	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO		F-AC-DBL-007	10-04-2012	A
Dependencia		Aprobado		Pág.
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA		SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(123)

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	JAIDER CORONEL ROJAS JHON EDINSON SANCHEZ LEON
FACULTAD	DE INGENIERIAS
PLAN DE ESTUDIOS	INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR	ROMEL JESUS GALLARDO AMAYA
TÍTULO DE LA TESIS	ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MORTERO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO PULVERIZADO

RESUMEN

(70 palabras aproximadamente)

EL PRESENTE TRABAJO DE INVESTIGACION EVIDENCIA EL ANALISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL MORTERO MEDIANTE LA SUSTITUCION PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO PULVERIZADO, MEDIANTE LA REALIZACION DE CUBOS DE MORTERO DE 50MM BASADOS EN LA NTC 220 Y REALIZANDO SUSTITUCION EN PESO DEL 10%, 20% Y 30% DE CEMENTO POR RESIDUO DE VIDRIO PARA COMPARAR CON LA MUESTRA PATRÓN DEL 0%. OBTENIENDO COMO RESULTADO PARA EL MORTERO CON 10% DE SUSTITUCION UNA OPTIMA ACTIVIDAD PUZOLANICA DE ACUERDO A LA NORMA ASTM C 618.

CARACTERÍSTICAS

PÁGINAS: 123	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 45	CD-ROM: 1
--------------	-----------	-------------------	-----------



ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL
MORTERO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO
PULVERIZADO

AUTOR:

JAIDER CORONEL ROJAS

JHON EDINSON SÁNCHEZ LEÓN

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director:

Ing. ROMEL J. GALLARDO AMAYA

Msc. Geotecnia

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Febrero de 2021

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este proyecto extienden un agradecimiento especial a la universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña por abrir sus puertas del conocimiento, permitiendo que se realicen importantes proyectos investigativos que fortalecen los saberes propios y quedan plasmados para futuras generaciones.

A las personas que de una forma u otra estuvieron involucradas en el desarrollo del proyecto, al ingeniero Romel Jesús Gallardo Amaya, pilar fundamental para llegar a los logros alcanzados en la investigación, gracias a su apoyo y direccionamiento incondicional, a Oliver Picón Vacca laboratorista de Suelos de la universidad por su disposición y asesoramiento en algunos procesos, al Ing. Ciro Andrey Martínez por su tiempo, colaboración y asesoramiento en la elaboración de este trabajo y a los jurados Leandro Ovallos Manosalva asesor científico y Jesús Antonio Palacios Amaya asesor metodológico.

Finalmente, al grupo de investigación GIGMA, por su acogimiento y apoyo para la realización conjunta del proyecto.

Índice

1.	Análisis de la variación de la resistencia a la compresión del mortero mediante la sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado.....	1
1.1	Planteamiento del problema.....	1
1.2	Formulación del problema.....	2
1.3	Objetivos.....	3
1.3.1	Objetivo general.....	3
1.3.2	Objetivos específicos.....	3
1.4	Justificación.....	3
1.5	Delimitaciones.....	4
1.5.1.	Geográfica.....	4
1.5.2.	Temporal.....	5
1.5.3.	Conceptual.....	5
1.5.4.	Operativa.....	5
2.	Marco referencial.....	7
2.1.	Marco Histórico.....	7
2.1.1.	Historia de los morteros.....	7
2.1.2.	Historia de las puzolanas.....	11
2.1.3.	Antecedentes a nivel internacional.....	12
2.1.4.	Antecedentes a nivel nacional.....	16
2.1.5.	Antecedentes a nivel local.....	17
2.2.	Marco Contextual.....	17
2.3.	Marco Conceptual.....	19
2.3.1.	Agregados.....	19
2.3.2.	Cemento Hidráulico.....	22
2.3.3.	Vidrio.....	23
2.3.4.	Puzolanas.....	23
2.4.	Marco Teórico.....	23
2.5.	Marco Legal.....	26

3. Diseño Metodológico	34
3.1. Tipo de investigación.....	34
3.2. Población y muestra.....	35
3.2.1. Población.....	35
3.2.2. Muestra.....	35
3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de la información	37
3.4. Diseño experimental	37
3.5. Análisis de la información	38
3.6. Cronograma de actividades	39
4. Resultados	41
4.1. Establecer las características físicas del cemento y el vidrio pulverizado	41
4.1.1. Densidad de las materias primas	44
4.1.2. Superficie específica de Blaine	48
4.1.3. Imágenes en microscopio del residuo de vidrio y mortero	49
4.2. Determinar la resistencia a la compresión del mortero normalizado para diferentes porcentajes de sustitución de cemento por vidrio pulverizado.	52
4.2.1. Fluidéz de las mezclas de mortero.	57
4.2.2. Densidad de los cubos de mortero.....	60
4.2.3. Resistencia a la compresión	64
4.3. Establecer la variación de la resistencia a la compresión del mortero normalizado en función del porcentaje de sustitución de cemento por vidrio pulverizado .	73
4.3.1. Análisis de la fluidéz de las mezclas de mortero	73
4.3.2. Análisis de la densidad de los cubos de mortero.....	79
4.3.3. Análisis de la resistencia a la compresión	90
4.3.4. Evaluación de la resistencia a la compresión con la norma ASTM C311 y ASTM C618 96	
5. CONCLUSIONES	100
6. RECOMENDACIONES	103
REFERENCIAS	104
Apéndice A,.....	111
Versión de prueba de Minitab.....	111

