fresco de las dosificaciones preparadas

- A medida que se aumenta el porcentaje de vidrio sustituido por la arena, se obtiene en las mezclas elaboradas un aumento en el asentamiento, debido probablemente a la baja absorción que posee el material utilizado como reciclaje, ya que esto permite que la cantidad de agua que era retenida en los poros del agregado fino en el concreto convencional se libere para el porcentaje de cambio establecido, resultando de esta forma una mezcla más líquida. Esta subida del asentamiento conlleva una mejora en la trabajabilidad con una consistencia más fluida.

- Aunque al diseñar la mezcla se toma como base un asentamiento de 7'', el concreto convencional alcanza uno de 6'', sin embargo, como los diseños con adición de vidrio se basan en el concreto patrón, las comparaciones entre mezclas no se ven afectadas. Solo se obtiene una mezcla que pasa las 7'' de asentamiento diseñadas inicialmente, la cual corresponde a la adición de 15% de vidrio por agregado fino.

De la resistencia a compresión del concreto endurecido

- De acuerdo a las mezclas elaboradas para las sustituciones de arena por vidrio de 10% y 15% y el concreto patrón, se obtiene que esta última es la que presenta el mejor comportamiento de resistencia a compresión a los 7 días de realizar el curado, por otro lado, se ve superado por solo una mezcla de adición de 10% a la edad de 28 días, y por una mezcla de 10% y otra de 15% a la edad de 90 días. Sin embargo, si se toma en cuenta la otra mezcla con el mismo porcentaje de sustitución para cada cantidad de días, el concreto convencional supera a los otros dos diseños.
- Para los promedios generales de cada mezcla en la resistencia a compresión realizados a la edad de 7 días, se afirma que a medida en que se hace el cambio de agregado fino por vidrio, adicionando más de este último, la resistencia a compresión se ve reducida, obteniendo una relación inversamente proporcional, donde se puede comprobar la reproducibilidad de los resultados, además, todas las mezclas superaron el 75% de la resistencia de diseño especificado en la norma, obteniendo como mayor valor el del concreto convencional con 92.39% y el menor corresponde a la mezcla "G5" de adición de 15% de vidrio por agregado fino, la cual alcanza el 85.25% del diseño inicial.

- Para los promedios generales de cada mezcla en la resistencia a compresión realizados a la edad de 28 días, los valores obtenidos para el concreto convencional lo ubican por encima de tres mezclas, exceptuando la perteneciente a la sustitución de agregado fino por 10% de vidrio molido (G4). No se logra comprobar la reproducibilidad de los resultados en las mezclas de 10% de adición de vidrio, mientras que para las mezclas con 15% de adición de este material se obtienen dos resultados similares. Todas las mezclas superan el diseño inicial de 210 Kgf/cm², obteniendo la mayor diferencia en la mezcla “G4”, la cual se encuentra 70.06 Kgf/cm² por encima.

- Para los promedios generales de cada mezcla en la resistencia a compresión realizados a la edad de 90 días, cada diseño de adición de vidrio logra superar al concreto convencional con una de sus mezclas, mientras que la otra se encuentra por debajo, los valores entre ellas son bastante distantes, por lo tanto, no se logra comprobar la reproducibilidad de los resultados. El mayor valor por encima del concreto convencional lo posee la mezcla “G5”, la cual se ubica a 5.05 Kgf/cm² de este, por otro lado, el menor valor los obtiene la mezcla “G2” con una gran diferencia respecto al concreto patrón de 31.49 Kgf/cm². Hasta este momento el mejor comportamiento lo tiene la mezcla con adición de 15% de vidrio por agregado fino, la cual reduce la diferencia con el concreto convencional a medida que pasa el tiempo hasta lograr valores por encima de este, indicando un tipo de mezcla con mayor resistencia a edades tardías.

- La resistencia a compresión del concreto convencional se mantuvo superior a las otras dos mezclas en el 83.33% de los casos, es decir de las 24 probetas elaboradas para sustitución de arena por vidrio, en solo cuatro el diseño patrón se vio superado, de las cuales tres se encuentran en los ensayos realizados a la edad de 90 días.

