

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL  
CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO,  
UTILIZANDO VIDRIO MOLIDO COMO SUSTITUTO  
PARCIAL DEL AGREGADO FINO**

PRESENTADO POR:

**LUIS ALEJANDRO PALACIOS MARTÍNEZ**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO CIVIL**

CIUDAD UNIVERSITARIA, SEPTIEMBRE DE 2019.

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR :**

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

**SECRETARIO GENERAL:**

**MSC. CRISTOBAL HERNÁN RÍOS BENÍTEZ**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**DIRECTOR :**

**ING. JORGE OSWALDO RIVERA FLORES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de graduación previo a la opción al Grado de:  
**INGENIERO CIVIL**

Título :

**DETERMINACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL  
CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO,  
UTILIZANDO VIDRIO MOLIDO COMO SUSTITUTO  
PARCIAL DEL AGREGADO FINO**

Presentado por :

**LUIS ALEJANDRO PALACIOS MARTÍNEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por :

Docentes Asesores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJIA**

**ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA**

**ING. NÉSTOR ENRIQUE CÁRCAMO REYES**

**ING. MARLON EBIEZER VIGIL SANCHEZ**

**SAN SALVADOR, SEPTIEMBRE DE 2019**

Trabajo de graduación aprobado por:

Docentes Asesores :

**INGRA. LESLY EMIDALIA MENDOZA MEJIA**

**ING. JOSÉ MIGUEL LANDAVERDE QUIJADA**

**ING. NÉSTOR ENRIQUE CÁRCAMO REYES**

**ING. MARLON EBIEZER VIGIL SANCHEZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Escoger adecuadamente las palabras para expresar lo que siento al llegar este momento, ha sido todo un reto, lo consideraba algo muy lejano, son tantos los momentos vividos, quiero agradecer a todos los involucrados para que mi sueño culmine haciéndose una realidad:

**A MIS PADRES:** Alma Janethe Martínez y José Víctor Palacios, por ser mi apoyo, mi ejemplo de vida, agradezco a ellos por enseñarme a luchar por mis sueños, por dedicar su amor, tiempo, su paciencia y confianza. Gracias a ellos soy una mejor persona.

**A LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR:** Por hacerme parte de la familia de estudiantes, darme la oportunidad para capacitarme como profesional en la ingeniería, y hacerme una persona de provecho para la sociedad.

**A MIS ASESORES:** Ing. Lesly Emidalia Mendoza Mejía, Ing. José Miguel Landaverde, por dedicar parte de su tiempo y conocimientos para que esta investigación sea una realidad, especialmente quiero agradecer a Ing. Lesly, por ser una profesional ejemplar, una motivación para lograr mis metas, siempre estando pendiente de apoyarme cuando lo necesité, también por su paciencia y su aporte de conocimientos en la Tecnología del Concreto. Mi admiración y respeto hacia ustedes.

**A MIS ASESORES EXTERNOS:** Ing. Néstor Cárcamo, quien a su vez es mi jefe, agradezco su apoyo incondicional, por ayudarme a resolver dudas sobre procedimientos de ensayo, asesorándome para poder solventar, por creer en mi persona y brindarme los permisos para dedicarme al desarrollo de la investigación y por hacerme parte de la familia Suelos y Materiales S. A. de C. V. Ing. Marlon Vigil, por apoyarme con la logística de inicio de esta investigación, ayudando a buscar apoyo externo, por asesorarme y apoyarme a desarrollar algunos ensayos.

**A LA CANTERA SA. DE CV.** Por el apoyo brindado, la donación de los agregados utilizados en esta investigación y el traslado de los mismos, especialmente al Ing. Saúl Cea, quien desinteresadamente apoyo a la realización de este trabajo.

**A LA ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL,** Por permitir el desarrollo de la parte práctica de esta investigación dentro de sus instalaciones y brindarme el apoyo como un hogar al momento de necesitar un lugar para poder trabajar.

**AL PERSONAL DE LABORATORIO,** Ing. Ramón Evelio López, quien me apoyó con la logística de uso de equipos y siempre estar disponible a pesar de haber terminado sus labores diarias. Tec. Carlos Morataya, por estar pendiente y apoyarme cuando necesitaba desarrollar algunos ensayos, suplir pruebas que estaban fuera de mi alcance, por sus consejos en la ejecución de ensayos y por tener esa paciencia que vale oro.

**A MI MEJOR AMIGA,** Lyseth Alemán, quien siempre iba ayudarme de forma desinteresada a realizar algunos procedimientos de ensayo, por soportar mis malos humores y mi exceso de estrés, gracias por escucharme siempre. Te quiero bicha chele.

**A MIS COMPAÑERAS,** Tirza Escobar, por apoyarme en el desarrollo del trabajo de laboratorio y ayudarme siempre que te lo pedí. Evelin Miranda, quien a pesar de estar trabajando en su tesis me apoyó desinteresadamente. También por estar conmigo trabajando hasta que cerraran la escuela de ingeniería civil.

**A DANIEL ALVARADO (Q.E.P.D.),** quien en vida siempre me apoyó y hasta el último momento creíste en mí, agradezco ese último empujón que me diste y me motivaste a seguir a pesar de las circunstancias, eres y serás siempre muy especial para mí.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo de investigación a todas aquellas personas que creyeron en mí y me apoyaron para no rendirme.

**Alma Janethe Martínez**, quien con su amor y paciencia, me inculcó los valores necesarios para trazar mi camino, también por dedicarse a mí a pesar de las adversidades. Eres la mejor madre que pude tener, no te cambiaría por nada ni por nadie, te amo mamá.

**José Víctor Palacios**, Por ser mi pilar, mi ejemplo a seguir, quien siempre está allí para darme un empujoncito cuando lo necesito, por tus consejos y regaños, gracias a ti por guiarme en el buen camino y ayudarme a crecer como persona y profesional. Eres un gran padre y siempre te admiraré, te amo papá.

**Josefina Serrano**, quien con su amor, dedicación y paciencia, estas al pendiente de mí, a pesar que ya soy un adulto siempre me tratas como tu nietecito el más consentido de todos, admiro tu perseverancia, te amo abuelita.

**Daniel Alvarado (Q.E.P.D.)**, con tus locuras siempre me sacabas una sonrisa, quien siempre tenía alguna idea loca para cada fin de semana y así olvidar el estrés del trabajo y la universidad, me haces mucha falta, hasta donde estés... te extrañaré siempre...

**Lyseth Alemán**, por brindarme tu tiempo, confianza y ayudarme a sobrellevar mis problemas, eres una mujer muy especial, parte de mi vida, mi mejor amiga, te amo, bicha chele.

**Ing. Lesly Mendoza**, por ser una profesional que admiro mucho, por hacerme sentir capaz para hacer todo lo que me propongo, usted es una segunda madre para mí; mis respetos, admiración, cariño y sobre todo, gracias por ayudarme y apoyarme siempre...

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>INTRODUCCION .....</b>	<b>1</b>
<b>1. ANTEPROYECTO.....</b>	<b>3</b>
1.1.    Introducción.....	3
1.2.    Antecedentes.....	4
1.3.    Planteamiento del problema.....	7
1.4.    Justificación.....	8
1.5.    Objetivos .....	9
1.5.1.    Objetivo general.....	9
1.5.2.    Objetivos específicos:.....	9
1.6.    Alcances.....	11
1.7.    Limitaciones.....	12
<b>2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS SOBRE EL USO DEL VIDRIO EN LAS MEZCLAS DE CONCRETO</b>	<b>14</b>
2.1.    Introducción.....	14
2.2.    Antecedentes sobre el uso del vidrio en el concreto.....	15
2.2.1.    Empleo como sustituto parcial del agregado grueso.....	15
2.2.2.    Empleo como sustituto parcial del agregado fino .....	17
2.2.3.    Empleo como sustituto parcial del cemento .....	29
2.3.    Ventajas y desventajas del uso de Vidrio Molido en el Concreto .....	48
2.4.    Reacciones Expansivas en el Concreto .....	50
2.4.1.    Reacción Álcali Sílice (ASR) .....	51
2.4.2.    Prevención.....	53
2.5.    Comparación de los cementos ASTM C1157 GU y ASTM C150. ....	56
2.6.    Vidrio.....	59
2.6.1.    Componentes del vidrio .....	61
2.6.2.    Proceso de Fabricación.....	63
2.6.3.    Tipos de Vidrio.....	65
2.6.4.    Características de los tipos de vidrio. ....	67
2.7.    Propiedades Físicas, Mecánicas y Químicas del Vidrio. ....	68

2.7.1.	Propiedades físicas .....	68
2.7.2.	Propiedades mecánicas del vidrio .....	69
2.7.3.	Propiedades químicas del vidrio.....	70
2.8.	Criterios para la selección del vidrio a utilizar en el concreto .....	71
2.9.	Comportamiento esperado en el concreto con adición de vidrio molido. ....	72
2.10.	Reciclaje y Reutilización del Vidrio .....	74
2.10.1.	Ventajas en el Reciclaje del Vidrio.....	74
2.11.	Recomendaciones de Seguridad en el Manejo del Vidrio Triturado.....	75
<b>3.</b>	<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO Y CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES .....</b>	<b>79</b>
3.1.	Introducción .....	79
3.2.	Objetivo de la Metodología de trabajo. ....	80
3.3.	Definición de parámetros fijos y variables en la investigación .....	80
3.3.1.	Parámetros fijos .....	80
3.3.2.	Parámetros variables.....	83
3.4.	Requisitos de los materiales para el concreto. ....	86
3.4.1.	Cemento.....	86
3.4.2.	Agua para concreto .....	87
3.4.3.	Agregado Fino .....	88
3.4.4.	Agregado grueso .....	89
3.5.	Definición de ensayos para concreto en estado fresco y estado endurecido.....	91
3.5.1.	Concreto en estado fresco.....	91
3.5.2.	Concreto en estado endurecido .....	92
3.6.	Cantidad de especímenes de ensayo. ....	94
3.7.	Codificación de especímenes de concreto. ....	95
3.8.	Metodología de trabajo de laboratorio.....	96
3.8.1.	Planificación de trabajo. ....	96
3.8.2.	Molienda y tratamiento del vidrio.....	100
3.8.3.	Diseño y verificación de mezclas de concreto hidráulico de control .....	102
<b>4.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA CONCRETO Y DISEÑO DE MEZCLAS .....</b>	<b>117</b>
4.1.	Introducción .....	117
4.2.	Caracterización de los agregados y vidrio. ....	118

4.2.1.	Agregado grueso .....	118
4.2.2.	Agregado fino .....	123
4.2.3.	Vidrio.....	129
4.2.4.	Combinación Arena – Vidrio (85 % - 15 %). .....	133
4.2.5.	Combinación Arena – Vidrio (80 % - 20 %). .....	136
4.2.6.	Combinación Arena – Vidrio (75 % - 25 %). .....	139
4.2.7.	Comparación del comportamiento de los resultados de Granulometrías combinadas y arena natural .....	142
4.3.	Diseño teórico de mezclas de concreto .....	144
4.3.1.	Parámetros de diseño.....	144
4.3.2.	Diseño de mezclas de concreto. ....	145
<b>5.</b>	<b>EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO Y ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>158</b>
5.1.	Introducción. ....	158
5.2.	Comportamiento del concreto en estado fresco.....	159
5.2.1.	Análisis comparativo del diseño de mezclas.....	159
5.2.2.	Tiempo de Fraguado del Concreto Fresco. ....	171
5.2.3.	Análisis de revenimiento. ....	177
5.2.4.	Comparación de la temperatura del concreto fresco.....	183
5.2.5.	Variación del peso volumétrico del concreto fresco.....	187
5.3.	Comportamiento del concreto en estado Endurecido. ....	192
5.3.1.	Comparación del Peso Volumétrico del Concreto Endurecido. ....	197
5.3.2.	Análisis de resistencia a la compresión. ....	204
5.3.3.	Curvas de tendencia para la comparación de resistencia a la compresión.....	209
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>214</b>
6.1.	Conclusiones. ....	214
6.1.1.	Concreto en Estado Fresco. ....	214
6.1.2.	Concreto en Estado Endurecido. ....	216
6.2.	Recomendaciones. ....	217
<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>		<b>219</b>
1.	Trabajos de Investigación .....	219
2.	Libros de texto citados. ....	221

3.	Páginas web. ....	221
4.	Normativas.....	221
5.	American Concrete Institute (ACI).....	223
6.	Otras Fuentes.....	223

## ÍNDICE DE TABLAS

### Capítulo II

Tabla No. 2-1: Resumen de resultados de investigaciones sobre el empleo de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en la elaboración de mezclas de concreto. ....	18
Tabla No. 2-2: Granulometría de agregado fino.....	20
Tabla No. 2-3: Granulometría de Agregado grueso.....	21
Tabla No. 2-4: Granulometría de vidrio.....	23
Tabla No. 2-5: Dosificación de mezclas de concreto. ....	25
Tabla No. 2-6: Dosificación de mezclas de concreto. ....	26
Tabla No. 2-7: Propiedades físicas del vidrio utilizado en la investigación realizada por la Universidad de Michigan.....	30
Tabla No. 2-8: Dosificación de mezclas de concreto con sustitución de vidrio molido. ....	31
Tabla No. 2-9: Ensayos de laboratorio realizados en la investigación, para determinar las propiedades del concreto con la adición de vidrio molido como sustituto parcial del cemento.	33
Tabla No. 2-10: Definición de reactividad de agregados según la norma ASTM C 1260. ....	42
Tabla No. 2-11: Resumen de las características de mezclas para analizar la reacción álcali - sílice .....	43
Tabla No. 2-12: Dosificación de mezclas y propiedades en estado fresco. ....	47
Tabla No. 2-13: Minerales, rocas y otros materiales potencialmente reactivos con el cemento. ....	54
Tabla No. 2-14: Resumen de características de los cementos tipo I y tipo GU.....	58
Tabla No. 2-15: Composición química de los tipos de vidrio más comunes. ....	66
Tabla No. 2-16: Resumen de características de los tipos de vidrio más comunes.....	67

### Capítulo III

Tabla No. 3-1: Especificación Estándar para Cemento ASTM C1157 tipo GU.....	87
Tabla No. 3-2: Especificaciones para el agregado fino. ....	88
Tabla No. 3-3: Límites granulométricos que establece ASTM C33 para agregado fino. ....	89
Tabla No. 3-4: Especificaciones para el agregado grueso.....	89
Tabla No. 3-5: Especificación de tamaños para agregado grueso. ....	90
Tabla No. 3-6: Lista de ensayos para concreto en estado fresco.....	91
Tabla No. 3-7: Ensayos en concreto endurecido. ....	92
Tabla No. 3-8: Listado de muestras y número de ensayos a realizar.....	94
Tabla No. 3-9: Proceso de codificación de especímenes de concreto. ....	95
Tabla No. 3-10: Selección de revenimiento de acuerdo con la estructura a construir. ....	103
Tabla No. 3-11: Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado .....	105
Tabla No. 3-12: Requisitos de fuerza de compresión promedio requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar. ....	107

Tabla No. 3-13: Modificación para el factor de la desviación estándar cuando se cuenta con menos de 30 ensayos. ....	107
Tabla No. 3-14: Fuerza de compresión promedio cuando no se disponen de datos para establecer la desviación estándar. ....	108
Tabla No. 3-15: Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto. ....	108
Tabla No. 3-16: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto. ....	110

## Capítulo IV

Tabla No. 4-1: Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso. ....	118
Tabla No. 4-2: Masas suelta y varillada del Agregado Grueso. ....	119
Tabla No. 4-3: Límites Granulométricos del Agregado Grueso. ....	120
Tabla No. 4-4: Pesos Retenidos, Agregado Grueso. ....	120
Tabla No. 4-5: Análisis por Tamizado para Agregado Grueso. ....	121
Tabla No. 4-6: Gravedad Específica y Absorción, Agregado Fino. ....	124
Tabla No. 4-7: Peso Volumétrico Suelto del Agregado Fino. ....	125
Tabla No. 4-8: Límites Granulométricos para Agregado Fino. ....	125
Tabla No. 4-9: Pesos Retenidos, Agregado Fino. ....	126
Tabla No. 4-10: Análisis por tamizado, Agregado Fino. ....	127
Tabla No. 4-11: Datos Granulométricos Promedio, Agregado Fino. ....	127
Tabla No. 4-12: Gravedad Específica y Absorción del Vidrio. ....	129
Tabla No. 4-13: Peso volumétrico suelto del Vidrio. ....	130
Tabla No. 4-14: Pesos retenidos de los ensayos granulométricos al Vidrio molido. ....	131
Tabla No. 4-15: Análisis por tamizado, al Vidrio molido. ....	131
Tabla No. 4-16: Pesos retenidos, Combinación Arena-Vidrio (85 % - 15 %). ....	133
Tabla No. 4-17: Análisis por tamizado, Combinación Arena-Vidrio (85 % - 15 %). ....	134
Tabla No. 4-18: Granulometría Promedio, combinación 85 % Arena – 15 % Vidrio. ....	134
Tabla No. 4-19: Pesos retenidos, Combinación Arena-Vidrio (80 % - 20 %). ....	136
Tabla No. 4-20: Análisis por tamizado, Combinación Arena-Vidrio (80 % - 20 %). ....	137
Tabla No. 4-21: Granulometría Promedio, Combinación 80 % Arena – 20 % Vidrio. ....	137
Tabla No. 4-22: Pesos retenidos, Combinación Arena-Vidrio (75 % - 25 %). ....	139
Tabla No. 4-23: Análisis por tamizado, Combinación Arena-Vidrio (75 % - 25 %). ....	140
Tabla No. 4-24: Granulometría Promedio, Combinación 75 % Arena – 25 % Vidrio. ....	140
Tabla No. 4-25: Resultados Granulométricos Promedio de arena y combinaciones de vidrio molido y arena. ....	142
Tabla No. 4-26: Parámetros de diseño del Concreto y Propiedades del vidrio y combinaciones de agregado fino y vidrio. ....	144
Tabla No. 4-27: Agua de Mezclado y cantidad de Aire Atrapado. ....	146
Tabla No. 4-28: Resistencia Requerida para Diseño de Concreto. ....	146
Tabla No. 4-29: Relación entre $f'_{cr}$ y la relación A/C. ....	147
Tabla No. 4-30: Volumen de agregado grueso por metro cubico de concreto. ....	148

Tabla No. 4-31: Cantidad de materiales para 1m <sup>3</sup> .....	150
Tabla No. 4-32: Diseño de concreto para 1m <sup>3</sup> .....	151
Tabla No. 4-33: Resultados de revenimiento y resistencia para definición de Mezcla de Referencia (MP) .....	152
Tabla No. 4-34: Ajuste por humedad y absorción. ....	153
Tabla No. 4-35: Mezcla de Concreto (1 m <sup>3</sup> ) corregida por humedad y absorción. ....	154
Tabla No. 4-36: Reducción a mezcla de Laboratorio .....	155
Tabla No. 4-37: Dosificación de Mezclas 1m <sup>3</sup> (peso seco). ....	156
Tabla No. 4-38: Dosificación de Mezclas, a tamaño de laboratorio 0.0854m <sup>3</sup> (Peso seco). .....	156

## Capítulo V

Tabla No. 5-1: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP. ....	160
Tabla No. 5-2: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP No 1 .....	160
Tabla No. 5-3: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP No 2 .....	160
Tabla No. 5-4: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP No 3 .....	161
Tabla No. 5-5: Dosificación de Mezcla con 15 % Sustitución Parcial de vidrio, MV15%. ....	162
Tabla No. 5-6: Dosificación de Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV15% No 1 .....	163
Tabla No. 5-7: Dosificación de Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV15% No 2 .....	163
Tabla No. 5-8: Dosificación de Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV15% No 3 .....	163
Tabla No. 5-9: Dosificación de Mezcla con 20 % Sustitución Parcial de vidrio, MV20%. ....	165
Tabla No. 5-10: Dosificación de Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio, MV20% No 1. ....	165
Tabla No. 5-11: Dosificación de Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio, MV20% No 2. ....	166
Tabla No. 5-12: Dosificación de Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio, MV20% No 3. ....	166
Tabla No. 5-13: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial Agregado Fino por Vidrio, MV25%. ....	168
Tabla No. 5-14: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV25% No 1 .....	168
Tabla No. 5-15: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV25% No 2 .....	169
Tabla No. 5-16: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV25% No 3. ....	169
Tabla No. 5-17: Tiempo de Fraguado para la Mezcla de Referencia (MP).....	172
Tabla No. 5-18: Tiempo de Fraguado para Mezcla con 15% de Sustitución parcial de agregado fino por vidrio (MV15%).....	173

Tabla No. 5-19: Tiempo de fraguado para Mezcla con 20% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV20%) .....	174
Tabla No. 5-20: Tiempo de Fraguado para Mezcla con 25% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%) .....	175
Tabla No. 5-21: Resultados Comparativos del Tiempo de Fraguado. ....	176
Tabla No. 5-22: Resultados de ensayo de Revenimiento, Mezcla de Referencia, MP .....	178
Tabla No. 5-23: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla 15% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV15%).....	179
Tabla No. 5-24: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 20 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV20%).....	180
Tabla No. 5-25: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 25 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%).....	181
Tabla No. 5-26: Resumen de resultados del ensayo de Revenimiento.....	182
Tabla No. 5-27: Resultados del ensayo de Temperatura del Concreto Fresco a las diferentes mezclas. ....	184
Tabla No. 5-28: Resultados promedio para la Temperatura del concreto fresco. ....	185
Tabla No. 5-29: Resultados de los ensayos de Peso Volumétrico, Rendimiento y Contenido de Aire (gravimétrico). ....	187
Tabla No. 5-30: Resultados promedios del Peso volumétrico del concreto fresco. ....	190
Tabla No. 5-31: Resultados de los Ensayos a la Compresión de Mezcla de Referencia (MP) ....	193
Tabla No. 5-32: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión, Mezcla MV15% .....	194
Tabla No. 5-33: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión, Mezcla MV20% .....	195
Tabla No. 5-34: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión, Mezcla MV25%. ....	196
Tabla No. 5-35: Peso Volumétrico Promedio y Desviación Estándar .....	197
Tabla No. 5-36: Resultados de resistencia a la compresión promedio. ....	209

## ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo II

Figura No. 2-1: Curva Granulométrica del agregado fino utilizado en la investigación. ....	20
Figura No. 2-2: Curva Granulometría del agregado grueso .....	22
Figura No. 2-3: Curva granulométrica realizada al vidrio .....	23
Figura No. 2-4: Muestra de vidrio triturado que se usó en la investigación. ....	24
Figura No. 2-5: Resultados de ensayo a compresión.....	25
Figura No. 2-6: Resultados de Ensayo de Revenimiento .....	27
Figura No. 2-7: Resultados de ensayo de resistencia a la compresión: (a) Edad 7 días. (b) Edad 28 días.....	28
Figura No. 2-8 Construcción de tramo de prueba (A) Colado de losa de prueba, (B) Acabado de losa de prueba .....	32
Figura No. 2-9: Tramo de prueba (A) Proceso de extracción de núcleos ASTM C42, (B) Obtención de Muestras. ....	33
Figura No. 2-10: Resultados obtenidos para el ensayo de compresión de cilindros según ASTM C-39, comparando el comportamiento de las diferentes mezclas. ....	35
Figura No. 2-11: Resultados obtenidos en el ensayo a flexión según ASTM C-78 .....	36
Figura No. 2-12: Resultados de ensayos a la compresión para núcleos extraídos del pavimento ASTM C39.....	37
Figura No. 2-13: Resultados de ensayos de permeabilidad de cloruros para núcleos extraídos del tramo de prueba a la edad de 90 y 450 días. ....	38
Figura No. 2-14 Resultados de ensayos de absorción de agua para núcleos extraídos del pavimento a la edad de 450 días, ASTM C1585 .....	39
Figura No. 2-15 Resultados de ensayos de abrasión para núcleos extraídos del pavimento a la edad de 450 días, ASTM C944.....	40
Figura No. 2-16: Resultados de la evaluación de la expansión de concreto usando agregado potencialmente reactivo al álcali del cemento .....	44
Figura No. 2-17: Resultados de la evaluación de la expansión de concreto usando agregado poco reactivo al álcali del cemento .....	45
Figura No. 2-18: Resultados de la evaluación de la expansión de concreto usando agregado reactivo al álcali del cemento.....	46
Figura No. 2-19: Resultado del ensayo a compresión para una mezcla de referencia y una mezcla con una sustitución de cemento por 20% de vidrio molido .....	47
Figura No. 2-20: Efectos de la reacción álcali sílice en un muro de concreto .....	51
Figura No. 2-21 Muestra de concreto afectada por la reacción álcali sílice, tratada con acetato de uranil.....	53
Figura No. 2-22: Muestra de concreto frente a luz UV, la presencia de gel expansivo producto de ASR es revelada por el acetato de uranil.....	53
Figura No. 2-23: Diagrama ternario, composición de algunos materiales utilizados en la industria de vidrio y el cemento.....	56

Figura No. 2-24: Diferencia entre el cristal de sílice y el vidrio (A) Cristal organizado de Sílice, (B) Sílice presente en el vidrio. ....	60
Figura No. 2-25: Proceso de Fabricación del Vidrio.....	64
Figura No. 2-26: Expansión en barras de mortero con un 10 % de agregado de vidrio, de acuerdo al tamaño de partícula y color del vidrio.....	72

### Capítulo III

Figura No. 3-1: Esquema secuencial de realización de ensayos en el concreto. ....	93
Figura No. 3-2: Lógica de selección de materiales.....	99

### Capítulo IV

Figura No. 4-1: Curva Granulométrica del Agregado Grueso. ....	122
Figura No. 4-2: Impurezas Orgánicas del Agregado Fino.....	123
Figura No. 4-3: Curvas Granulométricas, Agregado Fino.....	128
Figura No. 4-4: Curvas granulométricas del vidrio molido. ....	132
Figura No. 4-5: Curva Granulométrica, Arena-Vidrio (85 % - 15 %). ....	135
Figura No. 4-6: Curva Granulométrica, Arena-Vidrio (80 % - 20 %). ....	138
Figura No. 4-7: Curva Granulométrica, Arena-Vidrio (75 % - 25 %). ....	141
Figura No. 4-8: Comparación granulométrica del agregado fino Promedio y Combinaciones Arena-Vidrio.....	143

### Capítulo V

Figura No. 5-1: Dosificación de Materiales por peso, Mezcla de Referencia (MP) .....	161
Figura No. 5-2: Dosificación de Materiales por peso, Mezcla 15 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV15%).....	164
Figura No. 5-3: Dosificación de Materiales por peso, para Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio (MV20%).....	167
Figura No. 5-4: Dosificación de Materiales por peso, para Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%) .....	170
Figura No. 5-5: Tiempos de Fraguado para Mezcla de Referencia (MP).....	172
Figura No. 5-6: Tiempos de Fraguado para Mezcla con 15% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV15%) .....	173
Figura No. 5-7: Tiempo de fraguado, para Mezcla con 20% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV20%) .....	174
Figura No. 5-8: Tiempos de Fraguado para Mezcla con 25% de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%).....	175
Figura No. 5-9: Resultados del ensayo de Revenimiento Mezcla de Referencia MP .....	178
Figura No. 5-10: Resultados del ensayo de Revenimiento,, Mezcla con 15 % de Sustitución, Parcial de Agregado Fino por Vidrio molido.....	179

Figura No. 5-11: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 20 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio. ....	180
Figura No. 5-12: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 25 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio .....	181
Figura No. 5-13: Comparación de resultados del ensayo de Revenimiento promedio entre mezclas de concreto. ....	182
Figura No. 5-14: Gráfico comparativo de la temperatura para las distintas mezclas. ....	184
Figura No. 5-15: Resultados de temperatura de concreto fresco, promedio .....	186
Figura No. 5-16: Resultados del ensayo de peso volumétrico del concreto fresco. ....	188
Figura No. 5-17: Variación del Peso Volumétrico del Concreto Fresco Promedio.....	190
Figura No. 5-18: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla de Referencia (MP). ....	198
Figura No. 5-19: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla MV15%. ...	199
Figura No. 5-20: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla MV20% ....	200
Figura No. 5-21: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla MV25% ....	201
Figura No. 5-22: Carta de Control de Resistencias, Mezcla de Referencia. ....	205
Figura No. 5-23: Carta de Control de Resistencias, MV15%. ....	206
Figura No. 5-24: Carta de Control de Resistencias, MV20% .....	207
Figura No. 5-25: Carta de Control de Resistencias, MV25%. ....	208
Figura No. 5-26: Curvas de tendencia para la resistencia del concreto.....	210

## **INTRODUCCION**

El presente trabajo de grado, se realiza con el propósito de DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO, UTILIZANDO VIDRIO MOLIDO COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL AGREGADO FINO; para tales fines, la investigación se divide en cuatro etapas, detalladas a continuación:

En la primera se definen todos aquellos antecedentes sobre el uso del vidrio en las mezclas de concreto, aportando los criterios necesarios para la selección de vidrio a utilizar. En la segunda etapa, se desglosa la metodología para el desarrollo de la investigación, definiendo los parámetros que deberán cumplir los materiales a utilizar, también define los criterios a tomar en cuenta para la selección adecuada de los materiales. En la tercer etapa, se realizan las caracterizaciones de los agregados para utilizar en el diseño de mezclas, también, define la mezcla de control y las mezclas con las distintas sustituciones de agregado fino por vidrio molido. La cuarta etapa, evaluará las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, con el fin de comparar cada una de estas respecto a la mezcla de referencia.

Finalmente se realiza el análisis de resultados y las respectivas conclusiones de la investigación.

# Capítulo I

## **ANTEPROYECTO.**

### **1.1. Introducción.**

El concreto es básicamente una mezcla entre dos componentes: pasta y agregados. La pasta, compuesta de cemento y agua, esta se encarga de unir los agregados, normalmente arena y grava, creando así una masa similar a la de una roca. Esto ocurre por el endurecimiento de la pasta en consecuencia de la reacción química entre el cemento y el agua. Si bien se desea modificar las propiedades del concreto para que este tenga un mejor comportamiento mecánico, se deben establecer técnicas que ayuden a mejorar dichas propiedades, por lo tanto, el estudio de la tecnología del concreto nos ayuda a poder adicionar materiales no convencionales a las mezclas, determinando así su comportamiento en estado fresco y posteriormente en estado endurecido.

La técnica de adición del vidrio molido a una mezcla de concreto, básicamente consiste en sustituir dicho material de manera parcial por uno de los componentes que conforman la masa de la mezcla, esta modificación se realiza por dos razones: la primera es innovar en el campo de la ingeniería adicionando materiales que son producto del reciclado y la segunda es conservar los bancos de los materiales que generalmente se utilizan en el concreto; por tal razón, el objeto de estudio de esta investigación estará ligado a la determinación de la cantidad de vidrio ideal que puede sustituirse parcialmente por los agregados finos de la mezcla, definiendo así, el comportamiento en estado fresco y endurecido (comportamiento mecánico del concreto).

## **1.2. Antecedentes.**

En nuestro país, el crecimiento poblacional incrementa la necesidad de contar con espacios construidos para nuestro diario vivir, es por ello, que la solución viable es construir edificios de mediana a gran altura y otros tipos de obras, los cuales satisfacen esta necesidad a través de la relación superficie útil y área del terreno; sin embargo, esto conlleva a contar con materiales de construcción que deben cumplir con características de buen desempeño, durabilidad y bajo costo.

El concreto es uno de los principales materiales utilizados en la industria de la construcción de elementos estructurales, por lo que la demanda de sus componentes es creciente conforme al crecimiento de la población, ante dichos requerimientos, el concreto ha ido evolucionando a tal grado de poder mejorar sus características mediante el uso de adiciones al cemento y sustituciones a los agregados, tales como; puzolanas, aditivos químicos, materias producto del reciclado, entre otras.

Las adiciones antes mencionadas, mejoran cuantiosamente las propiedades de desempeño y durabilidad, sin embargo, en la búsqueda de modificar el diseño del concreto, se trata de innovar utilizando componentes que posean características similares a las del cemento, sin afectar de manera negativa el comportamiento final del concreto; con el uso de materiales reciclados se reduce la contaminación del medio ambiente, se prolonga la vida útil y la conservación de los bancos de caliza.

A lo largo de la historia, en la búsqueda del mejoramiento de las características del concreto, se ha procedido a utilizar muchas técnicas que modifiquen su comportamiento; adiciones que ayuden a diversificar las propiedades del concreto en estado frasco y en estado endurecido; sin embargo, muchas de estas técnicas, tienden a incrementar el costo del mismo.

La búsqueda de adiciones ha llevado a utilizar vidrio molido como una de las técnicas cuyas investigaciones datan de 1970, donde el principal problema que se tuvo con la colocación de este material al concreto fue la reacción Álcali-Sílice, la cual era una barrera para la época; esta reacción suele producirse en el concreto como consecuencia de la reactividad existente entre sus materiales componentes (Cemento Portland, Agua, Agregados, Adiciones minerales y Aditivos), principalmente por la presencia de sílice amorfo (no-cristalino). Al combinarse con la pasta de cemento, de naturaleza alcalina, en presencia de humedad, esta última ataca al sílice presente en los agregados formando un gel silicato-alcalino viscoso, que provoca una expansión no uniforme en el elemento de concreto, lo que finalmente produce grietas en la superficie del mismo. Dado que esta reacción se produce en presencia de humedad, es importante controlarla especialmente en aquellas estructuras que prestarán servicio de forma permanente, en ambientes húmedos o bajo el agua.

Este es un problema que se manifiesta a largo plazo, pudiendo pasar incluso años antes que sea evidente el daño provocado por este fenómeno. La complejidad de esta reacción hace que sea muy difícil establecer cuando un agregado es potencialmente reactivo o no. Estudios en la materia han determinado que a medida se usan partículas de vidrio más fino (menor a 0.15mm, Malla No 100 según ASTM) se reduce y hasta logra controlarse la reacción Álcali-Sílice.

En consistencia con lo anterior, es primordial controlar las expansiones del concreto, producto de la reacción Álcali-Sílice, principalmente por un tema de durabilidad del concreto estructural.

Un estudio hecho por la Universidad de Michigan durante el año 2011, rompió la brecha sobre las investigaciones realizadas con anterioridad, demostrando que un concreto al cual se le adicione vidrio molido puede comportarse de forma tal que su desempeño y durabilidad se vean modificadas de manera positiva, teniendo así resultados que con una dosificación adecuada de vidrio molido y una finura definida, este concreto aumentaba su resistencia y durabilidad, por lo que en Estados Unidos se le ve como posible producto, con el cual se puede reducir la cantidad de cemento utilizado en las mezclas y como una puerta para el reciclado del vidrio que se usaría en el diseño del mismo.

Teniendo definido este panorama, la propuesta de diseño de este tipo de concreto como un producto en nuestro medio, tiene como finalidad reciclar y reducir los desechos de vidrio, además de reducir significativamente el material cementante usado en el diseño del concreto; estos serán algunos de los beneficios que se esperan obtener a partir del desarrollo de esta investigación.

### **1.3. Planteamiento del problema.**

La creciente demanda de desempeño y durabilidad de las estructuras de concreto obliga a la utilización de técnicas de mejoramiento que puedan satisfacer dichos requisitos. En este sentido, se observa la necesidad de disminuir el costo pero manteniendo la calidad utilizando adiciones, ejemplo de ellos es el empleo que se ha tenido de vidrio molido como sustituto parcial de la arena, el cual reduciría de manera controlada la cantidad de arena e indirectamente incrementará la resistencia del concreto debido a sus propiedades silíceas.

La problemática está ligada principalmente a tres aspectos fundamentales dentro de la ingeniería y el desarrollo tecnológico, la primera es la innovación en cuanto a la reutilización de materiales reciclados (vidrio) en las mezclas de concreto, la segunda es la reducción de costos asociados a la utilización y producción de materias primas dentro de la industria de la construcción y la tercera es el cuidado del medio ambiente vinculado a la reducción de desechos sólidos a nivel domiciliario e industrial.

En la presente investigación se pretende identificar la influencia que tiene realizar mezclas de concreto con vidrio molido en sustitución parcial de agregado fino, en diferentes proporciones para determinar el comportamiento del concreto en estado fresco y en estado endurecido, con la finalidad de identificar las ventajas y desventajas que se presentan, y a partir de los resultados que se obtengan, se propondrá como una alternativa de uso para la industria de la construcción en nuestro medio.

#### **1.4. Justificación.**

El concreto es uno de los materias fundamentales en la industria de la construcción, que cada vez presenta una mayor demanda en comparación a los demás materiales de construcción, esta creciente demanda, lleva a tratar de optimizar los recursos que se utilizan para su elaboración; en la actualidad con el objetivo de minimizar el impacto ambiental que conlleva la elaboración de las materias primas del concreto, se han tratado de investigar el efecto que tiene la utilización de algunos materiales(adiciones), que por sus propiedades pueden ser utilizadas en la elaboración del concreto, ejemplo de ello es el vidrio, que por su composición química puede ser empleado con ese fin, sumado al hecho, que es uno de los materiales que más se desecha y puede reutilizarse a nivel mundial, su empleo contribuiría a la reducción de desechos sólidos que van a parar a los basureros del planeta.

La investigación sobre el comportamiento de las mezclas de concreto con sustitución parcial del agregado fino por vidrio molido, tendría varios beneficios

entre las que se pueden mencionar: el primero, reutilización del vidrio producto de desecho y así reducir las cantidades que llegan a los botaderos cada año, la segunda implica la reducción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) debido al proceso de producción del cemento y de manera directa la conservación de los yacimientos de caliza, y la tercera no menos importante está ligada a la conservación y reducción del uso de los bancos de arena natural, los cuales se encuentran en un punto crítico debido a su alta demanda y su explotación.

Con base a lo anterior, se realizará una investigación en la que se determinaría la influencia que se tiene al utilizar vidrio molido, como sustituto parcial del agregado fino, y su efecto en el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido, determinando como se modifican las características del concreto, y a partir de los resultados obtenidos determinar si sería viable la utilización del vidrio en la elaboración del concreto en nuestro medio.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo general.**

- Determinar el comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido, utilizando vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino.

### **1.5.2. Objetivos específicos:**

- Investigar los fundamentos teóricos relacionados sobre el uso de vidrio molido en las mezclas de concreto.
- Determinar las características que deberá cumplir el vidrio molido que se utilizará en las mezclas de concreto
- Diseñar una mezcla de concreto sin la utilización de vidrio, la cual servirá

como parámetro de comparación para los concretos donde se emplee vidrio molido en sustitución parcial de agregado fino.

- Diseñar mezclas de concreto hidráulico, considerando la combinación de arena y vidrio, manteniendo fijo el tipo de cemento, cantidad de cemento, relación agua/cemento y agregado grueso.
- Determinar las propiedades del concreto en estado fresco por medio de los ensayos de revenimiento, temperatura, contenido de aire y peso volumétrico, para cada uno de los diseños realizados.
- Determinar las propiedades del concreto en estado endurecido como son: la resistencia a la compresión a la edad de 7, 28 y 56 días, pesos volumétricos a todos los especímenes para cada uno de los diseños realizados.
- Analizar e interpretar el comportamiento del concreto, a través de los resultados de los ensayos realizados a las diferentes mezclas, en estado fresco y endurecido, tomando como referencia la mezcla sin la adición de vidrio
- Trazar curvas de tendencia entre la mezcla de referencia y las distintas mezclas con sustitución parcial de vidrio molido para analizar, cuál es la proporción de vidrio que mejora la resistencia a compresión de una mezcla de concreto.

## **1.6. Alcances.**

En esta investigación se determinará la influencia del uso de vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino en las mezclas de concreto.

- Para este estudio se utilizará cemento bajo la norma ASTM C 1157 de uso general, por su baja reactividad álcali agregado y menor calor de hidratación comparado con un cemento puro.
- El análisis completo constará de una mezcla patrón, la cual será comparada con el mismo diseño pero con sustitución parcial de vidrio molido en 3 proporciones distintas (15, 20 y 25%) del peso del agregado fino.
- Se definirán las características del concreto fresco: trabajabilidad, peso volumétrico, y temperatura para todas las mezclas.
- 
- Se determinará el tiempo de fraguado únicamente para 1 bachada de cada mezcla de comparación. Por lo que se realizarán 4 ensayos de este tipo para toda la investigación.
- Se obtendrá la resistencia a la compresión de los especímenes de ensayo a los 7, 28 y 56 días.
- Se comparará la resistencia a la compresión entre las mezclas de concreto con adición de vidrio molido y la mezcla de referencia, para definir la cantidad vidrio que mejores resultados de resistencia obtiene.

El vidrio molido que se utilizará tendrá las siguientes características:

- Al menos el 50% del vidrio molido deberá pasar la malla #50
- Únicamente se describirán las propiedades físicas y químicas del vidrio.

### **1.7. Limitaciones.**

- Debido a la amplitud del tema, únicamente se desarrollarán ensayos a la compresión en muestras de concreto, ya que el tiempo con el que se cuenta es muy limitado.
- La investigación se realizará variando únicamente el contenido de agregado fino de las mezclas, considerando constantes todos los otros componentes, dejando precedentes para la investigación acerca del tema donde se considere variar cualquiera de los otros componentes.
- El vidrio utilizado en esta investigación, será procedente de botellas producto del reciclado, se limitará a usar únicamente botellas de vidrio color verde, ya que según investigaciones previas, este es el color natural del vidrio y esto evita reacciones que pueda darse con el cemento, por algún otro proceso que se requiera al modificar el color, características y tipo de vidrio.
- El estudio comprenderá únicamente 1 ensayo de tiempos de fraguado para cada tipo de concreto preparado, considerando que este no es un ensayo que presente muchas variaciones si se mantienen las condiciones de los materiales y el procedimiento de elaboración de mezclas.

# Capítulo II

# **ANTECEDENTES HISTÓRICOS SOBRE EL USO DEL VIDRIO EN LAS MEZCLAS DE CONCRETO**

## **2.1. Introducción.**

El presente capítulo tiene la finalidad de describir investigaciones realizadas, respecto a la influencia que tiene el uso de vidrio molido en las propiedades de las mezclas de concreto hidráulico en estado fresco y endurecido. Así como también, de cómo se debe llevar a cabo el desarrollo de la investigación, tomando en cuenta los parámetros definidos en investigaciones anteriores, y que sirva como punto de partida para determinar la metodología que se debe usar en el trabajo de investigación.

Se hará una descripción general de los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, en las que se ha tratado el tema de mezclas de concreto cuando se les ha introducido vidrio molido, se definirá el vidrio como tal, describiendo las propiedades físicas, mecánicas y químicas necesarias para el uso dentro del concreto hidráulico. Una vez definidas todas estas propiedades, se determinarán, los criterios de selección de vidrio a utilizar, recomendaciones de seguridad en el manejo y uso del vidrio, y también la importancia de su reciclado.

## **2.2. Antecedentes sobre el uso del vidrio en el concreto.**

La incorporación del vidrio en la elaboración de concreto es posible debido a que el vidrio posee grandes proporciones de sílice y de calcio; dichos elementos se encuentran presente en las materias primas de los cementos o de los compuestos puzolánico, así como también comparte características con los agregados. Además, provee una solución a largo plazo para la disposición final de los desechos de vidrio, los cuales, no se degradan por efectos del medio ambiente, debido sus propiedades químicas.

Existen diferentes formas en que se ha empleado el vidrio en el concreto: como sustituto parcial del agregado grueso, fino o del cemento, a continuación, se realizar una breve descripción de los resultados obtenidos, a partir del estudio de varias investigaciones sobre el tema.

### **2.2.1. Empleo como sustituto parcial del agregado grueso.**

A continuación, se explica el efecto que tiene el uso del vidrio molido como sustituto parcial del agregado grueso, en propiedades del concreto, tanto en estado fresco como endurecido:

- Efecto en la trabajabilidad.

Los usos del vidrio en la industria de la construcción, como agregado grueso es el menos recomendable, sin embargo, se puede utilizar en pequeñas cantidades para algún acabado arquitectónico. Esto debido a que su naturaleza plana y alargada afecta la trabajabilidad (para agregado grueso es recomendable que se

tenga una superficie rugosa), lo que genera uniones débiles entre el agregado y la pasta de cemento disminuyendo la resistencia a la compresión; además el manejo se hace más difícil pues se requiere Equipo de Protección Personal (EPP) en todo momento por el riesgo a cortaduras (Vijayakumar, Vishaliny, & Govindarajulu, 2013).

- Reacción álcali agregado (Alcali sílice).

Es necesario tomar en cuenta, que las mezclas de concreto usando vidrio como sustituto parcial del agregado grueso, no se pueden realizar sin tomar en cuenta reacciones negativas, que puede experimentar entre los agregados y los álcalis presentes en el cemento, específicamente la reacción álcali-sílice, por el hecho de que el vidrio posee un alto contenido de sílice, corriendo el riesgo que dichas reacciones sean mayores, por lo que Federico & Chidiac (2009) citan un estudio donde se afirma que el vidrio de desecho como agregado grueso únicamente se debe emplear si se utiliza **cemento de baja reactividad o si se agregan grandes porcentajes de puzolanas.**

- Efecto en la resistencia.

Los efectos en la resistencia del concreto al utilizar vidrio reciclado fueron estudiados por muchos investigadores del área, incluyendo Schmidt and Sain (1963), Johnston (1974), Crais Polley (1998), Zdenek (2000), Xie and Xiang (2003), Neues Zsuzsanna (2006), Multon (2008); sus resultados indicaban que el uso de residuos de vidrio en el concreto generalmente reducía la resistencia

del mismo, esta reducción es consecuencia del sílice amorfo contenido en el vidrio.

- Efecto en la durabilidad.

Estos estudios fallaron debido a la interacción de la sílice con la pasta de cemento que es alcalina, generando expansiones en el concreto que provocaban agrietamientos en el mismo con el pasar de los años, lo que implicaba pérdidas de seguridad estructural en las obras, esta fue la principal barrera para la época en cuanto a la utilización de vidrio molido dentro de las mezclas de concreto.

### **2.2.2. Empleo como sustituto parcial del agregado fino<sup>1</sup>**

El vidrio como agregado fino es mayormente recomendado por los investigadores, pues no produce cambios negativos notables en las propiedades del concreto, tiende a aumentar la resistencia a la compresión, especialmente a largo plazo, mejora las propiedades térmicas del concreto, no afecta la durabilidad del concreto, además si el vidrio es molido de manera fina, (al menos el 50% del vidrio molido pase la malla No 50 (297  $\mu\text{m}$ )), éste no contribuye a la reacción álcali sílice (Shi & Zheng, 2007). Sin embargo, la característica que mayormente se ve afectada por la adición de vidrio es la trabajabilidad, esta última se puede mejorar agregando más agua a la mezcla (Ismail & Al-Hashmi, 2009; Jani & Hogland, 2014).

---

<sup>1</sup> Agregado fino: nombre que se le da a los granos de material pétreo con un diámetro menor a 4.760 mm, o que pasa el tamiz #4 (4.760 mm).

En la Tabla No. 2-1 Se puede revisar de forma resumida, los resultados de las investigaciones realizadas empleando vidrio como sustituto parcial del agregado fino.

*Tabla No. 2-1: Resumen de resultados de investigaciones sobre el empleo de vidrio como sustituto parcial del agregado fino en la elaboración de mezclas de concreto.*

<b>Autor(es)</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Resultados</b>
<b>De Castro &amp; de Brito (2013).</b>	Utilizó vidrio de ventanas de edificaciones y carros. Utilizó cemento CEM II A-L 42.5R (Cemento Portland con caliza, de alta resistencia Inicial)	No especifican los resultados, solo que a una proporción de 20 - 80 vidrio y arena la mezcla obtuvo una resistencia a la compresión de 99.15 % de la mezcla de referencia a los 28 días.
<b>Emam Ali &amp; Al-Tersawy (2012).</b>	Utilizó cemento CEM I 42.5N (Cemento Tipo I, de resistencia normal). Realizaron pruebas a distintas proporciones de agregado fino y variando la cantidad de cemento utilizado	A una proporción del 50 – 50 obtuvieron un valor de resistencia a la compresión de 363 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Ismail &amp; Al-Hashmi (2009).</b>	El vidrio utilizado fue una mezcla de vidrio de botellas con vidrio plano incoloro. Se utilizó cemento Tipo I. Realizó sustituciones del agregado fino por vidrio en proporciones de 10, 15 y 20 %.	Para la proporción de sustitución del 20 % del agregado la resistencia a la compresión obtenida fue de 468 kg/cm <sup>2</sup> a los 28 días.
<b>Peñafiel (2016).</b>	Usó un cemento Tipo I, y vidrio proveniente del reciclaje botellas. Sustituyo el agregado fino por vidrio molido en los siguientes porcentajes: 10 %, 20 %, 30 % y el 40 %	Para una mezcla de concreto con una resistencia de diseño de 210 kg/cm <sup>2</sup> y una relación de 60 % de arena y 40 % vidrio se obtuvo una resistencia a 28 días de 234.76 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Shayan (2002)</b>	Se estudia cómo cambia la reactividad álcali – sílice en mezclas de concreto al agregarle vidrio de diferentes tamaños: agregado grueso de vidrio (12 mm – 4.75 mm), agregado fino (4.75 mm – 0.15 mm) y polvo de vidrio (<10 µm). No se especifica el tipo de cemento.	En las mezclas donde se utilizó vidrio de tamaños entre 0.3 mm 0.15 mm y <10 µm, fue un catalizador de la reacción álcali – sílice.
<b>Rojas (2015)</b>	Se utilizó cemento con escoria de alto horno y puzolana que lo hacen de tipo MS (MR) (R), se sustituyó el agregado fino por un 2 % de vidrio molido, para un concreto con una resistencia de 210 kg/cm <sup>2</sup> a 28 días	No se observaron mejora en la resistencia del concreto al agregarle vidrio molido, debido a la pequeña cantidad que se agregó.

<b>Adaway y Wang (2015)</b>	Se usó cemento tipo I, se procuró que al menos el 50 % del vidrio molido pasara la malla 40, y el agregado fino se sustituyó por 15 %, 20 %, 25 %, 30 % y 40 %. La resistencia de diseño de las mezclas era de 560 kg/cm <sup>2</sup> a 28 días	A mayor cantidad de vidrio molido en la mezcla disminuyó el revenimiento de la mezcla, debido a la forma angulosa del vidrio. La mezcla con mayor resistencia a la compresión fue la que contenía un 30 %, y recomiendan no usar más de esa cantidad.
-----------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia

De las investigaciones anteriores se pasará a ampliar las siguientes debido a la similitud que tienen con nuestra investigación:

- **Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino**, Peñafiel Carrillo, Daniela Alejandra, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Técnica de Ambato.
- **Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – effects on compressive strength**, Adaway, M. & Wang, Y., School of engineering, Deakin University, Waurn Ponds, Australia.