- Los ensayos de resistencia a compresión elaborados individualmente para cada probeta indican que a la edad de 7 días se logra comprobar la reproducibilidad de los resultados para cada una de las mezclas, además, todas las desviaciones estándar obtenidas se encuentran dentro del rango presentado en la norma. Por otro lado, a la edad de 28 días solo se logra la reproducibilidad de los resultados para el concreto patrón y la mezcla con 15% de adición de vidrio por el agregado fino, en el caso de las otras dos mezclas los valores entre probetas difieren en gran medida, con una desviación estándar fuera de la norma. A la edad de 90 días, solo se obtiene la reproducibilidad de los resultados de la mezcla patrón y “G5”, las otras tres mezclas poseen desviaciones estándar entre sus cilindros fuera de los límites de la norma.

Del uso del concreto con sustitución de agregado fino por vidrio molido

- Al realizar un análisis de las mezclas con adiciones de vidrio con respecto al concreto convencional, se obtiene en su mayoría resistencias a compresión por debajo de este último, por lo tanto, los probables usos que se le pueden impartir al concreto con adición de vidrio desde este punto de vista son: la fabricación de morteros, adoquines, pisos, cunetas, alcantarillas.
- En cuanto al aumento del asentamiento, se puede emplear como concreto bombeable para mayores porcentajes de adición de vidrio, ya que la mezcla con agregado de vidrio necesita menos cantidad para obtener el asentamiento requerido, sin embargo, se deben realizar estudios previos.
- Debido al endurecimiento lento que presentan las mezclas con adiciones de vidrio se puede usar como un tipo de concreto con obtención de altas resistencias a edades tardías.

Recomendaciones

- Es recomendable realizar más estudios al vidrio molido utilizado, como, por ejemplo, agregar el ensayo de granulometría para verificar que este cuente con los límites establecidos por la norma para la distribución del tamaño de las partículas del agregado fino. También se pueden realizar pruebas al vidrio molido que no se encuentren regulados como un ensayo para diseñar hormigón, un caso de esto puede ser observar las características químicas y físicas que ofrece el material.
- Proponer y verificar procedimientos de ensayos específicos para el vidrio, al igual que como se encuentran regulados los procesos llevados a cabo para los componentes usados generalmente en la fabricación de concreto.
- Realizar un estudio donde se sustituya el vidrio parcialmente por el agregado grueso, y en otro por el cemento, para observar si obtiene un aumento en la resistencia a compresión o por el contrario una disminución con respecto a un concreto convencional, además de verificar si esas nuevas sustituciones resultan de mayor provecho que las presentadas en esta investigación.
- Elaborar estudios con otros tipos de vidrio, como puede ser el caso de fibras de vidrio, este planteamiento puede ayudar a la adhesión entre los componentes que conforman el concreto obteniendo mayores resultados en su resistencia a compresión.
- Realizar los ensayos de humedad para cada material, y de esta manera modificar las dosificaciones finales de cada mezcla, obteniendo una posible mejora en la lubricación al tomar en cuenta el agua contenida en los poros de los materiales para elaborar el concreto.

- Elaborar más diseños de mezclas con otras cantidades de adición de vidrio que permitan un análisis más extenso en cuanto a las propiedades del concreto en estado endurecido, para verificar que se mantenga la relación inversamente proporcional entre la cantidad de vidrio agregada y la resistencia a compresión obtenida, además, de verificar la reproducibilidad de los resultados.

- Emplear una mezcladora de concreto como instrumento para evitar las posibles pérdidas que se obtienen al momento de realizar el mezclado.

- Realizar un análisis de costos para confirmar que al emplear el vidrio molido como material de sustitución de la arena para elaborar concreto se obtenga también una reducción en los gastos de los componentes del hormigón, más específicamente de la arena al cambiarla por material reciclable.