En la primera investigación “**Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino**” se evalúa la modificación que sufre la resistencia a la compresión cuando se sustituye el agregado fino en proporciones de 10 %, 20 %, 30 % y 40 % por vidrio molido.

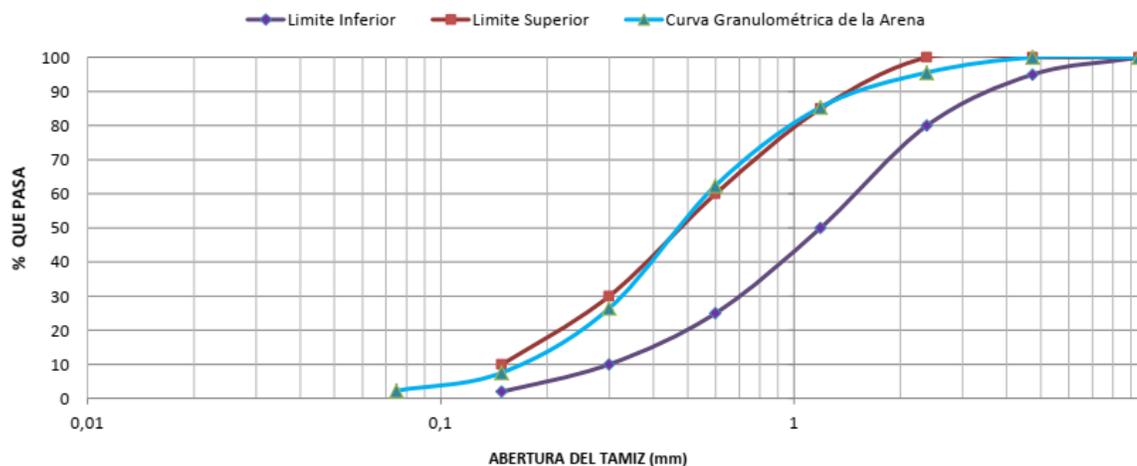
La Tabla No. 2-2, muestra los resultados obtenidos de la granulometría para el agregado fino, posteriormente en la Figura No. 2-1 se muestra gráficamente el comportamiento de dichos resultados.

Tabla No. 2-2: Granulometría de agregado fino

Tamiz	Abertura (mm)	Parcial (g)	Acumulado (g)	% retenido acumulado	% que pasa	% que pasa ASTM C 33
3/8"	9.5	0.00	0.00	0.00	100.00	100
#4	4.75	0.00	0.00	0.00	100.00	95-100
#8	2.38	35.00	35.00	4.43	95.57	80-100
#16	1.19	80.30	115.30	14.60	85.40	50-85
#30	0.6	181.60	296.90	37.59	62.41	25-60
#50	0.3	284.20	581.10	73.58	26.42	10-30
#100	0.149	149.00	730.10	92.44	7.56	2-10
#200	0.075	41.70	771.80	97.72	2.28	-
Fondo		18.00	789.80	100	0.00	

Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Figura No. 2-1: Curva Granulométrica del agregado fino utilizado en la investigación.



Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Además, el agregado fino tiene un módulo de finura de 2.23, esto indica que es un material bastante fino, para hacer concreto, puesto que el límite inferior es de 2.30, con base a lo que establece ASTM C 33.

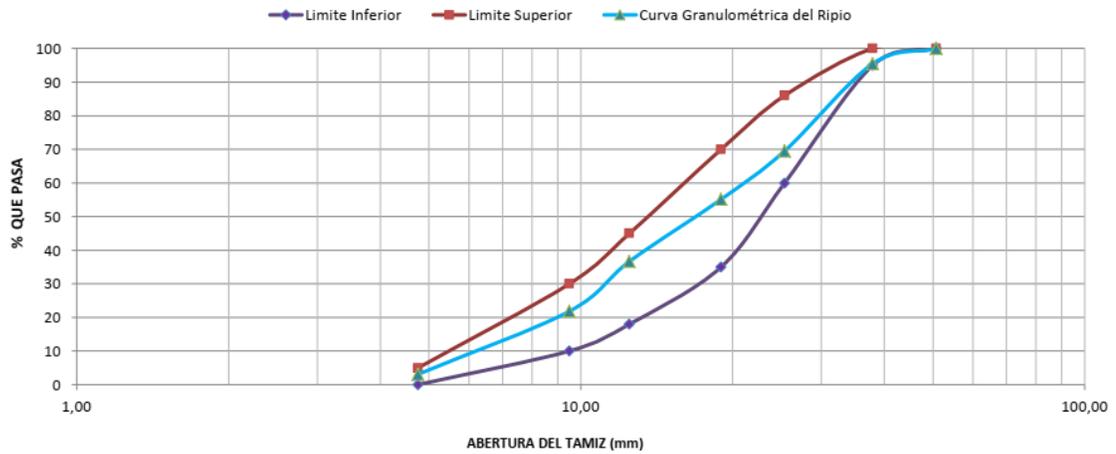
La granulometría del agregado grueso se muestra en la Tabla No. 2-3 y en la Figura No. 2-2 se muestra gráficamente los resultados de la granulometría.

*Tabla No. 2-3: Granulometría de Agregado grueso.*

<b>Tamiz (pulg)</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Parcial (g)</b>	<b>Acumulado (g)</b>	<b>% Retenido acumulado</b>	<b>% Que pasa</b>	<b>Límites ASTM C33, N°467</b>
<b>2''</b>	50.80	0.00	0.00	0.00	100	100
<b>1 ½''</b>	38.00	337.77	2279.53	4.52	95.48	95-100
<b>1''</b>	25.40	1941.76	3355.53	30.48	69.52	
<b>¾''</b>	19.00	1076.00	4737.51	44.86	55.14	35-70
<b>½''</b>	12.50	1381.98	5846.27	63.34	36.66	
<b>3/8''</b>	9.50	1108.76	7248.46	78.16	21.84	10-30
<b>#4</b>	4.76	1402.19	7479.98	96.90	3.10	0-5
<b>fondo</b>		231.52		100	0.00	

Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Figura No. 2-2: Curva Granulométría del agregado grueso



Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Se estableció que el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado grueso era de 1 ½ de pulgada equivalente a 38.10 mm.

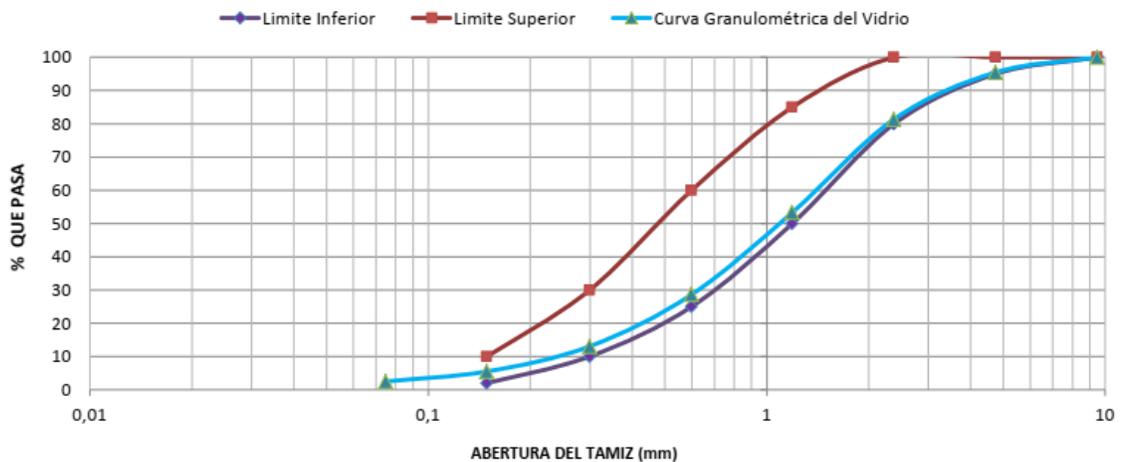
También se realizó un estudio granulométrico al vidrio que sería incorporado a las mezclas de concreto, luego de ser molido con una trituradora de mandíbula, con el fin de analizar si se cumplían con el tamaño requerido; los resultados obtenidos se presentan en la Tabla No. 2-4, la Figura No. 2-3 presenta la curva granulométrica obtenida del ensayo practicado al vidrio; por otra parte, la Figura No. 2-4, muestra el material obtenido luego del proceso de trituración.

Tabla No. 2-4: Granulometría de vidrio.

Tamiz (pulg)	Abertura (mm)	Parcial (g)	Acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Que pasa	Limite % que pasa ASTM C 33
3/8"	9.5	3.8	0.00	0.00	100.00	100
#4	4.75	32.40	32.40	4.54	95.46	95-100
#8	2.38	100.40	132.80	18.59	81.41	80-100
#16	1.19	200.50	333.30	46.67	53.33	50-85
#30	0.6	176.30	509.60	71.35	28.65	25-60
#50	0.3	111.40	621.00	86.95	13.05	10-30
#100	0.149	54.10	675.10	94.53	5.47	2-10
#200	0.075	21.50	696.60	97.54	2.46	
Fondo		17.60	714.20	100	0.00	

Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Figura No. 2-3: Curva granulométrica realizada al vidrio



Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

*Figura No. 2-4: Muestra de vidrio triturado que se usó en la investigación.*



Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). “Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino”. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

En la Figura No. 2-3, se observa que la tendencia de la curva granulométrica del vidrio, es muy cercana a los límites inferiores de los requisitos establecidos por ASTM C33, por lo que el material utilizado es muy fino, también cumple el tamaño para ser considerado como agregado fino para concreto, ya que la curva queda dentro de los límites granulométricos de las arenas.

Luego de haber caracterizado los materiales se realizó la dosificación para elaborar un concreto con una resistencia de control de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , misma utilizada para las mezclas con sustitución de vidrio, tal como se resume en la Tabla No. 2-5.

Tabla No. 2-5: Dosificación de mezclas de concreto.

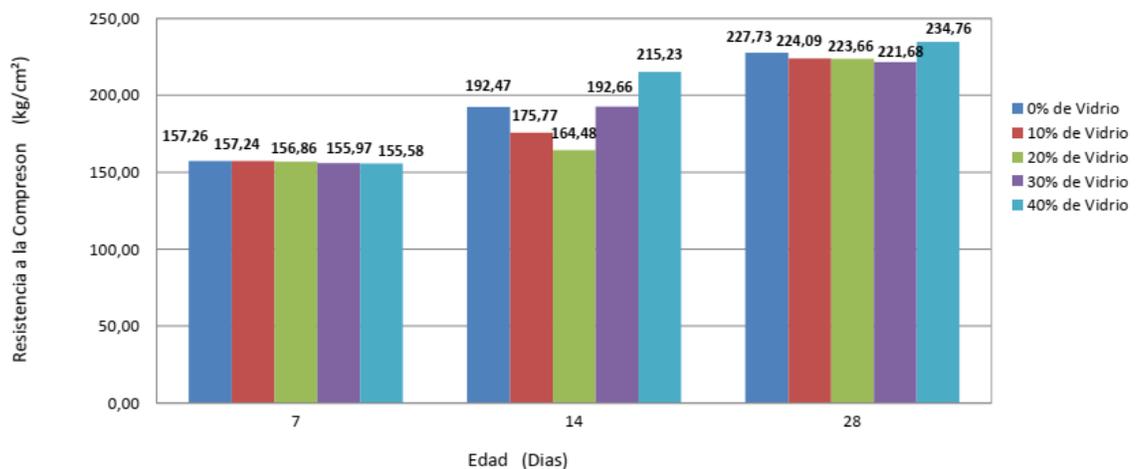
Materiales		Porcentaje de vidrio				
Denominación	Unidad	0%	10%	20%	30%	40%
Agua (W)	L	3.08	3.08	3.08	3.08	3.08
Cemento (C)	kg	5.31	5.31	5.31	5.31	5.31
Arena (A)	kg	10.72	9.65	8.58	7.50	6.43
Grava (G)	kg	18.83	18.83	18.83	18.83	18.83
Vidrio (V)	kg	0.00	1.07	2.14	3.22	4.29

Nota: la dosificación que aquí se muestra es para elaborar 3 cilindros de cada mezcla

Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

Luego de haber realizado la dosificación, se elaboraron 45 cilindros que se distribuyeron de la siguiente manera: 9 cilindros de cada mezcla para ensayar 3 cilindros a edades de: 7, 14 y 28 días respectivamente, obteniéndose los resultados mostrados en la Figura No. 2-5.

Figura No. 2-5: Resultados de ensayo a compresión



Fuente: Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). "Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino". Ambato: Universidad Técnica de Ambato.

En la Figura No. 2-5, se observa que a la edad de 28 días, la mezcla que obtiene mayor resistencia es la que posee un 40% de vidrio, alcanzando una resistencia a la compresión de 234.76 kg/cm<sup>2</sup>, ligeramente mayor a la resistencia de la mezcla de referencia (227.73 kg/cm<sup>2</sup>)

La segunda investigación cuyo título se puede traducir como: **“El vidrio reciclado como reemplazo parcial para agregado fino en concreto estructural – Efectos sobre la resistencia a la compresión”**. Se diseñaron mezclas de acuerdo al ACI 211.1 (American Concrete Institute 2009), para alcanzar una resistencia de 407.87 kg/cm<sup>2</sup> (40 MPa) a la edad de 28 días.

Para lograr dicha resistencia se usaron las siguientes dosificaciones que se muestran en la Tabla No. 2-6, para elaborar 1 m<sup>3</sup> de concreto. El agregado grueso varía por las correcciones que se tuvieron que hacer, debido a los cambios que sufrió el módulo de finura

*Tabla No. 2-6: Dosificación de mezclas de concreto.*

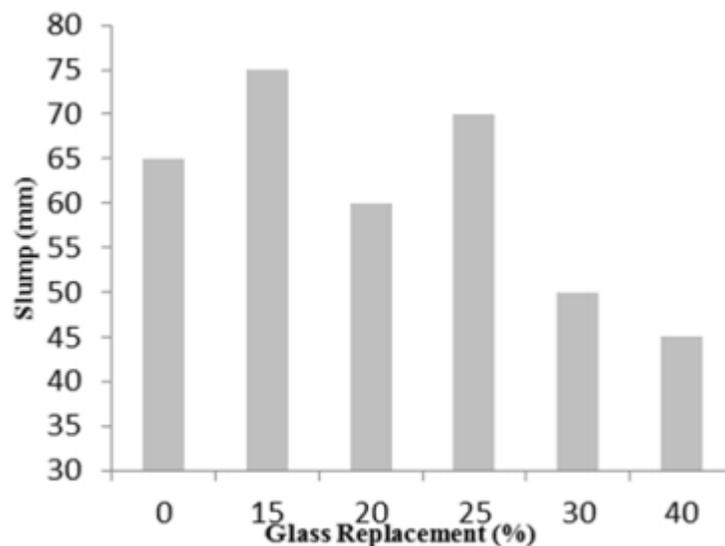
<b>Materiales</b>		<b>Porcentaje de vidrio</b>					
<b>Denominación</b>	<b>Unidad</b>	<b>0 %</b>	<b>15 %</b>	<b>20 %</b>	<b>25 %</b>	<b>30 %</b>	<b>40 %</b>
<b>Agua (W)</b>	kg	190	190	190	190	190	190
<b>Cemento (C)</b>	kg	458	458	458	458	458	458
<b>Arena (A)</b>	kg	739	613	573	533	493	417
<b>Grava (G)</b>	kg	925	935	939	942	946	953
<b>Vidrio (V)</b>	kg	0	108	143	178	211	278

Nota: La dosificación que aquí se muestra es para elaborar 1 m<sup>3</sup>

Fuente: Adaway, M., & Wang, Y. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering* 14(1) 2015, 116-122

Los resultados obtenidos al evaluar cómo se comportan las distintas dosificaciones de concreto se muestra en la Figura No. 2-6, que detalla la variación del revenimiento en estado fresco, donde se aprecia que el revenimiento con una sustituciones de 15 % y 25 % de arena por vidrio es mayor que la mezcla de control, y todas las demás son menores a la mezcla. Esta situación explican los autores que puede ser atribuido a una combinación de forma del agregado y a consecuencia de una reducción del módulo de finura.

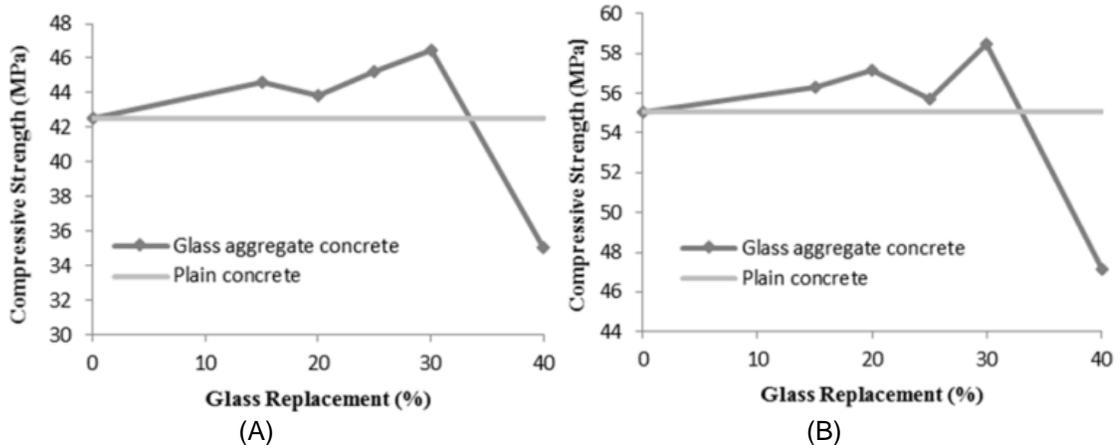
Figura No. 2-6: Resultados de Ensayo de Revenimiento



Fuente: Adaway, M., & Wang, Y. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering* 14(1) 2015, 116-122

Para evaluar el comportamiento del concreto en estado endurecido se evaluó la resistencia a la compresión a edades 7 y 28 días, dando como resultado el gráfico comparativo de la Figura No. 2-7 a y b, la cual muestra que la resistencia a la compresión en todas las mezclas son mayores a la mezcla de referencia a excepción de la mezcla que posee un 40% de sustitución.

Figura No. 2-7: Resultados de ensayo de resistencia a la compresión: (a) Edad 7 días. (b) Edad 28 días.



Fuente: Adaway, M., & Wang, Y. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength. *Electronic Journal of Structural Engineering* 14(1) 2015, 116-122

Para la edad de 7 días (Figura No. 2-7 (a)), la mezcla de referencia alcanza una resistencia de aproximadamente: 430.48 kg/cm<sup>2</sup> (43 MPa), la mezcla que posee un 30 % de vidrio alcanza una resistencia de aproximadamente 471.62 kg/cm<sup>2</sup> (46.25 MPa). Este ligero incremento se debe a la contribución del vidrio dentro de la mezcla.

Para la edad de 28 días (Figura No. 2-7 (b)), el comportamiento del gráfico de resistencia a la compresión es similar; la mezcla patrón alcanza una resistencia

de 560.84 kg/cm<sup>2</sup> (55 MPa), siempre se encuentra un incremento en la mezcla con un 30 % de sustitución de vidrio, obteniendo una resistencia de aproximadamente 596.53 kg/cm<sup>2</sup>. Para ambas edades la mezcla con 40 % de vidrio fue menor que la mezcla de referencia

Al revisar el comportamiento de la resistencia del concreto, con el incremento de vidrio en las mezclas, se puede decir lo siguiente:

Se observa un cambio de concavidad de la curva entre las mezclas que contenía un 15 % y un 25 % de vidrio, dado que a los 28 días, la mezcla de concreto que posee un 20 % de vidrio gana mayor resistencia a la compresión que las que tienen un 15 % y 25 % de vidrio, incluso la mezcla que contenía 25 % de vidrio obtuvo menor resistencia que la que tenía 15 % de vidrio.

Por esta razón, se seleccionaron para nuestra investigación los porcentajes de 15 %, 20 % y 25 %, pues son valores conservadores, que muy probablemente superen la resistencia a la compresión de la mezcla de referencia y para observar como varían la resistencia de estas en el tiempo dado la incongruencia del comportamiento mostrado anteriormente.

### **2.2.3. Empleo como sustituto parcial del cemento**

La Universidad de Michigan, de los Estados Unidos, es una de las instituciones que tiene más experiencia con el uso de vidrio reciclado molido en mezclas de concreto, La investigación fue realizada en tres etapas como se detalla a continuación:

- **Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement.** Roz-Ud-Din Nassar, Parviz Soroushian. Department of Civil and Environmental Engineering, Michigan State University, USA.
- **Field investigation of concrete incorporating milled waste glass.** Roz-Ud-Din Nassar y Parviz Soroushian. Civil and Environmental Engineering Department. Michigan State University, USA.
- **Towards broad use of recycled glass concrete on msu campus.** Parviz Soroushian. Diciembre 2012. Michigan State University.

El estudio en su primera etapa, consistió en reemplazar un porcentaje del cemento del concreto, con una muestra de vidrio pulverizado, el tamaño promedio utilizado fue de 25  $\mu\text{m}$  para poder reducir la posibilidad de una reacción Álcali sílice, las propiedades físicas del vidrio molido utilizado se muestran en la Tabla No. 2-7.

*Tabla No. 2-7: Propiedades físicas del vidrio utilizado en la investigación realizada por la Universidad de Michigan.*

<b>Propiedades físicas de vidrio molido</b>	
<b>% que pasa la malla #325</b>	93 %
<b>Gravedad específica</b>	2.46 gm/cc
<b>Tamaño medio de partícula</b>	25 $\mu\text{m}$
<b>Contenido de humedad</b>	0.1 %
<b>Brillo</b>	80 %
<b>Área específica superficial</b>	4280 $\text{cm}^2/\text{gm}$

Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

Se elaboró una mezcla patrón para luego sustituir parcialmente el cemento con polvo de vidrio en tres distintas proporciones del peso (15 %, 20 % y 23 %), y de esta forma determinar el comportamiento del concreto al introducirle este material. Las dosificaciones utilizadas se muestran en la Tabla No. 2-8.

Se evaluó su comportamiento en estado fresco, realizando los siguientes ensayos: revenimiento<sup>2</sup> y peso volumétrico de concreto en estado fresco<sup>3</sup>.

*Tabla No. 2-8: Dosificación de mezclas de concreto con sustitución de vidrio molido.*

Componentes	Diseño de mezclas			
	Control	15 % de vidrio	20 % de vidrio	23 % de vidrio
<b>Cemento Tipo I, kg/ m<sup>3</sup></b>	312	265	250	240
<b>Vidrio molido, kg/ m<sup>3</sup></b>	-	47	62	72
<b>Agregado fino, kg/ m<sup>3</sup></b>	799	799	799	799
<b>Agregado grueso, kg/ m<sup>3</sup></b>	1063	1063	1063	1063
<b>Contenido de humedad</b>	141	141	141	141
<b>Aditivo inclusor de aire (10 ml/ 100 lb de cemento)</b>	60	60	60	60
<b>Relación agua/cemento</b>	0.45	0.45	0.45	0.45
<b>Revenimiento, pulg</b>	3.5	3.5	3.5	3.5
<b>Contenido de aire, %</b>	4.5	4.5	4.5	4.5

Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. *Journal of solid waste technology and management*, 37(4), 307-319.

<sup>2</sup> Método de ensayo normalizado para asentamiento de concreto de cemento hidráulico, ASTM C 143, conocido en nuestro medio como ensayo de revenimiento.

<sup>3</sup> Método de ensayo normalizado de densidad (peso unitario), rendimiento, y contenido de aire (gravimétrico) del concreto, ASTM C138

Para evaluar el comportamiento en estado endurecido, se hicieron ensayos de resistencia a la compresión<sup>4</sup> y flexión<sup>5</sup>, elaborándose probetas para ensayarse a las edades de: 7, 14, 28, 90 y 270 días, para ambos ensayos.

Por último, se evaluó el aspecto de durabilidad para lo que se realizó un tramo de prueba como se muestra en la Figura No. 2-8 y 2-9, al que posteriormente se le extraerían núcleos de concretos a edades de 90 y 450 días, para evaluar la: la resistencia a la compresión, abrasión, permeabilidad a cloruros, resistencia al congelamiento y deshielo y reacción álcalis sílice.

*Figura No. 2-8 Construcción de tramo de prueba (A) Colado de losa de prueba, (B) Acabado de losa de prueba*



(A)



(B)

Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. *Journal of solid waste technology and management*, 37(4), 307-319.

---

<sup>4</sup> Método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos, ASTM C 39

<sup>5</sup> Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la flexión del concreto.

Figura No. 2-9: Tramo de prueba (A) Proceso de extracción de núcleos ASTM C42, (B) Obtención de Muestras.



(A)



(B)

Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. *Journal of solid waste technology and management*, 37(4), 307-319.

En la Tabla No. 2-9, se hace una lista de los ensayos y normas usadas en la investigación.

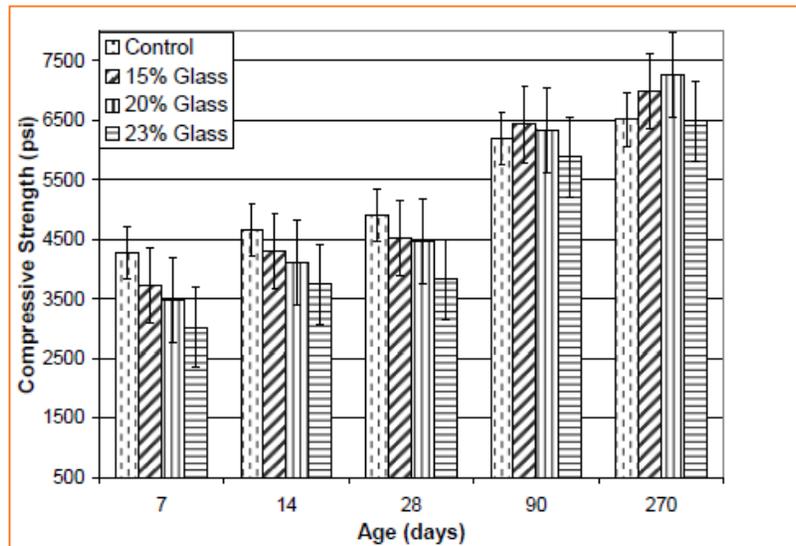
Tabla No. 2-9: Ensayos de laboratorio realizados en la investigación, para determinar las propiedades del concreto con la adición de vidrio molido como sustituto parcial del cemento.

Descripción del ensayo	Métodos de ensayo
Mezcla y curado de concreto	ASTM C-192
Revenimiento	ASTM C-143
Densidad de concreto fresco	ASTM C-138
Resistencia a la compresión	ASTM C- 39
Resistencia a flexión	ASTM C-78
Densidad del concreto endurecido, absorción de agua y porosidad	ASTM C-642
Absorción de agua	ASTM C-1585
Permeabilidad al cloruro	ASTM C-1202
Resistencia al congelamiento y al deshielo	ASTM C-666
Reacción álcali- sílice	ASTM C-1260

Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. *Journal of solid waste technology and management*, 37(4), 307-319.

De acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación, se observa que al adicionar vidrio en ciertos porcentajes mejora las propiedades de las mezclas de concreto; a continuación, se presentan los resultados de dicha investigación.

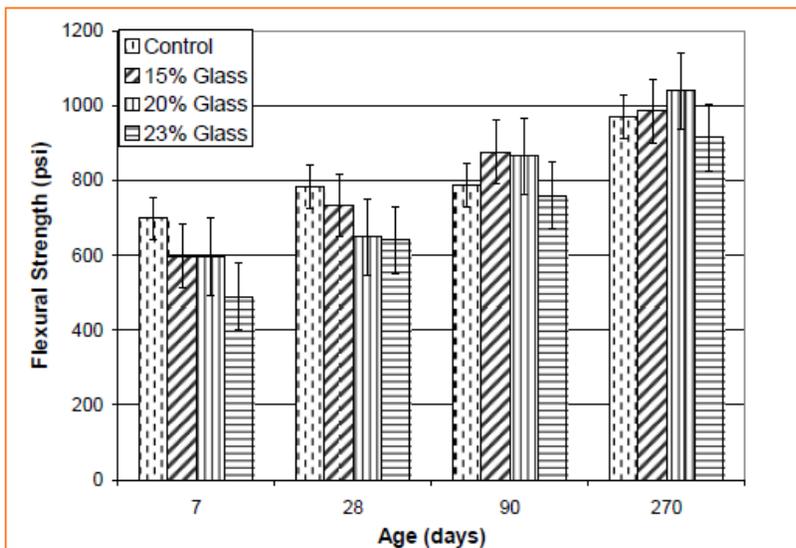
Figura No. 2-10: Resultados obtenidos para el ensayo de compresión de cilindros según ASTM C-39, comparando el comportamiento de las diferentes mezclas.



Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011).  
Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass.  
Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

En la Figura No. 2-10, se observa, que a edades menores o iguales a 28 días, la resistencia de los cilindro con sustitución de cemento por vidrio molido es menor que la resistencia de la mezcla patrón; en los resultados obtenidos a edades posteriores a 28 días, la resistencia a la compresión del concreto aumento para las mezclas que contienen una sustitución de 15 % y 20 % de vidrio, siendo la de mayor resistencia a 270 días la que posee un 20 %; en la mezcla que tiene un 23 %, la resistencia fue menor en todas las edades, sin embargo, a la edad de 270 días se logra una resistencia similar a la de la mezcla patrón.

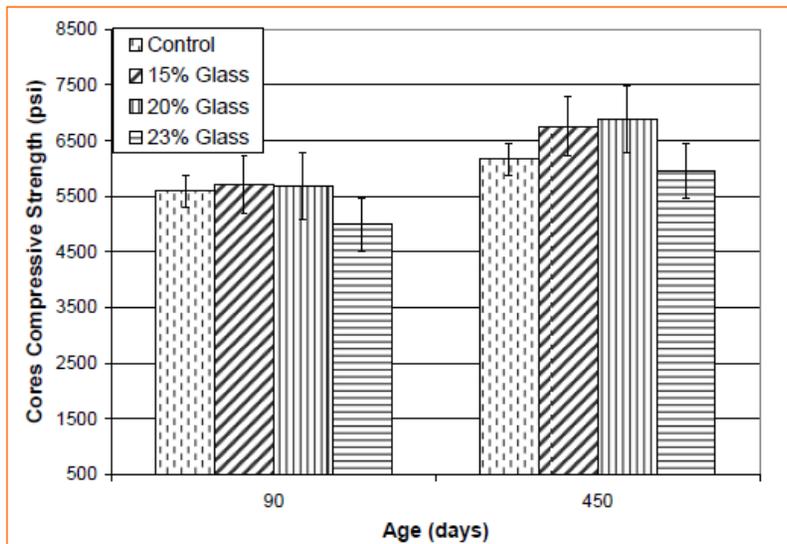
Figura No. 2-11: Resultados obtenidos en el ensayo a flexión según ASTM C-78



Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011).  
Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass.  
Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

En la Figura No. 2-11, se muestran los resultados de Resistencia a la flexión que se obtuvo en los ensayos, al igual que en el ensayo a compresión, la mejora de resistencia a la flexión se da después de los 28 días, antes de 90 días todas las mezclas con sustitución de vidrio molido por cemento tuvieron una menor resistencia que la mezcla patrón. Sin embargo, fue a los 90 días que se comenzó a observar mejoras significativas en la resistencia a la flexión de las mezclas que tiene un 15 % y 20 % de sustitución de vidrio molido. En las mezclas que poseen el 23 % de sustitución siempre estuvo por debajo de la mezcla patrón

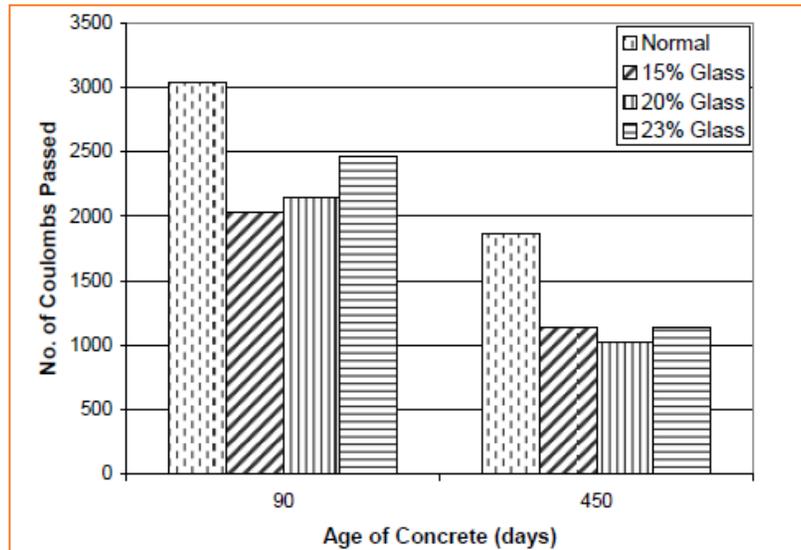
Figura No. 2-12: Resultados de ensayos a la compresión para núcleos extraídos del pavimento ASTM C39.



Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011).  
Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass.  
Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

En la Figura No. 2-12, se muestra los resultados obtenidos al ensayar núcleos de concreto a compresión, los núcleos se obtuvieron del tramo de prueba, elaborado para evaluar el comportamiento del concreto con sustitución de vidrio molido por cemento en condiciones de uso. Se evaluaron dos edades, a 90 y 450 días, dando como resultado: que a la edad de 90 días la mezcla con 15 % de vidrio es la que tiene una mayor resistencia, pero a los 450 días la mezcla que tiene mayor resistencia es la que posee un 20 % de vidrio. Se observa que la mezcla que contiene un 23 % de vidrio, siempre posee una menor resistencia que la mezcla control.

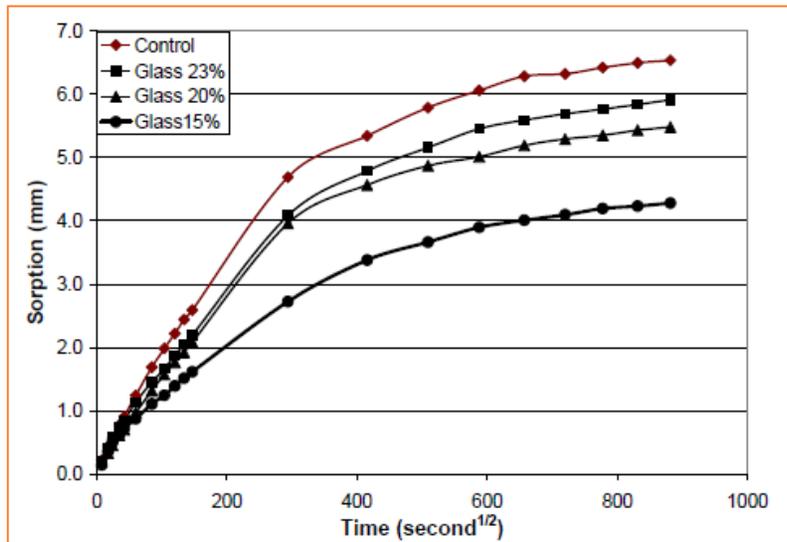
Figura No. 2-13: Resultados de ensayos de permeabilidad de cloruros para núcleos extraídos del tramo de prueba a la edad de 90 y 450 días.



Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011).  
 Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass.  
 Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

En la Figura No. 2-13, se muestran los resultados obtenidos del ensayo de permeabilidad de cloruros en núcleos de concreto, obtenidos del tramo de prueba, para evaluar cómo se comporta el concreto con sustitución de cemento por vidrio molido, ante la presencia de cloruros que tienen el ambiente. La evaluación se hizo para dos edades 90 y 450 días, se observa que el vidrio disminuye la permeabilidad de la mezcla de concreto, en todos los porcentajes que se usó, siendo la mezcla con 20 % de sustitución la que a mayor edad tuvo una menor permeabilidad de los cloruros.

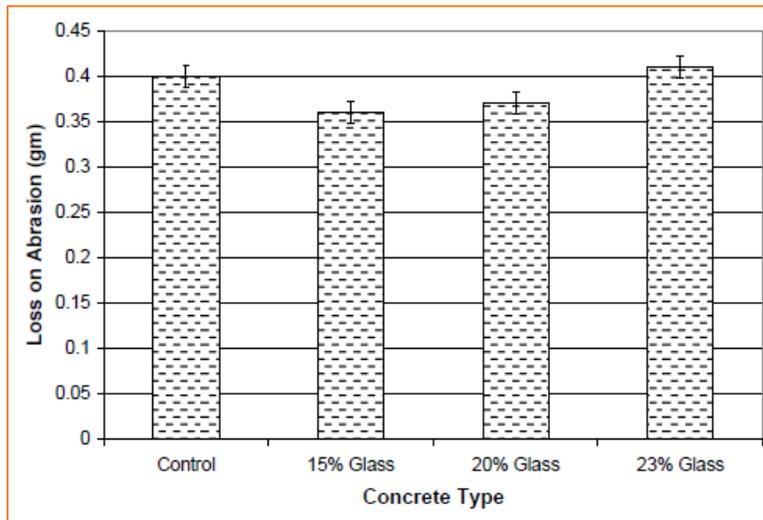
Figura No. 2-14 Resultados de ensayos de absorción de agua para núcleos extraídos del pavimento a la edad de 450 días, ASTM C1585



Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

En la Figura No. 2-14, se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de absorción de agua, en las curvas se puede apreciar que, con un incremento de vidrio en las mezclas de concreto las características de permeabilidad son reducidas y por ende hace más hermético el concreto. La mezcla patrón presenta mayor absorción de agua, entre las mezclas que poseen vidrio como sustituto parcial, la que presenta una reducción en la absorción es la del 15 %, esto es positivo cuando se desea tener superficies impermeabilizadas, por lo que es una buena alternativa de diseño y uso.

Figura No. 2-15 Resultados de ensayos de abrasión para núcleos extraídos del pavimento a la edad de 450 días, ASTM C944



Fuente: Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011).  
Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass.  
Journal of solid waste technology and management, 37(4), 307-319.

En la Figura No. 2-15, se muestra los resultados obtenidos en el ensayo a la abrasión, es notorio que el que tuvo menor desgaste por tránsito y puesta en servicio se obtiene en la mezcla que posee un 15% de vidrio. Esto puede ligarse al resultado anteriormente expuesto (Figura No. 2-7) debido a que, si la superficie es impermeable, esta debe poseer mejores características de durabilidad y resistencia al desgaste. La mezcla con un 23 % de vidrio tiene un desgaste mayor que incluso que la mezcla de referencia, por lo tanto se puede decir que el óptimo está cercano al 15 % de sustitución parcial de cemento por vidrio.

Las conclusiones de la investigación se resumen en lo siguiente:

- El concreto producido por la sustitución parcial del cemento con vidrio reciclado molido del tamaño de micras es compatible con la producción de concreto convencional en condiciones técnicas.
- El uso de residuos de vidrio molido como reemplazo parcial de cemento en el concreto, mejora la resistencia del concreto, la absorción de humedad lo que resulta en la mejora de características de durabilidad.
- La resistencia a la abrasión y resistencia a largo plazo del concreto, también se incrementa por la sustitución parcial del cemento con el vidrio reciclado molido (en cuanto a los niveles de reemplazo el valor óptimo es de aproximadamente el 20 % en peso).
- El concreto elaborado con un reemplazo del 20 % del cemento por vidrio molido reciclado ha funcionado satisfactoriamente en la práctica en aplicaciones reales (pavimento y cordón cuneta), con más de dos años de exposición a la intemperie, mostrándose efectivo también para las cargas de tráfico.
- El uso de residuos de vidrio molido en la fabricación de concreto es una práctica viable que daría lugar a importantes ahorros en la energía, con beneficios ambientales y de costos, y haría contribuciones importantes hacia la reducción de la huella de carbono de la industria de la construcción.

Otra investigación donde se ha sustituido cemento por vidrio molido, es la investigación titulada: **“Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio”** realizada por M. Rodríguez y M. Ruiz (2016), en la Universidad Nacional de Córdoba (UNC) Argentina.

Esta investigación tenía como objetivos: estudiar los efectos en la resistencia del concreto y la reacción álcali – sílice que se producían al agregar vidrio molido como sustituto parcial del cemento.

La parte de la investigación en la cual se estudió la reacción álcali – sílice, se desarrolló usando la norma IRAM 1674, equivalente a la norma ASTM C 1260: Método de prueba estándar para la reactividad potencial álcali de agregados (Mortero-Bar Method). Se usaron los tres tipos de agregados que se definen en las normas que se muestran en la Tabla No. 2-10.

*Tabla No. 2-10: Definición de reactividad de agregados según la norma ASTM C 1260.*

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Porcentaje de expansión de su longitud en un periodo de 16 días</b>
<b>Reactivo</b>	> 0.2 %
<b>Potencialmente reactivo*</b>	0.1 % < % expansión < 0.2 %
<b>No reactivo</b>	< 0.1 %

Todos los ensayos de expansión se verifican a una edad de 16 días.

\*Generalmente, para valores dentro de este intervalo, se requieren ensayos de verificación a los 28 días

Fuente: Datos tomados de ASTM C 1260 – 07.

Para evaluar el comportamiento del vidrio con los diferentes tipos de agregados que se mencionan en la Tabla No. 2-10, se hicieron 3 mezclas de referencia, utilizando: agregado poco reactivo, potencialmente reactivo y reactivo, se usó un tamaño de vidrio entre 137  $\mu\text{m}$  y 82  $\mu\text{m}$  (pasaba la malla No 100 y se retenía en la No 200) y se hicieron diferentes combinaciones de vidrio como se muestra en la Tabla No. 2-11.

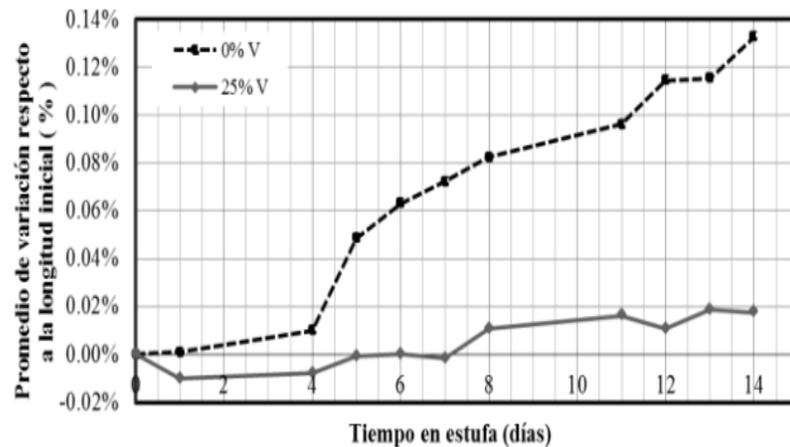
*Tabla No. 2-11: Resumen de las características de mezclas para analizar la reacción álcali - sílice*

<b>Mezcla de referencia</b>	<b>Porcentaje de vidrio sustituido por cemento</b>
<b>Mezcla 1: agregado potencialmente reactivo.</b>	25 %
<b>Mezcla 2: Agregado no reactivo.</b>	20 %
<b>Mezcla 3: Agregado reactivo.</b>	15 % y 25 %

Fuente: Elaboración propia, con datos retomados de la investigación "Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio"

Los resultados que se obtuvieron para el estudio de la reacción álcalis – sílice son los que se muestran en las Figuras No. 2-16, 2-17 y 2-18.

Figura No. 2-16: Resultados de la evaluación de la expansión de concreto usando agregado potencialmente reactivo al álcali del cemento

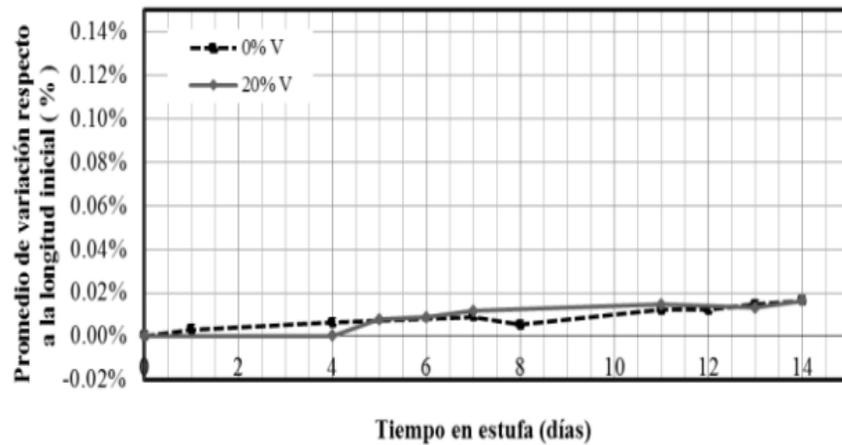


Fuente: Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES, 3(2),

53

Al evaluar la expansión del concreto con agregados potencialmente reactivo al álcali del cemento se muestra en la Figura No. 2-16. Se usaron una mezcla sin vidrio y otra mezcla con el mismo agregado y adicionado un 25 % de vidrio molido con la especificación de tamaños entre: 137  $\mu\text{m}$  y 82  $\mu\text{m}$  (pasaba la malla No 100 y se retenía en la malla No 200). Dando como resultado que la mezcla con vidrio redujo la expansión con respecto a su longitud inicial de un 0.13 % a un 0.02 % en un periodo de tiempo de 14 días.

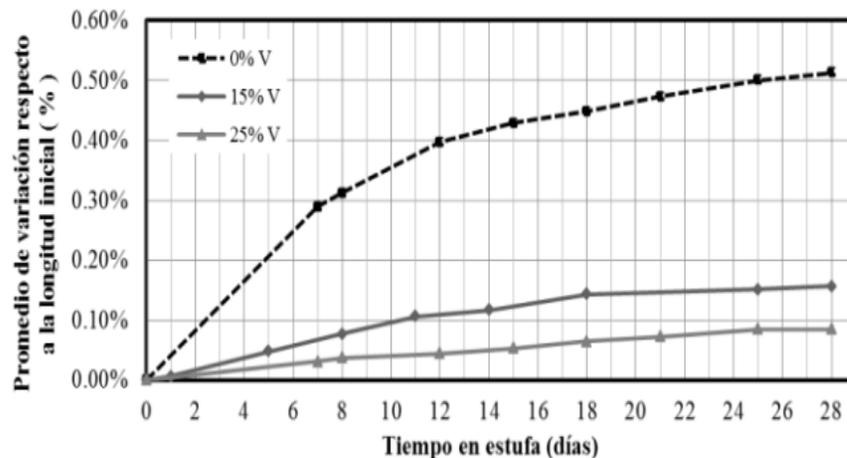
Figura No. 2-17: Resultados de la evaluación de la expansión de concreto usando agregado poco reactivo al álcali del cemento



Fuente: Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES, 3(2), 53

Al evaluar la expansión del concreto con agregados poco reactivo al álcali del cemento se obtiene el grafico que se muestra en la Figura No. 2-17, se observa que ambas mezclas de concreto una sin vidrio y otra con un 20 % de vidrio molido, usando el mismo agregado poco reactivo al álcalis, se observa que el comportamiento de ambas mezclas a una edad de 14 días es similar y ambas tienen un 0.02 % de expansión con respecto a su longitud inicial.

Figura No. 2-18: Resultados de la evaluación de la expansión de concreto usando agregado reactivo al álcali del cemento



Fuente: Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES, 3(2), 53

Al evaluar la expansión del concreto usando agregados reactivos a los álcalis del cemento se muestra en la Figura No. 2-18, y se puede observar que a los 28 días en la mezcla sin vidrio la expansión es de 0.52 % de su longitud inicial, también se observa que mientras mayor es la cantidad de vidrio, la expansión es menor, pues para este tipo de agregado se estudiaron dos mezclas con cantidades diferentes de vidrio molido, para la mezcla que contaría 20 % de vidrio la expansión fue de aproximadamente 0.18 % de su longitud inicial y para la mezcla que contenía un 25 % de vidrio tubo una expansión del 0.10 % de su longitud inicial.

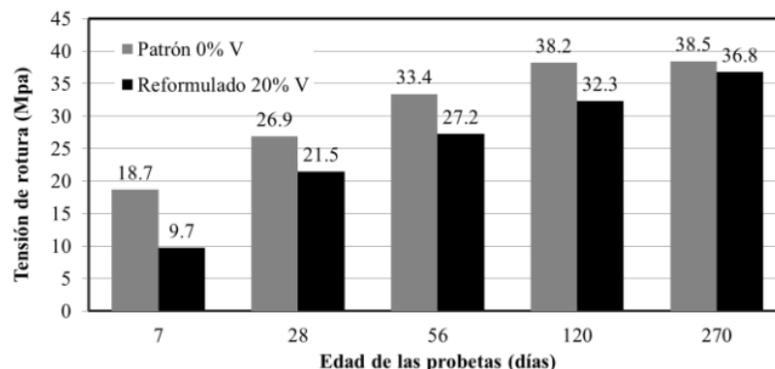
Para evaluar la resistencia a la compresión se utilizó una mezcla de control y otra con un 20 % de vidrio de molido con la especificación de tamaño de: 41  $\mu\text{m}$  (pasante malla No 325), para ambas mezclas se usó agregado poco reactivo y su dosificación se muestra en la Tabla No. 2-12; De lo anterior se obtuvieron los resultados que se muestran en la Figura No. 2-19.

Tabla No. 2-12: Dosificación de mezclas y propiedades en estado fresco.

Denominación	Patrón 0 % de vidrio	Adición de vidrio (20 %)
<b>Cemento (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>	371	297
<b>Vidrio mezclada P#200 (kg)</b>	0	74
<b>Agregado grueso</b>	1023	1023
<b>Agregado fino</b>	834	834
<b>Agua</b>	211	211
<b>Relación a/c</b>	0.57	0.57
<b>Densidad (<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>)</b>	2.29	2.27
<b>Asentamiento (cm)</b>	4.0	4.5
<b>Contenido de aire</b>	4.5	4.5
<b>plasticidad</b>	Muy buena	Muy buena

Fuente: Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES, 3(2), 53

Figura No. 2-19: Resultado del ensayo a compresión para una mezcla de referencia y una mezcla con una sustitución de cemento por 20% de vidrio molido



Fuente: Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES, 3(2), 53

Al evaluar los resultados obtenidos en este ensayo se observó que al agregar un 20 % de vidrio, a ninguna edad la resistencia de la mezcla con un 20 % de vidrio fue mayor a la mezcla de control.