Referencias

- Acosta, M., Bujato, J., Carey, G. & Díaz, A. (2018). El vidrio, la propuesta innovadora en las construcciones de Barranquilla. *Revista I+D en TIC. Volumen 9.* (p. 43-49).
- Arias, F. (2012). *EL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN: Introducción a la metodología científica* (Sexta ed.). Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
- Carrasco, F. (2013). *Propiedades de la mezcla fresca de hormigón*. Recuperado de <https://www.academia.edu/34649440/>
- Castillo, W. & Quispe, J. (2019). *Propiedades mecánicas del concreto elaborado con adición de vidrio molido y cuarcita*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional de San Agustín, Perú.
- Catalan, C. (2013). *Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20 y H30*. Trabajo de Grado. Universidad Austral de Chile, Chile.
- Cementos Cibao. (2017). Los diferentes tipos de concreto. Recuperado de: <https://www.cementoscibao.com/los-diferentes-tipos-concreto/> (2021)
- CEMEX, (s.f.). *Trabajabilidad Concreto Bombeable*. Recuperado de: <http://cemexparaindustriales.com/trabajabilidad-concreto-bombeable/> (2021)
- Construyendo.co. (s.f.). *Concreto*. Recuperado de: <https://construyendo.co/concreto/tipo-concreto.php> (2021)

COVENIN 266. (1977). *Método de ensayo para determinar la resistencia al desgaste de agregados gruesos menores de 38.1 mm (1 ½'') por medio de la Maquina de los Ángeles*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 263. (1978). *Método de ensayo para determinar el peso unitario del agregado*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 493. (1992). *Cemento Portland. Determinación del tiempo de fraguado por la aguja de Vicat*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 494. (1994). *Cemento Portland. Determinación de la consistencia normal*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 269. (1998a). *Agregado grueso. Determinación de la densidad y la absorción*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 268. (1998b). *Agregado fino. Determinación de la densidad y la absorción*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 255. (1998c). *Agregados. Determinación de la composición granulométrica*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 277. (2000). *Concreto. Agregados. Requisitos*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 338. (2002). *Concreto. Método para la elaboración, curado y ensayo a compresión de cilindros de concreto*. FONDONORMA, Venezuela.

COVENIN 339. (2003). *Concreto. Método para la medición del asentamiento con el cono de Abrams*. FONDONORMA, Venezuela.

- Diaz, J. & Ramos, C. (2018). *Evaluación del comportamiento mecánico de mezclas de concreto empleando diferentes proporciones de vidrio reciclado y triturado como sustituto de la arena*. Trabajo de Grado, Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
- Espinoza, E. (2017). *Estudio de vidrio reciclado como componente para la elaboración de cementos terciarios*. Trabajo de Grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Estrada, C., & Paez, R. (2014). *Influencia de la morfología de los agregados en la resistencia del concreto*. Trabajo de Grado, Universidad Veracruzana, México.
- Flores, A. (2016). *Estudio de un concreto fluídico de $f'c=250 \text{ Kg/cm}^2$ con superplastificante para estructuras en la ciudad de Jaén*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Geologiaweb. (2021). *¿Qué es la escala de Mohs?*. Recuperado de: <https://geologiaweb.com/minerales/escala-de-mohs/>. (2021).
- Grande, M., Hernández, R. & Renderos, L. (2017). *Sistematización de los procesos de termoformado y termo fundido en vidrio flotado para su aplicación artística en san salvador, 2017*. Trabajo de Grado, Universidad del Salvador, El Salvador.
- Guevara, J. (2008). *Análisis comparativo del comportamiento del concreto simple con el concreto reforzado con fibras de acero Wirand*. Proyecto de Tesis, Universidad Ricardo Palma, Perú.
- Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Primera ed.). Bogotá, Colombia: Editorial BHANDAR EDITORES.

- Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, M. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta ed.). México D. F., México: McGraw-Hill.
- Hidalgo, D. Poveda, R. (2013). *Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado*. Trabajo de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador.
- Huamán, Q. (2015). *Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de vidrio*. Trabajo de grado. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú.
- Huapaya, T. & Valdivia, J. (2019). *Uso de vidrio reciclado como adición en la elaboración de concreto $f'c=315$ kg/cm² para obras portuarias*. Trabajo de Grado, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú.
- Mora, J. (2018). *El vidrio reciclado y su conversión en material de la construcción. Estudios prospectivos en la provincia de Villa Clara*. Trabajo de Grado, Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba.
- Morales, L. (2017). *El vidrio en la edificación. Propiedades, aplicaciones y estudios de fracturas en casos reales*. Trabajo de Grado, Universidad Politécnica de Cataluña, España.
- Osorio, J. (2021). *¿Qué es el modo de elasticidad del concreto?*. Recuperado de <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/elasticidad-del-concreto#:~:text=Jes%C3%BA%20David%20Osorio&text=Resumen%3A,carga%20impuesta%20sobre%20el%20mismo>.
- Palella, S. & Martins, F. (2012). *Metodología De La Investigación Cuantitativa* (Tercera ed.). Caracas, Venezuela: FEDUPEL.

- Pertuz, A. (2010). Construcción y medio ambiente. *Revista Modulo. Volumen 1, N° 9.* (p. 105-114)
- Porrero, J., Ramos, C., Grases, J. & Velazco, G. (2012). *Concreto Estructural.* Caracas, Venezuela: editorial SIDETUR.
- Poveda, R., Granja, V., Hidalgo, D. & Ávila, C. (2015). Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A. *Revista Politécnica. Volumen 35, N° 3.* (p. 10).
- Rivera, G. (2013). *Concreto Simple.* Recuperado de https://www.academia.edu/13569512/CONCRETO_SIMPLE
- Riveros, J. (2021). *Ensayo Flexión de Vigas.* Recuperado de <https://consuasingenieria1.wordpress.com/2014/01/29/ensayo-flexion-de-vigas/>
- Rivva, E. (2000). *Naturaleza y Materiales del Concreto* (Primera ed.). Lima, Perú: Editorial aci Peru.
- Rodríguez, A & Rodríguez, P. (2019). *Efecto del vidrio molido en las propiedades físicas y mecánicas del concreto, Trujillo 2019.* Trabajo de Grado, Universidad Privada de Trujillo, Perú.
- Santillán, M. (2020). *Concreto reforzado con fibras aporta beneficios a la construcción.* Recuperado de: <http://ciencia.unam.mx/leer/1069/> (2021)
- Soroushian, P. (2011). *Field investigation of concrete incorporating milled waste glass.* The Journal of Solid Waste Technology and Management. Michigan, EEUU.

- Suque, C. (2016). *Utilización de desecho de vidrio como árido grueso para la elaboración de concreto*. Trabajo de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.
- Vargas, D. (2015). *Reutilización del vidrio plano como agregado fino en la elaboración de morteros de cemento y concreto*. Trabajo de Grado, Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Vasquez, S. & Giron, G. (2019). *Análisis de la Resistencia del Concreto con Adición de Vidrio Pulverizado*. Trabajo de grado, Universidad Nacional de Jaén, España.
- Walhoff, G. (2017). *Influencia del vidrio molido en la resistencia a la compresión del concreto y costos de fabricación, comparado con el concreto convencional, barranca-2016*. Trabajo de Grado, Universidad Nacional “Santiago Antuñez de Mayolo”, Perú.

Anexos

ANEXO A

Datos necesarios para el diseño de mezcla

NÚMERO DE ENSAYOS (*)	FACTOR DE MODIFICACIÓN
< 15	Usar la Tabla VI.5
15	1,16
20	1,08
25	1,03
≥ 30	1,00

(*) Interpólese para valores intermedios del número de ensayos, cuando éste exceda 15.

Figura 37. Factores de modificación para la desviación estándar cuando se dispone de menos de 30 ensayos. Tomado de *Manual del concreto estructural*, (p. 134), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

RESISTENCIA ESPECIFICADA Fc (kgf/cm ²) (2)	RELACIÓN AGUA/CEMENTO POR PESO (1)	
	CONCRETO SIN AIRE INCORPORADO	CONCRETO CON AIRE INCORPORADO
150 (3)	0,62	0,51
210	0,52	0,42
250	0,44	0,34
300	0,37	(4)
350	(4)	(4)

Figura 38. Relación agua/cemento permisible cuando no existen datos de ensayos en obra. Tomado de *Manual del concreto estructural*, (p. 135), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

POSIBLE TIPO DE DAÑO	CONDICIONES	α MÁXIMA
Deterioro del concreto Corrosión de las armaduras	Atmósfera común	0,75
	Litoral	0,60
	Alta humedad relativa	0,55
	En contacto con agua no corrosiva	0,50
	En contacto directo con agua marina o por salpicaduras	0,40
	En suelos selenitosos (con yesos)	0,40
	Ambientes industriales	Según el caso
Deterioro por deslavado o permeabilidad	Elementos delgados	0,45
	Concreto en masa*	0,65