Según los autores de este estudio una posible hipótesis para esto es: que el tamaño de las partículas de vidrio, eran más grande en comparación con las utilizadas en la investigación de la universidad de Michigan, ya que en ambas investigaciones se hicieron ensayos a 7, 28 y 270 días.

### **2.3. Ventajas y desventajas del uso de Vidrio Molido en el Concreto**

El vidrio puede tardar miles de años en descomponerse en la naturaleza por sí solo, por lo que es importante su reutilización y su reciclado. Esta larga resistencia a la degradabilidad del vidrio se debe a que es prácticamente inerte frente al agua, a soluciones acuosas y a cualquier sustancia química, inorgánica u orgánica; son disueltos sólo por el ácido fluorhídrico y son atacados por el ácido fosfórico caliente o por hidróxidos alcalinos concentrados; y ninguna de estas sustancias existe en los suelos (Mari, 1995).

Dentro de los beneficios que se pueden obtener al utilizar vidrio producto del desecho en el cemento y en el concreto Shi & Zheng (2007) citan los siguientes:

- Elimina o disminuye los costos de disposición, los cuales en algunos lugares van en aumento debido a los controles y costos impuestos por los rellenos sanitarios.

- La vida útil de los rellenos sanitarios no se ve disminuida por las enormes cantidades de vidrio.
- Ayuda a preservar recursos naturales, como las arenas de río, que no estarían siendo usados en la industria de la construcción y las cementeras.
- Si se utilizara como sustituto parcial del cemento, se ayuda a ahorrar energía utilizada en la fabricación de este producto, así como se reduciría las emanaciones de contaminantes atmosféricos generados en este proceso.
- Potencial para aumentar la conciencia ambiental en cuanto a los beneficios del reciclaje y reúso de residuos valorizables

Esta técnica puede ser beneficiosa, pero se deben tener en cuenta las siguientes desventajas:

- Reacciones expansivas, dado que el vidrio en su gran mayoría es sílice amorfo, como se menciona en el apartado **2.4 Reacciones Expansivas en el Concreto**.
- En la mayoría de las investigaciones consultadas se observó que, para los concretos con sustitución de vidrio, independientemente que la sustitución se haga por cemento o por arena, es recomendable no sustituir por una proporción mayor al 20 %, dado que la resistencia disminuye, debido a que el concreto comienza a tener un comportamiento frágil como el del vidrio

- Si la sustitución es por cemento se debe moler el virio hasta que el 93 % de este pasa la malla # 325 (44  $\mu\text{m}$ ), para lograr buenos resultados.

#### **2.4. Reacciones Expansivas en el Concreto**

Las reacciones expansivas en el concreto generalmente se producen por una interacción entre compuestos alcalinos presentes en el cemento, y ciertos componentes potencialmente reactivos presentes en los agregados utilizados para conformar el concreto, por lo que suelen llamarse reacciones de tipo álcali - agregado. Dentro de estas reacciones expansivas existen dos principalmente:

- a) Reacción álcali – sílice (ASR).
- b) Reacción álcali – carbonato.

Dado que el vidrio en su composición contiene abundantes cantidades de sílice amorfa, es de interés para este estudio las reacciones del tipo álcali - sílice (ASR). En la fabricación del concreto, la hidratación del cemento da como resultado una solución intersticial que contiene hidróxidos de calcio, sodio y potasio. El hidróxido de calcio está en forma cristalizada mientras que los hidróxidos de sodio y potasio se encuentran presentes en la solución. La reacción álcali-sílice se produce cuando la disolución alcalina de los poros del concreto y los minerales silíceos de algunos agregados reaccionan formando un gel, que al entrar en contacto con agua, aumenta su volumen, provocando la aparición de fisuras, como las mostradas en la Figura No. 2-20. En algunos casos puede tardar años

en manifestarse la reacción, generalmente a través de agrietamiento superficial.  
(Segarra, 2005).

*Figura No. 2-20: Efectos de la reacción álcali sílice en un muro de concreto*



Fuente: <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/deterioro-concreto-reactividad-alkali.html>

#### **2.4.1. Reacción Álcali Sílice (ASR)<sup>6</sup>**

Para que se genere la reacción dentro de una mezcla de concreto es necesario que se combinen cuatro condiciones de manera simultánea:

1. El agregado debe ser sensiblemente reactivo con álcalis, es decir con alta presencia de silicatos no cristalinos.
2. Álcalis en cantidad suficiente para desencadenar la reacción, aportados generalmente por el cemento.

---

<sup>6</sup> La reacción Álcali Sílice se conocerá también como: "reacción de tipo ASR"

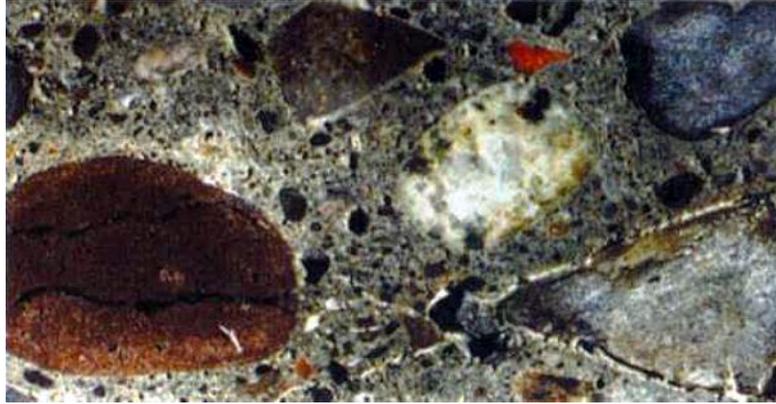
3. Humedad necesaria para que los álcalis entren en solución y generen la reacción química.
4. Una vez desencadenada la reacción ésta debe mantenerse por el tiempo suficiente para dar origen al gel y su posterior expansión.

Si alguna de estas cuatro condiciones no está presente, es imposible la generación de la reacción (Segarra, 2005).

Como se mencionó, para el caso del vidrio, es especialmente importante conocer la reacción álcali sílice, ya que la reactividad de la sílice, es inversamente proporcional al grado de cristalización de la misma, es decir, mientras mayor sea el grado de ordenamiento de las moléculas, el potencial de reactividad es menor. En la medida que la sílice es más desordenada a nivel molecular, es más probable que entre en reacción con los componentes alcalinos presentes en la mezcla.

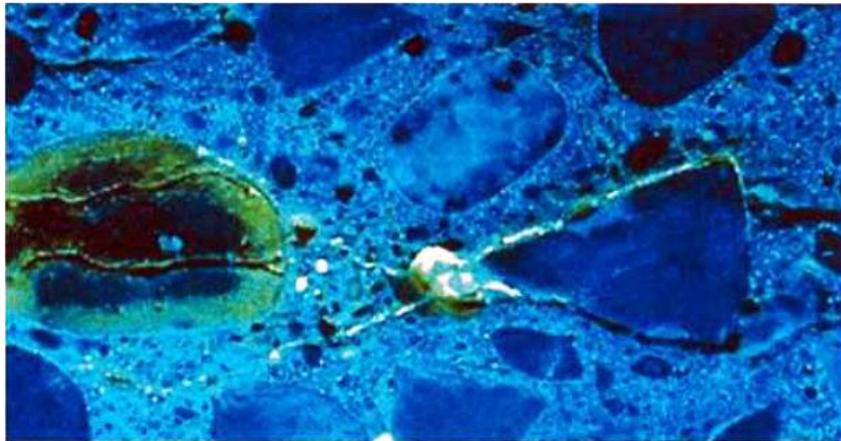
En la Figura No. 2-21, muestra el concreto afectado por la reacción álcali sílice, tratada con acetato de uranil y la Figura No. 2-22, muestra el concreto frente a luz UV, la presencia de gel expansivo producto de ASR es revelado por el acetato de uranil.

*Figura No. 2-21 Muestra de concreto afectada por la reacción álcali sílice, tratada con acetato de uranil*



Fuente: PASQUEL E., 1997. Reacción álcali-agregado: El VIH del concreto. Laboratorio del concreto – Asocreto.

*Figura No. 2-22: Muestra de concreto frente a luz UV, la presencia de gel expansivo producto de ASR es revelada por el acetato de uranil*



Fuente: PASQUEL E., 1997. Reacción álcali-agregado: El VIH del concreto. Laboratorio del concreto – Asocreto.

#### **2.4.2. Prevención**

Una de las características de esta reacción es la dificultad de detectarla a edades tempranas del concreto, tardando incluso años en manifestarse, por lo que se hace muy difícil combatirla una vez que ya se ha desencadenado. En

Latinoamérica, específicamente en países de Sudamérica existen una serie de minerales muy abundantes que podrían ocasionar este problema. En la Tabla No. 2-13, se puede apreciar un listado de dichos minerales, rocas y materiales, potencialmente reactivos que ocasionan reacciones en el concreto.

*Tabla No. 2-13: Minerales, rocas y otros materiales potencialmente reactivos con el cemento.*

<b>Reacción álcali – Sílice</b>	<b>Reacción álcali – Carbonato</b>
Andesitas, argilitas, calcedonia, ciertas calizas, ciertas dolomitas, cristobalita, cuarcita, cuarzosa, dacitas, esquistos, filita, gneiss granítico, ópalo, pizarras silíceas, riolitas, tridimita, vidrio silíceo, vidrio sintético.	Calizas dolomitas, dolomitas calcínicas, dolomitas de grano fino.

Fuente: PASQUEL E., 1997. Reacción álcali-agregado: El VIH del concreto. Laboratorio del concreto – Asocreto.

Identificar los materiales potencialmente reactivos es un primer paso para enfrentar los posibles efectos de esta reacción, para poder identificarlos se recomienda empezar con un ensayo petrográfico, y complementarlo con pruebas estandarizadas: análisis químico, ensayos acelerados en prismas de mortero, ensayos en prismas de concreto, entre otros. Sin embargo, la mejor prueba para descartar si un agregado es inocuo, es contar con evidencia histórica de los agregados de una misma procedencia, por un período de al menos 15 años en la producción de concreto, bajo condiciones similares de contenido de álcalis, tipo de cemento, humedad y condición de servicio similares a la del proyecto a ejecutar (Pasquel, 2009).

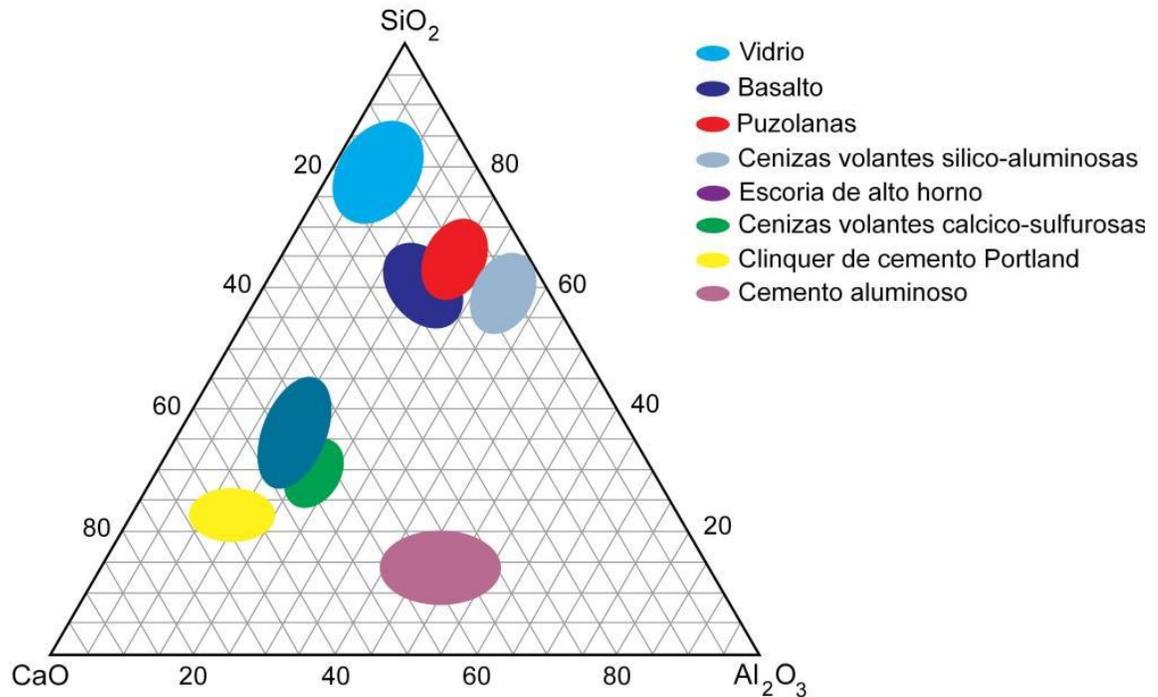
Cuando existe probable reactividad se recomienda tomar precauciones para mitigar este riesgo a través de una serie de medidas:

- Empleo de cemento con bajo contenido de álcalis (menor a 0.6 %).
- Uso de adiciones minerales tales como puzolanas, cenizas volantes, escorias y microsílíce como reemplazo parcial del cemento.
- Limitar el contenido total de álcalis en las mezclas de concreto a valores entre  $1.8 \text{ kg/m}^3$  y  $3.0 \text{ kg/m}^3$  dependiendo del caso particular.
- Incluso se pueden adicionar sales de litio como aditivo neutralizador.

Como en todo ámbito de la ingeniería se debe evaluar el costo-beneficio de la implementación de alguna de estas medidas, considerando la vida útil proyectada de la estructura implicada y su finalidad.

Finalmente, de modo ilustrativo, en la Figura No. 2-23, se muestra la composición de algunos materiales presentes en la industria del cemento básicamente y la composición del vidrio comercial. El ordenamiento en un diagrama tipo triángulo de Feret, para ilustrar de manera gráfica como estos tres componentes forman la base de los materiales mencionados

Figura No. 2-23: Diagrama ternario, composición de algunos materiales utilizados en la industria de vidrio y el cemento



Fuente: RINCÓN J. M., HERNÁNDEZ M. S., ROMERO M. Materias primas para la fabricación de materiales vítreos y cerámicos. Instituto Eduardo Torroja de Cs. de la Construcción, Madrid.

## 2.5. Comparación de los cementos ASTM C1157 GU y ASTM C150.

Los cementos portland son cementos hidráulicos compuestos principalmente de silicato hidráulico de calcio. Los cementos portland se fabrican bajo la norma ASTM C – 150<sup>7</sup>.

Los cementos portland se producen por la pulverización del clínker, el cual consiste principalmente en silicato de calcio hidráulico. El clínker también contiene algunos aluminatos de calcio y ferroaluminato de calcio y una o más

<sup>7</sup> Especificaciones normalizadas para el cemento portland.

formas de sulfato de calcio (yeso) que se muele juntamente con el clinker para la fabricación del producto final (*Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tenesi, 2004*)

Por otro lado, los cementos bajo los requisitos de la ASTM C – 1157<sup>8</sup>, son cementos adicionados que satisfacen a los ensayo de desempeño físicos, sin restricción de ingredientes o composición química del cemento, esto último hace la diferencia con los cementos mezclados que se rigen por la ASTM C - 595<sup>9</sup>, dado que en esta se especifica que los cementos mezclados se puede agregar al cemento hasta un 15 % de adiciones minerales que pueden ser: escorias granulada de alto horno, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada y otras puzolanas.

En la Tabla No. 2-14, se muestra una comparación entre las características de los tipos de cemento antes descritos.

---

<sup>8</sup> Especificación Normalizada de Desempeño para Cemento Hidráulico.

<sup>9</sup> Especificación para concretos hidráulicos mezclados.

Tabla No. 2-14: Resumen de características de los cementos tipo I y tipo GU.

Tipo de cemento	Tipo I (ASTM C 150)	Tipo GU (ASTM C 1157)
<b>Tiempo de fraguado, prueba de Vicat</b>		
Tiempo de fraguado no menor que, minutos	45	45
Tiempo de fraguado no mayor que, minutos	375	420
Cambio de longitud de autoclave, max, %	0.80	0.80
<b>Resistencia a la compresión MPa</b>		
1 día		
3 días	12	10
7 días	19	17
28 días	28	28
Fineza, Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3400 – 3700	4050 – 4200
Porcentaje de álcalis, % max	0.6	No se especifica <sup>10</sup>

Fuente: Elaboración propia, los datos se tomaron de las especificaciones ASTM C 150 y ASTM C 1157.

De la Tabla No. 2-14, es importante destacar la finura, dado que es un factor que afecta la hidratación del cemento, sin importar la composición química del mismo. Entre más fino es la molienda mayor es el calor de hidratación y el resultante incremento de resistencia acelerada. La razón por la cual un cemento más fino resulta en una hidratación más rápida es debido a que en estos, el área superficial de los granos de cemento es mayor en relación con uno de granos de molido grueso, puesto que el agua está en una mayor área de contacto. El incremento en resistencia debido a la finura es evidente durante los primeros siete días.

La mayoría de las investigaciones de este tema, han usado cemento portland tipo I. Para esta investigación se propone usar: cemento ASTM C-1157 tipo GU, dado

<sup>10</sup> El porcentaje álcalis no se especifica en la ASTM C 1157. Ver apartado 6 Composición química.

que es el tipo cemento más usado en nuestro medio, además, para evaluar cuál es el comportamiento de este tipo de cementos al adicionar vidrio.

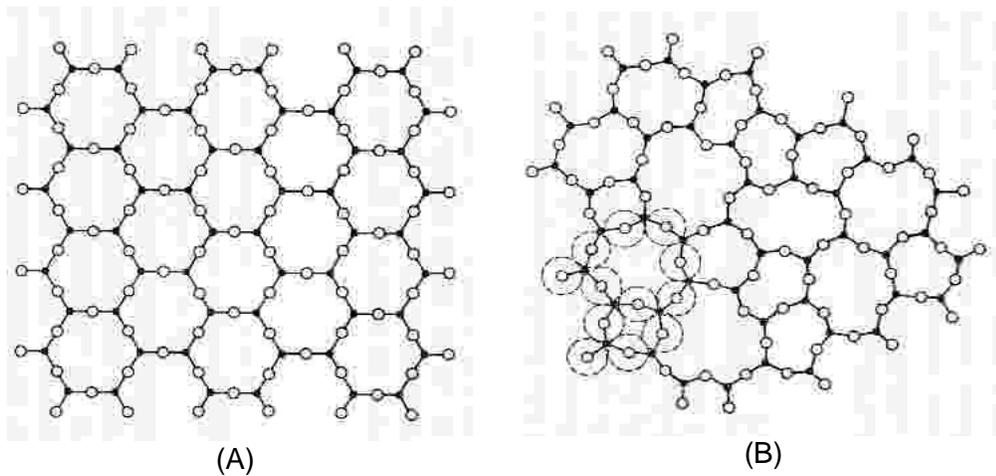
Otro aspecto por el que se propone usar cemento ASTM C 1157 tipo GU, es por la tendencia de usar menos cementos portland puros, sustituyéndolos con cementos por desempeño.

## **2.6. Vidrio**

Según la American Society for Testing Materials (ASTM), el vidrio es: “Un producto inorgánico de fusión, el cual se ha enfriado hasta un estado rígido, pero sin sufrir cristalización”.

El vidrio es un material de apariencia dura, frágil y generalmente transparente, aunque se comporta como un sólido, es un fluido de muy alta viscosidad. Está compuesto por una mezcla de óxidos metálicos, siendo su componente principal el óxido de silicio, conocido como sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Si bien a simple vista pareciera ser muy similar a un cristal, la diferencia con éste radica en el ordenamiento que tienen las moléculas que lo componen, donde los enlaces Si – O están distribuidos de manera irregular, sin un patrón determinado, siendo por definición, un material amorfo. Esta diferencia se muestra en la Figura No. 2-24.

Figura No. 2-24: Diferencia entre el cristal de sílice y el vidrio (A) Cristal organizado de Sílice, (B) Sílice presente en el vidrio.



Fuente: <http://www.quimitube.com/por-que-los-cristales-no-son-cristales>.

La estructura del silicio cristalino es un tetraedro, compuesto por un átomo de sílice rodeado de cuatro átomos de oxígeno, dispuestos a distancias regulares, conformando una red cristalina con una distribución ordenada.

De manera general, existe una confusión entre vidrio y cristal. Si bien estos materiales pueden tener la misma composición, pero poseen un orden diferente de su estructura atómica. Mientras que en el cristal los átomos permanecen ordenados, en el vidrio estos se presentan de forma desordenada, dando lugar a lo que llamaríamos un material amorfo. La estructura del vidrio se vuelve más discontinua, funde a menor temperatura y resulta fácil de manejar. El vidrio resultante es más económico a la hora de la fabricación.

El vidrio presenta cierta transparencia, su subestructura es amorfa, reduce su viscosidad en función de la temperatura, etc., por lo que este comportamiento se asemeja mucho al de cualquier líquido. Por lo que el vidrio podría ser definido más claramente como un líquido con una viscosidad tan alta que le proporcionaría un aspecto de sólido, sin serlo.

### **2.6.1. Componentes del vidrio**

Definiendo la composición, el principal componente del vidrio es el sílice, además del óxido de sodio, óxido de calcio, óxido de aluminio y componentes secundarios. Las características generales de estos componentes son:

- a) El sílice ( $\text{SiO}_2$ ): es el constituyente más importante conformando las tres cuartas partes de su composición, se lo obtiene de las arenas de cuarzo.
- b) El óxido de sodio: tiene por finalidad el favorecer la formación de vidrio, rebajando su temperatura de fusión y así facilitar su elaboración, son conocidos como fundentes.
- c) El óxido de calcio: su presencia aumenta la estabilidad química y mecánica del vidrio, por lo que desde el punto de vista funcional actúa como estabilizante.
- d) El óxido de aluminio, es un estabilizante, añadiéndole además ciertas características como: aumento de la resistencia mecánica, un mejoramiento de la estabilidad química, una elevación de la refractariedad,

una disminución del coeficiente de dilatación térmica y una mejor resistencia al choque térmico.

Las funciones de los óxidos que se mencionaron antes y otros que se pueden adicionar al vidrio, se les clasifica como óxidos formadores, modificadores y estabilizadores de la red vítrea y se detalla a continuación.

- a. Óxidos formadores de la red vítrea: dentro de esta denominación se agrupan todas las sustancias con la capacidad de formar vidrio, las más comunes son: el sílice ( $\text{SiO}_2$ ), el óxido de boro ( $\text{B}_2\text{O}_3$ ) y óxido de fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ).
- b. Óxidos modificantes de la red vítrea: son elementos que se introducen a la composición del vidrio que permiten modificar un poco las propiedades de este, ejemplos de ello son: la cal ( $\text{CaO}$ ), el óxido de magnesio ( $\text{MgO}$ ), óxido de zinc ( $\text{ZnO}$ ) y óxido de plomo ( $\text{PbO}$ ).
- c. Óxidos estabilizadores de la red vítrea: se consideran óxidos indiferentes desde el punto de vista químico, ya que pueden colocarse al lado del sílice y vitrificantes como ácidos, o del lado de la cal y de las bases como elemento básico entre ellos podemos mencionar: el óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

En la composición de los vidrios, también se observan otros constituyentes minoritarios con funciones determinadas como colorantes, afinantes, decolorantes, opacificantes, etc., haciendo especial mención a los fluoruros en

su papel de fluidificantes. Por ejemplo, para el color ámbar se añade óxido de hierro, para el color verde: óxido de cromo (CrO).

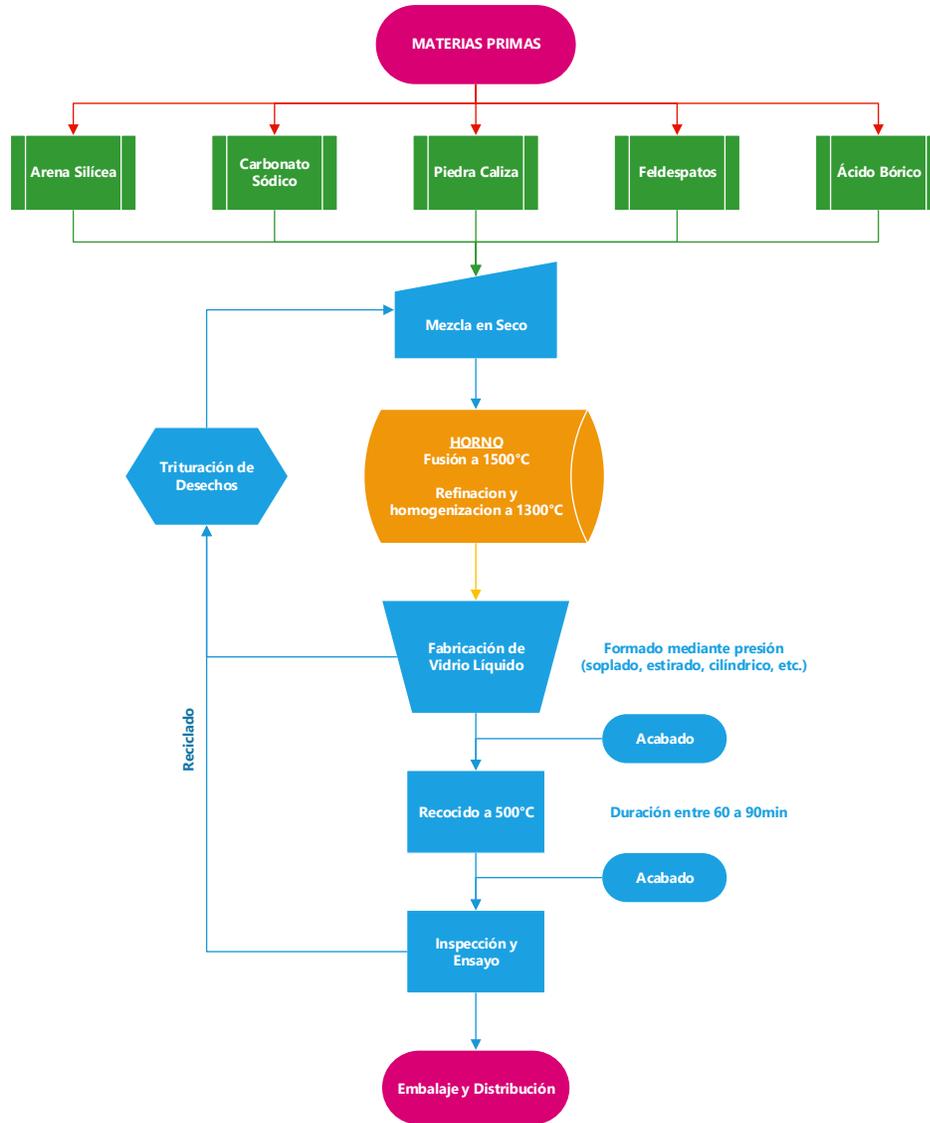
### **2.6.2. Proceso de Fabricación**

El proceso de fabricación propiamente, puede resumirse de la siguiente manera.

A medida que materias primas son recibidas (principalmente arena), se muelen y almacenan en depósitos en altura (silos), a la espera del momento en que serán transferidas a través de un sistema de alimentación por gravedad a los pesadores y mezcladores. En los mezcladores las materias primas son dosificadas y combinadas con vidrio reciclado para formar una mezcla homogénea, la cual es trasladada por medio de cintas transportadoras a un sistema de almacenamiento de cargas donde es contenida antes de ser depositada en el alimentador del horno de fundición.

Al entrar la carga al horno, a una temperatura de entre 1500 y 2000 °C, a través de los alimentadores, ésta flota en la superficie de la masa de vidrio fundida. Una vez que se funde, pasa al frente del baño y eventualmente fluye a través de la garganta de carga al refinador, posee una temperatura de 1300 °C, donde es condicionada térmicamente para descargar al proceso de formado. En la Figura No. 2-25.

Figura No. 2-25: Proceso de Fabricación del Vidrio



Fuente: INSTITUTO LATINOAMERICANO DE LA COMUNICACIÓN EDUCATIVA (ILCE).  
¿Cómo y con qué se hace el vidrio? Disponible en:

[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec\\_4.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec_4.html)

### **2.6.3. Tipos de Vidrio**

Entre los tipos de vidrio más comunes podemos separarlos entre vidrios comerciales, los cuales son producidos a gran escala, y vidrios especiales, menos masivos pero elaborados con fines específicos. Dentro de los vidrios más comunes se tienen los que se pasaran a describir a continuación:

#### **a. Vidrio Sodocálcico**

Es el tipo de vidrio más utilizado para fabricar todo tipo de contenedores (botellas, cristalerías de mesa, ampollitas, vidrios para ventanas y vidrios laminados), los recipientes hechos a partir de vidrio sodocálcico son prácticamente inertes, de modo que no contaminan el contenido del mismo. Son poco resistentes al choque térmico.

#### **b. Vidrio al Plomo**

Es el resultado de fórmulas que combinan óxidos de potasio con óxido de plomo, y es también conocido como cristal al plomo. El vidrio al plomo es pesado y tiene un alto índice de refracción, por lo que es útil para proteger al personal en instalaciones nucleares.

#### **c. Vidrio Borosilicato**

Este vidrio contiene óxido bórico entre sus ingredientes fundamentales, junto con sílice y álcali. Destaca por su durabilidad, resistencia a los ataques químicos y choques térmicos, por lo que se utiliza en muchos utensilios de cocina, aparatos de laboratorio y equipos para procesos químicos.

Los vidrios sodocálcico, al plomo y borosilicato son los tipos de vidrios más comunes, por esta razón solo se habla de estos tipos de vidrio, dado que, la finalidad de este trabajo es: usar vidrios que se desechan de forma cotidiana. Todos los tipos de vidrio mencionados anteriormente se pueden usar para añadirse a mezclas de concreto, por su similar composición química, en la Tabla No. 2-15, se muestra la composición química de estos tipos de vidrio.

*Tabla No. 2-15: Composición química de los tipos de vidrio más comunes.*

<b>Vidrio y usos</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>B<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>BaO</b>
<b>Vidrio Sodocálcico</b>								
<b>Contenedores (%)</b>	66-75	0.7-7		12-16	0.1-3	0.1-5	6-12	
<b>Floar (%)</b>	73-74			13.5-15	0.2	3.6-3.8	8.7-8.9	
<b>Vidrio laminado</b>	71-73	0.5-1.5		12-15		1.5-3.5	8-10	
<b>Ampolletas utensilios (%)</b>	73	1		17		4	5	
<b>Templados para horno (%)</b>	75	1.5		14			9.5	
<b>Vidrio al plomo</b>								
<b>Tubos de rayos (%)</b>	54	2		4	9			23
<b>TV colores (%)</b>								
<b>Tubos de neón (%)</b>	63	1		8	6			22
<b>Partes eléctricas (%)</b>	56	2		4	8			29
<b>Vidrio Borosilicato</b>								
<b>Aparatos químicos (%)</b>	81	2	13	4				
<b>Farmacéuticos (%)</b>	72	6	11	7	1			
<b>Tugsten sealing (%)</b>	74	1	15	4				

Fuente: MC LELLAN, G. W., SHAND, E. B., 1984. Glass Engineering Handbook, McGraw Hill, Inc. (Original no consultado, citado por: Caijun Shi y Keren Zheng, 2007. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources Conservation & Recycling n°52

#### 2.6.4. Características de los tipos de vidrio.

En la Tabla No. 2-16 se muestra un resumen de las características de los tipos de vidrio mencionados en el apartado 2.6.3 Tipos de Vidrio.

Tabla No. 2-16: Resumen de características de los tipos de vidrio más comunes.

Nombre	Características
<b>Sodocálcico o Soda - Cal</b>	Este tipo vidrio es el más utilizado, pues sus propiedades lo hacen adecuado para su uso con luz visible. Los recipientes hechos con este tipo de vidrio de soda – cal son virtualmente inertes, no contaminan la materia que contienen ni su olor. Son poco resistentes al choque térmico.
<b>Plomo</b>	Utiliza óxido de plomo en lugar de óxido de calcio, y óxido de potación en lugar del óxido de sodio, y se conoce comúnmente como vidrio al plomo. Los vidrios al plomo tienen un alto índice de refracción y una superficie relativamente blanda, lo que permite una fácil decoración por esmerilado, corte o tallado
<b>Borosilicato</b>	Este compuesto principalmente de sílice (70 – 80 %) y oxido bórico (7 – 13 %) con pequeñas cantidades de álcalis (óxido de sodio y potasio) y oxido de aluminio. Su principal característica es una buena resistencia a los choques térmicos.

Fuente: british glass manufacturers confederation (BGMC), 1999

## **2.7. Propiedades Físicas, Mecánicas y Químicas del Vidrio.**

El vidrio posee algunas características que lo hacen muy útil para la fabricación de distintos objetos como por ejemplo ventanas, botellas, frascos y vasos. La resistencia de los envases de vidrio es realmente sorprendente en algunos casos. Está determinada por los siguientes puntos: forma del envase, distribución de vidrio y grado de recocido. Al tener algún defecto en su resistencia, pueden ocurrir distintos tipos de fractura: por impacto, por choque térmico o por presión interna; todas ellas originadas por una descompensación en las fuerzas de tensión interna. Las imperfecciones en los envases de vidrio no sólo provocan rupturas, sino muchas otras consecuencias, como defectos en las máquinas que las manejan, defectos de apariencia o reacción en el contenido.

Dependiendo de la composición, algunos vidrios funden a temperaturas muy bajas, como 500 °C, mientras que otros necesitan 1650 °C, aunque por lo general, al presentar un elevado contenido de sílice, la temperatura final de fusión es más cercana a este último valor. El vidrio es un mal conductor de calor y electricidad, por lo que resulta práctico para el aislamiento térmico y eléctrico.

### **2.7.1. Propiedades físicas**

#### **a. Color del vidrio**

El color natural de vidrio es un tono verdoso, al que se le agregan decolorantes para hacerlo traslúcido, y colorantes para conferirle distintas tonalidades. Los envases de vidrio de colores sirven para proteger el contenido de la luz, por lo que sus principales usos se dan en la industria de alimentos (aunque últimamente su uso es limitado a contenidos líquidos, como licores, aceites, etc.); otros usos

del vidrio en sus distintas tonalidades: ventanas, utensilios de cocina y algunos fines estructurales.

Ya que el color del vidrio depende directamente de la composición química del mismo. Los colores más comunes en botellas de vidrio son: verde, ámbar y transparente, siendo el más expansivo de los tres el vidrio transparente, seguido por el ámbar, y el menos reactivo en ese aspecto el vidrio verde, debido principalmente a la presencia de óxido de cromo en su composición, el que es agregado por los fabricantes para poder lograr la tonalidad verde en el cristal (Jin et al., 2000)

**b. Textura**

Los vidrios al pasar a ser fundidos, este se nivela y aplanan formando una superficie lisa y homogénea. Cuando el vidrio no se funde por completo, la superficie resultante puede ser rugosa y con una tonalidad mate y opáco.

**c. Maleabilidad**

Los vidrios en etapa de fusión, presentan la característica de ser maleables, por lo que se pueden moldear y dar forma que se requiera.

**2.7.2. Propiedades mecánicas del vidrio**

**a. Resistencia a la compresión**

El vidrio posee una alta resistencia a compresión, estimándose en el orden de 10,000kg/cm<sup>2</sup>.

**b. Resistencia a la tracción**

No es posible dar un valor exacto a la resistencia a la tracción de un vidrio, ya que esta dependerá en parte de las micro-fisuras que tenga en su superficie. Sin embargo, se estima que la resistencia para el vidrio templado  $1000 \text{ kg/cm}^2$ , resistencia para el vidrio recocido  $400 \text{ kg/cm}^2$ .

**c. Resistencia a la flexión**

La carga a flexión se descompone en una carga a tracción y otra a compresión. Debido a que la resistencia del vidrio a tracción siempre será menor que la resistencia a compresión y en consecuencia el vidrio romperá por este esfuerzo, la resistencia a flexión será semejante a la de tracción.

**2.7.3. Propiedades químicas del vidrio**

Los vidrios no son materiales completamente inertes, dado que si presentan reacciones químicas: al agua, a los ácidos y a los agentes atmosféricos; lo anterior nos ayuda a entender cuáles serán las propiedades químicas presentes en el vidrio:

**a. Resistencia al agua.**

El agua ataca a algunos de los componentes del vidrio lo que se manifiesta en pequeñas pérdidas de masa, los daños que produciría el agua dependen de: tiempo de exposición, temperatura, composición del vidrio, el estado de la superficie y la agitación. Debido a lo anterior se dice que el vidrio presenta una

buena resistencia al agua, porque la exposición a temperatura ambiente le genera pérdidas de masa son inapreciables.

***b. Resistencia a los ácidos.***

Los efectos de los ácidos en el vidrio son depreciables, ya que del vidrio se desprenden iones preferentemente monovalentes. Con ello se forma un gel de sílice, muy delgada sobre la superficie del vidrio que inhibe el ataque de los ácidos

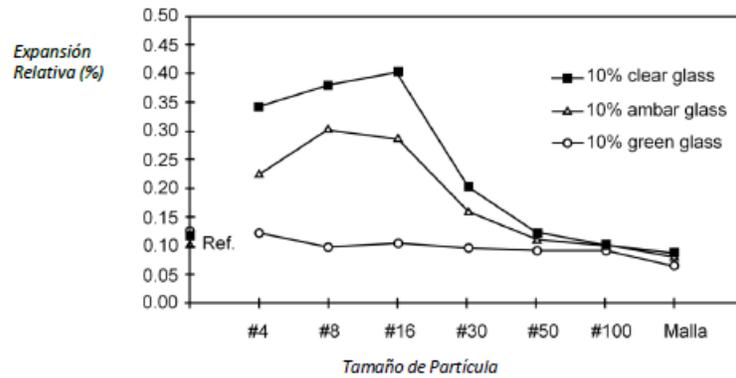
***c. Resistencia a los agentes atmosféricos.***

El ataque de los agentes atmosféricos produce sobre el vidrio manchas y escamas. El principal agente atmosférico que ataca al vidrio, es el agua contenida en la atmosfera que se condensa en la superficie del vidrio. Esta pequeña cantidad es peligrosa ya que da lugar a una disolución concentrada de hidróxido de sodio (NaOH) que ataca al vidrio. Resulta recomendable evitarlo en la medida de lo posible.

**2.8. Criterios para la selección del vidrio a utilizar en el concreto**

En consistencia con la sección 2.4, es particularmente deseable controlar la expansión del concreto, producto de la reacción ASR, principalmente por un tema de serviciabilidad del concreto estructural; se ha podido determinar la estrecha relación entre el color del vidrio utilizado y la expansión relativa en piezas de concreto con vidrio como agregado, (ver Figura No. 2-26).

Figura No. 2-26: Expansión en barras de mortero con un 10 % de agregado de vidrio, de acuerdo al tamaño de partícula y color del vidrio.



Fuente: JIN W.; C. MEYER, S. BAXTER. 2000. Glascrete – Concrete with Glass Aggregate. ACI Materials Journal, March–April 2000.

Por lo tanto, se considera que el color de vidrio con el que mejor comportamiento se obtiene en las mezclas de concreto es verde.

### 2.9. Comportamiento esperado en el concreto con adición de vidrio molido.

Luego de haber estudiado algunos antecedentes sobre el uso del vidrio en el concreto, comparar tipos de cementos, definir que es el vidrio y tomar algunos parámetros para definir las características del vidrio, se puede recapitular y definir lo siguiente:

- El vidrio molido será sustituido por una parte del agregado fino, por carecer de la maquinaria para triturar el vidrio al tamaño necesario para hacer la sustitución del vidrio por cemento.

- Debido a los antecedentes consultados, con relación al uso del vidrio en el concreto, se estudiará las sustituciones de vidrio molido por arena en porcentajes de 15 %, 20 % y 25 %, dado que estos porcentajes están dentro del rango donde se han observado mejoras en el comportamiento del concreto.
- El tipo de cemento que se utilizará, será un cemento bajo la especificación ASTM C1157 tipo GU, ya que es el equivalente en nuestro medio del ASTM C 150 Tipo I, y es el de uso más frecuente en nuestro medio.
- Se usará vidrio de tipo sodocálcico, proveniente de botellas de color verde, con la especificación de tamaño: que al menos el 50 % pase la malla No 50 (297  $\mu\text{m}$ ), dado que en el apartado **Criterios para la selección del vidrio a utilizar en el concreto**, se definió que: el color y el tamaño mencionados reducen la probabilidad de expansiones en el concreto.

Con estas consideraciones se espera: que la resistencia a la compresión del concreto con vidrio incluido en comparación con la mezcla de control aumente, para todas las mezclas de concreto.

No se esperaría tener reacción álcali – sílice, debido a varios factores que se han tomado en cuenta, los cuales son:

- Que solo se usará vidrio de color verde por ser el color natural del vidrio y éste tiende a ser menos reactivo que los vidrios de otros colores, además

se incorporará en tamaños menores a 297  $\mu\text{m}$  (pasante la malla No 50) el cual comienza a tener un comportamiento similar al de la puzolana.

- El cemento bajo la norma ASTM C1157 posee menos álcalis.
- Los agregados que se encuentran en nuestro país son de origen basáltico los cuales tienen poca sílice.

### **2.10. Reciclaje y Reutilización del Vidrio**

El reciclaje del vidrio es el resultado de una serie de actividades, mediante las cuales los envases de vidrio que se volvieron basura, se acopian, se recolectan y se procesan para ser usados como materia prima en la manufactura de bienes que anteriormente se elaboraban con vidrio virgen.

#### **2.10.1. Ventajas en el Reciclaje del Vidrio**

Se pueden mencionar tres ventajas por las cuales se debe de reciclar el vidrio, que son las siguientes:

1. Disminuye la cantidad de basura que se debe enterrar (por lo tanto, aumenta la vida útil de los rellenos sanitarios).
2. Preservación de recursos naturales, dado que una de las materias primas del vidrio es la arena como se mencionó en la sección 2.6 **Vidrio**
3. Economiza energía y reducción de la contaminación del agua y el aire.

### **2.11. Recomendaciones de Seguridad en el Manejo del Vidrio Triturado**

Las personas que trabajen y manipulen el vidrio se ven expuestas a peligros potenciales que pueden generar algún tipo de daño o lesión. En especial en el caso de trabajar con vidrios de desecho pues éstos son depositados en los contenedores donde se quiebran en pedazos grandes y pequeños, con puntas filosas, pedazos muy finos, etc. Son muchas las formas en que se encuentran los vidrios que son producto de desecho.

El riesgo de un corte por la manipulación del vidrio desechado es alto por lo que es necesario utilizar Equipo de Protección Personal (EPP) para las manos y la vista, la utilización de guantes resistentes a cortes y punzones es imprescindible. Se recomienda recurrir a guantes anatómicos con palma Dyneema, el cual es un material sintético que tiene las mismas propiedades protectoras que el Kevlar pero que es más flexible, lavable, liviano y no causa irritación.

La protección respiratoria varía dependiendo del tamaño de partícula con el cual se trabaja, así entonces puede ser obligatoria o no. Las partículas con diámetros menores a 100 micras son inhalables y se debe usar protección respiratoria.

El tipo de protección (mascarilla o respirador) varía según la concentración y el tiempo de exposición, por lo que es necesario realizar una Evaluación del Riesgo para determinar el tipo de protección más adecuado. El equipo de protección respiratoria tiene 3 componentes los cuales deben ser evaluados para escoger el más indicado:

- Tipo de protección: desde mascarillas desechables hasta aparatos de respiración autocontenidos.
- Resistencia a aceite: el equipo puede ser N (no resistente a aceites), R (resistente a aceites) o P (a prueba de aceites).
- Porcentaje de eficiencia del filtro: 95, 99 ó 100 (99.97) %.

Así se puede escoger por ejemplo una mascarilla desechable con un filtro R99 o un respirador de media cara con un filtro N95, todo dependiendo de los resultados de la Evaluación de Riesgos.

Así mismo Gómez (2014) indica que los EPP son solo una barrera entre el trabajador y el riesgo, por lo que hay que tomar otras medidas a la hora de trabajar con vidrio como las siguientes:

- Asegurarse de mantener un lugar de trabajo limpio y ordenado para evitar caídas o tropezones, especialmente cuando se están trasladando láminas de vidrio.
- Dependiendo del tamaño de las láminas, hacerles una marca visible con un pilot para evitar que alguien se accidente contra ellas durante el transporte.
- Evitar, siempre que sea posible, el almacenamiento o manipulación del vidrio a alturas superiores a la cabeza.
- Si es necesario transportar el vidrio molido, procurar hacerlo en recipientes cerrados para evitar derrames.

- Evitar levantar más de 25kg por persona.

Recalcando que la sílice es el principal componente de los vidrios planos, se considera que de no usarse los EPP adecuados un trabajador puede contraer diversas afectaciones tanto físicas como al sistema respiratorio. Organizaciones norteamericanas como son las Occupational Safety & Health Administration (OSHA) y la National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) perteneciente al Center for Disease Control and Prevention (CDC) poseen diversos documentos donde se habla de la afectaciones a la salud debido a las partículas respirables de la sílice, así como normas para la medición y concentraciones máximas permitidas y el equipo correspondiente de acuerdo a la concentración.

# Capítulo III

# METODOLOGÍA DE TRABAJO Y CRITERIOS DE SELECCIÓN DE MATERIALES

## 3.1. Introducción

El trabajo experimental constituye una parte fundamental de esta investigación, cuando se requiere determinar la influencia que tiene sustituir parcialmente vidrio molido en el agregado fino, verificando las variaciones que pueden darse en las propiedades del concreto, en estado fresco y en estado endurecido.

En este capítulo, se describe la metodología que se tomará en cuenta para el desarrollo de la investigación, definiendo parámetros fijos y variables, los ensayos a realizar a cada uno de los componentes del concreto, y finalmente obtener la caracterización de los materiales, las cuales servirán para el diseño de las mezclas de concreto hidráulico.

Para desarrollar el capítulo, se hace necesario definir los requisitos que deben satisfacer los materiales en el diseño de mezclas de concreto, por lo que se citarán algunos apartados de las normativas para definir los criterios y la selección apropiada de los materiales a utilizar.

### **3.2. Objetivo de la Metodología de trabajo.**

Para cumplir con las metas de este trabajo, se pretende realizar una investigación donde se elabore una mezcla de concreto que cumpla con los parámetros de diseño establecidos, esta mezcla posteriormente será reproducida con distintas proporciones de agregado fino por vidrio, con el fin de evaluar el efecto que tiene estas adición sobre las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. Por lo que la planificación de las etapas a seguir sería la siguiente:

### **3.3. Definición de parámetros fijos y variables en la investigación**

#### **3.3.1. Parámetros fijos**

Por la naturaleza del trabajo, debe definirse aquellos parámetros que inciden en el desarrollo de la investigación. Un parámetro fijo, es: “Aquella característica, propiedad o condición (de los materiales, procedimientos o actividades) que durante el proceso de la investigación se mantienen inalterables”.

A continuación se describen los parámetros que se mantendrán fijos durante la investigación:

#### **a. Condiciones de laboratorio.**

Todos los ensayos a realizar para obtener propiedades físicas de los agregados en el desarrollo de la investigación; la elaboración y ensayos a las mezclas de concreto, así como los ensayos a las unidades a las diferentes edades en estado fresco y endurecido, se realizarán en el Laboratorio de Suelos y Materiales "Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina “, de la Escuela de Ingeniería Civil en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, Dichas pruebas de laboratorio serán efectuadas por el grupo de trabajo de graduación de esta

investigación, realizando los ensayos a los agregados para determinar las propiedades físicas, además de las pruebas preliminares al concreto, para luego reproducir los cuatro diseños definitivos, todo por medio de la asesoría de los docentes directores de esta investigación; así como también, el apoyo del personal técnico del laboratorio.

**b. Relación agua - cemento (A/C)**

La relación agua - cemento se mantendrá constante para todas las mezclas (mezcla patrón y con sustitución parcial de vidrio molido), definiendo este parámetro de esta forma, se considera que el diseño no variará debido a la relación agua/cemento.

**c. Tipo de cemento**

Para todas las mezclas se utilizará un cemento hidráulico Tipo GU, elaborado bajo la norma ASTM C-1157.

**d. Agua**

En todas las mezclas se utilizará agua potable, proveniente de la red pública de ANDA (Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados), la cual abastece a la Universidad de El Salvador. La norma ASTM C-1602, referencia los requisitos de la calidad del agua para la elaboración de concretos de buena calidad. (Los requerimientos de ésta no se verificarán ya que se tienen antecedentes de buen desempeño con su uso en mezclas de concreto).

**e. Agregado grueso**

El agregado grueso será grava triturada que se obtiene de la fragmentación de roca basáltica, el cual se utilizará en todas las mezclas, tendrá un tamaño máximo nominal (TMN) de 3/4" y proviene de La Cantera S.A. de C.V. de San Diego, La Libertad.

**f. Revenimiento**

Se considera que el asentamiento en el cono de Abrams es un parámetro fijo (se diseñara la mezcla para un valor de revenimiento de 4"), por tolerancia según lo que establece ASTM C94 se utilizara un valor de  $4 \pm 1$  pulgadas. Este valor se considerará constante únicamente para la mezcla de control; sin embargo, por las propiedades que se vean modificadas al sustituir parcialmente el agregado fino por vidrio molido, que no posee absorción, puede que el revenimiento varíe debido a la influencia de la sustitución, pero se conservará la relación agua cemento, para poder evaluar este comportamiento.

**g. Tamaño máximo de las partículas de vidrio**

El tamaño máximo de las partículas de vidrio será 4.75 mm correspondiente a la Malla No. 4, para ser utilizado como sustituto parcial de arenas. En el Capítulo I – Alcances y Limitaciones se hace una referencia de acuerdo al tamaño de las partículas, donde al menos el 50% del vidrio molido deberá pasar la Malla No. 50 (300 micras), según antecedentes, la trabajabilidad del concreto se ve afectada por la cantidad de material que pasa la malla No 50 y se retiene en la malla No 100. "Concreto con agregados finos cerca de los mínimos para el porcentaje que

pasa las 300  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$  (Mallas No. 50 y No. 100 respectivamente) a veces tienen dificultades con la trabajabilidad, bombeo o sangrado excesivo”, (ASTM C33-13, Apartado No. 6, Nota No. 2).

***h. Método de proporcionamiento de mezclas***

El proporcionamiento de las mezclas de concreto se calculará según la metodología propuesta por el Comité ACI 211.1 “Práctica estándar para la selección del proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo”.

***i. Resistencia de diseño y control***

Se diseñará una mezcla de concreto de control, que deberá tener una resistencia a la compresión mínima de 280  $\text{kg/cm}^2$  a los 28 días, misma que se utilizará para el cálculo de diseño y proporcionamiento de las mezclas de concreto al sustituir parcialmente vidrio molido por arena.

***j. Curado de especímenes de concreto***

Las probetas se almacenarán en pilas de curado ubicadas en el Laboratorio de Suelos y Materiales “Ing. Mario Ángel Guzmán Urbina”, de la Escuela de Ingeniería Civil en la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador, el agua de curado se deberá mantener limpia, con cal y fresca.

**3.3.2. Parámetros variables**

Todas aquellas variables que en el proceso experimental dentro de la investigación no se tendrá control sobre ellas, se consideran parámetros

variables; sin embargo, estos pueden verse modificados dependiendo de las condiciones ambientales del lugar y afectar el desarrollo del estudio. Adicionalmente, afectarían la calidad con que se elabore y desarrolle los distintos especímenes; por lo tanto, los parámetros variables se detallan a continuación:

**a. Agregado fino**

El agregado fino será procedente del río Tihuapa, cuyo banco es administrado por la Cantera S. A. de C. V.; el tamaño máximo nominal es de 4.75 mm (Malla No. 4); este material se considera variable debido al uso en las distintas mezclas, cuya dosificación es dependiente del porcentaje de sustitución de vidrio.

**b. Temperatura del concreto**

La temperatura del concreto es otro parámetro que se considera variable, esto se debe a que es afectada directamente por las condiciones ambientales a las cuales estén expuesto todos los componentes del mismo, pero se propone la limitante a no tener concretos con una temperatura mayor a los 32 °C (este parámetro, será válido únicamente para la mezcla de concreto patrón o de referencia).

**c. Humedad de los agregados**

Se considera que la humedad de los agregados debe mantenerse constante entre mezclas de concreto, sin embargo, dadas las condiciones ambientales, el almacenamiento de los mismos, la humedad de estos puede variar de un día de trabajo a otro, por lo que previo a la elaboración de una mezcla será necesario determinar esta característica y corregir la mezcla por humedad y absorción con el fin de no cambiar la relación A/C.

**d. *Tiempos de fraguado del concreto***

El fraguado del concreto es un parámetro que depende mucho de las condiciones ambientales y del proceso de hidratación del cemento, por lo que se considera un parámetro no controlable, este será determinado mediante el ensayo de penetración bajo la norma ASTM C 403 “Método de ensayo estándar para el tiempo de fraguado de mezclas de concreto, por resistencia a la penetración”.

**e. *Peso volumétrico del concreto fresco***

El peso volumétrico del concreto fresco se considera variable entre una mezcla y otra, a causa de la adición del vidrio, esto ocurrirá a pesar de pertenecer al mismo diseño. La incidencia que tendrá la sustitución del vidrio por una cantidad de arena en las mezclas, se verá reflejado durante la determinación de este parámetro a las distintas dosificaciones.

**f. *Contenido de aire del concreto fresco***

En el diseño de las mezclas debido a las condiciones de exposición del concreto a ser diseñado, se considerará un concreto que no se adicionara aire, por lo que el contenido de aire atrapado para la mezcla de control estará en función de lo establecido en el comité ACI 211.1, sin embargo, este parámetro se considera que puede diferir de los valores dados en la normativa, debido a las propiedades que se vean modificadas al introducir vidrio molido en el concreto.

**g. *Combinación de agregado fino y vidrio molido***

El centro fundamental de esta investigación, está basado en las mezclas que se realizaran utilizando vidrio molido como sustituto parcial del agregado fino (arenas), siendo el vidrio molido una cantidad que variará entre 15 – 25 % del

peso del agregado fino, por lo que directamente se vería afectada la cantidad de arenas a utilizar para cada una de las mezclas.

### **3.4. Requisitos de los materiales para el concreto.**

En este apartado se definirán todos los requisitos de calidad que deben cumplir los materiales a utilizar, para la elaboración del concreto en el laboratorio.

Para el desarrollo experimental del estudio de las propiedades físicas de los materiales; así como las propiedades del concreto en su estado fresco y endurecido, se considera regirse por normativas y/o especificaciones técnicas las cuales ayuden para que los resultados sean confiables y precisos.

#### **3.4.1. Cemento**

Es necesario destacar que en esta investigación se utilizará únicamente cemento tipo GU (de uso general), que satisface los requisitos de la norma ASTM C1157; este tipo de material cementante fue seleccionado debido a que es adecuado para todas las aplicaciones donde las propiedades especiales de los otros tipos no sean necesarias.

En la Tabla No. 3-1 se muestran los requisitos de control de calidad que debe satisfacer el cemento elaborado bajo la norma ASTM C1157 tipo GU, (generalmente se solicita una certificación de calidad al fabricante de cementos, para poder corroborar los requisitos establecidos por la norma).

Tabla No. 3-1: Especificación Estándar para Cemento ASTM C1157 tipo GU.

Propiedad o característica	Método de ensayo aplicable	Requisito
Finura	ASTM C204 ASTM C430	
Cambio de longitud en autoclave, máx. (%)	ASTM C151	0.8
Tiempo de fraguado con agujas de Vicat (min)	ASTM C191 Inicial, no menor que: Final, no mayor que:	45 420
Resistencia mínima a la compresión MPa (Psi)	ASTM C109/C109M 1 día 3 días 7 días 28 días	--- 13(1890) 20(2900) 28(4060)
Calor de hidratación kJ/kg (kcal/kg)	ASTM C186 7 días 28 días	--- ---
Expansión de barras de mortero a 14 días, %máx.	ASTM C1038	0.020
Expansión por sulfatos (Resistencia a los sulfatos)	ASTM C1012 6 meses, máx. (%) 1 año, máx. (%)	--- ---

Fuente: ASTM C1157-11, Especificación de desempeño para cementos hidráulicos 2011. (Performance Specification for Hydraulic Cements).

Nota: En esta tabla no se detallan todos los requerimientos exigidos por la Especificación, se han colocado nada más, aquellos parámetros relevantes para esta investigación.

### 3.4.2. Agua para concreto

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se puede utilizar como agua de mezcla (de mezclado, de amasado) para la preparación del concreto. La norma ASTM C1602 “Especificación estándar para agua de amasado usada en la producción de concreto de cemento hidráulico” permite el uso de agua potable sin practicarle ensayos, siempre y cuando se posea un buen historial para el uso y elaboración de concreto. Si se

desea conocer las especificaciones con mayor amplitud, se recomienda verificar los requisitos de la norma ASTM C1602.

### 3.4.3. Agregado Fino

Los requisitos de control de calidad que debe cumplir la arena utilizada en las mezclas de concreto se enlistan en la Tabla No. 3-2, donde se describen las especificaciones generales del agregado fino.

*Tabla No. 3-2: Especificaciones para el agregado fino.*

<b>Descripción</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Especificación ASTM C 33</b>
<b>Análisis granulométrico</b>	ASTM C136	Véase la tabla No 3-3
<b>Densidad Bulk y porcentaje de vacíos</b>	ASTM C29	...
<b>Gravedad específica</b>	ASTM C128	2.4 < Gs < 2.9
<b>Absorción</b>	ASTM C128	Abs < 6.0 %
<b>Impurezas orgánicas</b>	ASTM C40	Color estándar máx. 3
<b>Módulo de finura <sup>A</sup></b>	ASTM C136	2.3 < MF < 3.1

A. El módulo de finura se define en la terminología de agregados para el concreto ASTM C125-13, donde también se especifica la forma de obtención del mismo. ASTM C33-13 define el parámetro MF en el apartado 6.1.

Fuente: Ing. Jorge Rugamas Dinarte. El Salvador 2012. Influencia de la arena triturada, como agregado fino, en las propiedades en estado fresco y endurecido, de mezclas de concreto hidráulico; Capítulo III, Apartado 3.6.2, Tabla 3.4.

En la Tabla No. 3-3, se presenta los requisitos granulométricos para agregado fino, según lo que establece ASTM C-33, que servirá en esta investigación:

Tabla No. 3-3: Límites granulométricos que establece ASTM C33 para agregado fino.

Abertura de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (N°4)	95 – 100
2.36 mm (N°8)	80 – 100
1.18 mm (N°16)	50 – 85
0.60 mm (N°30)	25 – 60
0.30 mm (N°50)	5 – 30
0.15 mm (N°100)	0 – 10

Fuente: ASTM C33-13, Especificación estándar de agregados para concreto

#### 3.4.4. Agregado grueso

Los requisitos que debe cumplir el agregado grueso para verificar su calidad y su correcta aplicación como componente del concreto son los que se establecen en la Tabla No. 3-4:

Tabla No. 3-4: Especificaciones para el agregado grueso.

Descripción	Método de ensayo	Especificación ASTM C 33
Número de granulometría	...	Véase la Tabla No. 3 – 5
Densidad Bulk y porcentaje de vicios	ASTM C29	1260 – 1750 kg/m <sup>3</sup>
Gravedad Específica	ASTM C127	2.4 < G <sub>s</sub> < 2.9
Absorción	ASTM C127	Abs < 4.0 %

Fuente: Ing. Jorge Rugamas Dinarte. El Salvador 2012 "Influencia de la arena triturada, como agregado fino, en las propiedades en estado fresco y endurecido, de mezclas de concreto hidráulico" Capítulo III, Apartado 3.6.2, Tabla 3.5.

Cuando se describe una clasificación de tamaños de partículas se usa el número de tamaño de la granulometría (o tamaño de granulometría). El número de tamaño se aplica a la cantidad colectiva de agregado que pasa a través de un arreglo de tamices como se muestra en la Tabla No. 3-5.

Tabla No. 3-5: Especificación de tamaños para agregado grueso.

No.	Tamaño nominal. Pulg. (mm)	Cantidades más pequeñas que cada tamiz (aberturas cuadradas), porcentaje de peso													
		4" (100mm)	3½" (90mm)	3" (75mm)	2½" (63mm)	2" (50mm)	1½" (37.5mm)	1" (25mm)	¾" (19mm)	½" (12.5mm)	3/8" (9.5mm)	Nº4 (4.75mm)	Nº8 (2.36mm)	Nº16 (1.18mm)	Nº50 (0.3mm)
1	3½ - 1½ (90 - 37.5)	100	90-100	...	25-60	...	0-15	...	0-5	...	...	...	...	...	
2	2½ - 1½ (63 - 37.5)	...	...	100	90-100	35-70	0-15	...	0-5	...	...	...	...	...	
3	2 - 1 (50 - 25)	...	...	...	100	90-100	35-70	0-15	...	0-5	...	...	...	...	
357	2 - Nº4 (50 - 4.75)	...	...	...	100	95-100	...	35-70	...	10-30	...	0-5	...	...	
4	1½ - ¾ (37.5 - 19)	...	...	...	...	100	90-100	20-55	0-15	...	0-5	...	...	...	
467	1½ - Nº4 (37.5 - 4.75)	...	...	...	...	100	95-100	...	35-70	...	10-30	0-5	...	...	
5	1 - ½ (25 - 12.5)	...	...	...	...	...	100	90-100	20-55	0-10	0-5	...	...	...	
56	1 - 3/8 (25 - 9.5)	...	...	...	...	...	100	90-100	40-85	10-40	0-15	0-5	...	...	
57	1 - Nº4 (25 - 4.75)	...	...	...	...	...	100	95-100	...	25-60	...	0-10	0-5	...	
6	¾ - 3/8 (19 - 9.5)	...	...	...	...	...	...	100	90-100	20-55	0-15	0-5	...	...	
67	¾ - Nº4 (19 - 4.75)	...	...	...	...	...	...	100	90-100	...	20-55	0-10	0-5	...	
7	½ - Nº4 (12.5 - 4.75)	...	...	...	...	...	...	...	100	90-100	40-70	0-15	0-5	...	
8	3/8 - Nº8 (9.5 - 2.66)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85-100	10-30	0-10	0-5	
89	3/8 - Nº16 (9.5 - 1.18)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90-100	20-55	5-30	0-10	0-5
9 <sup>A</sup>	Nº4 - Nº16 (4.75 - 1.18)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85-100	10-40	0-10	0-5

A. El agregado de tamaño número 9 se define en la Terminología C125 como un agregado fino. Se incluye como un agregado grueso cuando se combina con un material de tamaño 8 para crear un tamaño de 89, que es agregado grueso según lo definido por la Terminología C125.

Fuente: ASTM C33-13, Especificación estándar de agregados para concreto

**Granulometría a emplear No. 6, 3/4" - Nº4**

### 3.5. Definición de ensayos para concreto en estado fresco y estado endurecido.

#### 3.5.1. Concreto en estado fresco

Los requisitos que debe satisfacer el concreto en estado fresco se enlistan en la Tabla No. 3-6, detallando las especificaciones a seguir y los parámetros a tomar en cuenta.

*Tabla No. 3-6: Lista de ensayos para concreto en estado fresco.*

Ensayo	Método de ensayo	Parámetro
Hechura de mezclas	ASTM C192	...
Muestreo del concreto fresco	ASTM C172	...
Temperatura del concreto	ASTM C1064	No mayor a 32 °C (según ASTM C94-13 sección 12.10) Nota: Este requisito se exigirá nada más a la mezcla de referencia.
Revenimiento	ASTM C143	4 ± 1 pulg. (ASTM C94-13 sección 7.1.2) Nota: Este requisito se exigirá nada más a la mezcla de referencia
Contenido de aire	ASTM C138	2 % (Comité ACI 211.1 para un TMN 3/4" y un Rev de 4" )
Tiempo de fraguado	ASTM C403	<b>Fraguado inicial</b> Hasta que la mezcla presente una resistencia a la penetración de 35.7 kg/cm <sup>2</sup> <b>Fraguado final</b> Hasta que la mezcla presente una resistencia a la penetración de 280 kg/cm <sup>2</sup>
Elaboración de especímenes de ensayo	ASTM C192	...
Curado de especímenes de ensayo	ASTM C192	...

Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.2. Concreto en estado endurecido

La Tabla No. 3-7, muestra los ensayos en concreto endurecido que se realizaron en esta investigación.

*Tabla No. 3-7: Ensayos en concreto endurecido.*

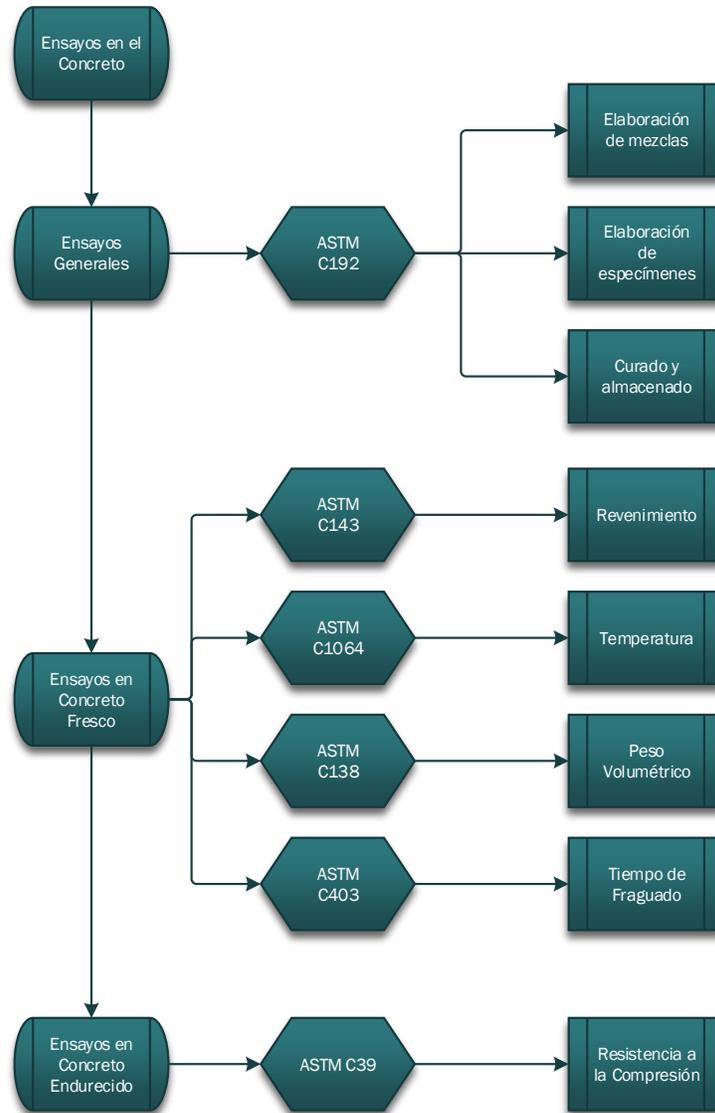
<b>Ensayo</b>	<b>Método de ensayo</b>	<b>Requisito</b>
<b>Determinación de la resistencia a la compresión en cilindros de concreto <sup>A</sup></b>	ASTM C39-12	280kg/cm <sup>2</sup> Nota: Este requisito se exigirá nada más a la mezcla de referencia

A. Se espera que la resistencia a la compresión de los especímenes de concreto cumpla con los requisitos de diseño, sin embargo, por la adición de vidrio este parámetro será un valor variable para los 28 días.

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura No. 3-1 se muestra una secuencia lógica de realización de ensayos para el concreto en estado fresco y en estado endurecido.

Figura No. 3-1: Esquema secuencial de realización de ensayos en el concreto.



Fuente: Elaboración propia.

### 3.6. Cantidad de especímenes de ensayo.

Para un correcto control de los resultados de compresión de especímenes y evitar sesgos por resultados con variaciones fuera de los parámetros de diseño, se propone tener una cantidad considerable de probetas de ensayo, para ello se detalla la cantidad de ensayos a realizar y el número de especímenes a elaborar en la Tabla No 3-8.

Tabla No. 3-8: Listado de muestras y número de ensayos a realizar.

Descripción	Método de ensayo	Numero de especímenes / Ensayos	Número de especímenes por mezcla a las diferentes edades
<b>Elaboración de especímenes de concreto</b>	ASTM C192	144 <sup>A</sup>	Mezcla patrón:
		24 a 7 días	6 a 7 días
		56 a 28 días	14 a 28 días
		64 a 56 días	16 a 56 días
<b>Ensayos de compresión</b>	ASTM C39	36/por cada mezcla	Mezcla 15% Vidrio
<b>Ensayos de Revenimiento</b>	ASTM C143	12	6 a 7 días
<b>Temperatura del concreto fresco</b>	ASTM C1064	12	14 a 28 días
<b>Tiempo de fraguado</b>	ASTM C403	4*	16 a 56 días
<b>Peso volumétrico y contenido de aire del concreto fresco</b>	ASTM C138	12	Mezcla 20 % Vidrio
			6 a 7 días
			14 a 28 días
<b>Humedad de los agregados</b>	ASTM C566	1 <sup>B</sup> y 1 <sup>B</sup>	16 a 56 días
			Mezcla 25 % Vidrio
			6 a 7 días
			14 a 28 días
			16 a 56 días

\* Debido a que se contará con una mezcla patrón y tres con variación al sustituir parcialmente el agregado fino por vidrio molido, se considera realizar únicamente 1 ensayo de tiempos de fraguado para cada tipo de concreto.

**A.** Las cantidades representadas por edad bajo el total de muestras requeridas, se divide entre 4 para obtener el total por tipo de concreto.

**B.** Para garantizar que no haya variación en la humedad de los agregados, estos serán almacenados en bolsas plásticas y apiladas en condiciones normales de laboratorio, sin embargo se monitoreará periódicamente la humedad de los agregados para hacer los ajustes necesarios en la dosificación de mezclas, si las hubiere.

Fuente: Elaboración propia

### 3.7. Codificación de especímenes de concreto.

Codificar los especímenes, induce orden al momento de procesar la información de los resultados que de éstos se deriven, a la vez permite identificar posibles causas de un resultado anómalo, esto en la medida en que se registren todas las condiciones o eventos que puedan darse durante la prueba o elaboración de especímenes.

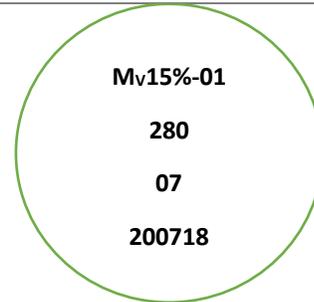
El primer paso que se realizará antes de iniciar la codificación de los especímenes de concreto, será identificar y codificar cada una de las mezclas realizadas, de la manera descrita en la Tabla No. 3-9.

*Tabla No. 3-9: Proceso de codificación de especímenes de concreto.*

<b>1. Clasificación de acuerdo al tipo de mezcla de concreto</b>	<b>Simbología a utilizar</b>
a. Mezcla patrón	<b>M<sub>P</sub></b>
b. Mezcla con vidrio como sustituto parcial del agregado fino.	<b>M<sub>V</sub></b>
<b>2. Numeración y variación</b>	
a. Mezcla patrón seguido de un numero correlativo	<b>M<sub>P</sub> - # #</b> (Ejemplo M <sub>P</sub> - 01)
b. Mezcla con vidrio como sustituto parcial del agregado fino. (Presentando el porcentaje de sustitución) seguido de un numero correlativo	<b>M<sub>V</sub>% - # #</b> Ejemplos M <sub>V</sub> 15 % - 01 M <sub>V</sub> 20 % - 01 M <sub>V</sub> 25 % - 01
<b>3. Resistencia de diseño</b>	
En este caso se maneja una única resistencia, por lo tanto la simbología será general para todos los especímenes. (f'c = 280 kg/cm <sup>2</sup> )	280
<b>Edad de ruptura</b>	
Para identificar las edades de ruptura se manejarán 2 dígitos, representando la edad en días.	07-28-56
<b>Fecha de elaboración</b>	
Para esto se utilizaran 6 dígitos consecutivos para la correcta identificación.	DDMMAA

---

**Presentación esquemática**



---

Fuente: Elaboración propia

### **3.8. Metodología de trabajo de laboratorio**

La metodología de trabajo será la siguiente:

#### **3.8.1. Planificación de trabajo.**

- Caracterización de los materiales:

En esta etapa, a los componentes del concreto se le estudiará cada una de sus propiedades, definidas en la sección 3.4 de este capítulo.

Deberá obtenerse las cantidades de materiales suficientes (Gravas, arena, y vidrio triturado) para garantizar que los resultados son representativos del material a utilizar, evitando de esta forma, variaciones en los ensayos que servirán para determinar sus propiedades. En la Figura No. 3-2 se muestra la lógica secuencial de selección de los materiales.

- Diseño de mezclas de concreto:

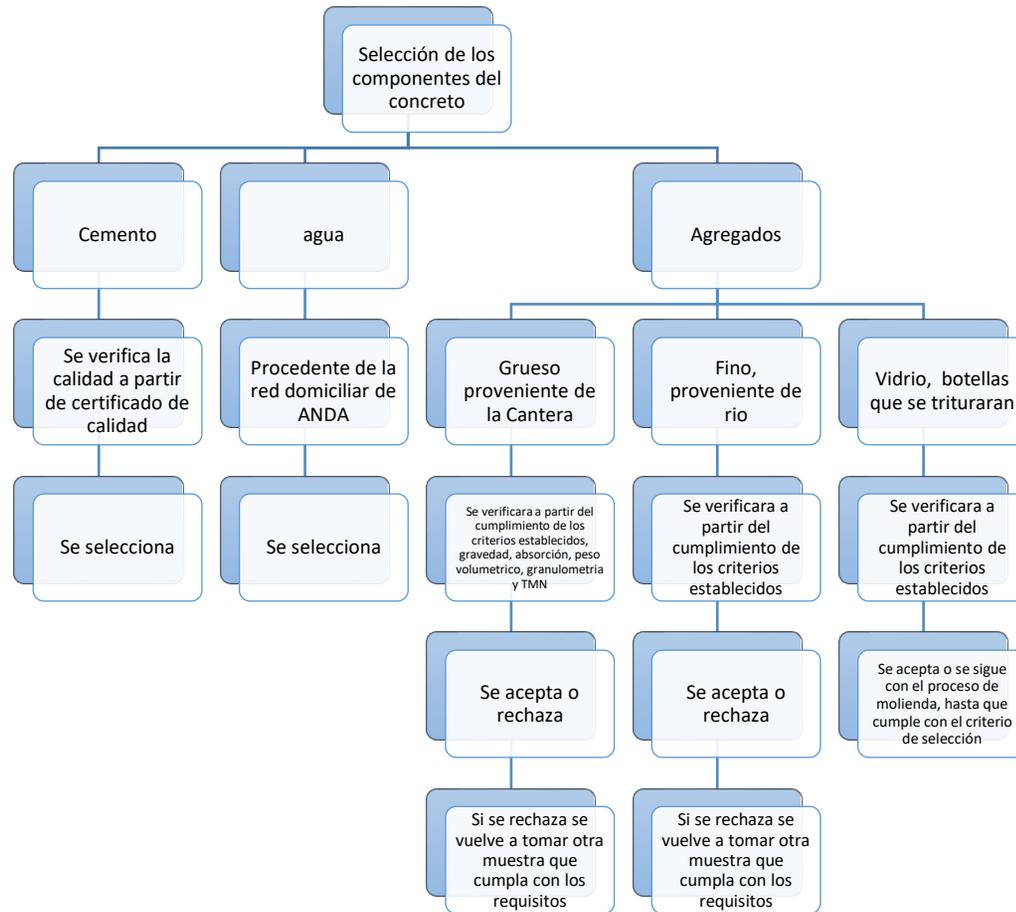
Una vez realizada la caracterización de los materiales se procederá al diseño de mezclas a partir de lo que establece ACI 211, Diseñando al menos tres mezclas con variación de la relación A/C, a las que se les evaluará la trabajabilidad y resistencia a los 28 días; al obtener estos

resultados, se seleccionará aquella mezcla de referencia que mejor se adapte con los parámetros descritos en la sección 3.3 de este capítulo; una vez definida esta mezcla se procederá a la reproducción de esta misma y el mismo diseño será aplicado a las mezclas con las distintas sustituciones de agregado fino por vidrio molido.

- Elaboración de mezclas de concreto.
  - Preparación. Previo a la elaboración de mezclas, cada uno de los materiales deberá ser pesado en las cantidades adecuadas para el día de elaboración de mezclas. También se deberá muestrear cada uno de los materiales para determinar el contenido de humedad y hacer los ajustes necesarios por humedad y absorción en el diseño de mezclas.
  - Elaboración de mezclas. Cada una de las mezclas se realizarán bajo los lineamientos de ASTM C192. La lógica secuencial de realización de ensayos posterior a la elaboración de concreto fresco, será la siguiente:
    - Toma de muestra para realización de ensayo de Revenimiento (ASTM C143); sobre la misma, se realizará la toma de Temperatura (ASTM C1064)
    - Toma de muestra para la determinación de la densidad del concreto fresco (ASTM C138);

- Adicionalmente se realizará el ensayo de tiempos de fraguado (ASTM C403).
  - Elaboración de probetas de concreto (ASTM C192).
- 
- Curado de los especímenes de concreto. Luego de desmoldadas cada una de las probetas, se procederá a identificar los especímenes, para proseguir con el curado de las mismas, bajo inmersión en agua.
  - Finalmente, para cada uno de los días de ensayo programados, se llevará a cabo la ruptura de los especímenes, tomando en cuenta las tolerancias en el tiempo de ensayo, que establece el procedimiento (ASTM C39).
  - Análisis de resultados: Al obtener los resultados del comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido de las mezclas elaboradas, se procederá a realizar su correspondiente análisis, que servirá para poder concluir sobre esta investigación.

Figura No. 3-2: Lógica de selección de materiales.



Fuente: Elaboración propia.

### **3.8.2. Molienda y tratamiento del vidrio**

En esta etapa se definirá el procedimiento que se llevará a cabo para la obtención del vidrio triturado, para ello se detallan los siguientes pasos a seguir:

#### **a. Limpieza de las botellas:**

- 1) Las botellas recolectadas se someterán a un lavado con agua caliente y detergente común, con la finalidad de remover cualquier residuo acumulado producto de su uso anterior, especialmente restos orgánicos, además de remover las etiquetas correspondientes a cada envase.

El proceso es relativamente sencillo, debido a la naturaleza soluble de los adhesivos utilizados para la demarcación de las botellas, en su gran mayoría.

- 2) Luego de limpiar y enjuagar las botellas, se deben secar en su totalidad para evitar problemas en el proceso de trituración, sobre todo con el material fino producido en la molienda.

#### **b. Trituración del vidrio**

- 1) Una vez que las botellas se encuentran libres de toda suciedad y secas, serán transportadas al Laboratorio de Suelos y Materiales "Mario Ángel Guzmán Urbina", en la escuela de Ingeniería Civil, Universidad de El Salvador, donde se realizará un proceso de trituración primario, rompiendo cada una de las botellas dentro de un recipiente, hasta reducirlo a partículas manejables.

- 2) Posteriormente, se realizará el proceso de trituración final o molienda del vidrio en la máquina de desgaste de “Los Ángeles”, sometiendo una muestra de vidrio de un tamaño específico, al impacto de bolas de acero de diámetro y masa , las que son introducidas junto con el vidrio en un tambor giratorio a una velocidad de 33 rev/min, este proceso se realiza las veces necesarias hasta que más del 50% del vidrio triturado pase la malla No 50 criterio definido en el apartado 3.2.1 literal g.

El proceso de molienda descrito en el apartado No 2 de esta sección, se realizará repetidas ocasiones, para obtener la cantidad deseada de material triturado. Para la correcta ejecución de los pasos mencionados, es necesario tomar las medidas pertinentes por el tema de seguridad, debido a la naturaleza extremadamente abrasiva del material triturado, utilizando EPP básicos como: mascarilla, guantes y zapatos de seguridad, teniendo especial cuidado con el material triturado más fino.

**c. Material resultante**

El resultado del proceso de trituración es un material con una textura similar a la arena, con una cantidad considerable de finos debido a los ajustes hechos al ser tamizado por la malla No 50; todo este material será mezclado y homogenizado para luego realizar la granulometría del vidrio.

### **3.8.3. Diseño y verificación de mezclas de concreto hidráulico de control**

Una vez obtenidos las características de los componentes, y verificado que cumplan con requisitos especificados se procede al diseño de la mezcla de concreto de referencia, a partir de lo estipulado en el ACI 211.1

El Instituto Americano del Concreto por sus siglas en inglés ACI en su comité 211.1, menciona 2 métodos para el diseño de mezcla del concreto que son:

- Basada en un peso estimado del concreto por unidad de volumen unitario.
- Basado en el cálculo del volumen absoluto ocupado por los componentes del concreto

Los métodos descritos proporcionan una aproximación preliminar de las cantidades de materiales necesarios para elaborar la mezcla de concreto, que luego deben ser verificadas mediante mezclas de prueba en el laboratorio o en el campo y efectuar los ajustes que sean necesarios con el objetivo de lograr las características deseadas en el concreto fresco y endurecido

Para hacer un correcto diseño de mezcla de concreto, la ACI 211.1 se puede resumir en nueve pasos que son los siguientes:

1. Elección del revenimiento.
2. Elección del tamaño máximo de agregado.
3. Cálculo del agua de mezclado y el contenido de aire.
4. Selección de la relación agua-cemento.

5. Cálculo del contenido de cemento.
6. Estimación del contenido de agregado grueso.
7. Estimación del contenido de agregado fino.
8. Ajuste por humedad del agregado
9. Ajustes en las mezclas de prueba.

**Paso No 1: elección de revenimiento:**

Se selecciona por el tipo de elemento estructural en el que se va a utilizar como se muestra en la Tabla No. 3-10.

*Tabla No. 3-10: Selección de revenimiento de acuerdo con la estructura a construir.*

Tipo de construcción	Revenimiento (cm)	
	máximo	Mínimo
<b>Muros de cimentación y zapatas reforzadas</b>	7.5	2.5
<b>Muros de sub-estructura, cajones y zapatas sin refuerzo</b>	7.5	2.5
<b>Vigas y muros reforzados</b>	10	2.5
<b>Columnas de edificios</b>	10	2.5
<b>Concreto masivo</b>	7.5	2.5

Fuente: ACI 211.1

**Paso No 2: elección del tamaño máximo de agregado**

Por regla general, el tamaño máximo de agregado debe ser el mayor disponible económicamente y guardar relación con las dimensiones de la estructura. En ningún caso el tamaño máximo debe exceder de:

1/5 de la menor dimensión entre los costados de los moldes.

1/3 del espesor de las losas.

3/4 del espacio libre mínimo entre varillas de refuerzo individuales, paquetes de varillas o torones de pretensado.

### **Paso No 3: Cálculo de agua de mezclado y contenido de aire.**

La Tabla No. 3-11, proporciona la cantidad de agua (en kg/m<sup>3</sup> de concreto) y el porcentaje de aire atrapado en función de las siguientes variables:

- a) Tipo de concreto
- b) Revenimiento
- c) Tamaño máximo nominal del agregado
- d) Tipo de exposición del concreto

**Nota:** Para obtener información sobre las condiciones relativas al contenido de aire, consultar los comités ACI 201, 301 y 302.

Tabla No. 3-11: Requisitos aproximados de agua de mezcla y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales del agregado

Revenimiento		Agua, kg/m <sup>3</sup> de concreto para tamaño máximo nominal*							
(cm)	(pulg)	9.5mm (3/8´´)	12.5mm (1/2´´)	19mm (3/4´´)	25mm (1´´)	37.5mm (1 1/2´´)	50mm (2´´)	75mm (3´´)**	150mm (6´´)**
<b>Concreto sin aire incluido</b>									
<b>2.5 a 5.0</b>	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
<b>7.5 a 10.0</b>	3 a 4	228	216	205	193	181	169	145	124
<b>15.0 a 17.5</b>	6 a 7	243	228	2016	202	190	178	160	---
<b>Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incluido, %</b>		3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
<b>Concreto con aire incluido</b>									
<b>2.5 a 5.0</b>	1 a 2	181	175	168	160	150	142	122	107
<b>7.5 a 10.5</b>	3 a 4	202	193	184	175	165	157	133	119
<b>15.0 a 17.5</b>	6 a 7	216	205	197	184	174	166	154	---
<b>Contenido promedio total de aire, para el nivel de exposición, %</b>									
<b>Exposición</b>	Baja	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5**	1.0**
	Media	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5**	3.0**
	Alta	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5**	4.0**

\* Estas cantidades de agua de mezcla son para utilizarse en el cálculo de los contenidos de cementos en las mezclas de prueba. Estas cantidades son máximas para agregados gruesos razonablemente angulares con granulometría dentro de los límites de las especificaciones.

\*\* El revenimiento (asentamiento) del concreto conteniendo agregado mayor que 37.5 mm se basa en el ensayo de revenimiento realizado después de la remoción de las partículas mayores que 37.5 mm, a través de cribado húmedo.

Fuente: Comité ACI 211.1

#### **Paso No 4: Resistencia del concreto y relación agua-cemento**

Se conoce como relación agua/cemento (A/C), a la razón existente entre el peso del agua con respecto al peso de cemento, es decir:

$$A/C = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de cemento}}$$

Si se mantienen constantes las cantidades de agregado seco en una determinada proporción de concreto, se observa que a medida la relación agua/cemento (A/C) se incrementa, esto conlleva una disminución en la resistencia del concreto. Por eso es importante tener un adecuado balance de dicha relación, de forma que permita que, para una determinada cantidad de cemento fija en la mezcla, se disponga de la suficiente cantidad de agua que permita una adecuada colocación del concreto y lograr la resistencia especificada ( $f'c$ ).

$$f'cr = f'c + \Delta fc$$

Los valores que están por debajo del valor promedio pueden representar problemas si están significativamente por debajo de  $f'c$ . De ahí que en ACI 318-02 se recomiendan 3 casos para estimar el valor de  $f'cr$  en función de la disponibilidad de registros de ensayos previos y toman en cuenta el valor de la desviación estándar obtenida. A continuación, se resumen las 3 situaciones descritas:

Se disponen de una cantidad de 30 o más registros.

Se dispone de 15 a 29 registros.

Se cuenta con menos de 15 registros.

Para cuando se dispone de una cantidad de 30 a más registros se usa la Tabla No. 3-12:

*Tabla No. 3-12: Requisitos de fuerza de compresión promedio requerida cuando hay datos disponibles para establecer una desviación estándar.*

Esfuerzo a compresión especificado $f'c$	Esfuerzo promedio requerido a compresión $f'cr$ , kg/cm <sup>2</sup>
<b><math>f'c \leq 350</math> kg/cm<sup>2</sup></b>	$f'cr = f'c + 1.34 s$
	$f'cr = f'c + 2.33 s-35$
	Usar el mayor valor que se obtenga
<b><math>f'c &gt; 350</math> kg/cm<sup>2</sup></b>	$f'cr = f'c + 1.34 s$
	$f'cr = 0.90 f'c + 2.33 s$
	Usar el mayor valor que se obtenga.

Fuente: comité ACI 318-11 apartado 5.3.2

Para cuando se disponen de 15 a 29 registros se emplea la Tabla No. 3-13.

*Tabla No. 3-13: Modificación para el factor de la desviación estándar cuando se cuenta con menos de 30 ensayos.*

No de pruebas*	Factor de modificación para la desviación estándar**
<b>&lt;15</b>	Usar tabla 5.3.2.2 de ACI 318
<b>15</b>	1.16
<b>20</b>	1.08
<b>25</b>	1.03
<b>≥30</b>	1.00

\*interpolan números intermedios de pruebas

\*\*desviación estándar modificada a ser usada para determinar el esfuerzo promedio requerido  $f'cr$  a partir de tabla 3.16

Fuente: comité ACI 318-11 apartado 5.3.1

Si se cuenta con menos de 15 registros se emplea la Tabla No. 3-14.

*Tabla No. 3-14: Fuerza de compresión promedio cuando no se disponen de datos para establecer la desviación estándar.*

<b>Esfuerzo a compresión especificada <math>f'c</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Esfuerzo promedio requerido a compresión <math>f'cr</math> (kg/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>&lt; 210</b>	$f'c + 70$
<b>210 – 350</b>	$f'c + 84$
<b>&gt; 350</b>	$1.10 f'c + 49$

Fuente: comité ACI 318-11 apartado 5.3.2

Una vez se determina el valor de  $f'cr$  y si el concreto será con o sin inclusión de aire se procede a determinar la relación A/C de la Tabla No. 3-15, que se muestra a continuación:

*Tabla No. 3-15: Dependencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a la compresión del concreto.*

<b>Esfuerzo a compresión a 28 días, (kg/cm<sup>2</sup>)*</b>	<b>Relación agua cemento por peso</b>	
	<b>Concreto sin aire incluido</b>	<b>Concreto con aire incluido</b>
<b>420</b>	0.41	---
<b>350</b>	0.48	0.40
<b>280</b>	0.57	0.48
<b>210</b>	0.68	0.59
<b>140</b>	0.82	0.74

\*Los valores son resistencias promedio estimadas para concreto que no tienen más del porcentaje de aire que se indica en la tabla 1 (de este documento). Para una relación agua cemento constante se reduce la resistencia del concreto conforme se incrementa el contenido de aire.

Fuente: comité ACI 211.1

La resistencia base en cilindros de 15 x 30 cm, curado con humedad hasta los 28 días a  $23 \pm 1.7$  °C, de acuerdo a la norma ASTM C 192.

La relación supone un tamaño nominal máximo de agregado de 3/4" y que pasa el 100% en la malla de 1", para un banco dado la resistencia producida por una

relación agua/cemento dada se incrementará conforme se reduce el tamaño de agregado.

**Paso No 5: cálculo del contenido de cemento.**

El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado dividido entre la relación A/C, Si, no obstante, la especificación incluye un límite mínimo separado sobre el cemento, además de los requerimientos de resistencia y durabilidad, la mezcla debe basarse en el criterio que conduzca a una cantidad mayor de cemento.

$$C = \frac{A}{(A/C)}$$

Dónde:

C = Cantidad de cemento por m<sup>3</sup> de concreto

A = Cantidad de agua por m<sup>3</sup> de concreto

A/C = Relación agua-cemento

### **Paso No 6: estimación del contenido de agregado grueso.**

En la Tabla No. 3-16, se muestra el volumen de agregado, en m<sup>3</sup>, con base al peso volumétrico varillado seco (PVV), para un metro cúbico de concreto. Este volumen se convierte a peso seco del agregado grueso requerido en un m<sup>3</sup> de concreto, multiplicándolo por el peso volumétrico varillado en seco por m<sup>3</sup> de agregado grueso.

*Tabla No. 3-16: Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto.*

Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de agregado grueso* varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
		2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 mm	3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 mm	1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
19 mm	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
25 mm	1"	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 mm	1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
50 mm	2"	0.78	0.76	0.74	0.72
75 mm	3"	0.82	0.80	0.78	0.76
150 mm	6"	0.87	0.85	0.83	0.81

\*Los volúmenes están basados en agregados en condiciones de peso volumétrico varillado seco, como se describe en la norma ASTM C 29. Estos volúmenes se han seleccionado a partir de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado a la construcción reforzada común. Para concretos menos trabajables como como los requeridos en la construcción de pavimentos de concreto, pueden incrementarse en un 10% aproximadamente.

Fuente: comité ACI 211.1

### **Paso No 7: Estimación del contenido de agregado fino**

Hasta el paso 6 se han estimado todos los componentes del concreto, excepto el agregado fino, cuya cantidad se determina por diferencia. ACI 211.1 proporciona 2 formas de determinarlo:

- Por el método de peso
- Por el método de volumen absoluto (preferido en el país)

### **Método de peso**

Cuando se desea un cálculo teóricamente exacto del peso del concreto fresco por m<sup>3</sup>, puede emplearse la siguiente fórmula:

$$U = 10Ga(100 - A) + C_M \left(1 - \frac{Ga}{Gc}\right) - W_M(Ga - 1)$$

Dónde:

U : Peso del concreto fresco, por m<sup>3</sup>.

Ga : Promedio pesado del peso específico de la combinación de agregado fino y grueso, a granel en condición SSS.

Gc : Peso específico del cemento (generalmente es 3.15

A : Porcentaje de contenido de aire.

WM : Requerimiento de agua de mezclado, kg/m<sup>3</sup>

CM : Requerimiento de cemento, kg/m<sup>3</sup>

La estimación del contenido de agregado fino se hace restando al peso del concreto fresco la suma de las cantidades de agua, cemento y agregado grueso que se han determinado previamente:

$$\text{Agregado fino} = W_{\text{concreto}} - (W_{\text{agua}} + W_{\text{cemento}} + \text{agregado grueso})$$

Dónde:

$W_{\text{concrto}}$  = peso del concreto

$W_{\text{agua}}$  = Peso del agua

$W_{\text{cemento}}$  = Peso del cemento. (en kg/m<sup>3</sup> de concreto)

### **Por el método de volumen absoluto**

Un procedimiento más exacto para calcular la cantidad requerida de agregados finos, implica el empleo de volúmenes desplazados por los componentes (determinación de gravedades específicas). En este caso, el volumen total desplazado por los componentes conocidos (el agua, aire, cemento y agregado grueso) se resta del volumen unitario del concreto para obtener el volumen requerido de agregado fino. El volumen ocupado por cualquier componente en el concreto es igual a su peso dividido entre la densidad de ese material (siendo ésta el producto del peso unitario del agua por el peso específico del material).

Con las cantidades de cemento, agua, agregado grueso establecido y la cantidad aproximada de aire atrapado de 2% que se determinó en la Tabla No. 3-11, el contenido de arena puede calcularse como sigue:

$$\text{peso volumetrico} = \frac{\text{peso}}{\text{volumen}}$$

$$\text{volumen} = \frac{\text{peso}}{\text{peso volumetrico}}$$

*Gravedad específica = gravedad esécífica*

$$\text{Gravedad específica} = \frac{\text{Peso volumétrico}}{\text{Peso volumétrico del agua}}$$

Peso volumétrico = gravedad específica × peso volumétrico del agua

peso volumétrico del agua = 1000 kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Volumen} = \frac{\text{Peso}}{(\text{gravedad específica} \times \text{peso volumétrico del agua})}$$

### **Paso No 8: Ajustes por humedad del agregado.**

Determinación del peso húmedo.

Agregado fino húmedo = masa de Agregado fino seco (1 +  $\omega_{af}$ )

Agregado grueso húmedo = masa de Agregado grueso seco (1 +  $\omega_{ag}$ )

Determinación de agua a añadir.

**Agua a añadir = Agua neta de mezclado – Agua por humedad + agua por absorción**

**Agua a añadir = Agua neta de mezclado**

$$\text{Agua a añadir} = ANM - (W_{as} \times \omega_a + W_{as} \times abs_a) - (W_{gs} \times \omega_g + W_{gs} \times abs_g)$$

$$\text{Agua a añadir} = ANM - (W_{as} (\omega_a - abs_a)) - (W_{gs} (\omega_g - abs_g))$$

Dónde:

ANM = Agua neta de mezclado

$W_{as}$  = Peos arena seca

$\omega_a$  = Humedad de la arena

$abs_a$  = Absorción de la arena

$W_{gs}$  = Peso grava seca

$\omega_g$  = Humedad de la grava

$abs_g$  = Absorción de la grava

### **Paso No 9: ajustes en las mezclas de prueba**

El volumen necesario para una revoltura de prueba en el laboratorio se desglosa de la siguiente manera:

12 especímenes (cilindros de 6")

1 ensayo de revenimiento

1 ensayo de peso volumétrico

Un desperdicio de 15%

Al obtener este volumen total por tanto este volumen se multiplica por los valores de agua a ser añadida, cemento, agregado grueso y fino húmedo, para obtener los pesos requeridos para realizar la revoltura de prueba

Lo que se obtiene es un diseño teórico, que se verificara en el laboratorio, a partir de la elaboración de elementos de prueba, los cuales ayuden a corroborar el diseño.

# Capítulo IV

# CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES PARA CONCRETO Y DISEÑO DE MEZCLAS

## 4.1. Introducción

Para continuar el desarrollo de la investigación, surge la necesidad de diseñar y elaborar una mezcla de concreto, que debe cumplir con los lineamientos establecidos en la metodología del Capítulo III.

En la primera etapa de este capítulo, se determinan las características de cada uno de los componentes del concreto, obteniendo su gravedad específica y absorción, la densidad Bulk y finalmente la granulometría. En el vidrio se realiza un estudio similar donde se determinan las mismas propiedades, luego se realizan las combinaciones de agregado fino y vidrio para determinar las variaciones en la granulometría del agregado fino.

En la segunda etapa de este capítulo, se propone el diseño de mezclas bajo los criterios del Comité ACI 211; este será utilizado para la determinación de las características de cada mezcla en estado fresco y endurecido, finalmente el diseño propuesto para  $1\text{m}^3$ , será reducido al tamaño de mezcla de laboratorio (12 cilindros), y reproducido para su posterior análisis.

## 4.2. Caracterización de los agregados y vidrio.

Para caracterizar cada uno de los componentes del concreto, es necesario determinar propiedades como son gravedad específica, absorción, densidad Bulk, granulometrías e impurezas orgánicas únicamente en el caso del agregado fino. A continuación se presentan, los resultados de la caracterización de los materiales en estudio que servirán para la investigación:

### 4.2.1. Agregado grueso

#### a. Gravedad específica y absorción Agregado Grueso (ASTM C127)

En la Tabla No. 4-1 se muestran los resultados obtenidos en laboratorio, que servirán para determinar la gravedad específica y absorción del agregado grueso.

Tabla No. 4-1: Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso.

Muestras	1	2	3	Valor Promedio
<b>B) peso SSS (g)</b>	3282.9	3190.2	3185.7	
<b>C) peso aparente (g)</b>	2008.4	1945.3	1944.3	
<b>A) peso seco (g)</b>	3242.4	3150.4	3146.0	
<b>Gravedad específica seca (OD)</b>				
$OD = \frac{A}{(B - C)}$	OD = 2.544	OD = 2.531	OD = 2.534	<b>OD = 2.54</b>
<b>Gravedad específica Saturada superficial seca (SSD)</b>				
$SSD = \frac{B}{(B - C)}$	SSD = 2.576	SSD = 2.563	SSD = 2.566	<b>SSD = 2.57</b>
<b>Gravedad específica aparente (<math>G_{AP}</math>)</b>				
$G_{AP} = \frac{A}{(A - C)}$	$G_{AP} = 2.628$	$G_{AP} = 2.614$	$G_{AP} = 2.618$	<b><math>G_{AP} = 2.62</math></b>
<b>Absorción</b>				
$\%Abs = \frac{B - A}{A}$	$\%Abs = 1.25\%$	$\%Abs = 1.26\%$	$\%Abs = 1.26\%$	<b><math>\%Abs = 1.26\%</math></b>

Fuente: Elaboración propia.

**b. Densidad Bulk del Agregado Grueso (ASTM C 29)**

El cálculo de la densidad Bulk y porcentaje de vacíos en el agregado grueso, se determinó bajo los lineamientos establecidos en la norma ASTM C29, los resultados obtenidos se muestran en la Tabla No. 4-2

Tabla No. 4-2: Masas suelta y varillada del Agregado Grueso.

<b>MASAS – MUESTRA AGREGADO GRUESO</b>				
<b>Muestra N°</b>	1	2	3	4
<b>Recipiente N°</b>	1	1	1	1
<b>Peso de medidor vacío (kg)</b>	8.420	8.420	8.420	8.420
<b>Volumen del medidor (m<sup>3</sup>)</b>	0.0143	0.0143	0.0143	0.0143
<b>Peso de medidor con muestra suelta (kg)</b>	28.340	28.230	28.310	28.180
<b>Peso de muestra suelta (kg)</b>	19.920	19.810	19.890	19.760
<b>Peso de medidor con muestra varillada(kg)</b>	29.510	29.480	29.400	29.580
<b>Peso de muestra varillada (kg)</b>	21.090	21.060	20.980	21.160
<b>PESOS VOLUMÉTRICOS DEL AGREGADO GRUESO</b>				
<b>PESO VOLUMETRICO SUELTO</b>	<b>ENSAYO (kg/m<sup>3</sup>)</b>		<b>PROMEDIO (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
1	$M = \frac{19.92}{0.0143} = 1393.0$		<b>M = 1388</b>	
2	$M = \frac{19.81}{0.0143} = 1385.3$			
3	$M = \frac{19.89}{0.0143} = 1390.9$			
4	$M = \frac{19.76}{0.0143} = 1381.8$			
<b>PESO VOLUMETRICO VARILLADO</b>	<b>ENSAYO (kg/m<sup>3</sup>)</b>		<b>PROMEDIO (kg/m<sup>3</sup>)</b>	
1	$M = \frac{21.09}{0.0143} = 1474.8$		<b>M = 1474</b>	
2	$M = \frac{21.06}{0.0143} = 1472.7$			
3	$M = \frac{20.98}{0.0143} = 1467.1$			
4	$M = \frac{21.16}{0.0143} = 1479.7$			

Fuente: Elaboración propia.