Figura 39. Máximos valores de α para distintas condiciones de servicio o ambientales. Tomado de *Manual del concreto estructural*, (p. 139), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

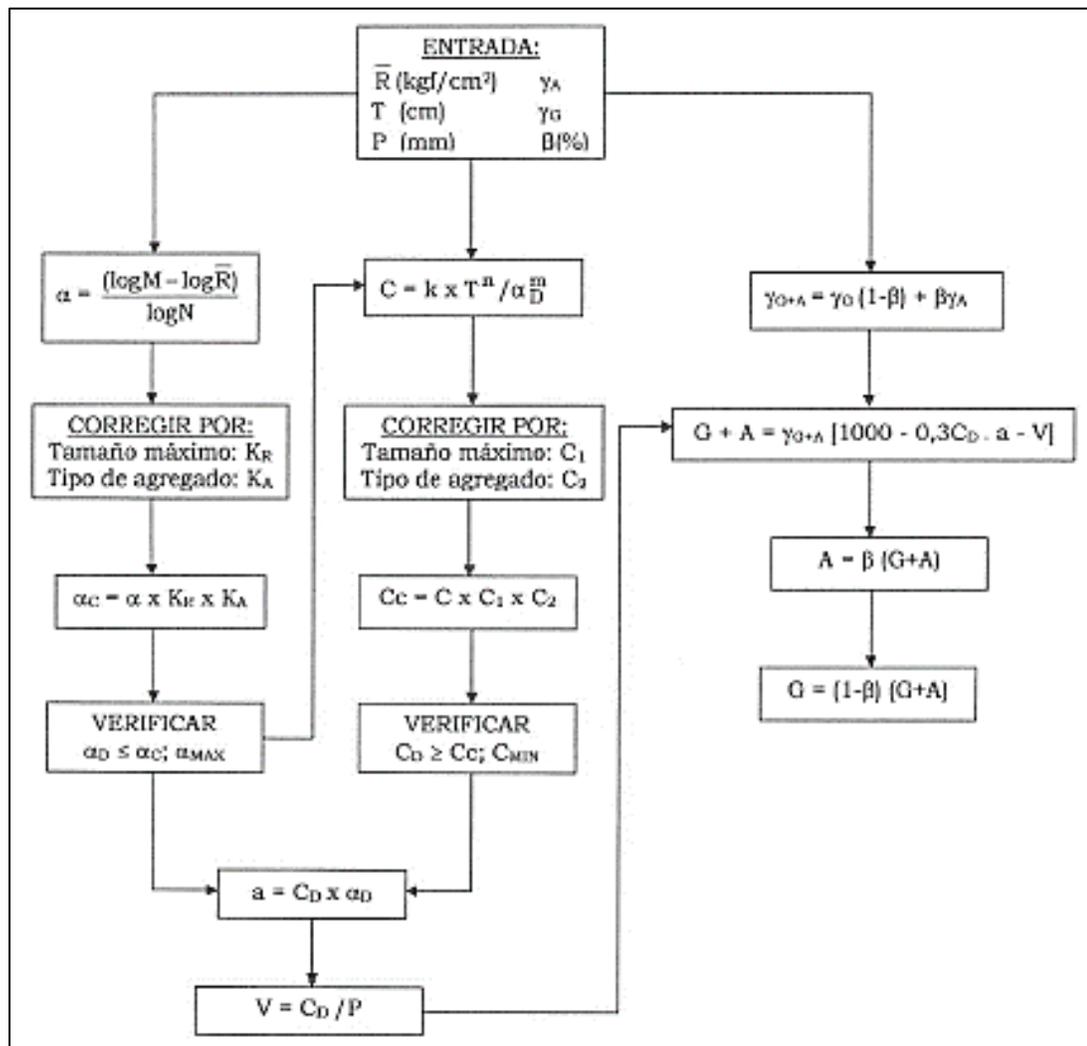


Figura 40. Esquema de los pasos del diseño de mezcla. Tomado de *Manual del concreto estructural*, (p. 146), por Porrero, Ramos, Grases y Velazco, 2012, Venezuela. Derechos reservados por Joaquín Porrero, Carlos Ramos, José Grases y Gilberto Velazco.