**c. Granulometría del Agregado Grueso (ASTM C136<sup>11</sup>)**

Tomando como referencia la Tabla No. 3–5 del Capítulo III: “Especificación de tamaños para agregado grueso” se determina que el Número de la granulometría a utilizar es N°6; por lo tanto, los requisitos granulométricos deben satisfacer los límites mostrados en la Tabla No. 4-3.

*Tabla No. 4-3: Límites Granulométricos del Agregado Grueso.*

No de Tamaño	Tamaño nominal. Pulg. (mm)	Cantidades más pequeñas que cada tamiz (aberturas cuadradas), porcentaje de peso				
		1" (25mm)	3/4 " (19mm)	1/2" (12.5mm)	3/8" (9.5mm)	N°4 (4.75mm)
<b>6</b>	3/4 - 3/8 (19 – 9.5)	100	90-100	20-55	0-15	0-5

Fuente: ASTM C33-13

La Tabla No. 4–4, Muestra los pesos retenidos, obtenidos del proceso de tamizado de los ensayos al agregado grueso:

*Tabla No. 4-4: Pesos Retenidos, Agregado Grueso.*

W <sub>o</sub> (g)	7051.0	5247.2	5277.0
<b>Malla</b>	<b>Pesos ret. (g), Ensayo No. 1</b>	<b>Pesos ret. (g), Ensayo No. 2</b>	<b>Pesos ret. (g), Ensayo No. 3</b>
<b>1"</b>	0.0	0.0	0.0
<b>3/4"</b>	150.0	63.9	89.3
<b>1/2"</b>	4080.0	2981.3	3491.1
<b>3/8"</b>	2000.0	1567.9	1272.8
<b>N° 4</b>	714.0	633.0	423.5
<b>Pasa N°4</b>	106.0	1.9	0.3
<b>W<sub>T</sub> (g)</b>	7050.0	5248.0	5277.0
<b>% Error</b> $E = \frac{W_T - W_o}{W_o}$	% Error E = -0.014 %	% Error E = 0.015 %	% Error E = 0.00 %

Fuente: Elaboración propia

La Tabla No. 4-5, muestra los resultados del análisis por tamizado que se llevó a cabo en el agregado grueso.

<sup>11</sup> ASTM C136: Método estándar para el análisis granulométrico de agregados finos y gruesos.

Tabla No. 4-5: Análisis por Tamizado para Agregado Grueso.

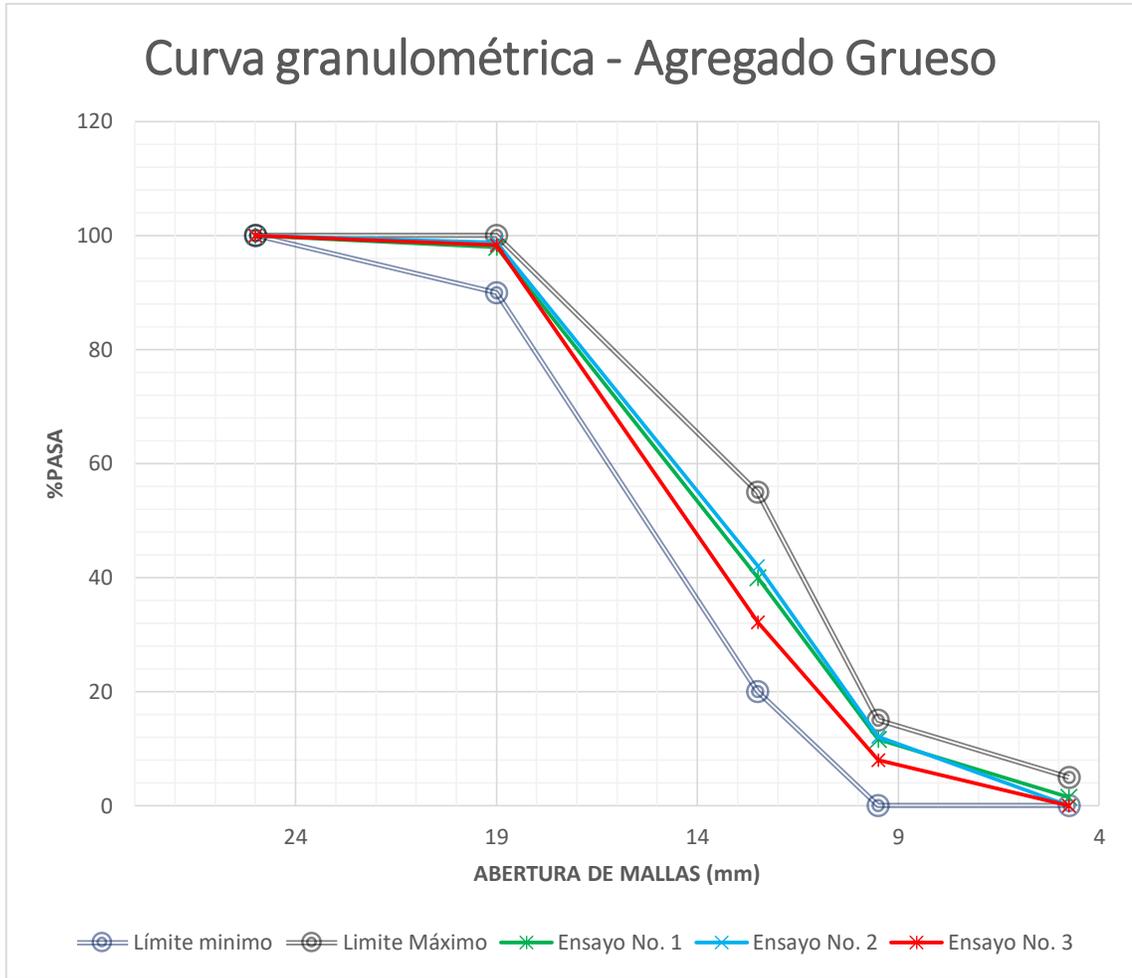
Malla	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2		Ensayo No. 3	
	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)
1"	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0
3/4"	150.0	97.9	63.9	98.8	89.3	98.3
1/2"	4081.0	40.0	2980.5	42.0	3491.1	32.2
3/8"	2000.0	11.6	1567.9	12.1	1272.8	8.0
N° 4	714.0	1.5	633.0	0.0	423.5	0.0
<b>Pasa N°4</b>	106.0		1.9		0.3	
<b>TOTAL</b>	7051.0		5247.2		5277.0	

\*NOTA: Las masas retenidas presentadas en esta tabla, son las correspondientes masas corregidas de la Tabla No 4-4.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 4-1 se muestran las gráficas de los resultados de la granulometría obtenidos a partir del análisis por tamizado del agregado grueso para los 3 ensayos.

Figura No. 4-1: Curva Granulométrica del Agregado Grueso.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.2. Agregado fino

##### a. *Impureza orgánica ASTM C40*

El ensayo de impureza orgánica en el agregado fino se determina a partir de una muestra representativa, reducida bajo los lineamientos de ASTM C702. El resultado del método de ensayo de Impurezas orgánicas, se muestra en la Figura No 4-2.

*Figura No. 4-2: Impurezas Orgánicas del Agregado Fino.*



Fuente: Elaboración propia.

El color observado en los recipientes después de 24 horas, según la carta de colorimetría es el color N°2.

**b. Gravedad Específica y absorción del agregado fino (ASTM C128)**

En la Tabla No. 4-6 se muestran los datos obtenidos en laboratorio que se utilizarán para la determinación de la gravedad específica y absorción del agregado fino.

*Tabla No. 4-6: Gravedad Específica y Absorción, Agregado Fino.*

No. de Ensayo	1	2	3	
A) Masa de muestra secada en horno (g)	483.5	483.7	482.2	
B) Masa de picnómetro lleno de agua aforado (g)	1442.5	1461.5	1453.5	
C) Masa de picnómetro + agua + muestra saturada aforado (g)	1742.4	1760.1	1752.2	<b>Valor Promedio</b>
S) Masa de muestra saturada superficialmente seca (g)	502.9	502.5	501.1	
<b>Gravedad específica seca (OD)</b>				
$OD = \frac{A}{(B + S - C)}$	OD = 2.382	OD = 2.372	OD = 2.382	<b>OD = 2.38</b>
<b>Gravedad específica superficial seca (SSD)</b>				
$SSD = \frac{S}{(B + S - C)}$	SSD = 2.477	SSD = 2.464	SSD = 2.476	<b>SSD = 2.47</b>
<b>Gravedad específica aparente (G<sub>AP</sub>)</b>				
$G_{AP} = \frac{A}{(B + A - C)}$	G <sub>AP</sub> = 2.633	G <sub>AP</sub> = 2.613	G <sub>AP</sub> = 2.628	<b>G<sub>AP</sub> = 2.62</b>
<b>Absorción (%)</b>				
$\%Abs = 100 \left( \frac{S - A}{A} \right)$	%Abs = 4.0	%Abs = 3.9	%Abs = 3.9	<b>%Abs = 3.9</b>

Fuente: Elaboración propia.

**c. Densidad Bulk del Agregado Fino (ASTM C29)**

En la Tabla No. 4-7, se presentan los resultados obtenidos del peso volumétrico suelto del agregado fino.

Tabla No. 4-7: Peso Volumétrico Suelto del Agregado Fino.

Ensayo No.	1	2	3	4
Recipiente No.	1	1	1	1
Peso de medidor vacío (kg)	1662	1662	1662	1662
Volumen del medidor (m <sup>3</sup> )	0.00281	0.00281	0.00281	0.00281
Peso de muestra suelta + medidor (kg)	5386	5373	5381	5380
Peso de muestra suelta (kg)	3724	3711	3719	3718
PESO VOLUMETRICO SUELTO	ENSAYO (kg/m <sup>3</sup> )		PROMEDIO (kg/m <sup>3</sup> )	
1	$M_1 = \frac{3.724}{0.00281} = 1325.3$		<b>M = 1323</b>	
2	$M_2 = \frac{3.711}{0.00281} = 1320.6$			
3	$M_3 = \frac{3.719}{0.00281} = 1323.5$			
4	$M_4 = \frac{3.718}{0.00281} = 1323.1$			

Fuente: Elaboración propia

**d. Granulometría del agregado fino (ASTM C136)**

En la Tabla No. 4-8 se muestran los límites granulométricos que debe satisfacer el agregado fino.

Tabla No. 4-8: Límites Granulométricos para Agregado Fino.

Abertura de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52mm (3/8")	100
4.75mm (N°4)	95 – 100
2.36mm (N°8)	80 – 100
1.18mm (N°16)	50 – 85
0.60mm (N°30)	25 – 60
0.30mm (N°50)	5 – 30
0.15mm (N°100)	0 – 10

Fuente: ASTM C33-13, Especificación estándar de agregados para concreto

La Tabla No. 4-9, Muestra los pesos obtenidos luego de realizado el tamizado del agregado fino.

Tabla No. 4-9: Pesos Retenidos, Agregado Fino.

<b>W<sub>0</sub>(g)</b>	<b>829.0</b>	<b>1166.7</b>	<b>1152.4</b>
<b>Abertura de la malla</b>	<b>Masas retenidas (g)</b>	<b>Masas retenidas (g)</b>	<b>Masas retenidas (g)</b>
	<b>Ensayo No. 1</b>	<b>Ensayo No. 2</b>	<b>Ensayo No. 3</b>
<b>9.52mm (3/8")</b>	0.0	0.0	0.0
<b>4.75mm (N°4)</b>	14.0	26.7	24.1
<b>2.36mm (N°8)</b>	86.0	87.7	93.1
<b>1.18mm (N°16)</b>	132.9	161.8	158.8
<b>0.60mm (N°30)</b>	237.1	281.0	277.3
<b>0.30mm (N°50)</b>	229.6	371.1	362.4
<b>0.15mm (N°100)</b>	99.4	157.1	173.7
<b>Pasa N°100</b>	29.9	80.5	62.4
<b>Total</b>	<b>828.9</b>	<b>1165.9</b>	<b>1151.8</b>
<b>% Error</b> $= \frac{W_T - W_0}{W_0}$	% Error = 0.012%	% Error = -0.07%	% Error = -0.05%
<b>Error por tamizado (Malla N° 30)</b>			
<b>% Error</b> $= \frac{W_F - W_i}{W_i}$	% Error = -0.01%	% Error = 0.02%	% Error = 0.00%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No. 4-10, presenta los resultados del análisis por tamizado que se lleva a cabo en el agregado fino.

Tabla No. 4-10: Análisis por tamizado, Agregado Fino.

Malla	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2		Ensayo No. 3	
	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)
3/8"	0.0	100.0	0.0	100.0	0	100.0
N°4	14.0	98.3	26.7	97.7	24.1	97.9
N°8	86.0	87.9	87.7	90.2	93.1	89.8
N°16	132.9	71.9	161.8	76.3	158.8	76.0
N°30	237.2	43.3	281.0	52.2	277.3	52.0
N°50	229.6	15.6	371.9	20.4	363.0	20.5
N°100	99.4	3.6	157.1	6.9	173.7	5.4
<b>Pasa N°100</b>	29.9	0.0	80.5	0.0	62.4	0.0
<b>TOTAL</b>	829.0		1166.7		1152.4	
<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF<sub>1</sub> = 2.79</b>		<b>MF<sub>2</sub> = 2.56</b>		<b>MF<sub>3</sub> = 2.58</b>	

\*NOTA: Las masas retenidas presentadas en esta tabla, son las correspondientes masas corregidas de la Tabla No 4-9.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No. 4–11, muestra los resultados promedio de la Tabla No. 4-10 que se utilizaran en la sección “g” del apartado 4.2, en la comparación de las curvas granulométricas del agregado fino y la combinación de sustituciones parciales de agregado fino por vidrio molido.

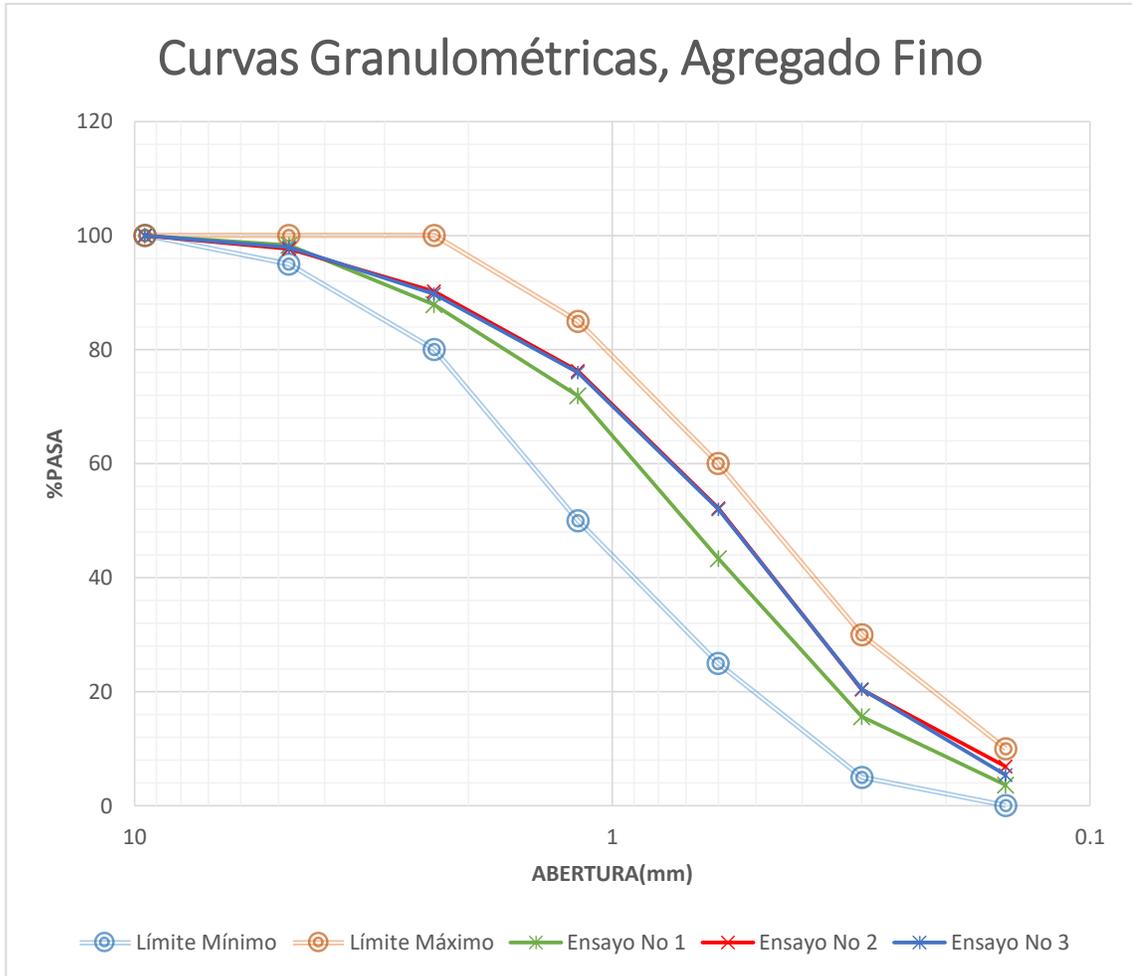
Tabla No. 4-11: Datos Granulométricos Promedio, Agregado Fino.

Malla	Aberturas (mm)	Porcentaje que pasa Promedio	Módulo de Finura Promedio
3/8"	9.52	100.0	
N°4	4.75	98.0	
N°8	2.36	89.3	
N°16	1.18	74.7	2.65
N°30	0.60	49.2	
N°50	0.30	18.8	
N°100	0.15	5.3	

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 4-3 se muestran las gráficas de los resultados de la granulometría obtenidos a partir del análisis por tamizado del agregado fino, presentado en la Tabla No 4-10, para los 3 ensayos.

Figura No. 4-3: Curvas Granulométricas, Agregado Fino.



Fuente: Elaboración propia.

### 4.2.3. Vidrio.

#### a. *Gravedad Específica y absorción del vidrio (ASTM C128)*

La Tabla No. 4-12 muestra los resultados obtenidos en laboratorio que se utilizarán para la determinación de la gravedad específica y absorción del vidrio.

Tabla No. 4-12: Gravedad Específica y Absorción del Vidrio.

Muestras	1	2	3	
A) Masa de muestra secada en horno (g)	510.9	507.3	509.4	
B) Masa de picnómetro lleno de agua aforado (g)	1460.9	1460.9	1460.9	
C) Masa de picnómetro + agua + muestra saturada aforado (g)	1770.4	1768.1	1769	<b>Valor Promedio</b>
S) Masa de muestra saturada superficialmente seca (g)	511.1	507.4	509.5	
<b>Gravedad específica (OD)</b>				
$OD = \frac{A}{(B + S - C)}$	OD = 2.534	OD = 2.534	OD = 2.529	<b>OD = 2.53</b>
<b>Gravedad específica (SSD)</b>				
$SSD = \frac{S}{(B + S - C)}$	SSD = 2.535	SSD = 2.534	SSD = 2.530	<b>SSD = 2.53</b>
<b>Gravedad específica aparente (<math>G_{AP}</math>)</b>				
$G_{AP} = \frac{A}{(B + A - C)}$	$G_{AP} = 2.537$	$G_{AP} = 2.535$	$G_{AP} = 2.531$	<b><math>G_{AP} = 2.53</math></b>
<b>Absorción (%)</b>				
$\%Abs = 100 \left( \frac{S - A}{A} \right)$	$\%Abs = 0.04$	$\%Abs = 0.02$	$\%Abs = 0.02$	<b><math>\%Abs = 0.0</math></b>

Fuente: Elaboración propia.

**b. Densidad Bulk del Vidrio (ASTM C29)**

Para la obtención del peso volumétrico suelto; en la Tabla No. 4-13, se presentan los resultados de los pesos volumétricos sueltos para el vidrio.

Tabla No. 4-13: Peso volumétrico suelto del Vidrio.

Ensayo No	1	2	3	4
Recipiente N°	1	1	1	1
Peso de medidor vacío (kg)	2821.9	2821.9	2821.9	2821.9
Volumen del medidor (m <sup>3</sup> )	0.00303	0.00303	0.00303	0.00303
Peso de muestra suelta + medidor (kg)	6817.1	6805.0	6812.6	6815.6
Peso de muestra suelta (kg)	3995.2	3983.1	3990.7	3993.7
PESOS VOLUMÉTRICOS DEL VIDRIO				
PESO VOLUMETRICO SUELTO	ENSAYO (kg/m <sup>3</sup> )		PROMEDIO (kg/m <sup>3</sup> )	
1	$M_1 = \frac{3.9952}{0.00303} = 1318.5$		<b>M = 1317</b>	
2	$M_2 = \frac{3.9831}{0.00303} = 1314.6$			
3	$M_3 = \frac{3.9907}{0.00303} = 1317.1$			
4	$M_4 = \frac{3.9937}{0.00303} = 1318.1$			

Fuente: Elaboración propia.

**c. Granulometría Vidrio (ASTM C136)**

Para definir las características granulométricas del vidrio se realizan ensayos de granulometría al material puro y luego se realizan las combinaciones planificadas para verificar el efecto que tiene el combinar vidrio en la granulometría original de la arena. Al realizar el análisis granulométrico del vidrio se toma en cuenta los límites establecidos en la Tabla No. 4-8.

La Tabla No. 4-14, Muestra los pesos obtenidos luego de realizado el proceso de tamizado del vidrio.

Tabla No. 4-14: Pesos retenidos de los ensayos granulométricos al Vidrio molido.

$W_0(g)$	1020.3	1011.7	1021.2
Abertura de la malla	Masas retenidas (g) Ensayo No. 1	Masas retenidas (g) Ensayo No. 2	Masas retenidas (g) Ensayo No. 3
9.52mm (3/8")	0.0	0.0	0.0
4.75mm (N°4)	0.2	0.6	0.1
2.36mm (N°8)	2.0	1.8	2.2
1.18mm (N°16)	76.0	76.3	76.7
0.60mm (N°30)	155.8	155.7	156.2
0.30mm (N°50)	171.8	172.3	173.3
0.15mm (N°100)	261.6	271.2	260.1
Pasa N°100	351	331.9	350.6
<b>Total</b>	1018.4	1009.8	1019.2
$\% \text{ Error} = \frac{W_T - W_0}{W_0}$	% Error = -0.18%	% Error = -0.18%	% Error = -0.19%
<b>Error por tamizado</b>			
$\% \text{ Error} = \frac{W_T - W_0}{W_0}$	% Error = -0.04%	% Error = 0.03%	% Error = 0.06%

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No. 4-15, muestra el análisis por tamizado que se lleva a cabo en el vidrio.

Tabla No. 4-15: Análisis por tamizado, al Vidrio molido.

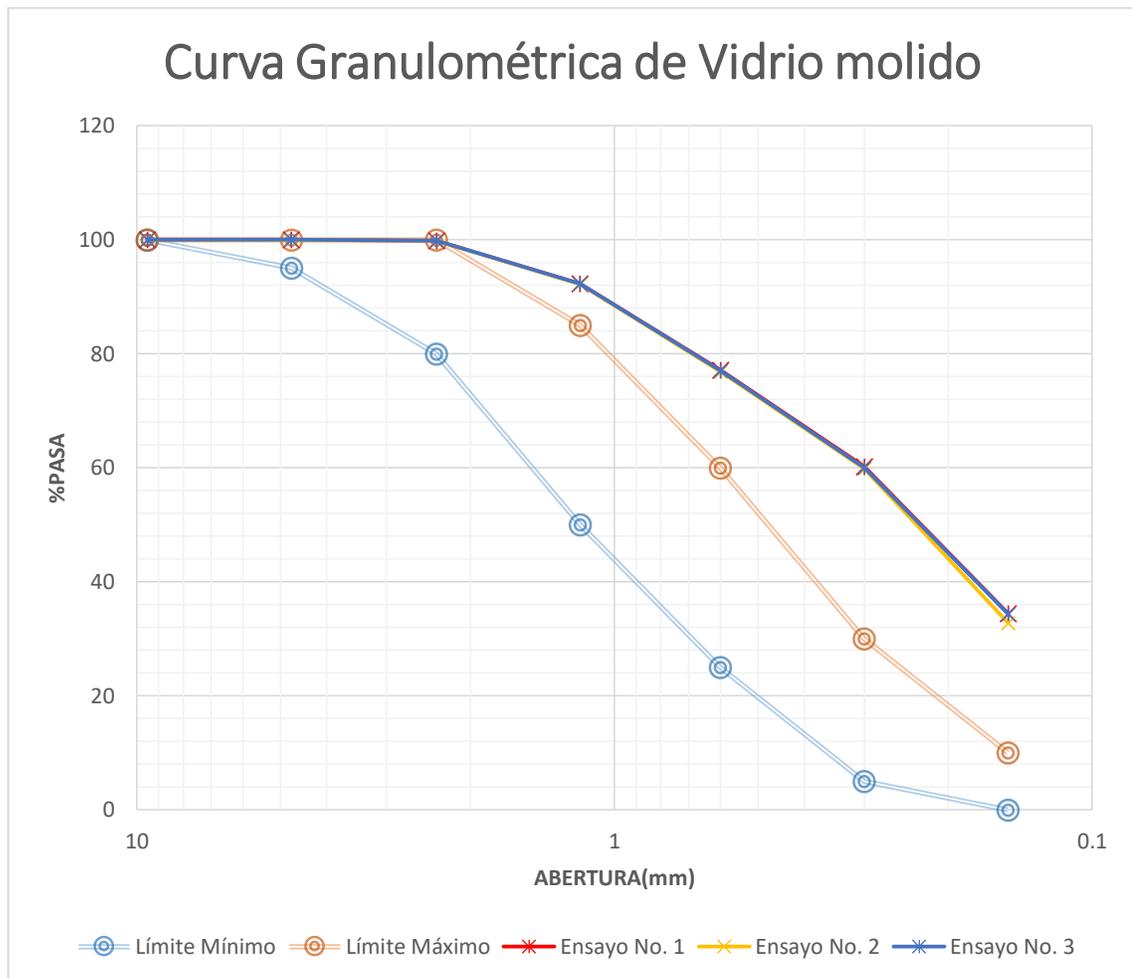
Malla	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2		Ensayo No. 3	
	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)
3/8"	0.0	100.0	0.0	100.0	0.0	100.0
N°4	0.2	100.0	0.6	99.9	0.1	100.0
N°8	2.0	99.8	1.8	99.8	2.2	99.8
N°16	76.0	92.3	76.3	92.2	76.7	92.3
N°30	155.8	77.1	155.7	76.8	156.2	77.0
N°50	171.8	60.2	172.3	59.8	173.3	60.0
N°100	263.5	34.4	273.1	32.8	262.1	34.3
Pasa N°100	351	0.0	331.9	0.0	350.6	0.0
<b>TOTAL</b>	1020.3		1011.7		1021.2	
<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF<sub>1</sub> = 1.36</b>		<b>MF<sub>2</sub> = 1.39</b>		<b>MF<sub>3</sub> = 1.37</b>	

\*NOTA: Las masas retenidas presentadas en esta tabla, son las correspondientes masas corregidas de la Tabla No 4-14.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 4-4 se muestran las gráficas de los resultados de la granulometría obtenidos a partir del análisis por tamizado del vidrio, presentado en la Tabla No. 4-15, para los 3 ensayos.

Figura No. 4-4: Curvas granulométricas del vidrio molido.



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.4. Combinación Arena – Vidrio (85 % - 15 %).

##### a. Granulometría 85% Arena – 15% Vidrio (ASTM C136)

Para el análisis granulométrico de la combinación se toma en cuenta los límites establecidos en la Tabla No. 4-8.

La Tabla No. 4-16, Muestra los pesos obtenidos luego de realizado el tamizado de la combinación arena-vidrio (85 % - 15 %).

Tabla No. 4-16: Pesos retenidos, Combinación Arena-Vidrio (85 % - 15 %).

<b>W<sub>0</sub>(g)</b>	<b>1037.5</b>	<b>1021.9</b>	<b>1053.2</b>
<b>Abertura de la malla</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 1</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 2</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 3</b>
<b>9.52mm (3/8")</b>	0.0	0.0	0.0
<b>4.75mm (N°4)</b>	19.0	16.7	26.3
<b>2.36mm (N°8)</b>	67.1	59.8	64.9
<b>1.18mm (N°16)</b>	131.3	120.8	130
<b>0.60mm (N°30)</b>	235.4	227.6	239.1
<b>0.30mm (N°50)</b>	309.4	313.1	315.4
<b>0.15mm (N°100)</b>	185.8	179.7	188.3
<b>Pasa N°100</b>	89.8	104.1	89.0
<b>Total</b>	<b>1037.8</b>	<b>1021.8</b>	<b>1053.0</b>
<b>% Error = <math>\frac{W_T - W_0}{W_0}</math></b>	% Error = -0.03 %	% Error = -0.01 %	% Error = -0.02 %
<b>Error por tamizado en malla N°50</b>			
<b>% Error = <math>\frac{W_T - W_0}{W_0}</math></b>	% Error = 0.01 %	% Error = 0.02 %	% Error = 0.01 %

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No 4-17, muestra el análisis por tamizado que se lleva a cabo en el vidrio – arena (85 %-15 %).

Tabla No. 4-17: Análisis por tamizado, Combinación Arena-Vidrio (85 % - 15 %).

Malla	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2		Ensayo No. 3	
	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)
3/8"	0.0	100.0	0.0	100.0	0	100.0
N°4	19.0	98.2	16.7	98.4	26.3	97.5
N°8	67.1	91.7	59.8	92.5	64.9	91.3
N°16	131.3	79.0	120.8	80.7	130	79.0
N°30	235.4	56.4	227.6	58.4	239.1	56.3
N°50	309.1	26.6	313.2	27.8	315.6	26.3
N°100	185.8	8.7	179.7	10.2	188.3	8.5
Pasa N°100	89.8	0.0	104.1	0.0	89.0	0.0
<b>TOTAL</b>	<b>1037.5</b>		<b>1021.9</b>		<b>1053.2</b>	
<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF<sub>1</sub> = 2.40</b>		<b>MF<sub>2</sub> = 2.32</b>		<b>MF<sub>3</sub> = 2.41</b>	

\*NOTA: Las masas retenidas presentadas en esta tabla, son las correspondientes masas corregidas de la Tabla No 4-16.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No. 4–18, muestra los resultados promedio de la Tabla No. 4-17 que se utilizarán en la sección “g” del apartado 4.2, en la comparación de las curvas granulométricas del agregado fino y la combinación de sustituciones parciales de agregado fino por vidrio molido.

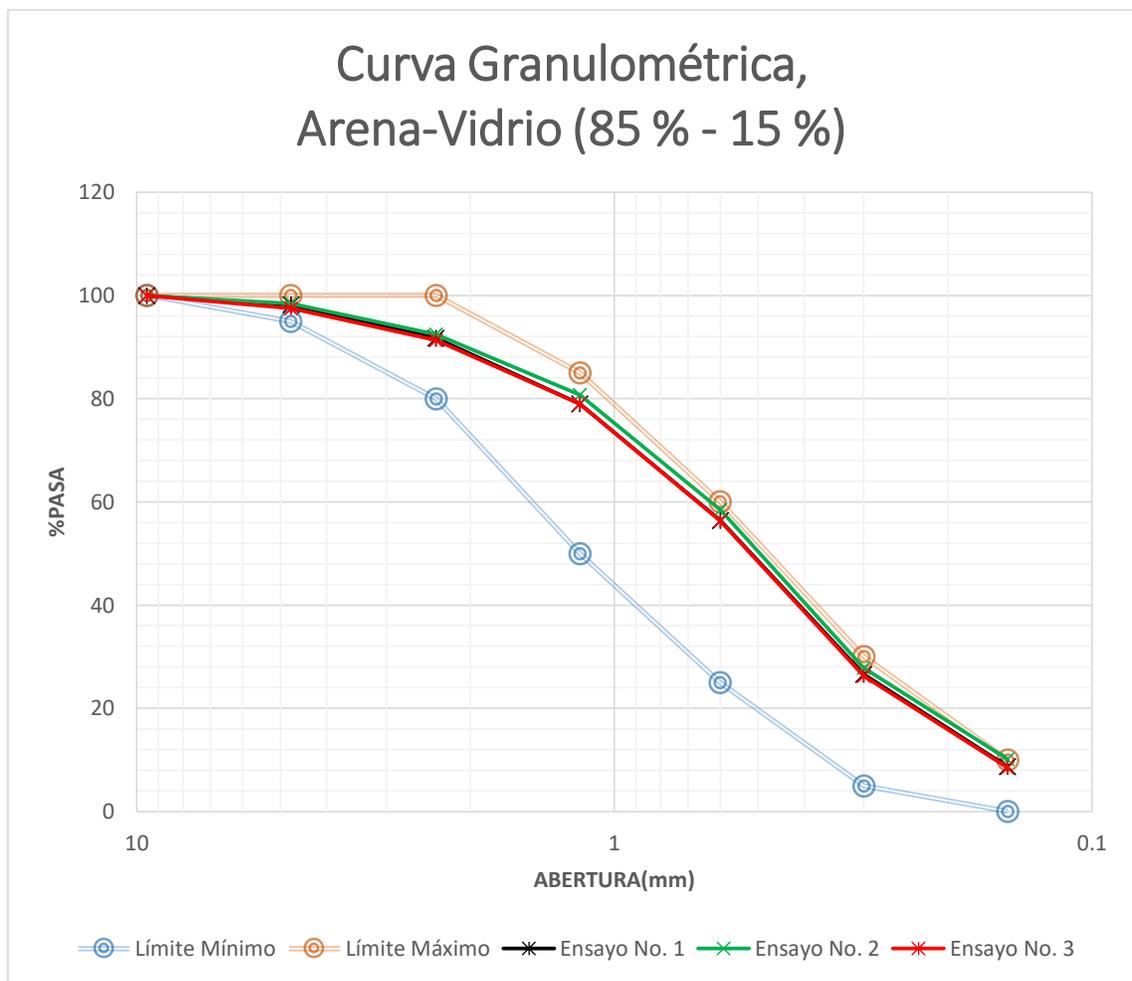
Tabla No. 4-18: Granulometría Promedio, combinación 85 % Arena – 15 % Vidrio.

Malla	Aberturas (mm)	Porcentaje que pasa Promedio	Módulo de Finura Promedio
3/8"	9.52	100.0	
N°4	4.75	98.0	
N°8	2.36	91.9	
N°16	1.18	79.6	2.38
N°30	0.60	57.0	
N°50	0.30	26.9	
N°100	0.15	9.1	

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 4-5 se muestran las gráficas de los resultados de la granulometría obtenidos a partir del análisis por tamizado de la combinación agregado fino vidrio (85 % - 15 %), presentado en la Tabla No. 4-17, para los 3 ensayos.

Figura No. 4-5: Curva Granulométrica, Arena-Vidrio (85 % - 15 %).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.5. Combinación Arena – Vidrio (80 % - 20 %).

##### a. Granulometría 80 % Arena – 20 % Vidrio (ASTM C136)

Para el análisis granulométrico del vidrio se toma en cuenta los límites establecidos en la Tabla No. 4-8.

La Tabla No. 4-19, Muestra los pesos obtenidos luego de realizado el tamizado de la Arena 80% - Vidrio 20%.

Tabla No. 4-19: Pesos retenidos, Combinación Arena-Vidrio (80 % - 20 %).

<b>W<sub>0</sub>(g)</b>	<b>1028.6</b>	<b>1030.4</b>	<b>1036.5</b>
<b>Abertura de la malla</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 1</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 2</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 3</b>
<b>9.52mm (3/8")</b>	0.0	0.0	2.9
<b>4.75mm (N°4)</b>	18.9	16.3	27.5
<b>2.36mm (N°8)</b>	62.8	57.3	71.1
<b>1.18mm (N°16)</b>	127.6	122.6	132.6
<b>0.60mm (N°30)</b>	232.2	229.7	229.7
<b>0.30mm (N°50)</b>	301.4	301.8	290.6
<b>0.15mm (N°100)</b>	185.7	198.1	164.5
<b>Pasa N°100</b>	100.1	104.8	117.6
<b>Total</b>	1028.7	1030.6	1036.5
<b>% Error = <math>\frac{W_T - W_0}{W_0}</math></b>	% Error = 0.01 %	% Error = 0.02 %	% Error = 0.00 %
<b>Error por tamizado en malla N°50</b>			
<b>% Error = <math>\frac{W_T - W_0}{W_0}</math></b>	% Error = 0.00 %	% Error = 0.01 %	% Error = 0.03 %

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No 4-20, muestra los resultados del análisis por tamizado que se lleva a cabo en la combinación Arena 80 % y Vidrio 20 %.

Tabla No. 4-20: Análisis por tamizado, Combinación Arena-Vidrio (80 % - 20 %).

Malla	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2		Ensayo No. 3	
	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)
3/8"	0.0	100.0	0.0	100.0	2.9	99.7
N°4	18.9	98.2	16.3	98.4	27.5	97.1
N°8	62.8	92.1	57.3	92.9	71.1	90.2
N°16	127.6	79.7	122.6	81.0	132.6	77.4
N°30	232.2	57.1	229.7	58.7	229.7	55.3
N°50	301.3	27.8	301.6	29.4	290.6	27.2
N°100	185.7	9.7	198.1	10.2	164.5	11.3
Pasa N°100	100.1	0.0	104.8	0.0	117.6	0.0
<b>TOTAL</b>	1028.6		1030.4		1036.5	
<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF<sub>1</sub> = 2.36</b>		<b>MF<sub>2</sub> = 2.30</b>		<b>MF<sub>3</sub> = 2.42</b>	

\*NOTA: Las masas retenidas presentadas en esta tabla, son las correspondientes masas corregidas de la Tabla No 4-19.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No. 4–21, muestra los resultados promedio de la Tabla No. 4-20 que se utilizarán en la sección “g” del apartado 4.2, en la comparación de las curvas granulométricas del agregado fino y la combinación de sustituciones parciales de agregado fino por vidrio molido.

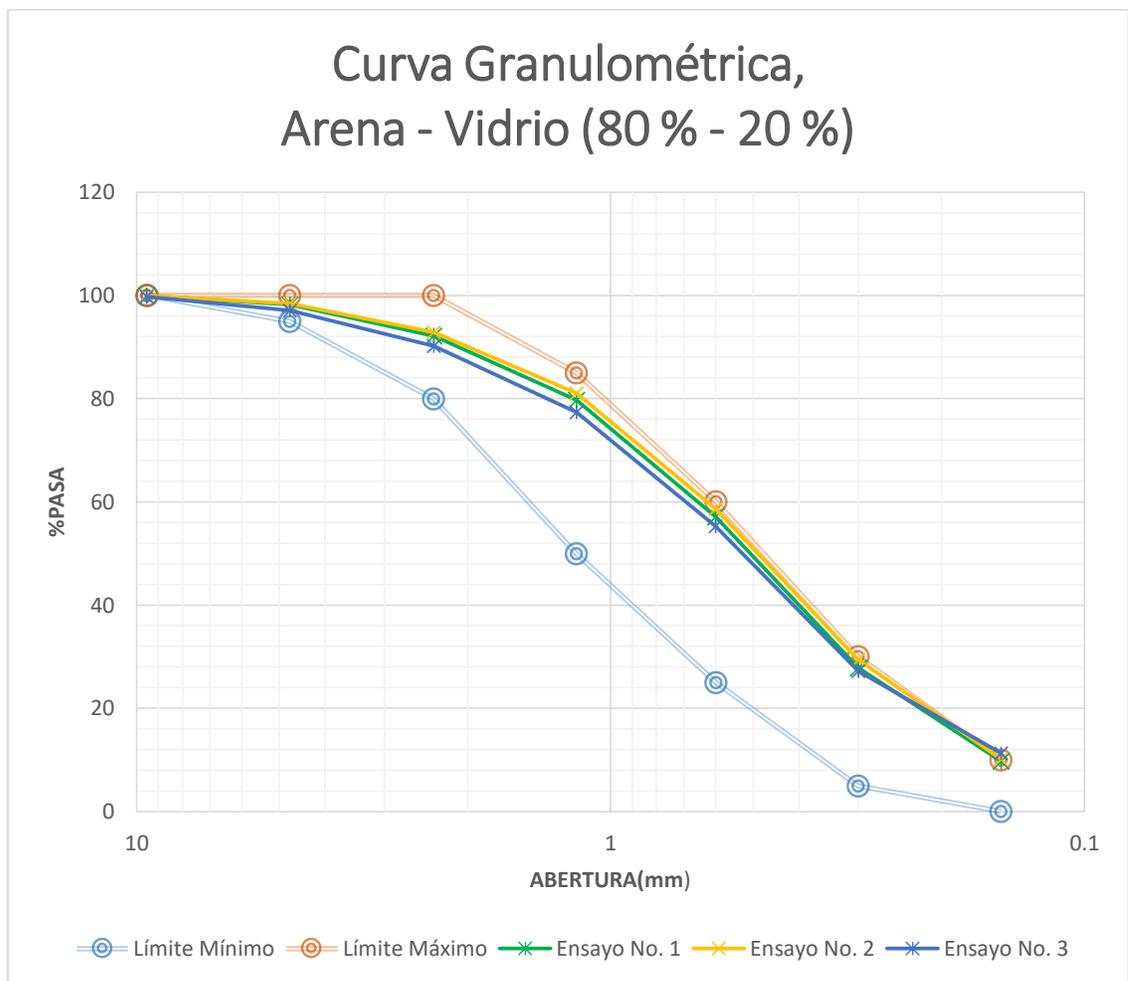
Tabla No. 4-21: Granulometría Promedio, Combinación 80 % Arena – 20 % Vidrio.

Malla	Aberturas (mm)	Porcentaje que pasa Promedio (%)	Módulo de Finura Promedio
3/8"	9.52	99.9	2.36
N°4	4.75	97.9	
N°8	2.36	91.7	
N°16	1.18	79.3	
N°30	0.60	57.0	
N°50	0.30	28.1	
N°100	0.15	10.4	

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 4-6 se muestran las gráficas de los resultados de la granulometría obtenidos a partir del análisis por tamizado de la combinación agregado fino vidrio (80 % - 20 %), presentado en la Tabla No. 4-20, para los 3 ensayos.

Figura No. 4-6: Curva Granulométrica, Arena-Vidrio (80 % - 20 %).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.6. Combinación Arena – Vidrio (75 % - 25 %).

##### a. Granulometría 75 % Arena – 25 % Vidrio (ASTM C136)

Para el análisis granulométrico del vidrio se toma en cuenta los límites establecidos en la Tabla No. 4-8.

La Tabla No. 4-22, Muestra los pesos obtenidos luego de realizado el tamizado de la combinación arena-vidrio.

Tabla No. 4-22: Pesos retenidos, Combinación Arena-Vidrio (75 % - 25 %).

<b>W<sub>0</sub>(g)</b>	<b>1005.9</b>	<b>1012.4</b>	<b>1024.1</b>
<b>Abertura de la malla</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 1</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 2</b>	<b>Masas retenidas (g) Ensayo No. 3</b>
<b>9.52mm (3/8")</b>	2.2	0.0	0.0
<b>4.75mm (N°4)</b>	20.1	23.3	24.3
<b>2.36mm (N°8)</b>	57.1	63.2	56.3
<b>1.18mm (N°16)</b>	124.2	124.3	121.8
<b>0.60mm (N°30)</b>	221.3	222.7	222.4
<b>0.30mm (N°50)</b>	282.3	283.6	289.1
<b>0.15mm (N°100)</b>	178.7	177.3	194.2
<b>Pasa N°100</b>	118.7	117	115.9
<b>Total</b>	1004.6	1011.4	1024.0
<b>% Error = <math>\frac{W_T - W_0}{W_0}</math></b>	% Error = -0.13 %	% Error = -0.10 %	% Error = -0.01 %
<b>Error por tamizado en malla N°30</b>			
<b>% Error = <math>\frac{W_T - W_0}{W_0}</math></b>	% Error = 0.02 %	% Error = 0.02 %	% Error = 0.04 %

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No 4-23, muestra el análisis por tamizado que se lleva a cabo en la combinación arena-vidrio (75 % – 25 %).

Tabla No. 4-23: Análisis por tamizado, Combinación Arena-Vidrio (75 % - 25 %).

Malla	Ensayo No. 1		Ensayo No. 2		Ensayo No. 3	
	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)	Masa retenida* (g)	Porcentajes que pasan (%)
3/8"	2.2	99.8	0.0	100.0	0.0	100.0
N°4	20.1	97.8	23.3	97.7	24.3	97.6
N°8	57.1	92.1	63.2	91.5	56.3	92.1
N°16	124.2	79.8	124.3	79.2	121.8	80.2
N°30	221.3	57.8	222.7	57.2	222.4	58.5
N°50	283.6	29.6	284.6	29.1	289.2	30.3
N°100	178.7	11.8	177.3	11.6	194.2	11.3
Pasa N°100	118.7	0.0	117.0	0.0	115.9	0.0
<b>TOTAL</b>	<b>1005.9</b>		<b>1012.4</b>		<b>1024.1</b>	
<b>Módulo de Finura</b>	<b>MF<sub>1</sub> = 2.31</b>		<b>MF<sub>2</sub> = 2.34</b>		<b>MF<sub>3</sub> = 2.30</b>	

\*NOTA: Las masas retenidas presentadas en esta tabla, son las correspondientes masas corregidas de la Tabla No 4-22.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No. 4–24, muestra los resultados promedio de la Tabla No. 4-23 que se utilizarán en la sección “g” del apartado 4.2, en la comparación de las curvas granulométricas del agregado fino y la combinación de sustituciones parciales de agregado fino por vidrio molido.

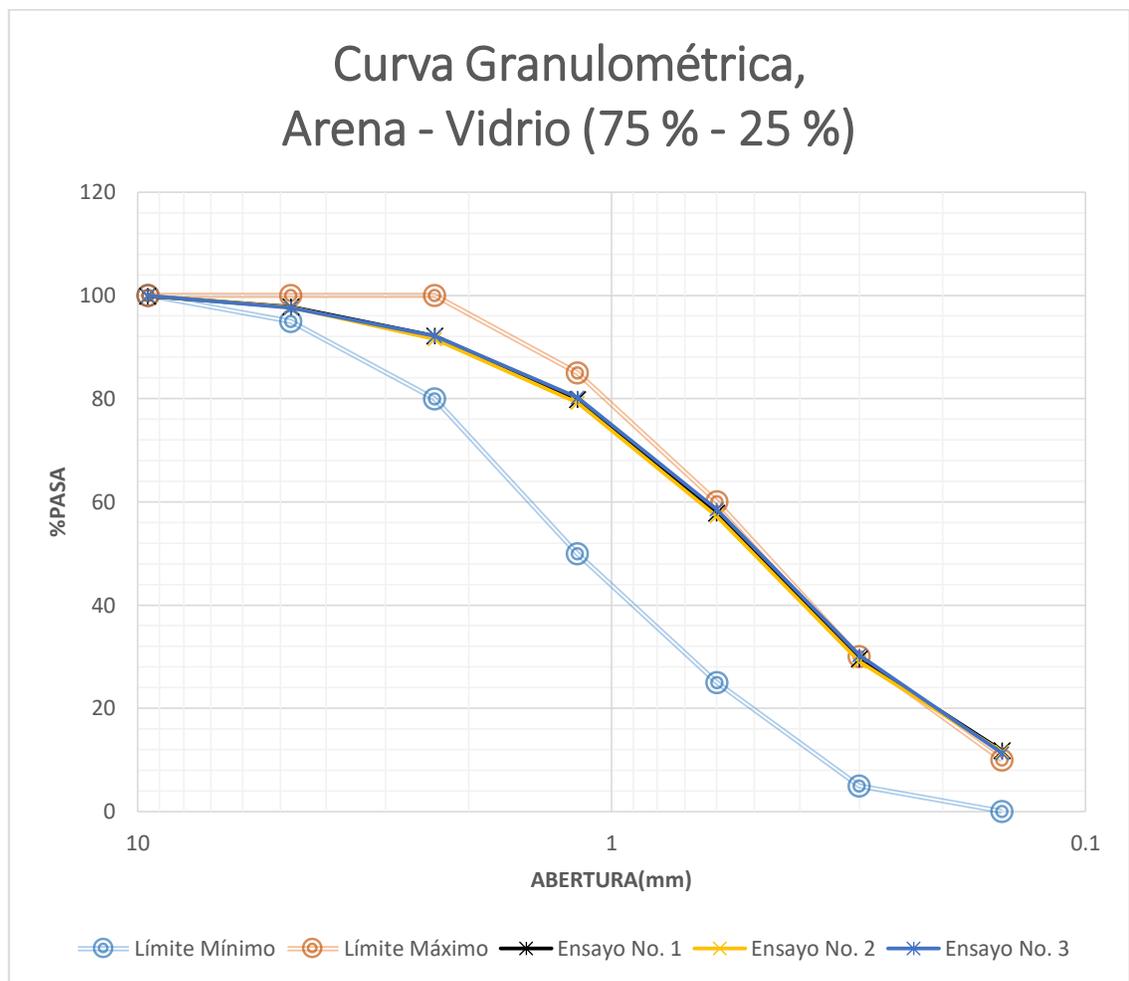
Tabla No. 4-24: Granulometría Promedio, Combinación 75 % Arena – 25 % Vidrio.

Malla	Aberturas (mm)	Porcentaje que pasa Promedio (%)	Módulo de Finura Promedio
3/8"	9.52	99.9	2.32
N°4	4.75	97.7	
N°8	2.36	91.9	
N°16	1.18	79.7	
N°30	0.60	57.8	
N°50	0.30	29.6	
N°100	0.15	11.6	

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 4-7 se muestran las gráficas de los resultados de la granulometría obtenidos a partir del análisis por tamizado de la combinación agregado fino vidrio (75 % - 25 %), presentado en la Tabla No. 4-23, para los 3 ensayos.

Figura No. 4-7: Curva Granulométrica, Arena-Vidrio (75 % - 25 %).



Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2.7. Comparación del comportamiento de los resultados de Granulometrías combinadas y arena natural

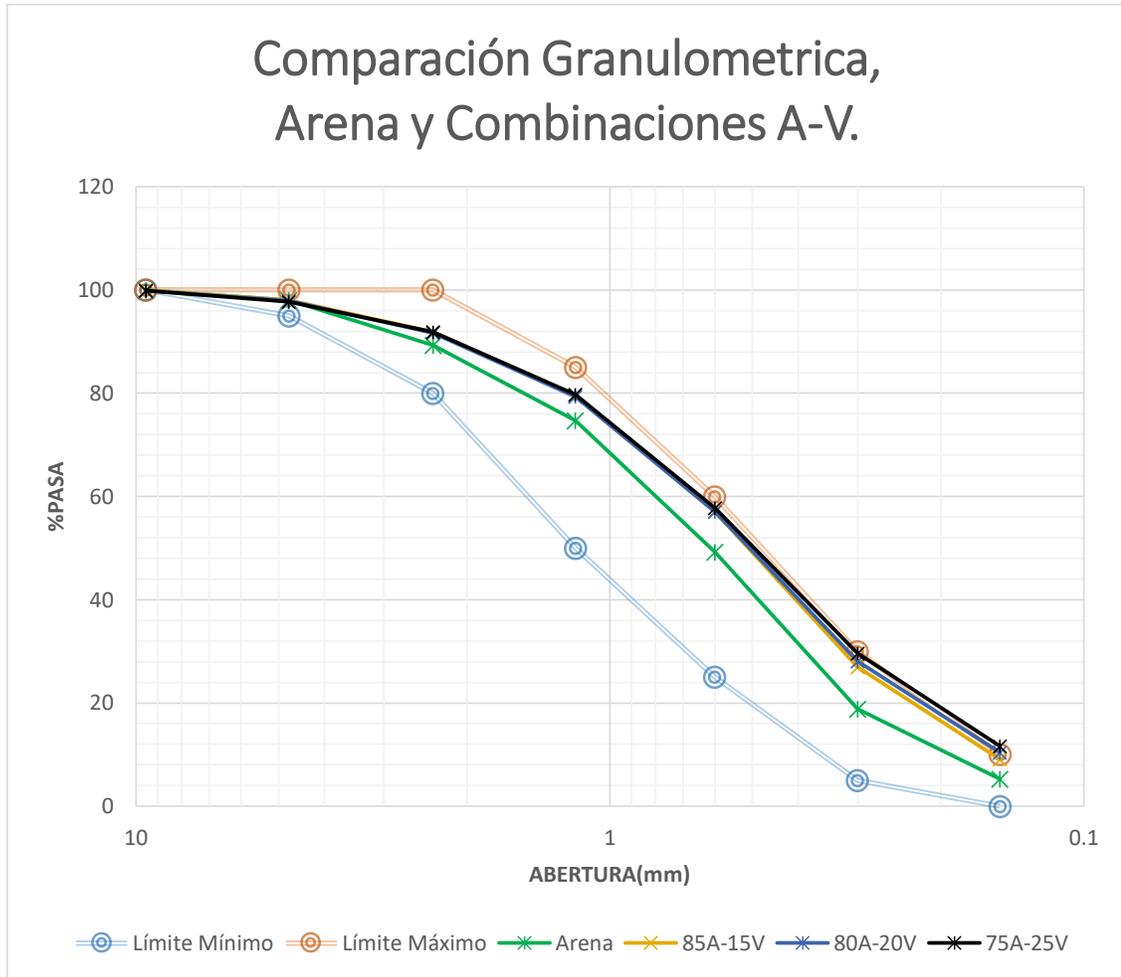
La Tabla No. 4-25 Muestra el resumen de los resultados promedio de las granulometrías realizadas a las combinaciones de arena y vidrio, (ver Tablas No. 4-11; 4-18; 4-21 y 4-24) y en la Figura No. 4-8, se presentan las curvas granulométricas del agregado fino y las combinaciones de agregado fino con vidrio molido.

*Tabla No. 4-25: Resultados Granulométricos Promedio de arena y combinaciones de vidrio molido y arena.*

<b>Combinación</b>		<b>100%Arena</b>	<b>85%A-15%V</b>	<b>80%A-20%V</b>	<b>75%A-25%V</b>
<b>Malla</b>	<b>Aberturas (mm)</b>	Porcentaje que pasa Promedio (%)			
<b>3/8"</b>	9.52	100.0	100.0	99.9	99.9
<b>N°4</b>	4.75	98.0	98.0	97.9	97.7
<b>N°8</b>	2.36	89.3	91.9	91.7	91.9
<b>N°16</b>	1.18	74.7	79.6	79.3	79.7
<b>N°30</b>	0.60	49.2	57.0	57.0	57.8
<b>N°50</b>	0.30	18.8	26.9	28.1	29.6
<b>N°100</b>	0.15	5.3	9.1	10.4	11.6
<b>Módulo de Finura</b>		<b>2.65</b>	<b>2.38</b>	<b>2.36</b>	<b>2.32</b>

**NOTA:** A: Arena; V: Vidrio  
Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 4-8: Comparación granulométrica del agregado fino Promedio y Combinaciones Arena-Vidrio.



### 4.3. Diseño teórico de mezclas de concreto

#### 4.3.1. Parámetros de diseño

En la Tabla No. 4-26, se muestra el resumen de los resultados recopilados en los ensayos de caracterización de agregados.

Tabla No. 4-26: Parámetros de diseño del Concreto y Propiedades del vidrio y combinaciones de agregado fino y vidrio.

<b>PARÁMETROS DE DISEÑO</b>			
Resistencia		f'c = 280kg/cm <sup>2</sup>	
Condiciones de exposición y Contenido de Aire		<b>Condiciones climáticas cálidas (normales), Sin Aire incluido</b>	
<b>Cemento</b>			
Clasificación		<b>Portland C1157 tipo GU</b>	
Gravedad Especifica		<b>G<sub>s</sub> = 2.9</b>	
<b>Agregado Fino</b>		<b>Agregado Grueso</b>	
Gravedad específica seca	<b>G<sub>s</sub>seca=2.38</b>	Gravedad específica seca	<b>G<sub>s</sub>seca=2.54</b>
%Humedad	<b>%ω=5.84%</b>	%Humedad	<b>%ω=0.74%</b>
%Absorción	<b>%Abs=3.9</b>	%Absorción	<b>%Abs=1.26</b>
Peso Vol. Suelto	<b>γ=1323kg/m<sup>3</sup></b>	Peso Vol. Varillado	<b>γ=1474kg/m<sup>3</sup></b>
Módulo de Finura	<b>MF=2.65</b>	Peso Vol. Suelto	<b>γ=1388kg/m<sup>3</sup></b>
		Tamaño Máximo Nominal	<b>TMN=3/4"</b>
<b>PROPIEDADES DEL VIDRIO Y COMBINACIONES DE ARENA – VIDRIO</b>			
<b>Vidrio</b>		<b>Combinaciones</b>	
Gravedad específica seca	<b>G<sub>s</sub>seca=2.53</b>	Arena-Vidrio (85-15)%	<b>MF=2.38</b>
%Humedad	<b>%ω=0.0%</b>		
%Absorción	<b>%Abs=0.0%</b>	Arena-Vidrio (80-20)%	<b>MF=2.36</b>
Peso Vol. Suelto	<b>γ=1317kg/m<sup>3</sup></b>		
Módulo de Finura	<b>MF=1.37</b>	Arena-Vidrio (75-25)%	<b>MF=2.32</b>

Fuente: Elaboración Propia.

#### **4.3.2. Diseño de mezclas de concreto.**

##### ***I. Selección de revenimiento***

El valor de revenimiento para diseñar es: **10cm (4")**

**NOTA:** La tolerancia para este diseño es  $\pm 1$  Pulgada. **(4 $\pm$ 1Pulg.)**

##### ***II. Elección del tamaño máximo de agregado.***

El tamaño máximo del agregado a utilizar en la mezcla de concreto es 1", cuyo TMN es 3/4". Esto debido a los agregados proporcionados para el trabajo experimental.

Tamaños del agregado grueso: **TMN 3/4" y Tamaño Máx. 1"**

##### ***III. Agua de mezclado y contenido de aire.***

Tomando como referencia la Tabla No. 3-11 del Capítulo 3, sección 3.8.3, de esta investigación, se reduce la misma con aquellos valores que se consideran pertinentes para la correcta selección de cantidad de agua de mezclado, en una mezcla de concreto sin aire incluido. La Tabla No. 4-27 muestra los valores de agua de mezclado en función del revenimiento y el TMN del agregado.

Tabla No. 4-27: Agua de Mezclado y cantidad de Aire Atrapado.

Revenimiento		Agua, kg/m <sup>3</sup> de concreto para tamaño máximo nominal							
(cm)	(pulg)	9.5mm (3/8")	12.5mm (1/2")	19mm (3/4")	25mm (1")	37.5mm (1 1/2")	50mm (2")	75mm (3")**	150mm (6")**
Concreto sin aire incluido									
2.5-5.0	1 a 2	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5-10.0	3 a 4	228	216	<b>205</b>	193	181	169	145	124
15.0-17.5	6 a 7	243	228	216	202	190	178	160	---
<b>Cantidad aproximada de aire atrapado en el concreto sin aire incluido, (%)</b>		3	2.5	<b>2</b>	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente: Elaboración propia.

**Agua de mezclado 205 kg y cantidad de aire atrapado 2 %.**

#### IV. Resistencia del concreto y relación Agua/Cemento.

Debido a que no se cuenta con un registro estadístico de resistencias a la compresión de especímenes de concreto, se procede a la utilización de la Tabla No. 3-14, del Capítulo 3 sección 3.8.3 de esta investigación, para obtener la resistencia de diseño; en la Tabla No. 4-28 se muestra una porción de la misma, donde se detallan los datos apropiados para la determinación de la resistencia  $f'_{cr}$ .

Tabla No. 4-28: Resistencia Requerida para Diseño de Concreto.

Esfuerzo a compresión especificada $f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo promedio requerido a compresión $f'_{cr}$ (kg/cm <sup>2</sup> )
210 – 350	$f'c + 84$

Fuente: Elaboración propia.

Dado que  $f'c = 280 \text{ kg/cm}^2$

$$f'_{cr} = f'c + 84 = 280 + 84$$

$$f'_{cr} = 364 \text{ kg/cm}^2$$

Una vez se determina el valor de  $f'_{cr}$  y si el concreto será con o sin inclusión de aire se procede a determinar la relación A/C, utilizando la Tabla No. 3-15 del Capítulo 3 sección 3.8.3 de esta investigación; para esto en la Tabla No. 4-29 se muestran los datos necesarios para la determinación de la relación Agua/Cemento:

*Tabla No. 4-29: Relación entre  $f'_{cr}$  y la relación A/C*

Esfuerzo a compresión a 28 días, (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación agua cemento por peso	
	Concreto sin aire incluido	Concreto con aire incluido
420	0.41	---
350	0.48	0.40
280	0.57	0.48

Fuente: Elaboración propia.

Como el valor de  $f'_{cr}$  no se encuentra directamente, se procede a interpolar para la determinación de la relación A/C.

$f'_{cr}$  (kg/cm<sup>2</sup>)    Relación A/C

420                    0.41

364                    A/C

350                    0.48

$$\frac{A/C - 0.48}{364 - 350} = \frac{0.41 - 0.48}{420 - 350}$$

$$A/C = \frac{(0.41 - 0.48)(364 - 350)}{420 - 350} + 0.48$$

$$A/C = 0.466$$

### V. **Cálculo del contenido de cemento mínimo.**

El cemento requerido es igual al contenido estimado de agua de mezclado dividido entre la relación A/C.

$$C = \frac{A}{(A/C)}$$

Dónde:

C = Cantidad de cemento por m<sup>3</sup> de concreto

A = Cantidad de agua por m<sup>3</sup> de concreto

A/C = Relación agua-cemento

$$C = \frac{205}{(0.466)} = 439.9 \text{ kg/m}^3$$

$$C = 439.9 \text{ kg/m}^3$$

### VI. **Estimación del contenido de agregado grueso.**

En la Tabla No. 4-30 se muestra el volumen de agregado, en m<sup>3</sup>, con base al peso volumétrico varillado seco; esta tabla es una porción de la Tabla No. 3-16 del Capítulo 3 sección 3.8.3.

*Tabla No. 4-30: Volumen de agregado grueso por metro cubico de concreto.*

Tamaño máximo nominal del agregado		Volumen de agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura del agregado fino			
		2.40	2.60	2.80	3.00
19 mm	3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60

Fuente: Elaboración propia.

Como el valor del MF=2.65 no se encuentra directamente, se procede a extrapolar para la determinación del volumen de agregado grueso.

Módulo de Finura (MF)	Volumen AG(m <sup>3</sup> )
2.60	0.64
2.65	V <sub>AG</sub>
2.80	0.62

$$\frac{V_{AG} - 0.62}{2.65 - 2.80} = \frac{0.64 - 0.62}{2.60 - 2.80}$$

$$V_{AG} = 0.62 + \frac{(-0.15)(0.02)}{-0.20}$$

$$V_{AG} = 0.635m^3$$

Luego de la determinación del volumen máximo del agregado grueso, se procede al cálculo de masa de agregado grueso, partiendo de peso volumétrico varillado seco. (PVV= 1474kg/m<sup>3</sup>)

$$P_{VV} = \frac{W}{V} \rightarrow W = V \times P_{VV} \rightarrow W = 0.635 \times 1474$$

$$W = 936.00kg$$

### **VII. Estimación del contenido de agregado fino.**

Para la determinación del contenido de agregado fino se utilizará el método del volumen absoluto, el volumen del agregado fino se determina sustrayendo, de un metro cúbico, los volúmenes absolutos de los componentes conocidos. El volumen absoluto del agua, cemento y agregado grueso se calcula dividiéndose la masa conocida de cada uno de ellos por el producto de su masa específica

relativa y la densidad del agua. Los cálculos del volumen son como se muestra en la Tabla No. 4-31.

Tabla No. 4-31: Cantidad de materiales para 1m<sup>3</sup>

Material	Peso (kg) por m <sup>3</sup>	Gravedad Específica	Volumen (m <sup>3</sup> )
Agua	205	1.0	$A = \frac{205}{1 \times 1000}$ <b>A = 0.205</b>
Cemento	439.9	2.9	$C = \frac{439.9}{2.9 \times 1000}$ <b>C = 0.152</b>
Aire (2%)	-	-	<b>A<sub>i</sub> = 0.02</b>
Grava <sub>seca</sub>	936.00	2.54	$G = \frac{936.00}{2.54 \times 1000}$ <b>G = 0.369</b>
Arena <sub>seca</sub>	-	2.38	<b>A<sub>R</sub></b>

Fuente: Elaboración propia.

$$A_R = 1 - (A + C + A_i + G) \rightarrow A_R = 1 - (0.205 + 0.152 + 0.02 + 0.369)$$

$$A_R = 0.254m^3$$

**Peso de arena:**

$$W_{AR} = G_S \times A_R \times \rho_{H2O} \rightarrow W_{AR} = 2.38 \times 0.254 \times 1000$$

$$W_{AR} = 604.52kg$$

### **VIII. Resumen de diseño teórico:**

En la Tabla No. 4-32 se muestra el diseño de concreto con materiales secos.

*Tabla No. 4-32: Diseño de concreto para 1m<sup>3</sup>*

<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>Cemento</b>	439.9
<b>Agua</b>	205.0
<b>Grava Seca</b>	936.00
<b>Arena Seca</b>	604.52
<b>Aire</b>	2%

Fuente: Elaboración propia.

### **IX. Definición de la Mezcla de Control, Mezcla Patrón o Mezcla de Referencia (MP)**

Con la finalidad de obtener una mezcla que mejor se ajuste a los parámetros definidos anteriormente, se procede a elaborar distintas mezclas con variación de la relación agua cemento (A/C), de esta manera, se define la mezcla de referencia y posteriormente se reproduce para realizar las distintas sustituciones de vidrio. La Tabla No. 4-33, muestra los resultados de revenimiento y resistencia de las mezclas elaboradas con variación de la relación A/C.

Tabla No. 4-33: Resultados de revenimiento y resistencia para definición de Mezcla de Referencia (MP)

No. Mezcla	Relación A/C	Revenimiento (Pulgadas)	Resistencia, kg/cm <sup>2</sup> (MPa)	
			7 días	28 días
1	0.460	3.50	254.1 (25.9)	325.7 (33.2)
2	0.466	4.25	235.4 (24.0)	319.8 (32.6)
3	0.470	4.75	219.7 (22.4)	294.3 (30.0)

Fuente: Elaboración propia.

Realizando un pequeño análisis comparativo entre las distintas mezclas mostradas en la Tabla No. 4-33, podemos determinar que: la Mezcla No. 1 con una relación A/C de 0.46, alcanza mejores resultados de resistencia a los 7 y 28 días, sin embargo, existe una baja trabajabilidad; para Mezcla No. 2, con relación A/C de 0.466 (del diseño), se obtienen resultados bastante aceptables, y un revenimiento muy cercano al establecido en el diseño; para la Mezcla No. 3 con una relación A/C de 0.47, se obtienen resultados de resistencia menores en comparación con las otras dos mezclas, y una mejoría en la trabajabilidad.

Basado en estos resultados y observando que todas las mezclas cumplen con la resistencia, el criterio de selección es tomado con base a la trabajabilidad, determinando así, que la mezcla cuyas características mejor se ajustan a los parámetros de diseño es la Mezcla No. 2.

#### **X. Corrección por humedad y absorción de agregados.**

- 1- Obtención del peso de los agregados en estado húmedo

$$P_h = P_s \times (1 + \omega\%)$$

Agregado fino húmedo:

$$P_{hArena} = 604.52 \times (1 + 0.0584)$$

$$P_{hArena} = 639.82kg$$

Agregado grueso húmedo:

$$P_{hGrava} = 936.00 \times (1 + 0.0074)$$

$$P_{hGrava} = 942.93kg$$

2- Ajuste de agua por humedad:

La Tabla No. 4-34 muestra los valores de humedad y absorción de los agregados para concreto, ayuda a determinar si estos aportan o retiran agua a la mezcla.

Tabla No. 4-34: Ajuste por humedad y absorción.

Material	Humedad (%)	Absorción (%)	% $\omega$ - %Abs	Conclusión
Arena	5.84	3.9	5.84-3.9= 1.94	Aporta agua
Grava	0.74	1.26	0.74-1.26=-0.52	Retira agua

Fuente: Elaboración propia.

$$Agua Extra = W_{seco} \left( \frac{\% \omega - \% Abs}{100} \right)$$

$$Agua Extra_{Arena} = 604.52 \left( \frac{1.94}{100} \right) = 11.73kg, se debe retirar$$

$$Agua Extra_{Grava} = 936.00 \left( \frac{-0.52}{100} \right) = -4.87kg, se debe añadir$$

### Agua de Mezclado

$$Agua_{NETA} = 205.0 - 11.72 + 4.87$$

$$Agua_{NETA} = 198.15kg$$

La Tabla No 4-35 Muestra el diseño de concreto corregida por humedad y absorción.

*Tabla No. 4-35: Mezcla de Concreto (1 m<sup>3</sup>) corregida por humedad y absorción.*

<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>
<b>Cemento</b>	439.9
<b>Agua</b> Corregida	198.15
<b>Grava</b> Húmeda	942.93
<b>Arena</b> Húmeda	639.82
<b>Aire</b>	2%

Fuente: Elaboración propia.

#### ***XI. Reducción a mezcla de laboratorio.***

El volumen necesario para una revoltura de prueba en el laboratorio se desglosa de la siguiente manera

12 especímenes (cilindros de 6" c/u)

1 ensayo de revenimiento

1 ensayo de peso volumétrico

Desperdicio de 15 %

NOTA: Para el ensayo de revenimiento y peso volumétrico se realizaran con la misma muestra, sin embargo se considera que el volumen para estos es igual a 2 cilindros, por lo tanto la distribución de volumen queda de la siguiente manera:

- Volumen de cilindros:

$$V = 14 \times \frac{\pi}{4} \times D^2 \times h$$

$$V = 14 \times \frac{\pi}{4} \times 15^2 \times 30$$

$$V = 74220.12 \text{ cm}^3$$

Volumen total:

$$V_T = 1.15 V$$

$$V_T = 1.15(74220.12)$$

$$V_T = 85353.14 \text{ cm}^3$$

$$V_T = 0.0853531 \text{ m}^3$$

$$V_T = 0.0854 \text{ m}^3$$

La Tabla No. 4-36 Muestra la reducción de la mezcla de prueba.

*Tabla No. 4-36: Reducción a mezcla de Laboratorio*

Material	Peso (kg), Mezcla para 1m <sup>3</sup>	FACTOR	Peso (kg), Mezcla de prueba
<b>Cemento</b>	439.9	0.0854	37.57
<b>Agua</b> corregida	198.15	0.0854	16.92
<b>Grava</b> húmeda	942.93	0.0854	80.53
<b>Arena</b> húmeda	639.82	0.0854	54.64
<b>Aire</b>	2 %	-	2 %

Fuente: Elaboración propia.

**XII. Dosificación de mezclas con sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido**

La Tabla No. 4-37 Muestra las dosificaciones de concreto con sustitución parcial del agregado fino por vidrio molido; la Tabla No. 4-38 muestra la dosificación reducida a tamaño de mezcla de laboratorio. Ambas tablas están elaboradas para dosificaciones con agregados secos.

*Tabla No. 4-37: Dosificación de Mezclas 1m<sup>3</sup> (peso seco).*

Componentes	Diseño de mezclas (1m <sup>3</sup> )			
	Control	15% de vidrio	20% de vidrio	25% de vidrio
Cemento C1157, kg/ m <sup>3</sup>	439.9	439.9	439.9	439.9
Agua, kg/m <sup>3</sup>	205.0	205.0	205.0	205.0
Agregado grueso, kg/ m <sup>3</sup>	936.00	936.00	936.00	936.00
Agregado fino, kg/ m <sup>3</sup>	604.52	513.84	483.86	453.39
Vidrio molido, kg/ m <sup>3</sup>	0.0	90.68	120.66	151.13
Aire (%)	2.0	2.0	2.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla No. 4-38: Dosificación de Mezclas, a tamaño de laboratorio 0.0854m<sup>3</sup> (Peso seco).*

Componentes (Mezcla de prueba, 12 Cilindros)	Diseño de mezclas (0.0854m <sup>3</sup> )			
	Control	15% de vidrio	20% de vidrio	25% de vidrio
Cemento C1157, kg	37.57	37.57	37.57	37.57
Agua, kg	17.51	17.51	17.51	17.51
Agregado grueso, kg	79.93	79.93	79.93	79.93
Agregado fino, kg	51.63	43.88	41.30	38.72
Vidrio molido, kg	0.0	7.75	10.33	12.91
Aire (%)	2.0	2.0	2.0	2.0

Fuente: Elaboración propia.

# Capítulo V

# **EVALUACION DE LAS PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO Y ANALISIS DE RESULTADOS**

## **5.1. Introducción.**

La etapa final de esta investigación, comprende la elaboración de las mezclas proyectadas en el Capítulo IV, partiendo de esto, se investigan las propiedades del concreto en estado fresco y posteriormente, en estado endurecido.

El análisis de resultados es de gran importancia para la investigación, en este capítulo se recopila toda la información obtenida de los ensayos de laboratorio realizados al concreto (en estado fresco y endurecido), cuyos resultados servirán para concluir sobre esta investigación.

Este capítulo, se encuentra dividido en 2 apartados, el primero comprende la recopilación de los resultados de los ensayos realizados al concreto fresco, la segunda, comprende los resultados de los ensayos realizados en el concreto endurecido, cada uno de estos con su respectivo análisis comparativo respecto a la mezcla de referencia.

## **5.2. Comportamiento del concreto en estado fresco.**

Este apartado recopila el conjunto de resultados de los ensayos realizados al concreto en estado fresco (a la mezcla de referencia y las diferentes combinaciones donde se ha adicionado vidrio), evaluando individualmente y comparado con la mezcla de referencia.

### **5.2.1. Análisis comparativo del diseño de mezclas.**

Para elaborar la Mezcla de Referencia o Patrón (MP), y con sustitución de agregado fino por vidrio molido (MV), fue necesario reproducirlas 3 veces, partiendo de esto, se determina, el peso volumétrico, revenimiento y temperatura, contenido de aire, adicionalmente se determinó el tiempo de fraguado y posteriormente se elaboraron los especímenes para determinar su resistencia a la compresión a las diferentes edades requeridas

#### **a. Mezcla de Referencia (MP)**

En la Tabla No. 5-1 se muestra la dosificación de la Mezcla de Referencia para 1m<sup>3</sup>; luego en las Tablas No. 5-2 hasta la Tabla No. 5-4 se muestran las dosificaciones reducidas a tamaño de ensayo, ajustadas por humedad y absorción.

Tabla No. 5-1: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP.

Dosificación para 1 m <sup>3</sup>		
Mezcla de Referencia (MP)	Materiales	Peso(kg)
	Cemento	439.90
	Agua	205.00
	Grava <sub>seca</sub>	936.00
	Arena <sub>seca</sub>	604.52
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-2: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP No 1

Dosificación para 0.0854 m <sup>3</sup>		
Humedad (%): AG <sup>12</sup> = 0.74; AF <sup>13</sup> = 5.84		Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90
Mezcla de Referencia MP No 1	Materiales	Peso(kg)
	Cemento	37.57
	Agua <sub>corregida</sub>	16.92
	Grava <sub>húmeda</sub>	80.53
	Arena <sub>húmeda</sub>	54.64
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-3: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP No 2

Dosificación para 0.0854 m <sup>3</sup>		
Humedad (%): AG = 0.54; AF = 3.61		Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90
Mezcla de Referencia MP No 2	Materiales	Peso(kg)
	Cemento	37.57
	Agua <sub>corregida</sub>	18.23
	Grava <sub>húmeda</sub>	80.37
	Arena <sub>húmeda</sub>	53.49
	Aire	2 %

Fuente Elaboración propia.

<sup>12</sup> AG: Agregado Grueso

<sup>13</sup> AF: Agregado Fino

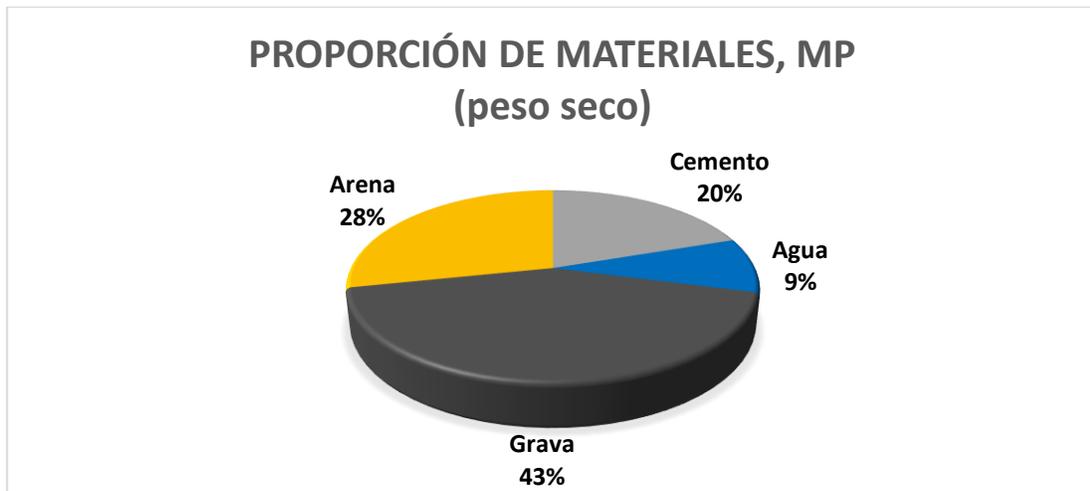
Tabla No. 5-4: Dosificación para Mezcla de Referencia, MP No 3

Dosificación para 0.0783 m <sup>3</sup>		
Humedad (%): AG = 0.46; AF = 0.95		Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90
Mezcla de Referencia MP No 3	<b>Materiales</b>	Peso(kg)
	Cemento	34.44
	Agua corregida	18.03
	Grava húmeda	73.61
	Arena húmeda	47.77
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

La Figura No. 5-1 muestra gráficamente la dosificación de materiales de la mezcla de referencia; los porcentajes mostrados están conforme a la Tabla No. 5-1.

Figura No. 5-1: Dosificación de Materiales por peso, Mezcla de Referencia (MP)



Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones obtenidas de cada una de las mezclas son atribuidas al contenido de humedad, el cual no es constante entre una mezcla y otra; en consecuencia se observan variaciones en las cantidades de agregados y el contenido de agua; en la Mezcla MP No 1, se tiene una cantidad de agua de 16.92 kg, para un contenido de humedad de 5.84 % para la arena y 0.74 % para las gravas, lo que

hace una clara disminución respecto al agua de mezclado. En la Mezcla MP No 2, se tiene una cantidad de agua de 18.23 kg, para un contenido de humedad de 3.61 % para las arenas y 0.54 % para las gravas, existiendo un incremento en el agua de mezclado, también es notorio un incremento de 7.7 % en la cantidad de agua entre MP No 1 y MP No 2. Para la Mezcla MP No 3, la cantidad de agua es de 18.03kg, un contenido de humedad de 0.95 % y 0.46 % para arenas y gravas respectivamente. Lo anterior es el resultado de las correcciones necesarias para no alterar la relación A/C.

**b. Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio (MV15%)**

En la Tabla No 5-5 se muestra la dosificación de la Mezcla con 15% de sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido para 1 m<sup>3</sup>; posteriormente, en las Tablas No 5-6 hasta la No 5-8 se muestran las distintas reproducciones de la mezcla MV15% ajustadas por humedad y absorción.

*Tabla No. 5-5: Dosificación de Mezcla con 15 % Sustitución Parcial de vidrio, MV15%.*

Dosificación para 1 m <sup>3</sup>		
	Materiales	Peso seco (kg)
Mezcla 15% Sustitución MV15%	Cemento	439.90
	Agua	205.00
	Grava <small>seca</small>	936.00
	Arena <small>seca</small>	513.84
	Vidrio	90.68
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-6: Dosificación de Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV15% No 1

Dosificación para 0.0854 m <sup>3</sup>		
Humedad (%): AG = 0.46; AF = 2.96		Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90
Mezcla 15% Sustitución MV15% No 1	Materiales	Peso(kg)
	Cemento	37.57
	Agua corregida	18.56
	Grava húmeda	80.30
	Arena húmeda	45.18
	Vidrio	7.74
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-7: Dosificación de Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV15% No 2

Dosificación para 0.0854 m <sup>3</sup>		
Humedad (%): AG = 0.57; AF = 2.47		Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90
Mezcla 15% Sustitución MV15% No 2	Materiales	Peso(kg)
	Cemento	37.57
	Agua corregida	18.69
	Grava húmeda	80.39
	Arena húmeda	44.97
	Vidrio	7.74
	Aire	2 %

Fuente Elaboración propia.

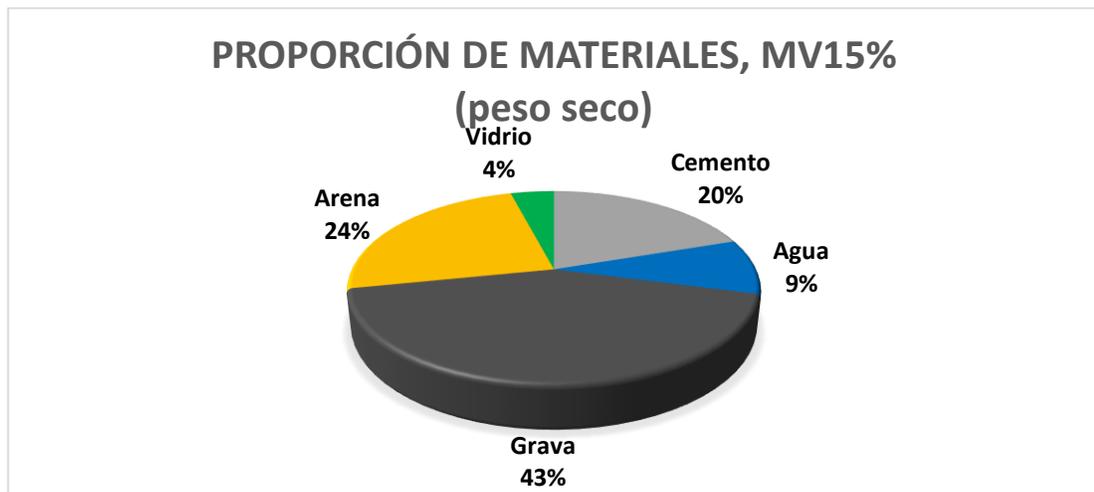
Tabla No. 5-8: Dosificación de Mezcla con 15 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV15% No 3

Dosificación para 0.0641 m <sup>3</sup>		
Humedad (%): AG = 0.44; AF = 0.78		Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90
Mezcla 15% Sustitución MV15% No 3	Materiales	Peso húmedo (kg)
	Cemento	28.18
	Agua corregida	14.65
	Grava húmeda	60.21
	Arena húmeda	33.17
	Vidrio	5.81
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

La Figura No 5-2 muestra gráficamente la dosificación de materiales de la mezcla con 15 % de sustitución parcial del agregado fino por vidrio molido; los porcentajes mostrados son conforme a la Tabla No. 5-5.

*Figura No. 5-2: Dosificación de Materiales por peso, Mezcla 15 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV15%)*



Fuente: Elaboración propia.

Existen variaciones entre cada una de las mezclas, estas son atribuidas al contenido de humedad, el cual no es constante entre una mezcla y otra; en consecuencia se encuentran variaciones en las cantidades de agregados y el contenido de agua; en la Mezcla MV15% No 1, en arenas, se tiene una cantidad de agua de 18.56 kg, para un contenido de humedad de 2.96 % y 0.46 % en gravas lo que genera un incremento del agua de mezclado. En la Mezcla MV15% No 2, se tiene una cantidad de agua de 18.69 kg, para un contenido de humedad de 2.47 % en arenas y 0.57 % en gravas, siempre existiendo un incremento en el agua de mezclado; también, hay un ligero incremento de 0.7% en la cantidad

de agua entre MV15% No 1 y MV15% No 2. Para la Mezcla MV15% No 3, la cantidad de agua es de 14.65 kg, un contenido de humedad de 0.74 % y 0.48 % para arenas y gravas respectivamente. Lo anterior es el resultado de las correcciones necesarias para no alterar la Relación A/C.

**c. Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio (MV20%)**

En la Tabla No. 5-9 se muestra la dosificación de la Mezcla con 20 % de sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido para 1 m<sup>3</sup>; posteriormente, en las Tablas No. 5-10 hasta la No. 5-12 se muestran las distintas reproducciones de la mezcla MV20% con ajustes por humedad y absorción.

*Tabla No. 5-9: Dosificación de Mezcla con 20 % Sustitución Parcial de vidrio, MV20%.*

<b>Dosificación para 1 m<sup>3</sup></b>		
	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
<b>Mezcla 20% Sustitución MV20%</b>	Cemento	439.90
	Agua	205.00
	Grava <i>seca</i>	936.00
	Arena <i>seca</i>	483.86
	Vidrio	120.66
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla No. 5-10: Dosificación de Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio, MV20% No 1.*

<b>Dosificación para 0.0854 m<sup>3</sup></b>		
	<b>Humedad (%): AG = 0.52; AF = 2.41</b>	<b>Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90</b>
	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
<b>Mezcla 20% Sustitución MV20% No 1</b>	Cemento	37.57
	Agua <i>corregida</i>	18.71
	Grava <i>húmeda</i>	80.35
	Arena <i>húmeda</i>	42.32
	Vidrio	10.30
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-11: Dosificación de Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio, MV20% No 2.

<b>Dosificación para 0.0854 m<sup>3</sup></b>		
<b>Humedad (%): AG = 0.57; AF = 2.44</b>		<b>Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90</b>
<b>Mezcla 20% Sustitución MV20% No 2</b>	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
	Cemento	37.57
	Agua corregida	18.66
	Grava húmeda	80.39
	Arena húmeda	42.33
	Vidrio	10.30
	Aire	2 %

Fuente Elaboración propia.

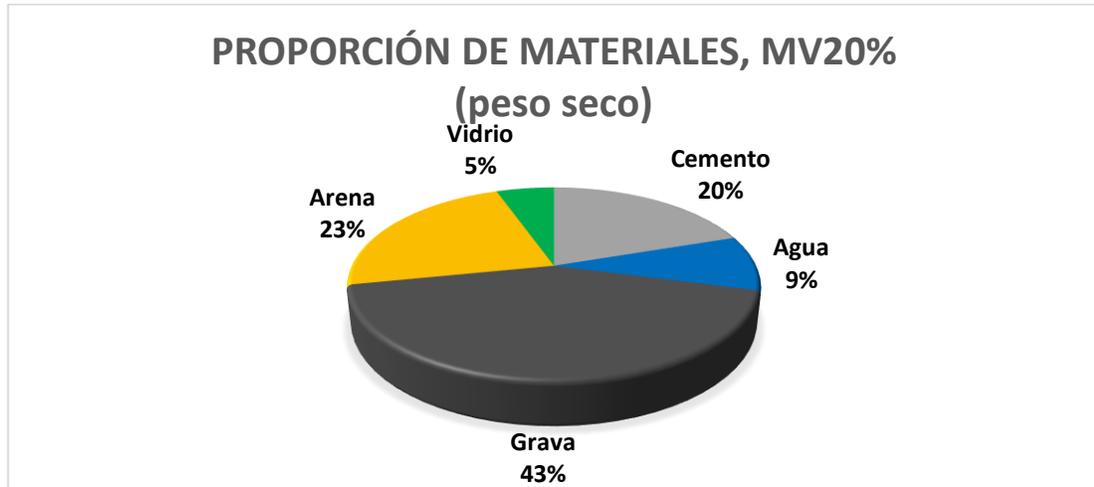
Tabla No. 5-12: Dosificación de Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio, MV20% No 3.

<b>Dosificación para 0.0641 m<sup>3</sup></b>		
<b>Humedad (%): AG = 0.32; AF = 0.78</b>		<b>Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90</b>
<b>Mezcla 20% Sustitución MV20% No 3</b>	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
	Cemento	28.18
	Agua corregida	14.66
	Grava húmeda	60.14
	Arena húmeda	31.23
	Vidrio	7.73
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

La Figura No. 5-3 muestra gráficamente la dosificación de materiales de la mezcla con 20 % de sustitución parcial del agregado fino por vidrio molido; los porcentajes mostrados son conforme a la Tabla No. 5-9.

Figura No. 5-3: Dosificación de Materiales por peso, para Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio (MV20%)



Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones entre cada una de las mezclas, son consecuencia del contenido de humedad, el cual no es constante entre una mezcla y otra; por tal motivo se encuentran variaciones en las cantidades de agregados y el contenido de agua; en la Mezcla MV20% No 1, se tiene una cantidad de agua de 18.71 kg, para un contenido de humedad de 2.41 % en arenas y 0.52 % en gravas lo que genera un incremento del agua de mezclado. En la Mezcla MV20% No 2, se tiene una cantidad de agua de 18.66 kg, para un contenido de humedad de 2.44 % en arenas y 0.57 % en gravas, siempre con un incremento en el agua de mezclado, al mismo tiempo hay una ligera reducción de 0.3 % en la cantidad de agua entre MV20% No 1 y MV20% No 2. Para la Mezcla MV20% No 3, la cantidad de agua es de 14.66 kg, un contenido de humedad de 0.78 % y 0.32 % para arenas y

gravas respectivamente. Lo anterior es el resultado de las correcciones necesarias para no alterar la Relación A/C.

**d. Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de agregado fino por vidrio (MV25%)**

En la Tabla No. 5-13 se muestra la dosificación de la Mezcla con 25% de sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido para 1 m<sup>3</sup>; posteriormente, en las Tablas No. 5-14 hasta la No. 5-16 se muestran las distintas reproducciones de la mezcla MV25% con ajustes por humedad y absorción.

*Tabla No. 5-13: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial Agregado Fino por Vidrio, MV25%.*

<b>Dosificación para 1 m<sup>3</sup></b>		
	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
<b>Mezcla 25% Sustitución MV25%</b>	Cemento	439.90
	Agua	205.00
	Grava <i>seca</i>	936.00
	Arena <i>seca</i>	453.39
	Vidrio	151.13
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

*Tabla No. 5-14: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV25% No 1.*

<b>Dosificación para 0.0712 m<sup>3</sup></b>		
	<b>Humedad (%): AG = 0.56; AF = 2.41</b>	<b>Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90</b>
	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
<b>Mezcla 25% Sustitución MV25% No 1</b>	Cemento	31.31
	Agua <i>corregida</i>	15.54
	Grava <i>húmeda</i>	66.99
	Arena <i>húmeda</i>	33.04
	Vidrio	10.76
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-15: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV25% No 2.

<b>Dosificación para 0.0854 m<sup>3</sup></b>		
<b>Humedad (%): AG = 0.50; AF = 2.44</b>		<b>Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90</b>
<b>Mezcla 25% Sustitución MV25% No 2</b>	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
	Cemento	37.57
	Agua corregida	18.68
	Grava húmeda	80.33
	Arena húmeda	39.66
	Vidrio	12.91
	Aire	2 %

Fuente Elaboración propia.

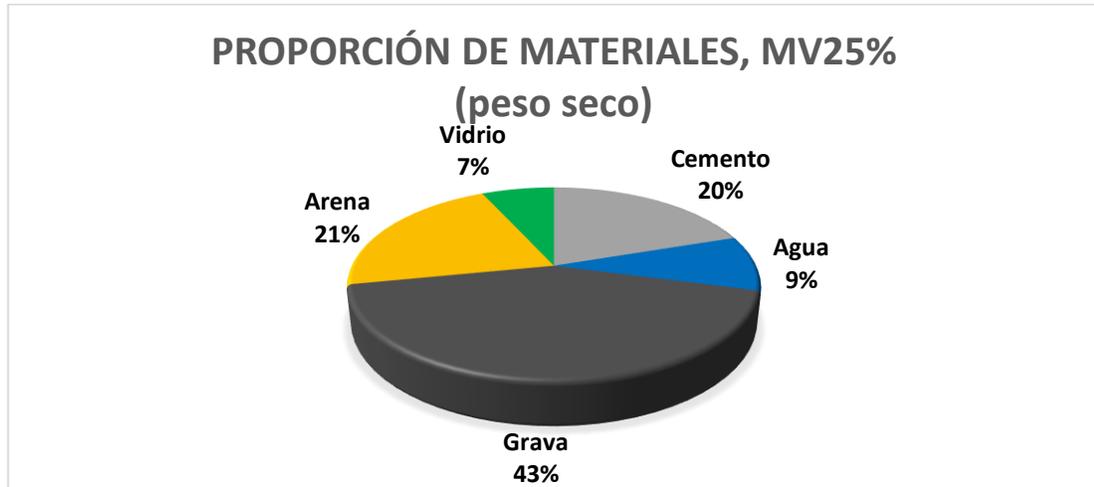
Tabla No. 5-16: Dosificación de Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio, MV25% No 3.

<b>Dosificación para 0.0783m<sup>3</sup></b>		
<b>Humedad (%): AG = 0.58; AF = 1.68</b>		<b>Absorción (%): AG = 1.26; AF = 3.90</b>
<b>Mezcla 25% Sustitución MV25% No 3</b>	<b>Materiales</b>	<b>Peso(kg)</b>
	Cemento	34.44
	Agua corregida	17.33
	Grava húmeda	73.70
	Arena húmeda	36.09
	Vidrio	11.83
	Aire	2 %

Fuente: Elaboración propia.

La Figura No. 5-4 muestra gráficamente la dosificación de materiales de la mezcla con 25% de sustitución parcial del agregado fino por vidrio molido; los porcentajes mostrados son conforme a la Tabla No. 5-13.

Figura No. 5-4: Dosificación de Materiales por peso, para Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%)



Fuente: Elaboración propia.

Finalmente para la Mezcla con 25 % de sustitución parcial de agregado fino, la variación en la cantidad de agua de las mezclas, consecuencia del contenido de humedad, se describen para cada una de las mezclas: en la Mezcla MV25% No 1, se tiene una cantidad de agua de 15.54 kg, para un contenido de humedad de 2.41 % en arenas y 0.56 % en gravas lo que genera un incremento respecto al agua de mezclado. En la Mezcla MV25% No 2, se tiene una cantidad de agua de 18.68 kg, para un contenido de humedad de 2.44 % en arenas y 0.50 % en gravas, siempre con un incremento en el agua de mezclado, Para la Mezcla MV25% No 3, la cantidad de agua es de 17.33 kg, un contenido de humedad de 1.68 % y 0.58 % para arenas y gravas respectivamente; de igual manera existe un incremento del agua de mezclado. Lo anterior fue el resultado de las correcciones necesarias para no alterar la Relación A/C.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados al concreto en estado fresco:

### **5.2.2. Tiempo de Fraguado del Concreto Fresco.**

En términos generales se le denomina Fraguado, al proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del concreto, producto del secado de la mezcla y la recristalización de los componentes del cemento. Se conoce el fraguado inicial como la pérdida de la plasticidad de la mezcla, y fraguado final al estado en cual la consistencia alcanzada cambia de plástica a endurecida; el lapso de tiempo entre estos dos se conoce como tiempo de fraguado.

En la Tabla No. 5-17 hasta la Tabla No. 5-20 se muestran los resultados de los ensayos de tiempo de fraguado, realizados a las mezclas de referencia y con las distintas sustituciones.

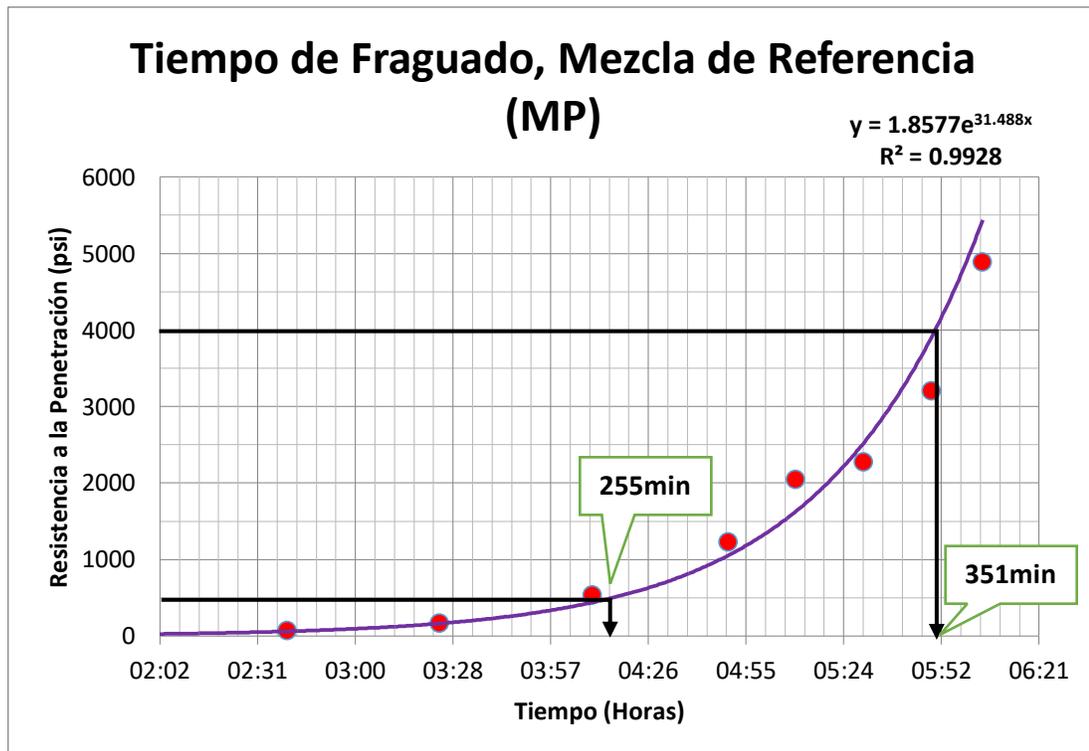
A continuación de cada una de las tablas se presenta gráficamente el comportamiento del tiempo de fraguado (ver Figuras No. 5-17 hasta la Figura No. 5-20), de cada una de las mezclas de concreto, esto con el fin de realizar una mejor interpretación de los resultados de esta propiedad.

Tabla No. 5-17: Tiempo de Fraguado para la Mezcla de Referencia (MP).

Hora de Inicio: 07:30 a.m.						
Hora Penetración	Horas	Minutos	Diámetro de aguja (Pulg.)	Área (Pulg <sup>2</sup> )	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)
09:15	01:45	110	1	1.00	15	15
10:10	02:40	155	1/2	0.50	34	68
10:55	03:25	200	1/2	0.50	80	160
11:40	04:10	245	1/4	0.25	132	528
12:20	04:50	285	1/10	0.10	122	1220
12:40	05:10	305	1/20	0.05	102	2040
13:00	05:30	325	1/40	0.03	68	2267
13:20	05:50	345	1/40	0.03	80	3200
13:35	06:05	360	1/40	0.03	122	4880
<b>Fraguado Inicial: 255 min</b>			<b>Fraguado Final: 351 min</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-5: Tiempos de Fraguado para Mezcla de Referencia (MP).