ANEXO B

Ensayo de peso unitario



Figura 41. Separación de la muestra de agregado fino para ensayo de peso unitario. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

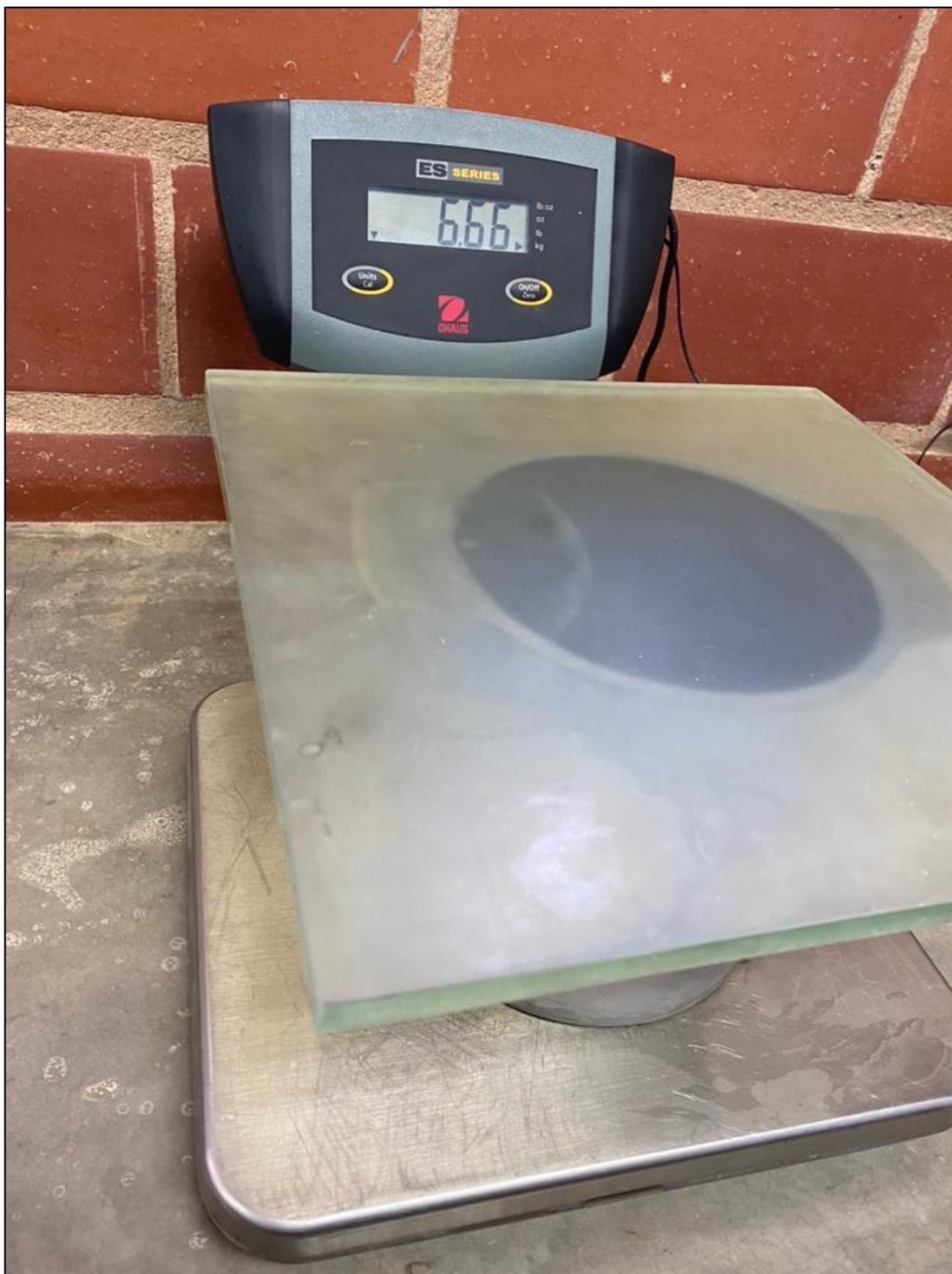


Figura 42. Calibración del recipiente para agregado fino. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 43. Muestra de agregado fino para peso unitario suelto. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 44. Muestra de agregado grueso para peso unitario suelto. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

ANEXO C

Ensayo de Densidad y absorción



Figura 45. Muestra de agregado grueso en cesta. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 46. Muestra de agregado fino para ensayo de densidad y absorción. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

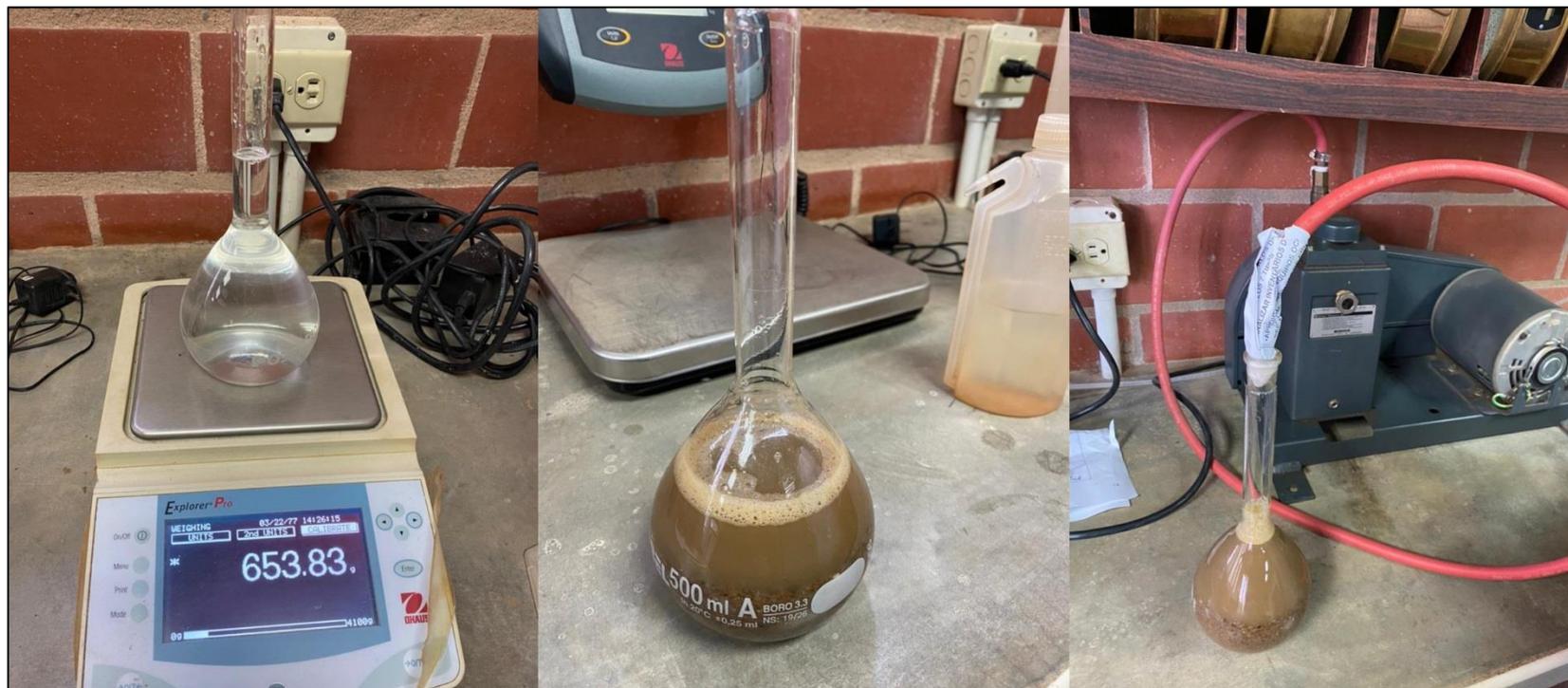


Figura 47. Procedimiento de ensayo de densidad con picnómetro. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 48. Secado de las muestras para obtener la absorción. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

ANEXO D

Elaboración de las mezclas



Figura 49. Transporte de arena al lugar de mezclado. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 50. Transporte de grava al lugar de mezclado. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 51. Agregando el vidrio molido a la mezcla. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 52. Mezclado de los componentes del concreto sin agua. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.



Figura 53. Limpieza de los cilindros. Tomado por Velásquez y Zakhia, 2021, Venezuela. Derechos reservados por autores.