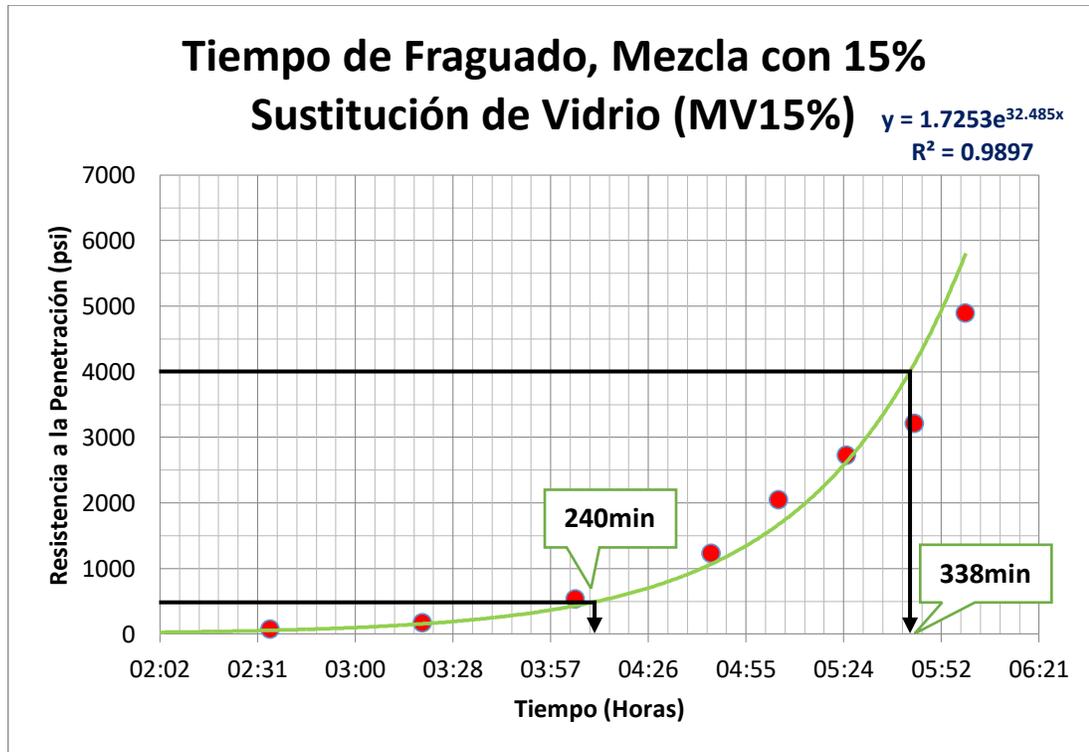
Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-18: Tiempo de Fraguado para Mezcla con 15% de Sustitución parcial de agregado fino por vidrio (MV15%).

Hora de Inicio: 07:40 a.m.						
Hora Penetración	Horas	Minutos	Diámetro de aguja (Pulg.)	Área (Pulg <sup>2</sup> )	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)
09:30	01:50	110	1	1.00	15	15
10:15	02:35	155	1/2	0.50	34	68
11:00	03:20	200	1/2	0.50	80	160
11:45	04:05	245	1/4	0.25	132	528
12:25	04:45	285	1/10	0.10	122	1220
12:45	05:05	305	1/20	0.05	102	2040
13:05	05:25	325	1/40	0.03	68	2720
13:25	05:45	345	1/40	0.03	80	3200
13:40	06:00	360	1/40	0.03	122	4880
<b>Fraguado Inicial: 240 min</b>			<b>Fraguado Final: 338 min</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-6: Tiempos de Fraguado para Mezcla con 15% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV15%)



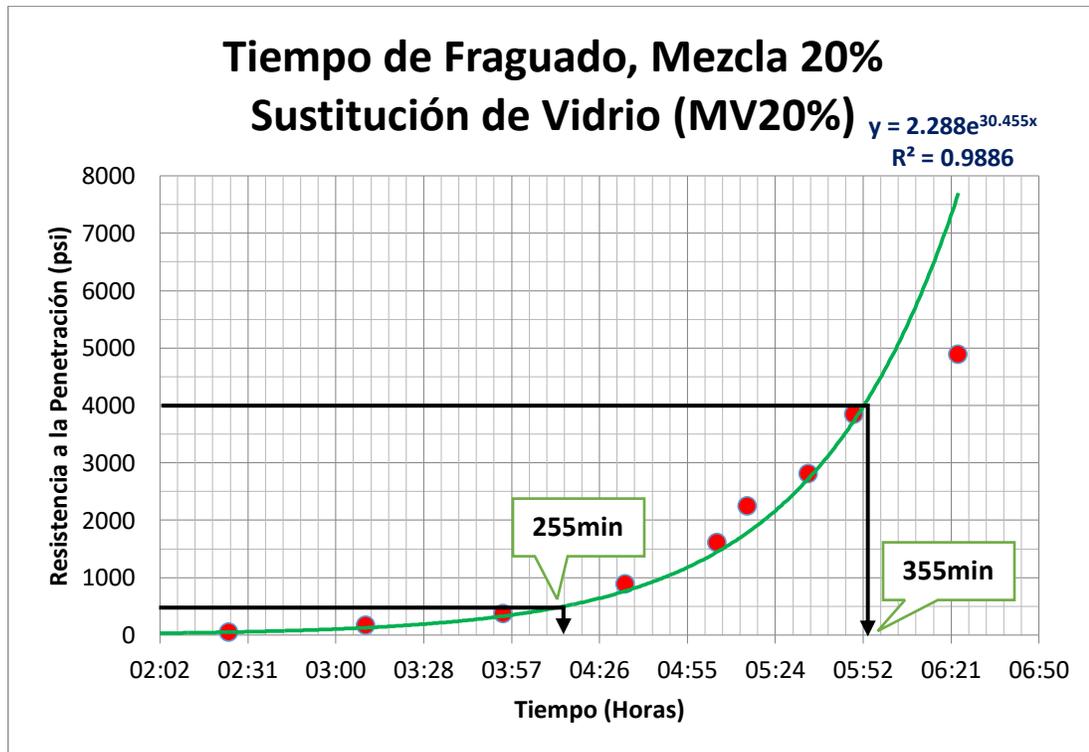
Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-19: Tiempo de fraguado para Mezcla con 20% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV20%)

Hora de Inicio: 07:50 a.m.						
Hora Penetración	Horas	Minutos	Diámetro de aguja (Pulg.)	Área (Pulg <sup>2</sup> )	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)
09:30	01:40	130	1	1.00	15	15
10:15	02:25	175	1/2	0.50	22	44
11:00	03:10	220	1/2	0.50	78	156
11:45	03:55	265	1/4	0.25	90	360
12:25	04:35	305	1/10	0.10	88	880
12:55	05:05	325	1/20	0.05	80	1600
13:05	05:15	345	1/40	0.03	56	2240
13:25	05:35	345	1/40	0.03	70	2800
13:40	05:50	345	1/40	0.03	96	3840
<b>Fraguado Inicial: 255 min</b>			<b>Fraguado Final: 355 min</b>			

Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-7: Tiempo de fraguado, para Mezcla con 20% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV20%)



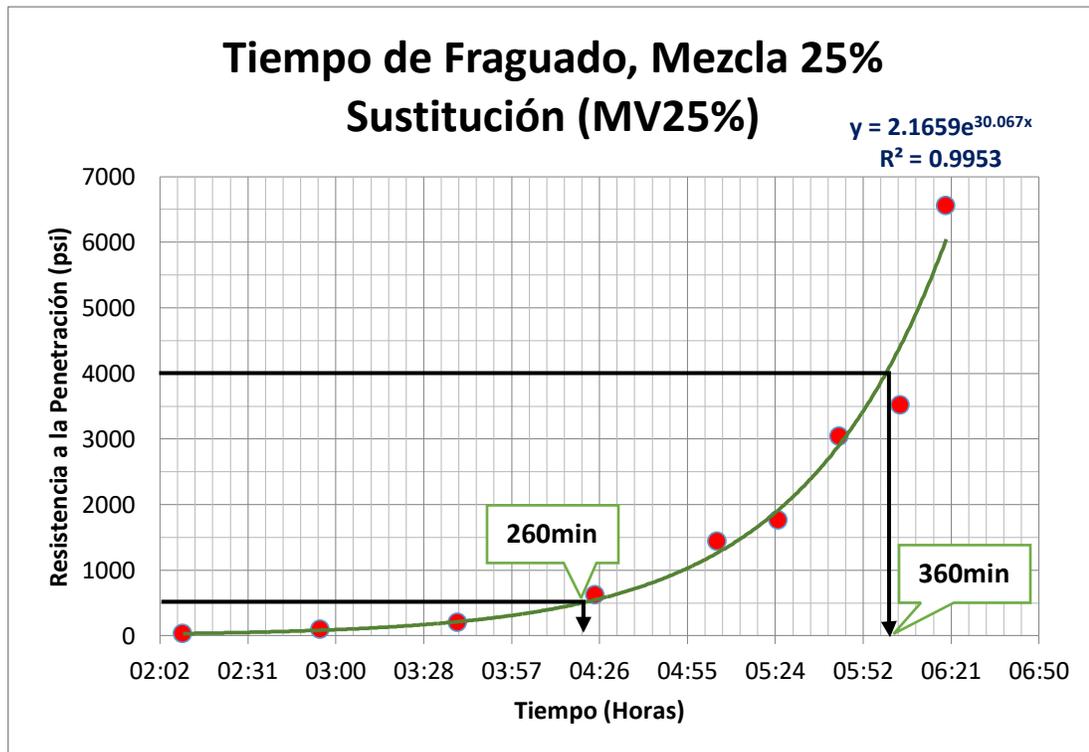
Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-20: Tiempo de Fraguado para Mezcla con 25% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%)

Hora de Inicio: 07:20 a.m.						
Hora Penetración	Horas	Minutos	Diámetro de aguja (Pulg.)	Área (Pulg <sup>2</sup> )	Carga (lb)	Esfuerzo (psi)
09:30	02:10	130	1	1.00	29	29
10:15	02:55	175	1/2	0.50	46	92
11:00	03:40	220	1/2	0.50	102	204
11:45	04:25	265	1/4	0.25	156	624
12:25	05:05	305	1/10	0.10	144	1440
12:45	05:25	325	1/20	0.05	88	1760
13:05	05:45	345	1/40	0.03	76	3040
13:25	06:05	365	1/40	0.03	88	3520
13:40	06:20	380	1/40	0.03	164	6560
Fraguado Inicial: 260 min			Fraguado Final: 360 min			

Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-8: Tiempos de Fraguado para Mezcla con 25% de Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%)



Fuente: Elaboración propia.

La Tabla No 5-21 Muestra un resumen comparativo de los resultados obtenidos para los tiempos de fraguado de las distintas mezclas.

*Tabla No. 5-21: Resultados Comparativos del Tiempo de Fraguado.*

Tipo de Mezcla	TFI	Variación del TFI respecto a MP	TFF	Variación del TFF respecto a MP
<b>MP</b>	255	-	351	-
<b>MV15%</b>	240	-5.9 %	338	-3.7 %
<b>MV20%</b>	255	0.0 %	355	1.1 %
<b>MV25%</b>	260	2.0 %	360	2.6 %

Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados obtenidos en los tiempos de fraguado, y comparando estos con la Mezcla de referencia, se determina lo siguiente:

El Fraguado Inicial (FI) obtenido para la Mezcla de Referencia (MP),  $FI_{MP} = 255$  min, El FI de la Mezcla con 15 % de sustitución parcial de Agregado Fino por vidrio molido (MV15%), obtenido es de  $FI_{MV15\%} = 240$  min, lo que indica una reducción en el tiempo de fraguado de 5.9 % respecto a MP; para la mezcla MV20%, el  $FI_{MV20\%} = 255$  min, no existe variación entre este y la mezcla de referencia; finalmente para la mezcla MV25%, el  $FI_{MV25\%} = 260$  min, lo que indica un incremento en el tiempo de fraguado de 2.0 % con respecto a MP. Las variaciones entre los tiempos de fraguado inicial respecto a la Mezcla de Referencia, oscilan entre 2.0 % hasta 5.9 %, (5 min hasta 15 min, respectivamente); se determina que el uso de vidrio en las mezclas de concreto no genera mayor influencia en el tiempo de fraguado inicial de las mezclas.

El fraguado final (FF) de la Mezcla de Referencia,  $FF_{MP} = 351$  min; El FF obtenido para la Mezcla con 15 % de Sustitución parcial  $FF_{MV15\%} = 338$  min, lo que indica 3.70 % de disminución respecto a MP; Para la Mezcla con 20 % de Sustitución Parcial  $FF_{MV20\%} = 355$ min, se observa un ligero incremento entre este y MP de 1.14 %; Finalmente para la Mezcla con 25 % de Sustitución Parcial  $FF_{MV25\%} = 360$  min, indicando un incremento de 2.56 % respecto a MP. Las variaciones entre los tiempos de fraguado final respecto a la Mezcla de Referencia, oscilan entre 1.1 % hasta 3.7 % (4 min y 13 min respectivamente), por lo que el uso de vidrio en estas dosificaciones no es un factor que afecte fraguado final, de las mezclas en estudio.

### **5.2.3. Análisis de revenimiento.**

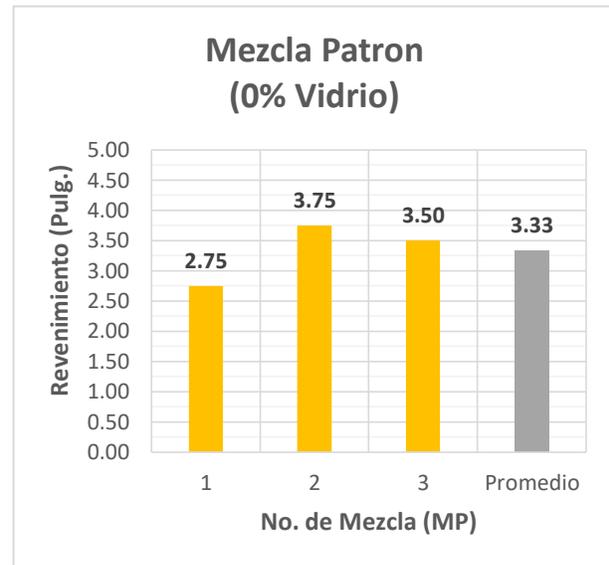
Los resultados obtenidos en las pruebas de revenimiento en las distintas mezclas, se muestran en las Tablas de la No. 5-22 a la 5-25; luego de esto se hace una comparación entre los resultados promedio de las mezclas, que se presenta en la Tabla No. 5-26.

Figura No. 5-9: Resultados del ensayo de Revenimiento Mezcla de Referencia MP

Tabla No. 5-22: Resultados de ensayo de Revenimiento, Mezcla de Referencia, MP

<b>Mezcla de Referencia</b>	
<b>No. de Mezcla</b>	<b>Revenimiento, Pulg. (mm)</b>
<b>MP No 1</b>	2.75 (68.75)
<b>MP No 2</b>	3.75 (93.75)
<b>MP No 3</b>	3.50 (87.50)
<b>Promedio</b>	3.33 (83.33)

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

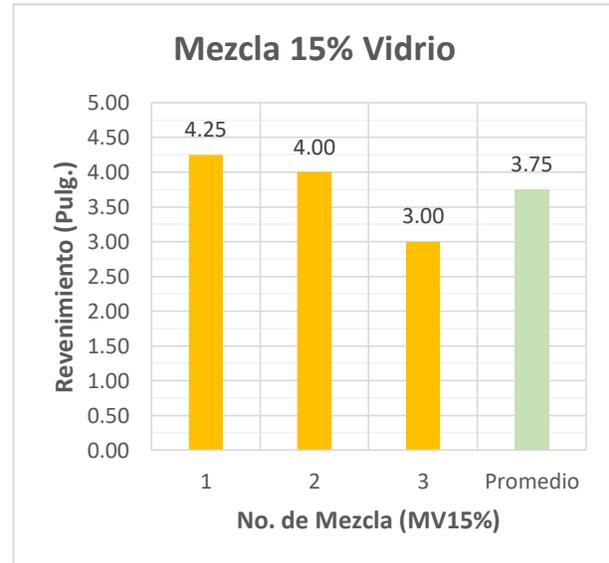
El comportamiento del revenimiento en las distintas mezclas, no define una tendencia uniforme o regular, el rango del revenimiento de esta mezcla queda definido entre 2.75 a 3.75 pulgadas, con un valor promedio de 3.33 pulgadas, que se encuentra dentro de la tolerancia establecida en el diseño, por lo que se considera aceptable.

Figura No. 5-10: Resultados del ensayo de Revenimiento,, Mezcla con 15 % de Sustitución, Parcial de Agregado Fino por Vidrio molido

Tabla No. 5-23: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla 15% Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV15%)

MV15%	
No. de Mezcla	Revenimiento, Pulg. (mm)
MV15% No 1	4.25 (106.25)
MV15% No 2	4.00 (100.00)
MV15% No 3	3.00 (75.00)
<b>Promedio</b>	<b>3.75 (93.75)</b>

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

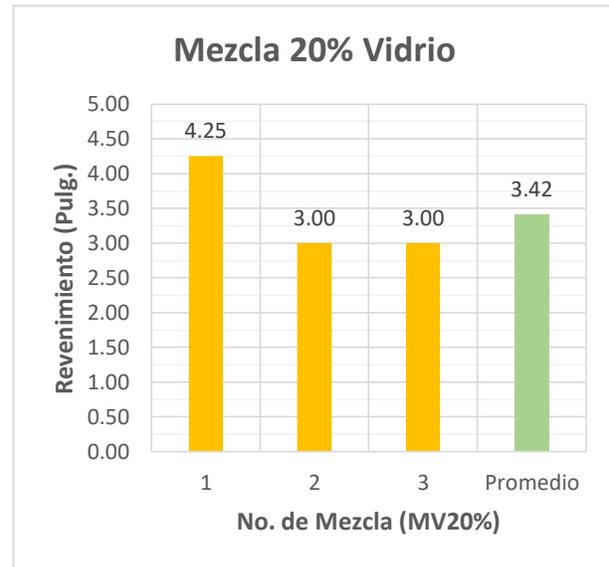
El rango de valor de revenimiento para las mezclas con 15 % de sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido, oscila entre 3.0 a 4.25 Pulgadas, con un valor promedio de 3.75 pulgadas; Comparando el valor promedio de MV15% tenemos un revenimiento de 3.75 pulg, lo que indica un incremento de 12.6 % respecto a la Mezcla de referencia, la cual tiene un valor promedio de 3.33 pulgadas.

Figura No. 5-11: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 20 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio.

Tabla No. 5-24: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 20 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV20%)

MV20%	
No. de Mezcla	Revenimiento, Pulg. (mm)
<b>MV20% No 1</b>	4.25 (106.25)
<b>MV20% No 2</b>	3.00 (75.00)
<b>MV20% No 3</b>	3.00 (75.00)
<b>Promedio</b>	3.42 (85.50)

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

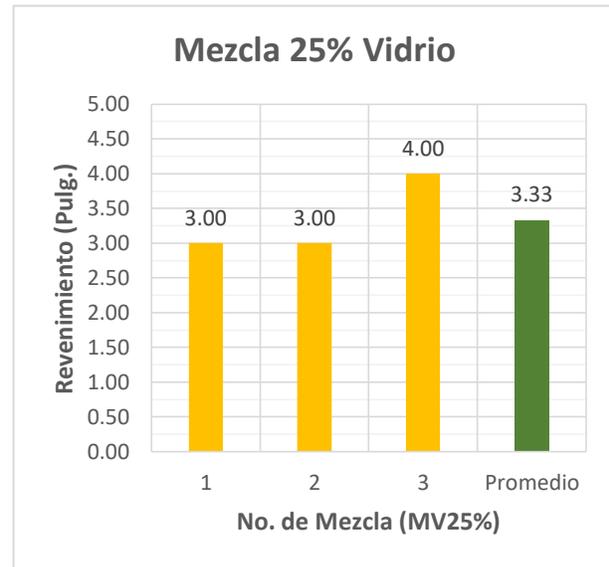
El rango de valor de revenimiento para las mezclas con 20 % de sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido, oscila entre 3.0 a 4.25 Pulgadas, con un valor promedio de 3.42 pulgadas; Comparando el valor promedio de MV20% tenemos un revenimiento de 3.42 pulg, lo que indica un incremento de 2.7% respecto a la Mezcla de referencia, la cual tiene un valor promedio de 3.33 pulgadas.

Figura No. 5-12: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 25 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio

Tabla No. 5-25: Resultados del ensayo de Revenimiento, Mezcla con 25 % Sustitución Parcial de Agregado Fino por Vidrio (MV25%).

MV25%	
No. de Mezcla	Revenimiento, Pulg. (mm)
MV25% No 1	3.00 (75.00)
MV25% No 2	3.00 (75.00)
MV25% No 3	4.00 (100.00)
<b>Promedio</b>	<b>3.33 (83.25)</b>

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

El rango de valor de revenimiento para las mezclas con 25 % de sustitución parcial de agregado fino por vidrio, oscila entre 3.0 hasta 4.00 Pulgadas, con un valor promedio de 3.33 pulgadas; Comparando el valor promedio de MV25% tenemos un revenimiento de 3.33 pulg, lo que indica un 0.0 % de variación respecto a la Mezcla de referencia, la cual tiene un valor promedio de 3.33 pulgadas.

Figura No. 5-13: Comparación de resultados del ensayo de Revenimiento promedio entre mezclas de concreto.

Tabla No. 5-26: Resumen de resultados del ensayo de Revenimiento

Variación del Revenimiento	
Tipo de Mezcla	Revenimiento, Pulg. (mm)
MP	3.33 (83.25)
MV15%	3.75 (93.75)
MV20%	3.42 (85.50)
MV25%	3.33 (83.25)

Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

Analizando los resultados de variación del revenimiento promedio obtenidos entre las mezclas con las distintas sustituciones, (Tabla No. 5-26, Figura No. 5-13), y comparando con el revenimiento de la Mezcla de Referencia (3.33 Pulg.), el comportamiento presenta un incremento de 12.6 % de revenimiento al introducir un 15 % de vidrio y su tendencia es a disminuir al seguir incrementando la cantidad de vidrio, se observa una reducción del revenimiento entre la MV15% y MV20% de 8.8 %; y un incremento de 2.7 % respecto a MP y así sucesivamente al comparar la MV20% y MV25% con una reducción de 2.6 % y una variación de 0.0 % respecto a MP; esto podría deberse a que existe mayor fricción entre las partículas de los agregados, dado que existe mayor cantidad de granos angulosos, en consecuencia el revenimiento disminuye, por lo tanto para obtener

una mejor trabajabilidad del concreto, el valor óptimo de sustitución de vidrio es el de 15 %. Cabe destacar que todas las mezclas elaboradas, cumplen con poseer un revenimiento dentro de los valores de tolerancia para el diseño de mezclas.

Este comportamiento es el mismo descrito en la investigación de “Adaway, M., & Wang, Y. (2015). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in structural concrete – Effects on compressive strength”, mencionado en el Capítulo II de esta investigación. Donde especifica que el mejor valor de trabajabilidad se obtiene al realizar sustituciones con menores cantidades de vidrio.

#### **5.2.4. Comparación de la temperatura del concreto fresco.**

La temperatura del concreto fresco es uno de los factores más importantes a evaluar, ya que este parámetro influye en la calidad del concreto y sus propiedades (en estado fresco y endurecido), tales como: revenimiento, tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, entre otros; en este apartado se realiza una comparación entre las distintas temperaturas obtenidas en el concreto fresco para cada una de las mezclas reproducidas con sustitución parcial del agregado fino, respecto a la mezcla de referencia.

En la Tabla No. 5-27 se muestra la recopilación de resultados de temperatura para cada una de las mezclas elaboradas, y la Tabla No 5-28 muestra los resultados de temperatura promedio para las mezclas de referencia y con

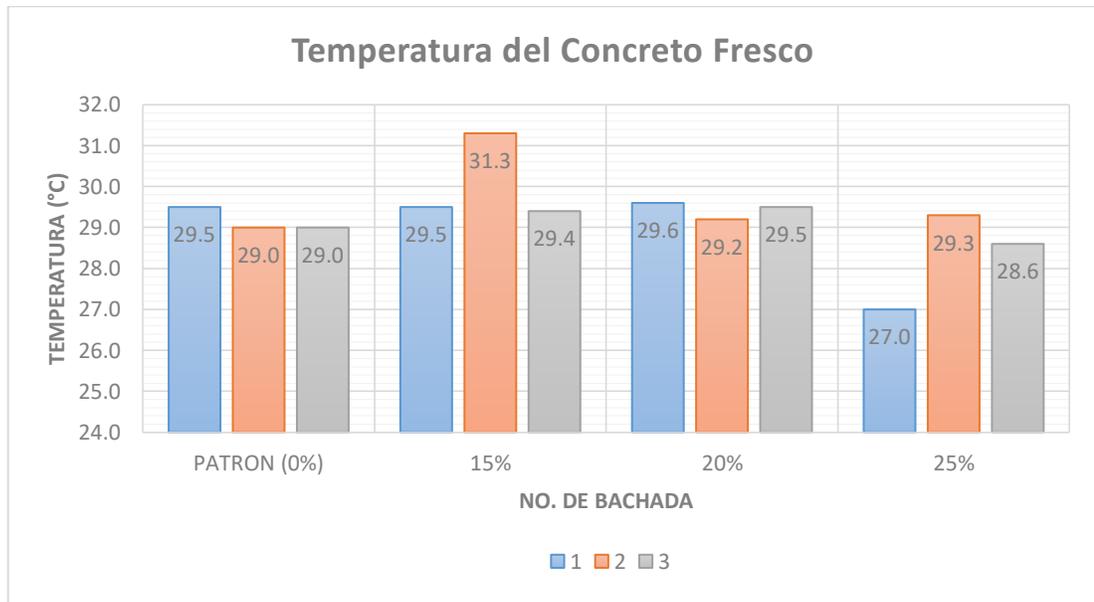
sustitución parcial de agregado fino. Conforme a esto, las Figuras No. 5-14 y No. 5-15 Muestran gráficamente los resultados de la temperatura del concreto fresco y temperatura promedio para cada mezcla, respectivamente.

*Tabla No. 5-27: Resultados del ensayo de Temperatura del Concreto Fresco a las diferentes mezclas.*

<b>Temperatura del concreto fresco (°C)</b>				
<b>No. Mezcla</b>	<b>MP</b>	<b>MV15%</b>	<b>MV20%</b>	<b>MV25%</b>
<b>1</b>	29.5	29.5	29.6	27.0
<b>2</b>	29.0	31.3	29.2	29.3
<b>3</b>	29.0	29.4	29.5	28.6
<b>Promedio</b>	29.2	30.1	29.4	28.3

Fuente: Elaboración propia.

*Figura No. 5-14: Gráfico comparativo de la temperatura para las distintas mezclas.*



Fuente: Elaboración propia.

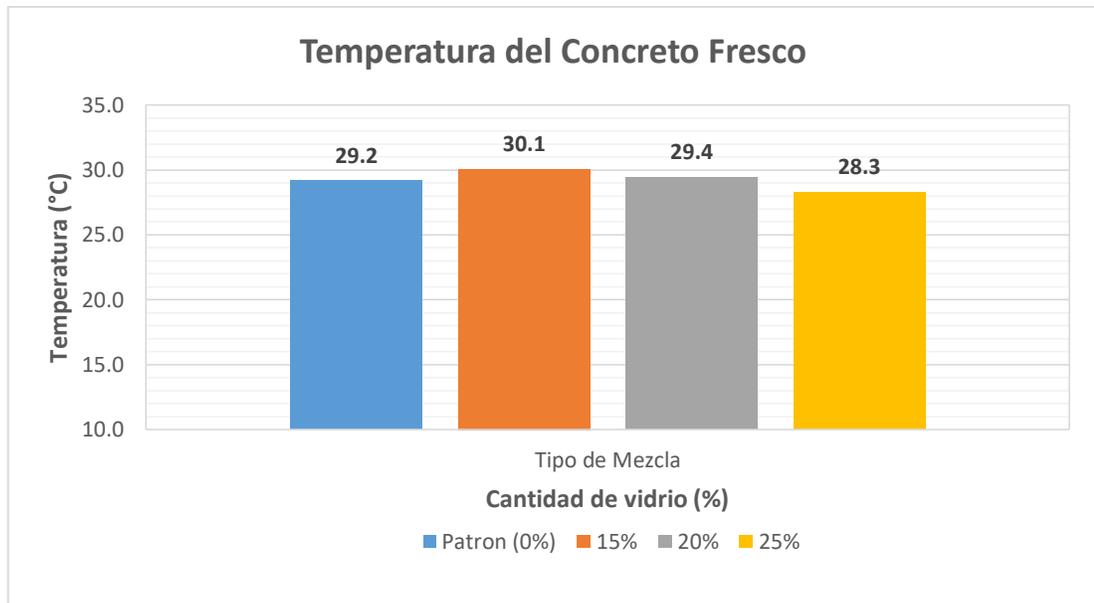
La temperatura del concreto fresco, no presenta variaciones notables, según lo que se observa en la Tabla No. 5-27, donde se muestran los resultados individuales de los ensayos realizados al concreto fresco; en la Mezcla de Referencia (MP), se obtiene una variación dentro de un rango entre 29.0 hasta 29.5 °C, con un valor promedio de 29.2 °C; la temperatura de la mezcla con 15 % de sustitución parcial presenta un rango de valores entre 29.4 a 31.3 °C, con un valor promedio de 30.1 °C; para la mezcla con 20 % de sustitución parcial el rango de valores de temperatura oscila entre 29.2 a 29.6 °C con un valor promedio de 29.4 °C; finalmente, la mezcla con 25 % de sustitución parcial se obtienen resultados que oscilan entre los 27.0 hasta los 29.3 °C, con un valor promedio de 28.3 °C; para todas las mezclas se observa un comportamiento muy uniforme.

*Tabla No. 5-28: Resultados promedio para la Temperatura del concreto fresco.*

<b>Temperatura del concreto fresco (°C)</b>				
<b>Tipo de Mezcla</b>	MP	MV15%	MV20%	MV25%
<b>Promedio</b>	29.2	30.1	29.4	28.3

Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-15: Resultados de temperatura de concreto fresco, promedio



Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla No. 5-28 y Figura No. 5-15 se muestran los valores promedio de temperatura para cada una de las mezclas de concreto elaboradas en esta investigación. Comparando los resultados promedio, se define una tendencia uniforme, tomando como base el valor de temperatura de la Mezcla de Referencia (29.2° C), la variación de temperatura para un 15 % de sustitución es de 30.1 °C, (3 %), para el 20 % de sustitución 29.4 °C, (0.7 %) y para el 25 % de sustitución 28.3 °C, (-3.0 %); esto indica que no hay un valor con variación mayor a 0.9 °C; por lo tanto la adición de vidrio no afecta el comportamiento de la temperatura del concreto fresco.

### 5.2.5. Variación del peso volumétrico del concreto fresco.

La determinación del peso volumétrico del concreto fresco, se considera importante ya que este sirve para la comparación del volumen diseñado teóricamente y el volumen producido. El peso volumétrico del concreto fresco depende directamente del peso de cada uno de los componentes (Cemento, Agua, Grava, Arena y Vidrio). Para obtener esta propiedad, se sigue el procedimiento descrito en la norma ASTM C138. Partiendo de los resultados obtenidos por el método de ensayo, se procede a calcular el contenido de aire (método gravimétrico), rendimiento, volumen absoluto de componentes, en la Tabla No. 5-29 se muestran los resultados obtenidos del ensayo de peso volumétrico del concreto fresco, contenido de aire (gravimétrico), y el rendimiento de cada mezcla elaborada en esta investigación.

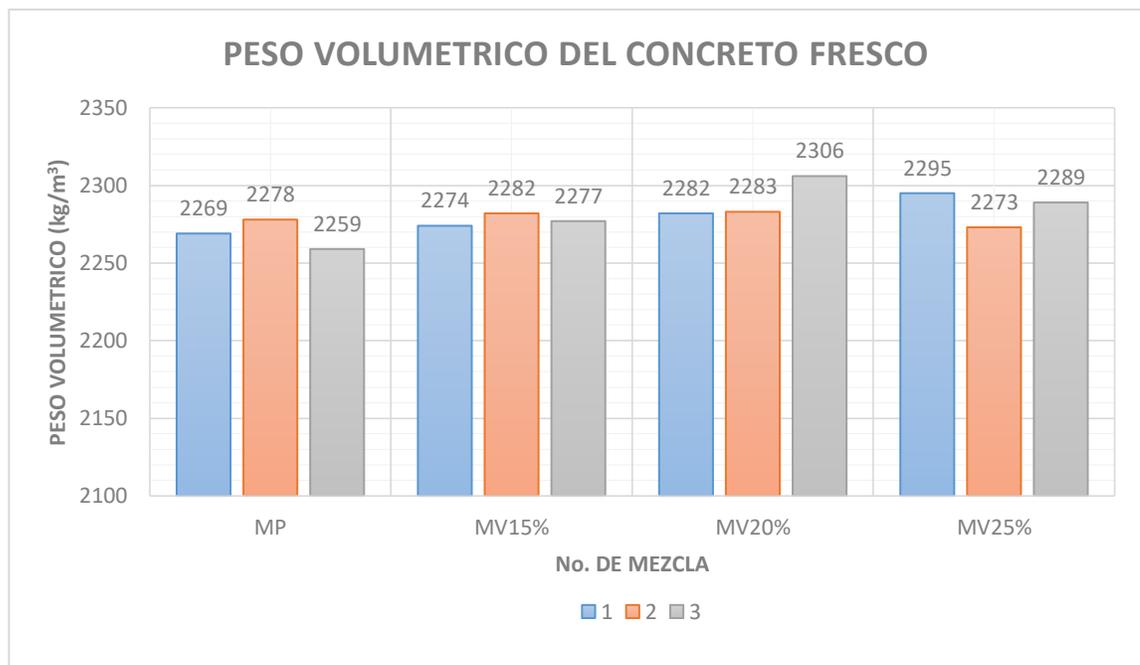
*Tabla No. 5-29: Resultados de los ensayos de Peso Volumétrico, Rendimiento y Contenido de Aire (gravimétrico).*

Tipo de Mezcla	No de Mezcla	Peso Vol. Ensayo (kg/m <sup>3</sup> )	Vol. Diseño (m <sup>3</sup> )	Vol. Rend. (m <sup>3</sup> )	Rend.	Vol. Absoluto (m <sup>3</sup> )	Peso Vol. Absoluto (kg/m <sup>3</sup> )	Cont. de aire (%)
<b>MP</b>	1	2269	0.0854	0.08590	1.006	0.08334	2276	2.41
	2	2278	0.0854	0.08326	0.975	0.08413	2254	1.49
	3	2259	0.0783	0.07696	0.983	0.07789	2232	1.21
<b>MV15%</b>	1	2274	0.0854	0.08327	0.975	0.08352	2267	2.20
	2	2282	0.0854	0.08298	0.972	0.08420	2249	1.47
	3	2277	0.0641	0.06237	0.973	0.06353	2235	1.88
<b>MV20%</b>	1	2282	0.0854	0.08298	0.972	0.08415	2249	1.47
	2	2283	0.0854	0.08290	0.971	0.08411	2250	1.51
	3	2306	0.0641	0.06155	0.960	0.06348	2236	3.13
<b>MV25%</b>	1	2295	0.0712	0.06869	0.965	0.07005	2250	2.00
	2	2273	0.0854	0.08322	0.974	0.08406	2250	1.57
	3	2289	0.0783	0.07575	0.967	0.07718	2247	1.89

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 5-16 se muestran los pesos volumétricos obtenidos a partir de los ensayos realizados al concreto fresco, cuyas variaciones sirven para realizar el análisis comparativo entre mezclas.

Figura No. 5-16: Resultados del ensayo de peso volumétrico del concreto fresco.



Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones obtenidas en el contenido de aire por el método gravimétrico se detallan a continuación:

El rango de valores para contenido de aire de la Mezcla de Referencia, oscila entre 1.21 % hasta 2.41%, con un promedio de 1.70 %; para la Mezcla MV15% el rango de valores de contenido de aire oscila entre 1.47 % y 2.20 % con un valor promedio de 1.85 %; para la Mezcla MV20% el rango de contenido de aire varía entre 1.47 % hasta 3.13 % con un valor promedio de 2.04 %; finalmente, la

Mezcla MV25% tiene una variación de contenido de aire entre 1.57 % hasta 2.00 % con un valor promedio de 1.82 %; las diferencias de contenido de aire son mínimas por lo que se consideraría que el vidrio no ejerce influencia sobre esta propiedad.

El peso volumétrico del concreto fresco no presenta variaciones notables entre las mezclas del mismo tipo; la Figura No. 5-16 muestra las variaciones obtenidas de las distintas mezclas; cuyos resultados se detallan a continuación:

En la Mezcla de Referencia o Patrón (MP), se obtiene un rango de valores entre 2259 kg/m<sup>3</sup> hasta los 2278 kg/m<sup>3</sup>, con un valor promedio de 2269 kg/m<sup>3</sup> describiendo un comportamiento.

La Mezcla con 15 % de sustitución arenas por vidrio (MV15%): presenta un rango de valores entre 2274 kg/m<sup>3</sup> a 2282 kg/m<sup>3</sup> con un valor promedio de 2278 kg/m<sup>3</sup> con un comportamiento bastante uniforme.

La Mezcla con 20 % de sustitución de arenas por vidrio (MV20%), el rango de valores obtenido varía entre 2282 kg/m<sup>3</sup> a 2306 kg/m<sup>3</sup>, con un valor promedio de 2290 kg/m<sup>3</sup>, cabe destacar que esta mezcla presenta los mayores valores para peso volumétrico.

Finalmente, la Mezcla con 25 % de sustitución presenta un comportamiento bastante uniforme con valores de peso volumétrico entre 2273 kg/m<sup>3</sup> a 2295 kg/m<sup>3</sup>, con un valor promedio de 2286 kg/m<sup>3</sup>.

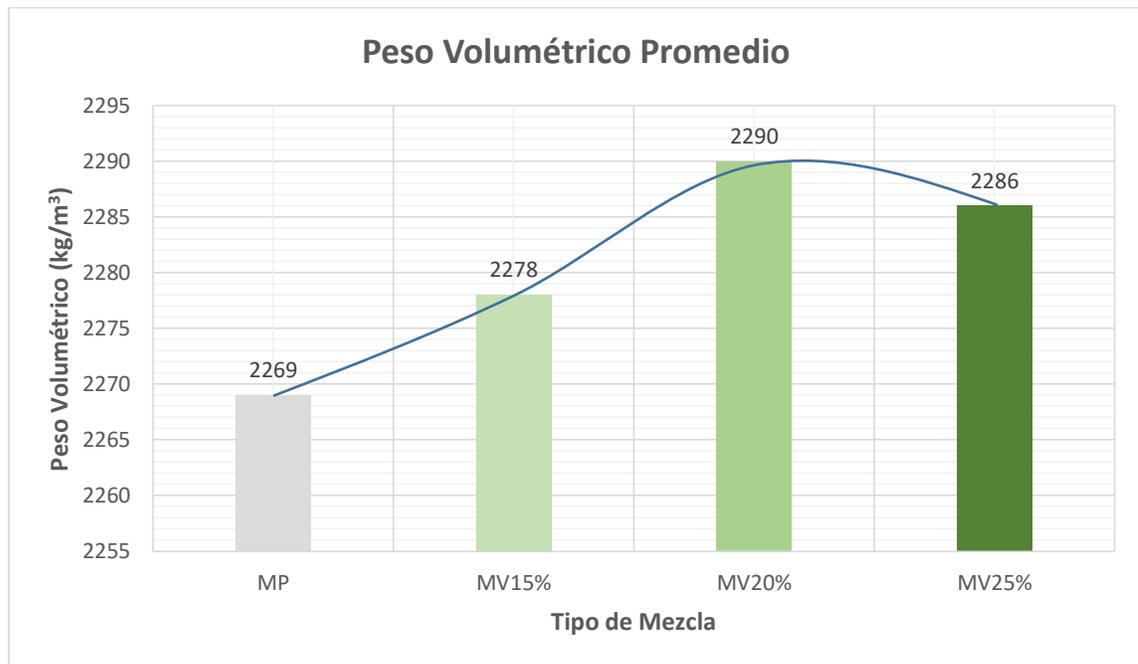
En la Tabla No. 5-30 se muestra el resultado promedio del peso volumétrico en las distintas mezclas, para finalmente realizar el análisis comparativo entre las mismas.

*Tabla No. 5-30: Resultados promedios del Peso volumétrico del concreto fresco.*

Tipo de Mezcla	Peso Volumétrico del Concreto Fresco			
	MP	MV15%	MV20%	MV25%
<b>Promedio (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2269	2278	2290	2286

Elaboración propia.

*Figura No. 5-17: Variación del Peso Volumétrico del Concreto Fresco Promedio.*



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar el análisis comparativo de las distintas mezclas de concreto, nos apoyamos en la Tabla No. 5-30 y la Figura No 5-17, donde se presentan los resultados de peso volumétrico promedio; partiendo de esto, se puede visualizar una tendencia marcada donde el peso volumétrico crece a medida se incrementa la cantidad de vidrio utilizado en las mezclas; la Mezcla de Referencia posee un peso volumétrico promedio de  $2269 \text{ kg/m}^3$ ; para la Mezcla MV15% se obtiene un valor de peso volumétrico medio de  $2278 \text{ kg/m}^3$ , lo que indica un incremento del 0.4 % respecto a MP; Para la Mezcla MV20%, se tiene un peso volumétrico promedio de  $2290 \text{ kg/m}^3$ , lo que indica un ligero incremento de 0.5 % respecto a la mezcla MV15% y un incremento de 0.9 % respecto a MP; para la mezcla MV25% se obtiene un valor de peso volumétrico promedio de  $2286 \text{ kg/m}^3$ , existe una ligera disminución de 0.2 % respecto a la mezcla MV20%; sin embargo, existe un incremento del peso volumétrico comparado con MP de 0.7 %. En términos generales la cantidad adecuada de vidrio para un concreto denso con sustitución parcial del agregado fino, es cercano al 20%.

### **5.3. Comportamiento del concreto en estado Endurecido.**

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión en los diferentes especímenes de prueba (cilindros) a las edades especificadas, 7, 28 y 56 días, se muestran en la Tabla No 5-31 para cilindros elaborados a partir del diseño de referencia (MP); la Tabla No. 5-32, muestra los resultados con 15 % de sustitución de agregado fino por vidrio (MV15%); la Tabla No 5-33 muestra los resultados con 20 % de sustitución agregado fino por vidrio (MV20%) y la Tabla No. 5-34 muestra los resultados con 25 % de sustitución de agregado fino por vidrio (MV25%).

A cada uno de los especímenes de concreto endurecido se le efectuó un análisis de resistencia a la compresión simple (ASTM C39), también se verificaron los pesos volumétricos de cada cilindro, y se considera importante el tipo de fractura al fallar el espécimen; esto con el fin de establecer criterios para el análisis de resultados.

Tabla No. 5-31: Resultados de los Ensayos a la Compresión de Mezcla de Referencia (MP)

No Mezcla	No Muestra	Edad (días)	Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)	Tipo de Fractura
MP No. 1	1	7	2267	244.4	24.0	Corte
	2	7	2262	264.1	25.9	Corte
	3	28	2307	338.4	33.2	Cónica
	4	28	2267	332.9	32.6	Cónica
	5	56	2285	381.5	37.4	Cónica
	6	56	2269	399.5	39.2	Cónica
	7	7	2262	255.6	25.1	Cónica
	8	7	2270	228.0	22.4	Columna
	9	28	2274	372.4	36.5	Cónica
	10	28	2269	394.8	38.7	Cónica
	11	56	2279	380.7	37.3	Cónica
	12	56	2294	420.8	41.3	Cónica
MP No. 2	13	7	2256	250.1	24.5	Cónica
	14	7	2261	249.3	24.4	Columna
	15	28	2271	306.0	30.0	Cónica
	16	28	2273	342.3	33.6	Cónica
	17	56	2271	347.1	34.0	Cónica
	18	56	2270	368.5	36.1	Corte
	19	28	2272	360.7	35.4	Corte
	20	28	2270	350.4	34.4	Cónica
	21	28	2265	339.9	33.3	Corte
	22	28	2269	354.0	34.7	Cónica
	23	56	2266	412.8	40.5	Corte
	24	56	2278	352.3	34.6	Cónica
MP No. 3	25	28	2257	308.3	30.2	Corte
	26	28	2257	313.6	30.8	Columna
	27	28	2256	314.4	30.8	Corte
	28	28	2244	267.4	26.2	Corte
	29	56	2242	361.2	35.4	Cónica
	30	56	2252	355.4	34.9	Cónica
	31	56	2254	369.0	36.2	Cónica
	32	56	2250	273.9	26.9	Columna
	33	56	2247	354.4	34.8	Cónica
	34	56	2251	333.8	32.7	Cónica
	35	56	2246	299.2	29.3	Corte
	36	56	2255	373.3	36.6	Corte

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-32: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión, Mezcla MV15%

No Mezcla	No Muestra	Edad (días)	Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)	Tipo de Fractura
MV15% No. 1	1	7	2279	237.8	23.3	Columna
	2	7	2260	267.2	26.2	Columna
	3	28	2264	363.5	35.6	Cónica
	4	28	2261	309.0	30.3	Cónica
	5	56	2253	354.0	34.7	Corte
	6	56	2257	362.3	35.5	Cónica
	7	7	2262	241.7	23.7	Columna
	8	7	2260	253.2	24.8	Cónica
	9	28	2268	279.5	27.4	Corte
	10	28	2269	307.1	30.1	Cónica
	11	56	2272	342.9	33.6	Cónica
	12	56	2233	369.8	36.3	Corte
MV15% No. 2	13	7	2292	246.8	24.2	Cónica
	14	7	2311	213.7	21.0	Cónica
	15	28	2303	294.4	28.9	Corte
	16	28	2239	354.6	34.8	Cónica
	17	56	2252	403.9	39.6	Corte
	18	56	2266	415.8	40.8	Corte
	19	28	2250	351.5	34.5	Cónica
	20	28	2255	265.0	26.0	Columna
	21	28	2266	325.5	31.9	Cónica
	22	28	2256	321.5	31.5	Cónica
	23	56	2260	380.5	37.3	Corte
	24	56	2259	406.6	39.9	Corte
MV15% No. 3	25	28	2257	273.6	26.8	Columna
	26	28	2266	312.4	30.6	Cónica
	27	28	2260	281.6	27.6	Columna
	28	28	2263	314.9	30.9	Corte
	29	56	2258	303.0	29.7	Corte
	30	56	2267	294.0	28.8	Columna
	31	56	2257	315.1	30.9	Corte
	32	56	2261	297.5	29.2	Corte
	33	56	2259	381.8	37.4	Cónica
	34	56	2264	353.6	34.7	Cónica
Prueba	35	56	2252	328.7	32.2	Corte
	36	56	2245	376.5	36.9	Corte

Fuente: Elaboración propia.

Tabla No. 5-33: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión, Mezcla MV20%

No Mezcla	No Muestra	Edad (días)	Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)	Tipo de Fractura
MV20% No. 1	1	7	2260	247.5	24.3	Columna
	2	7	2251	256.5	25.2	Corte
	3	28	2328	363.9	35.7	Corte
	4	28	2220	352.4	34.6	Cónica
	5	56	2262	372.4	36.5	Cónica
	6	56	2272	378.1	37.1	Cónica
	7	7	2265	245.0	24.0	Corte
	8	7	2254	231.1	22.7	Columna
	9	28	2225	361.3	35.4	Cónica
	10	28	2250	365.8	35.9	Cónica
	11	56	2260	392.7	38.5	Cónica
	12	56	2255	372.4	36.5	Corte
MV20% No. 2	13	7	2254	242.3	23.8	Columna
	14	7	2251	221.8	21.8	Corte
	15	28	2257	364.8	35.8	Cónica
	16	28	2266	364.3	35.7	Cónica
	17	56	2262	399.0	39.1	Corte
	18	56	2254	382.3	37.5	Corte
	19	28	2257	327.1	32.1	cónica
	20	28	2266	350.1	34.3	Corte
	21	28	2263	363.2	35.6	Cónica
	22	28	2273	338.8	33.2	Columna
	23	56	2322	238.7	23.4 <sup>14</sup>	Corte
	24	56	2264	367.8	36.1	Corte
MV20% No. 3	25	28	2252	350.6	34.4	Cónica
	26	28	2256	370.7	36.4	Corte
	27	28	2254	359.7	35.3	Corte
	28	28	2256	350.0	34.3	Columna
	29	56	2255	417.5	40.9	Cónica
	30	56	2261	432.9	42.5	Cónica
	31	56	2260	398.8	39.1	Cónica
	32	56	2258	397.4	39.0	Corte
	33	56	2262	387.1	38.0	Cónica
	34	56	2247	383.2	37.6	Corte
Prueba	35	56	2254	351.4	34.5	Corte
	36	56	2253	357.4	35.1	Corte

Fuente: Elaboración propia.

<sup>14</sup> Valor de resistencia menor al criterio ACI 214, (Véase sección 5.3.2)

Tabla No. 5-34: Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión, Mezcla MV25%.

No Mezcla	No Muestra	Edad (días)	Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> )	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c (MPa)	Tipo de Fractura
MV25% No 1	1	7	2263	240.41	23.9	Cónica
	2	7	2260	236.04	23.2	Columna
	3	56	2262	377.80	37.1	Cónica
	4	56	2269	387.62	38.0	Corte
	5	56	2271	410.51	40.3	Cónica
	6	7	2268	185.15	18.2	Corte
	7	7	2262	256.54	25.2	Cónica
	8	56	2266	339.74	33.3	Corte
	9	56	2265	388.33	38.1	Cónica
	10	56	2259	379.77	37.2	Corte
MV25% No. 2	11	7	2252	181.91	17.8	Columna
	12	7	2258	206.33	20.2	Columna
	13	28	2253	294.19	28.9	Cónica
	14	28	2260	296.42	29.1	Cónica
	15	28	2244	293.37	28.8	Corte
	16	28	2260	257.41	25.2	Cónica
	17	28	2259	347.70	34.1	Cónica
	18	28	2250	329.58	32.3	Corte
	19	28	2260	312.19	30.6	Cónica
	20	28	2261	311.26	30.5	Cónica
	21	56	2250	377.47	37.0	Corte
	22	56	2262	366.28	35.9	Cónica
MV25% No. 3	23	28	2259	306.00	30.0	Corte
	24	28	2265	272.46	26.7	Columna
	25	28	2257	286.88	28.1	Cónica
	26	28	2256	251.33	24.7	Columna
	27	28	2264	296.38	29.1	Cónica
	28	28	2256	291.41	28.6	Cónica
	29	56	2253	333.33	32.7	Cónica
	30	56	2262	323.25	31.7	Corte
	31	56	2263	306.28	30.0	Corte
	32	56	2262	343.35	33.7	Corte
	33	56	2260	321.38	31.5	Corte
	34	56	2264	310.22	30.4	Corte
Prueba	35	56	2251	356.04	34.9	Corte
	36	56	2251	345.99	33.9	Corte

Fuente: Elaboración propia.

### 5.3.1. Comparación del Peso Volumétrico del Concreto Endurecido.

La importancia de la determinación del peso volumétrico de cada uno de los especímenes, radica en obtener las bases necesarias para considerar cualquier anomalía que se obtenga del resultado de compresión simple, dentro de estas, podríamos obtener resistencias muy alejadas del valor de diseño ( $f'c$ ); por lo que se hace necesario comparar los resultados de peso volumétrico del concreto endurecido.

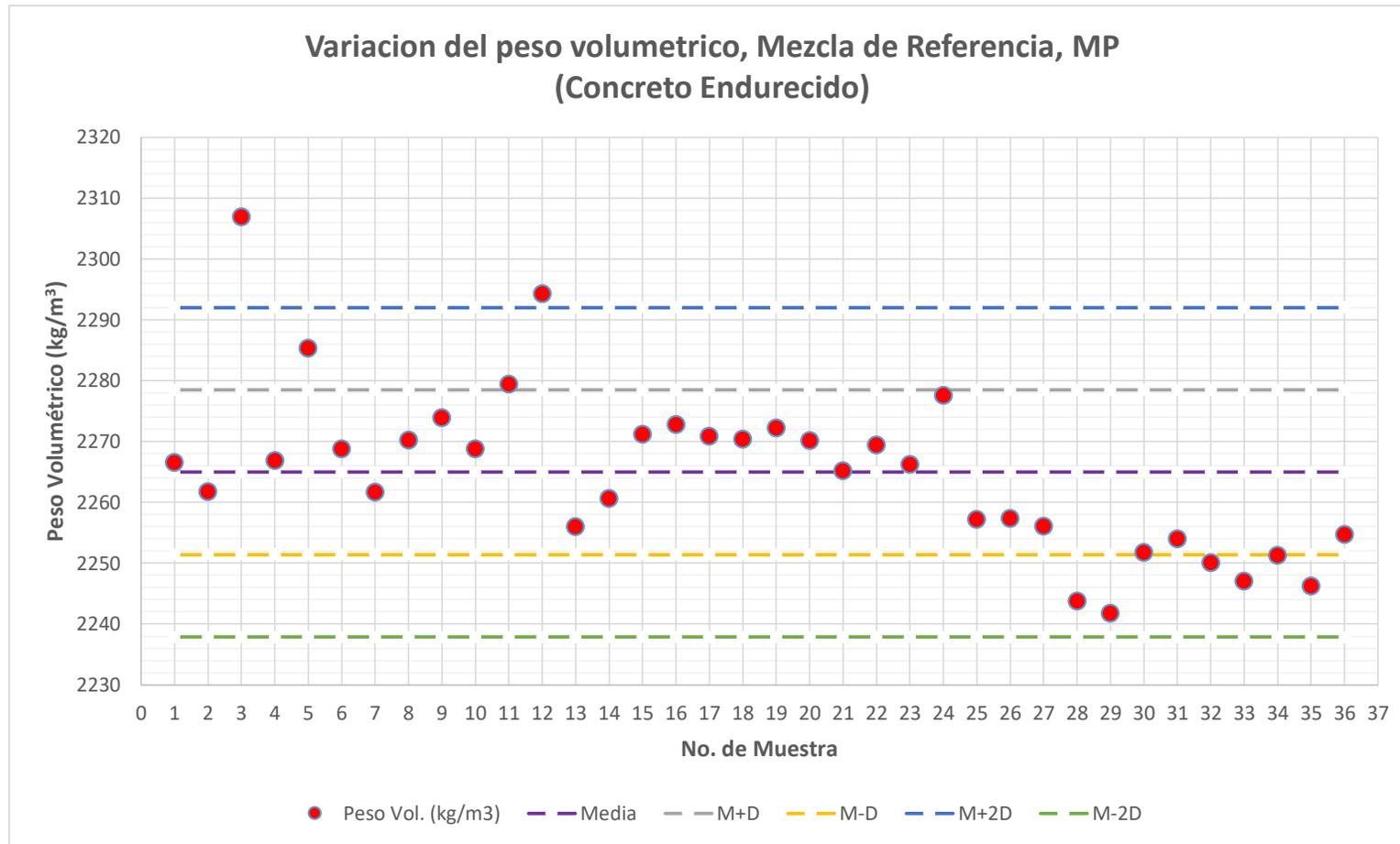
La Figuras desde la No.5-18 a la No. 5-21, muestran la dispersión de peso volumétrico del concreto endurecido, con base a las Tablas No. 5-31 a la No. 5-34; también, se hace necesario calcular el promedio para cada población de resultados, y la desviación estándar, tal como se muestra en la Tabla No. 5-35.

*Tabla No. 5-35: Peso Volumétrico Promedio y Desviación Estándar*

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>Peso Volumétrico Promedio (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Desviación Estándar (kg/m<sup>3</sup>)</b>
<b>MP</b>	2265	13.5
<b>MV15%</b>	2263	14.8
<b>MV20%</b>	2260	18.6
<b>MV25%</b>	2259	6.0

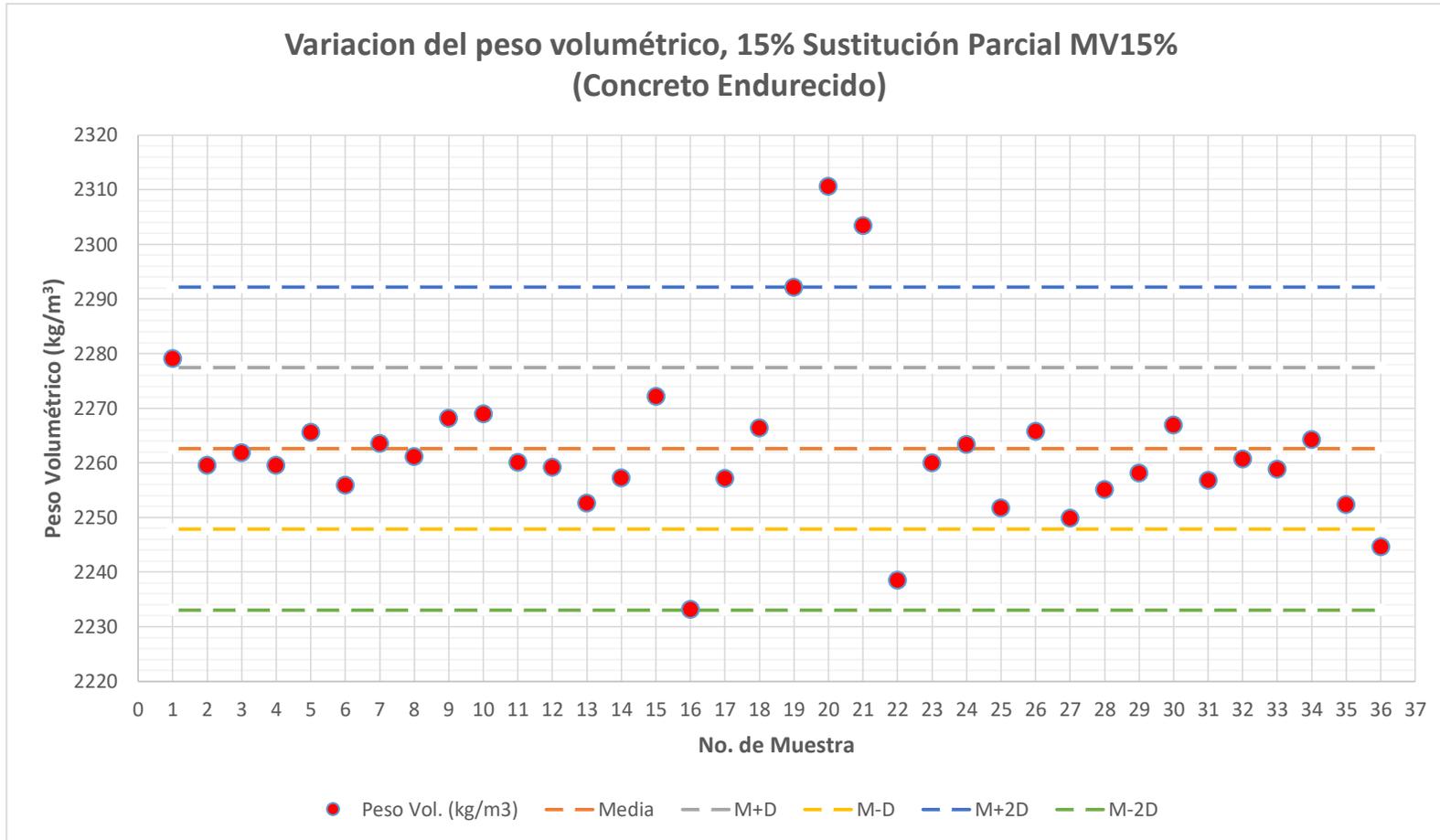
Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-18: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla de Referencia (MP).



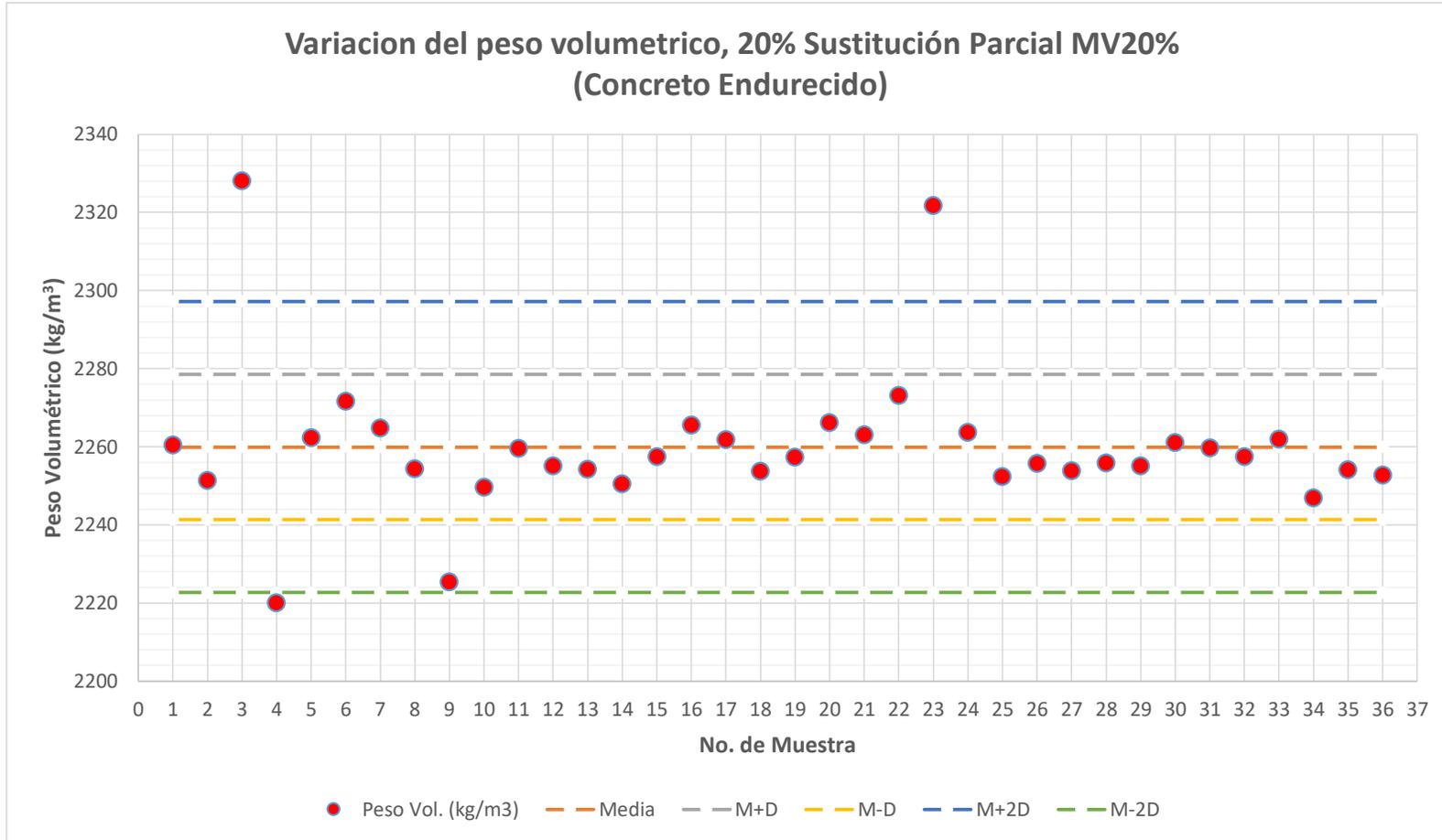
Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-19: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla MV15%.



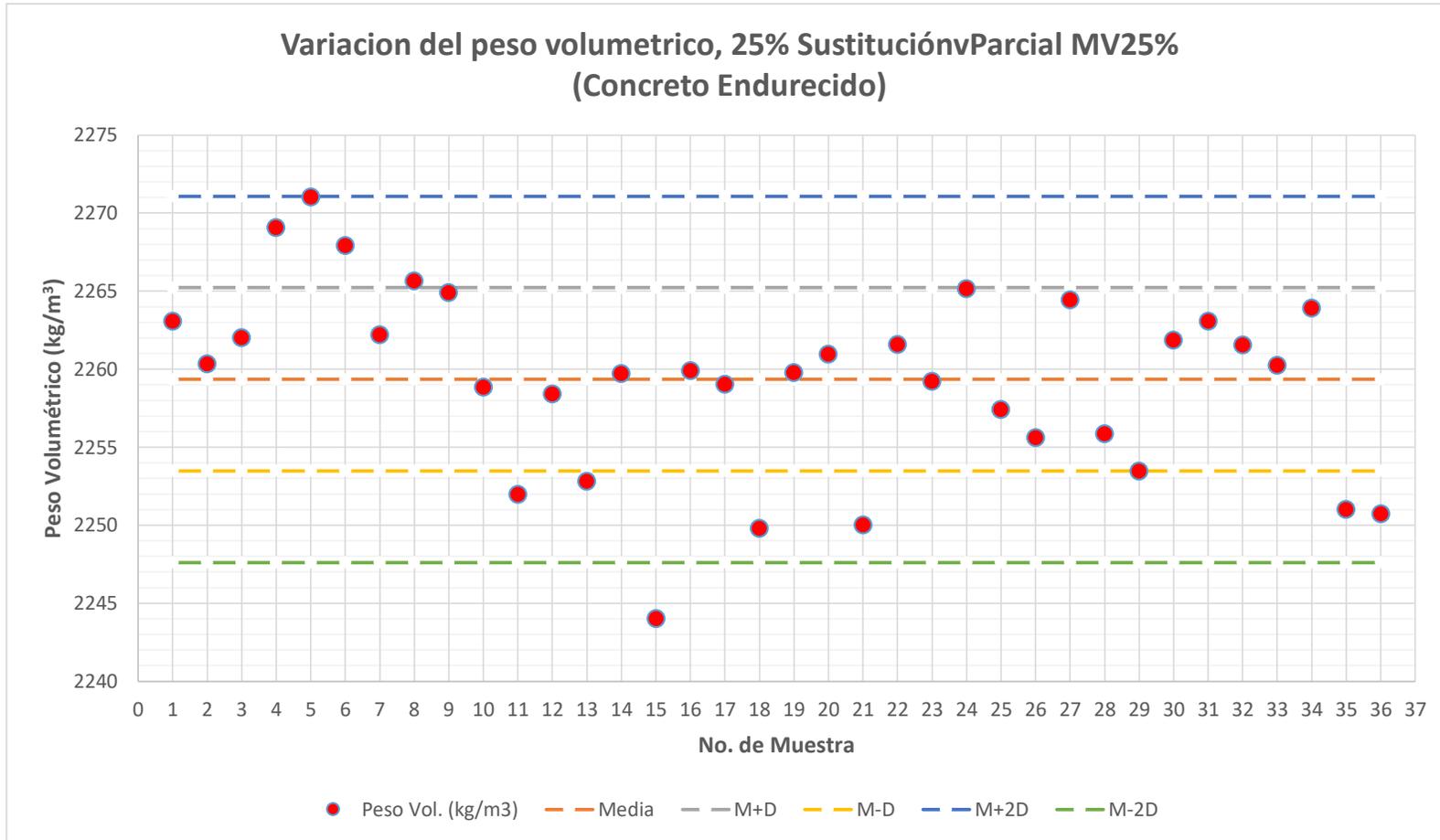
Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-20: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla MV20%



Fuente: Elaboración propia.

Figura No. 5-21: Variación del peso volumétrico del concreto endurecido, Mezcla MV25%



Fuente: Elaboración propia.

El análisis realizado a las distintas poblaciones de resultados consiste en comparar que tan variable son estos acorde a la media y cuanto se alejan de ella (Criterio de tolerancia utilizado: Media  $\pm$  2 Desviaciones); para los resultados obtenidos y comparados respecto al criterio de tolerancia, se observa lo siguiente:

La Mezcla de Referencia (MP), posee un peso volumétrico promedio de 2265 kg/m<sup>3</sup>, con una desviación estándar de 13.5 kg/m<sup>3</sup>; observando el grafico correspondiente a la Figura No. 5-18 podemos determinar que la muestra No 3 y No. 12 (2/36) que representan el 5.55 % de la población; son las únicas fuera de la tolerancia.

La Mezcla MV15% tiene un peso volumétrico promedio de 2263 kg/m<sup>3</sup>, lo que indica una reducción de 0.1 % respecto a la mezcla de referencia. La desviación estándar obtenida es de 14.8 kg/m<sup>3</sup>; con base a la Figura No. 5-19, podemos determinar que las muestras No 19, 20 y 21 (3/36) que representan el 8.33 % de la población; estas muestras son las únicas que quedan fuera del rango de tolerancia.

La Mezcla MV20% tiene un peso volumétrico promedio de 2260 kg/m<sup>3</sup>, lo que indica una disminución de 0.2 % respecto a la mezcla de referencia; la desviación estándar obtenida es de 18.6 kg/m<sup>3</sup>; con base a la Figura No 5-20, podemos observar que las muestras No 3, 4 y 23 (3/36) que representan el 8.33 % de la población, son las únicas que quedan fuera del rango de tolerancia. Cabe

destacar que en esta población de resultados es donde los datos quedan más cercanos a la media, esto comparado con las otras mezclas.

La Mezcla MV25% posee un peso volumétrico promedio de 2259 kg/m<sup>3</sup>, lo que indica una reducción de 0.3 % respecto a la mezcla de referencia; la desviación estándar obtenida es de 6.0 kg/m<sup>3</sup>; con base a la Figura No. 5-21, podemos observar que únicamente la muestra No 15, (1/36) que representa el 2.78 % de la población, es la que queda fuera del rango de tolerancia, lo que indica que hubo mayor control de resultados en este tipo de concreto.

En términos generales se podría decir que a media se incrementa la cantidad de vidrio que se utiliza para hacer las sustituciones, este tiene el efecto de reducir el peso volumétrico del concreto endurecido. Sin embargo por el rango en porcentajes que oscila entre 0.1 % hasta 0.3 %, indica que el vidrio no tiene mayor influencia sobre el peso volumétrico de las muestras elaboradas en esta investigación.

### **5.3.2. Análisis de resistencia a la compresión.**

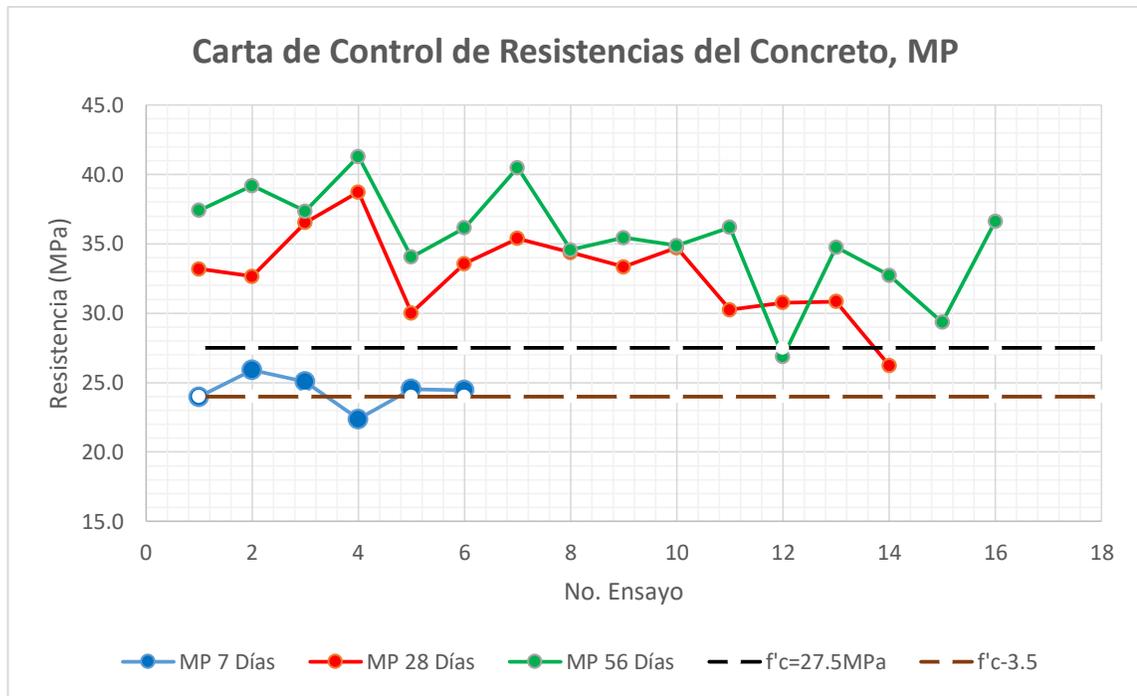
En esta etapa, el análisis se realiza partiendo de las resistencias individuales de las probetas de ensayo (cilindros), mostradas en las Tablas No 5-30 a la Tabla No 5-33; se elabora la carta de control de resistencias para tipo de mezcla, trazando gráficos simultáneos que ayuden a determinar cuántas muestras cumplen con los requisitos de control en ACI 214<sup>15</sup>.

En la Figura No. 5-22 hasta la Figura No. 5-25 se muestran las cartas de control de resistencia a la compresión para las mezclas elaboradas en esta investigación.

---

<sup>15</sup> ACI 214: Prácticas para la evaluación de resultados de concreto.

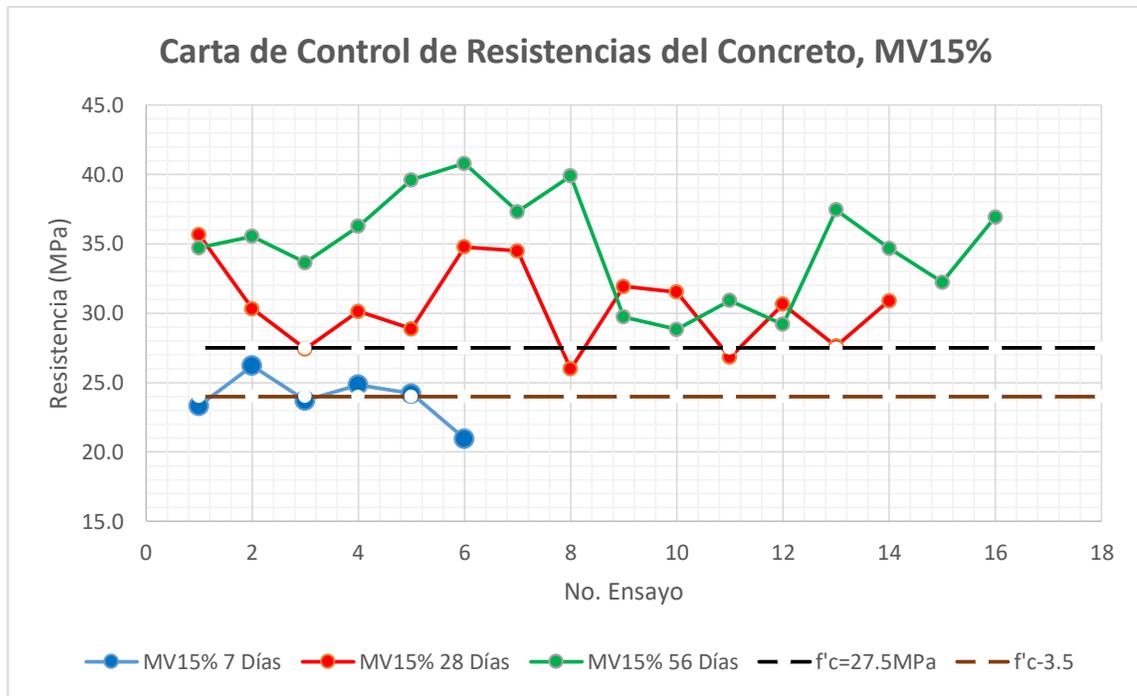
Figura No. 5-22: Carta de Control de Resistencias, Mezcla de Referencia.



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 5-22, se observa que para la edad de 7 días, el concreto alcanza un promedio general de resistencias de 24.4 MPa, tal resultado es mayor al proyectado ( $0.70 f'c = 19.25$  MPa); Para la Edad de 28 días, se alcanza un promedio general de 32.9 MPa; solamente una probeta tiene una resistencia por debajo de  $f'c$ ; sin embargo, el criterio que establece ACI 214 menciona que los ensayos individuales deben tener una resistencia mayor a  $f'c - 3.5$ MPa (mayor que 24.0 MPa); Finalmente a la edad de 56 días se alcanza una resistencia promedio de 35.5 MPa; es evidente que todos los cilindros poseen una resistencia mayor al criterio establecido por el comité ACI 214.

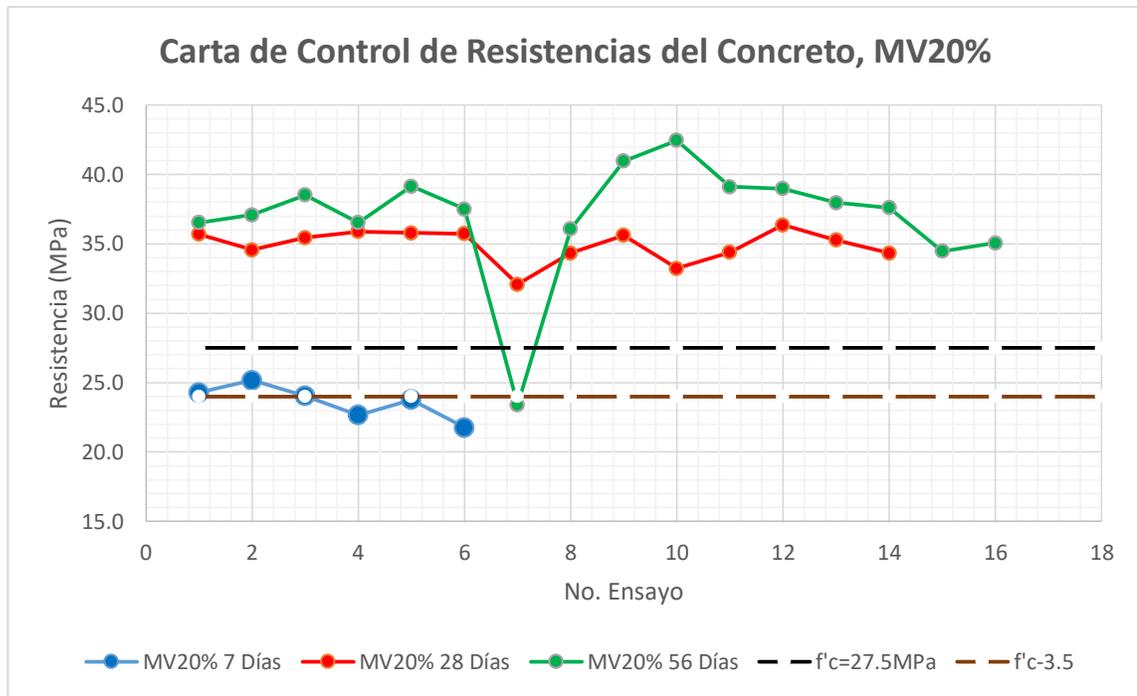
Figura No. 5-23: Carta de Control de Resistencias, MV15%.



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura No. 5-23, para la edad de 7 días, el concreto alcanza un promedio general de resistencias de 23.9 MPa, este resultado es mayor al 70 % de la resistencia de diseño; Para la Edad de 28 días, se alcanza un promedio general de 30.5 MPa; dos probetas tienen una resistencia por debajo de  $f'_c$ ; sin embargo, su valor de resistencia está por encima del criterio establecido por ACI 214. Finalmente para la edad de 56 días se alcanza una resistencia promedio de 34.9 MPa; se observa que todos los cilindros poseen una resistencia mayor al criterio establecido por el comité ACI 214.

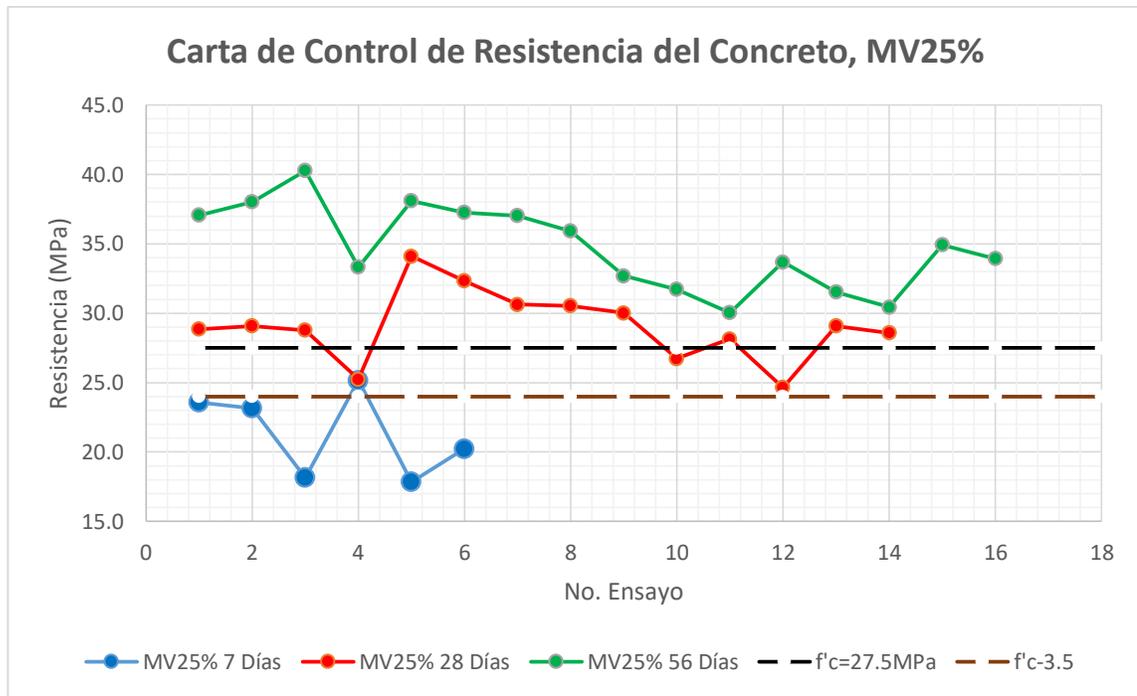
Figura No. 5-24: Carta de Control de Resistencias, MV20%



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura No. 5-24, a la edad de 7 días, el concreto alcanza un promedio general de resistencias de 23.6 MPa, este resultado es mayor al 70 % de la resistencia de diseño; A la Edad de 28 días, se alcanza un promedio general de resistencia de 30.5 MPa; todas las probetas de ensayo están por encima del criterio establecido por ACI 214; finalmente para la edad de 56 días se alcanza una resistencia promedio de 37.9 MPa; se observa que el cilindro No 7 (Cilindro No 23, nomenclatura original), posee una resistencia menor al criterio establecido por el comité ACI 214, por lo que este queda descartado para la siguiente etapa de análisis.

Figura No. 5-25: Carta de Control de Resistencias, MV25%.



Como se puede observar en la Figura No. 5-25, para la edad de 7 días, el concreto alcanza una resistencia promedio de 21.4 MPa, este resultado es mayor al 70 % de la resistencia de diseño ( $f'_c$ ); Para la Edad de 28 días, se alcanza una resistencia promedio general de 29.1 MPa; tres probetas tienen una resistencia por debajo de  $f'_c$ ; sin embargo, su valor de resistencia está por encima del criterio establecido por ACI 214; por lo tanto todos los cilindros elaborados para 28 días pasan a la siguiente etapa de evaluación. Finalmente para la edad de 56 días se alcanza una resistencia promedio de 34.7 MPa; se observa que todos los cilindros poseen una resistencia mayor al criterio establecido por el comité ACI 214.

### 5.3.3. Curvas de tendencia para la comparación de resistencia a la compresión.

La comparación de las resistencias del concreto básicamente consiste en trazar una familia de curvas en un solo gráfico, partiendo de la resistencia promedio de todos aquellos cilindros que cumplen con los requisitos de resistencia (Criterios de tolerancia según ACI 214), una vez analizados los datos con el apoyo de cartas de control de resistencias (Sección 5.3.2. de esta investigación), y el análisis de pesos volumétricos del concreto endurecido, se procede a elaborar las curvas de tendencia para el concreto endurecido.

La Tabla No. 5-36 recopila la información de resistencia promedio para cada una de las mezclas elaboradas en esta investigación.

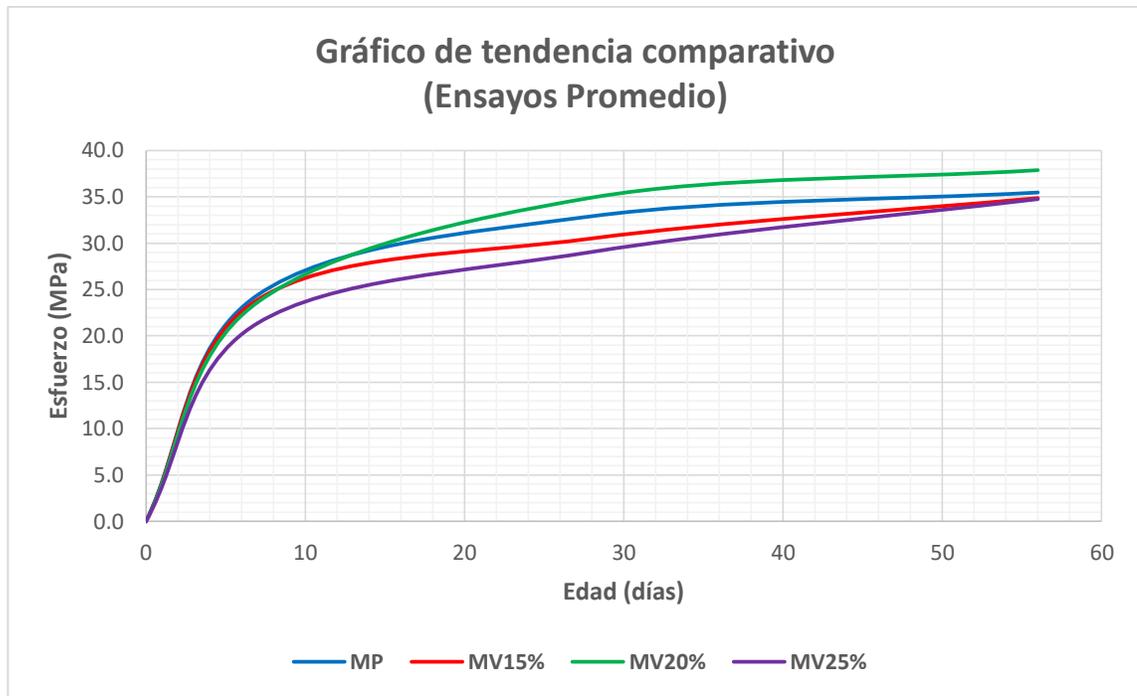
*Tabla No. 5-36: Resultados de resistencia a la compresión promedio.*

<b>Tipo de Mezcla</b>	<b>MP</b>		<b>MV15%</b>		<b>MV20%</b>		<b>MV25%</b>	
<b>Edad (días)</b>	$\sigma$ (MPa)	Variación resp. f'c	$\sigma$ (MPa)	Variación resp. MP	$\sigma$ (MPa)	Variación resp. MP	$\sigma$ (MPa)	Variación resp. MP
<b>7</b>	24.4	-11.3%	23.9	-2.1%	23.6	-3.2%	21.4	-12.4%
<b>28</b>	32.9	19.6%	30.5	-7.3%	34.9	6.1%	29.1	-11.7%
<b>56</b>	35.5	29.1%	34.9	-1.7%	37.9	6.8%	34.7	-2.0%

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura No. 5-26 se muestra la familia de curvas de tendencia para todas las mezclas elaboradas en esta investigación.

Figura No. 5-26: Curvas de tendencia para la resistencia del concreto.



Fuente: Elaboración propia.

El análisis de las curvas de tendencia consiste en determinar las resistencias alcanzadas por cada una de las mezclas y compararlas con la resistencia de la mezcla de referencia a las distintas edades de evaluación, a continuación se detalla el análisis comparativo de las resistencias:

### **Análisis para la edad de 7 días**

La Mezcla MP alcanza una resistencia de 24.4 MPa, un 88.7 % de ganancia respecto a la resistencia de diseño ( $f'c = 27.5$  MPa); la resistencia de la Mezcla MV15% es de 23.9 MPa lo que indica una reducción de 2.1 % respecto a MP; Para la Mezcla MV20% se tiene una resistencia de 23.6 MPa, que indica una

reducción de 3.2 % de resistencia respecto a MP; finalmente para la Mezcla MV25% se tiene una resistencia de 21.4 MPa, lo que indica una reducción de 12.4 % de resistencia respecto a MP.

### **Análisis para la edad de 28 días**

La Mezcla MP alcanza una resistencia promedio de 32.9 MPa, con un incremento de 19.6 % respecto a la resistencia de diseño ( $f'_c=27.5\text{MPa}$ ); para la Mezcla MV15%, se alcanza una resistencia de 30.5 MPa, que indica una reducción de 7.3 % respecto a MP; para la Mezcla MV20% se tiene una resistencia de 34.9 MPa, esto indica un incremento de 6.1 % respecto a MP; para la Mezcla MV25% se tiene una resistencia de 29.1 MPa, lo que indica una reducción de 11.7 % respecto a MP.

### **Análisis para la edad de 56 días**

La Mezcla MP tiene una resistencia de 35.5 MPa, incrementando en 29.1 % respecto a la resistencia de diseño ( $f'_c = 27.5 \text{ MPa}$ ); para la Mezcla MV15%, se alcanza una resistencia de 34.9 MPa, comparado con MP se tiene una reducción de 1.7 %; para la Mezcla MV20%, se alcanza una resistencia de 37.9 MPa, se tiene un incremento de 6.8 % respecto a MP; finalmente, para la Mezcla MV25% se tiene una resistencia de 34.7 MPa, , se tiene una reducción de 2.0 % respecto a MP.

En síntesis, la mezcla que presenta un mejor valor de resistencia a temprana edad es la MP, alcanzando un esfuerzo a la compresión de 24.4 MPa; a la edad de 28 y 56 días la mezcla que alcanza mejores resultados es MV20% seguida de MP, con una diferencia muy estrecha (6.1 % y 8.6 % respectivamente). Cabe destacar que a pesar que las mezclas MV15% y MV25% no alcanzan la resistencia de MP, estas tienen una peculiaridad respecto a su resistencia entre los 28 y 56 días, se observa un incremento de resistencia bastante potencial (14.4 % y 19.2 % respectivamente), indicando que a edades posteriores puede que alcancen mayores resistencias.

# Capítulo VI

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1. Conclusiones.

Con base a los resultados obtenidos en esta investigación, se elaboran las conclusiones en dos etapas, la primera las conclusiones del concreto en estado fresco y la segunda las conclusiones del concreto endurecido.

#### 6.1.1. Concreto en Estado Fresco.

A continuación se detallan las conclusiones para cada propiedad en estado fresco estudiada:

##### *a. Tiempo de Fraguado.*

Comparando los resultados de tiempo de fraguado inicial y final de la Mezcla de Referencia (255 min y 351 min respectivamente), respecto a las mezclas con sustitución parcial de agregado fino por vidrio; para una sustitución de un 15 % de arena por vidrio, el comportamiento que tiene tanto para el fraguado inicial y final, disminuye 5.9 % y 3.7 % respectivamente; Para el 20 % de sustitución de vidrio el fraguado inicial se mantuvo igual y el final incremento en 1.14 %; Para un 25 % de sustitución de vidrio los fraguados inicial y final se incrementaron en 2 % y 2.56 % respectivamente.

##### *b. Revenimiento*

Tomando como base el revenimiento promedio de la Mezcla de Referencia (3.33 pulg), y comparando con cada mezcla con distinta sustitución parcial del agregado fino por vidrio; para una sustitución de 15 % y 20 % de vidrio por arena,

existe un incremento en el revenimiento de 0.42” y 0.09” respectivamente y para un 25 % el valor de revenimiento es igual al de la mezcla de referencia.

El comportamiento que tiene el concreto para las dosificaciones de vidrio entre un 15 % y 25 %, como sustituto de arena, es que tiende a disminuir la trabajabilidad que existe entre estos.

**c. Temperatura del concreto fresco**

Tomado como referencia la temperatura de la mezcla patrón (29.2 °C), y comparando con las mezclas con distintas sustituciones de agregado fino por vidrio; para una sustitución de 15 % y 20 % de vidrio por arena, existe un incremento en el valor de temperatura de 0.9 °C y 0.2 °C respectivamente y para un 25 % el valor disminuye en 0.9 °C.

Debido a los resultados obtenidos se puede decir que la adición de vidrio en los porcentajes estudiados, tienen una incidencia de disminuir la temperatura de la mezcla a medida incrementa la cantidad de vidrio; 30.1 °C (15 %), 29.4 °C (20 %) y 28.3 °C (25%).

**d. Peso volumétrico del concreto fresco.**

Al comparar el peso volumétrico de la Mezcla de Referencia, con un valor de 2269 kg/m<sup>3</sup>, y compararlo con las mezclas con distintas sustituciones de agregado fino por vidrio, se determina que existe una tendencia a aumentar este parámetro a medida se incrementa el porcentaje de vidrio en la mezcla, de la

siguiente manera: 2278 kg/m<sup>3</sup> (15 % de vidrio), 2290 kg/m<sup>3</sup> (20 % de vidrio) y 2286 kg/m<sup>3</sup> (25 % de vidrio). Existe una relación directamente proporcional al adicionar vidrio a las mezclas, densificando las mezclas a medida se incrementa el porcentaje de sustitución parcial de agregado fino por vidrio molido.

#### **6.1.2. Concreto en Estado Endurecido.**

A continuación se detallan las conclusiones para cada propiedad en estado endurecido estudiada:

##### **a. *Peso volumétrico del concreto endurecido***

Tomado como referencia el peso volumétrico del concreto endurecido de la mezcla patrón (2265 kg/m<sup>3</sup>), y comparando con las mezclas con distintas sustituciones de agregado fino por vidrio; se determina que existe una tendencia a disminuir ligeramente, este parámetro a medida se incrementa el porcentaje de vidrio en la mezcla, de la siguiente forma: 2263 kg/m<sup>3</sup> (15 % de vidrio), 2260 kg/m<sup>3</sup> (20 % de vidrio) y 2259 kg/m<sup>3</sup> (25 % de vidrio).

##### **b. *Resistencia a la compresión.***

A la edad de 7 días, si se compara el resultado de la resistencia de la mezcla patrón (24.4 MPa) con la adición de vidrio se determina que existe un relación inversa del porcentaje de vidrio con relación a la resistencia de la siguiente manera: 15 % de sustitución de vidrio, 23.9 MPa, 20 %, 23.6 MPa y con el 25 % se obtiene un valor de 21.4 MPa

A la edad de 28 días, si se compara el resultado de la resistencia de la Mezcla de Referencia (32.9 MPa) con las Mezclas con sustitución parcial de agregado fino por vidrio, se tiene que la mayor resistencia (34.9 MPa) se obtiene con una sustitución de vidrio del 20 %; para los porcentajes del 15 y 25 % se obtiene los valores de 30.5 MPa y 25.1 MPa respectivamente, lo que significa una disminución con relación a la mezcla de referencia.

A la edad de 56 días, si se compara el resultado de la resistencia de la mezcla patrón (35.5 MPa) con las Mezclas con adición de vidrio, se tiene que la mayor resistencia (37.9 MPa) se obtiene con la Mezcla que con 20% de sustitución vidrio; para las Mezclas con 15 % y 25 % de sustitución, se obtiene los valores de 34.9 MPa y 34.7 MPa respectivamente, lo que significa una leve disminución con relación a la mezcla de referencia.

La máxima resistencia a la compresión del concreto a las edades de 28 y 56 días se obtiene con el 20 % de adición de vidrio.

## **6.2. Recomendaciones.**

Producto de este estudio se puede decir que:

- El vidrio es un material que puede usar en la elaboración de mezclas de concreto, ya que no modifica considerablemente las características del concreto en estado fresco y endurecido.

- La aplicación de los diseños empleados para la ejecución de esta investigación, permite recomendar lo siguiente:
  - Usar un 20 % de adición de vidrio, para alcanzar resistencia de hasta 37.9 MPa a la edad de 56 días.
  - Usar un 15 % de adición de vidrio, para alcanzar resistencia de hasta 34.9 MPa a la edad de 56 días.
  - Usar un 25 % de adición de vidrio, para alcanzar resistencia de hasta 34.7 MPa a la edad de 56 días.
  - Para todos los diseños realizados se alcanzaron resistencias superiores a la de diseño (27.5 MPa).

Es recomendable realizar otras investigaciones variando los siguientes parámetros:

- Utilizar vidrio molido con granulometrías diferentes a la aplicada.
- Ampliar los porcentajes de sustitución de vidrio molido por agregado fino
- Utilizar resistencias de diseño según se requieran en la industria de la construcción

Todo lo anterior con el fin de tener suficientes criterios que permita evaluar la factibilidad de utilizar este recurso en la industria de la construcción.

## BIBLIOGRAFIA

### 1. Trabajos de Investigación

- José Eduardo García Rojas y Walter Iván Guerrero Contreras, (2009), “Análisis experimental del uso de un aditivo reductor de agua de alto rango y retardante, para el control de la consistencia y resistencia del concreto hidráulico en carreteras”, Universidad de El Salvador.
- Jorge Alejandro Carrera Andrade, (1980), “Concreto liviano empleando vidrio volcánico como agregado”, Universidad Nacional de Ingeniería, programa académico de ingeniería civil, Lima Perú.
- Ronald Isaí Arias Cisneros, Francisco Burgos Rivera, Franklin Geovanni Carranza Cisneros, (2013), “Determinación del comportamiento del concreto en estado fresco y endurecido, utilizando arena natural, arena lavada industrialmente y la combinación de las mismas”, Universidad de El Salvador.
- Jorge Alberto Rugamas Dinarte, (2012), “Influencia de la arena triturada, como agregado fino, en las propiedades en estado fresco y endurecido, de las mezclas de concreto hidráulico”, Universidad de El Salvador.
- David Andrés Vargas Castro, (2015), “Reutilización de vidrio plano como agregado fino en la elaboración de morteros de cemento y concreto”, Tecnológico de Costa Rica Ingeniería Ambiental, Cartago, Costa Rica.

- Marcelo Castillo Pazmiño, (2010), “Investigación de la utilización de vidrio molido como material de construcción y técnicas constructivas”, World Wildlife Fund.
- Carlos Javier Catalán Arteaga, (2013), “Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones grado H15, H20 y H30”, Universidad Austral de Chile.
- Peñafiel Carrillo, D. A. (2016). “Análisis de la resistencia a la compresión del hormigón al emplear vidrio reciclado molido en reemplazo parcial del agregado fino”. Ambato: Universidad Técnica de Ambato.
- PASQUEL E., 1997. Reacción álcali-agregado: El VIH del concreto. Laboratorio del concreto – Asocreto.
- Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Field investigation of concrete incorporating milled wasted glass. Journal of solid waste technology and management. Department of Civil and Environmental Engineering. Michigan State University, USA.
- Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (Noviembre de 2011). Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. Department of Civil and Environmental Engineering. Michigan State University, USA.
- Rodríguez, M., & Ruiz, M. (2016). Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en

reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

## **2. Libros de texto citados.**

- Portland Cement Association (PCA),  
Capítulo 1, Fundamentos del Concreto  
Capítulo 9, Diseño y proporcionamiento de mezclas de concreto normal.

## **3. Páginas web.**

- Reacción Álcali- Sílice en el concreto  
<http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/deterioro-concreto-reactividad-alkali.html>
- Diferencias entre cristal de Sílice y el vidrio  
[http://www.quimitube.com/por-que-los-cristales-no-son-cristales.](http://www.quimitube.com/por-que-los-cristales-no-son-cristales)
- Proceso de Fabricación del vidrio  
[http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec\\_4.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/137/html/sec_4.html)

## **4. Normativas**

- ASTM C1157-11: Standar Performance for Hydraulic Cement
- ASTM C1602-12: Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete
- ASTM C94-13: Standard Specification for Ready-Mixed Concrete
- ASTM C33-13: Standard Specification for Concrete Aggregates
- ASTM C403-08: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance
- ASTM C136-06: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

- ASTM C702-11: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size
- ASTM C29-09: Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate
- ASTM C40-11: Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete
- ASTM C128-12: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate
- ASTM C127-12: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate
- ASTM C192-13: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
- ASTM C172-10: Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete
- ASTM C1064-12: Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete
- ASTM C138-13: Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete
- ASTM C143-12: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete
- ASTM C39-12: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

- ASTM C566-13: Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying
- ASTM D75-14: Standard Practice for Sampling Aggregates

#### **5. American Concrete Institute (ACI).**

- Comité ACI 211-92 (2002): Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweight, and Mass Concrete.
- Comité ACI 214 (2002): Evaluation of Strength Test Results of Concrete

#### **6. Otras Fuentes**

- Asesorías permanentes con Ing. Lesly E. Mendoza (UES)
- Asesorías permanentes con Ing. José Miguel Landaverde (UES)
- Asesorías permanentes con Ing. Nestor E. Cárcamo (Jefe de Control de Calidad de Materiales, Suelos y Materiales S. A. de C. V.)
- Asesorías permanentes con Ing. Marlon E. Vigil (ISCYC)
- Apuntes de clase, Tecnología del Concreto, Universidad de El Salvador.