ANEXO E

Tipos de fallas de las probetas

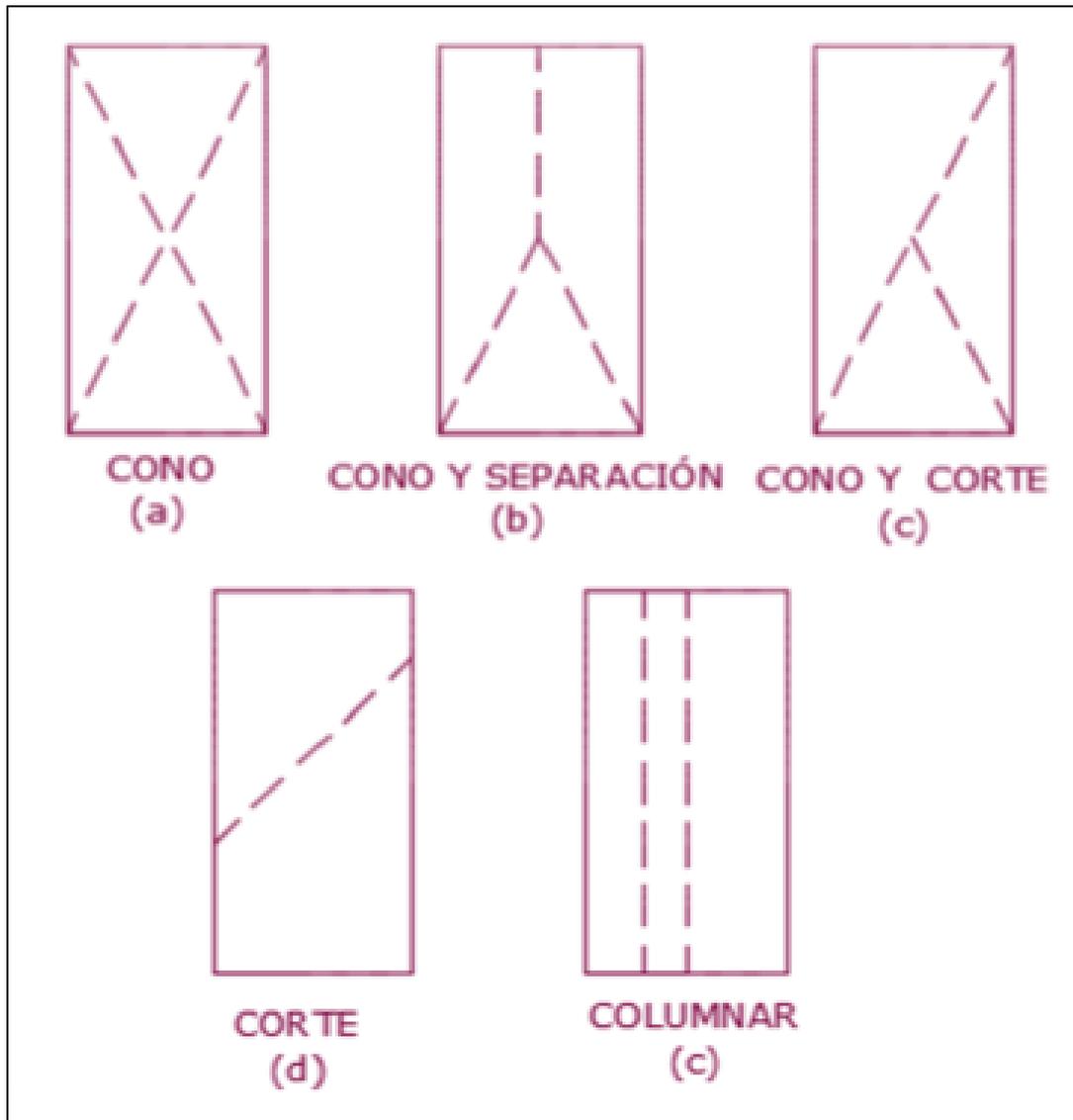


Figura 54. Tipos de fracturas de esfuerzo a compresión. Tomado de *Efectos del vidrio molido en las propiedades físicas y mecánicas del concreto*, Trujillo 2019, (p. 17), por Rodríguez y Rodríguez, 2019, Perú. Derechos reservados para Universidad Nacional de Cajamarca.