Apéndice B.	112
Informe de resultados de laboratorio.	112
Apéndice C.	113
Consolidación de ensayos de resistencia de compresión.....	113

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Resistencia a la compresión de las mezclas de aditivos minerales de cal.....	13
<i>Figura 2.</i> Resistencia a la compresión de concretos que contienen 30% de vidrio molido....	14
<i>Figura 3.</i> Resistencia a compresión de morteros a 2, 7 y 28 días.....	16
<i>Figura 4.</i> Ubicación de Vidrieras y laboratorios en Ocaña, N. de S.....	19
<i>Figura 5.</i> Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción.....	27
<i>Figura 6.</i> Tipo de vidrio según recolección de vidrio realizada en las diferentes vidrieras de Ocaña.....	39
<i>Figura 7.</i> Recolección de residuo de vidrio	42
<i>Figura 8.</i> Molienda y tamizaje del residuo de vidrio	43
<i>Figura 9.</i> Tamizaje del residuo de vidrio	43
<i>Figura 10.</i> Residuo de vidrio pulverizado	44
<i>Figura 11.</i> Ensayo de densidad del cemento.....	45
<i>Figura 12.</i> Baño maria del frasco le chatelier para densidad de cemento	46
<i>Figura 13.</i> Ensayo de densidad para el residuo de vidrio	47
<i>Figura 14.</i> Imagen microscópica del residuo de vidrio pulverizado.....	50
<i>Figura 15.</i> Imagen microscopica del mortero	51
<i>Figura 16.</i> Ensayo de fluidez para determinar la fórmula de trabajo	55
<i>Figura 17.</i> Tamizado de la arena gradada normalizada.....	56
<i>Figura 18.</i> Mezclado de la arena gradada normalizada.....	57
<i>Figura 19.</i> Materiales utilizados en el ensayo de fluidez.....	58
<i>Figura 20.</i> Ensayo de fluidez	59
<i>Figura 21.</i> Medición de los lados de un cubo de mortero.....	61
<i>Figura 22.</i> Medición de la masa de un cubo de mortero.....	62
<i>Figura 23.</i> Proceso de mezclado de la lechada de mortero.....	64
<i>Figura 24.</i> Compactación de cubos de mortero	65
<i>Figura 25.</i> Ensayo de resistencia a la compresión	66
<i>Figura 26.</i> Fallas en los cubos de mortero.....	68
<i>Figura 27.</i> Curva de fuerza-deformación de cubos de mortero	71
<i>Figura 28.</i> Resistencia a la compresión para valores promedio	72
<i>Figura 29.</i> Residuos frente a valores ajustados para primer modelo de fluidez	76
<i>Figura 30.</i> Línea ajustada en modelo lineal para primer modelo de fluidez	77
<i>Figura 31.</i> Grafica de predicción para el segundo modelo de fluidez	78
<i>Figura 32.</i> Residuos frente a valores ajustados para primer modelo de densidad.....	81
<i>Figura 33.</i> Línea ajustada en modelo lineal para primer modelo de densidad	82
<i>Figura 34.</i> Residuos frente a valores ajustados para el segundo modelo de densidad.....	83
<i>Figura 35.</i> Línea ajustada en modelo lineal para el segundo modelo de densidad.....	84
<i>Figura 36.</i> Residuos frente a valores ajustados para el tercer modelo de densidad.....	84
<i>Figura 37.</i> Residuos frente a valores ajustados para el tercer modelo de densidad.....	85
<i>Figura 38.</i> Residuos frente a valores ajustados para el cuarto modelo de densidad.....	86
<i>Figura 39.</i> Línea ajustada en modelo lineal para el cuarto modelo de densidad	87
<i>Figura 40.</i> Residuos frente a valores ajustados para el quinto modelo de densidad.....	88
<i>Figura 41.</i> Grafica de predicción para el quinto modelo de densidad	89
<i>Figura 42.</i> Grafica de probabilidad normal de la resistencia a la compresión.....	93
<i>Figura 43.</i> Histograma de frecuencia de residuos para la resistencia a la compresión.....	94
<i>Figura 44.</i> Grafica de efectos principales con medias ajustadas para la resistencia a la compresión	95
<i>Figura 45.</i> Grafica de interacción con medias ajustadas para la resistencia a la compresión.....	96

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Requisitos de la arena normalizada</i>	29
Tabla 2. <i>Diseño del análisis factorial de la muestra</i>	36
Tabla 3. <i>Diseño experimental</i>	38
Tabla 4. <i>Cronograma de actividades</i>	40
Tabla 5. <i>Densidad de las materias primas</i>	48
Tabla 6. <i>Superficie específica de Blaine para las materias primas</i>	49
Tabla 7. <i>Orden de corrida del diseño experimental</i>	52
Tabla 8. <i>Resultados ensayo de fluidez</i>	55
Tabla 9. <i>Resultados ensayo de fluidez</i>	59
Tabla 10. <i>Densidad de los cubos de mortero</i>	63
Tabla 11. <i>Resultados de resistencia a la compresión</i>	68
Tabla 12. <i>Media de resistencia a la compresión</i>	72
Tabla 13. <i>Fluidez pronosticada con índice de predicción de 95%</i>	79
Tabla 14. <i>Densidad pronosticada con índice de predicción de 95%</i>	90
Tabla 15. <i>Medias ajustadas para la Resistencia a la Compresión</i>	92
Tabla 16. <i>Índice de Actividad de Resistencia a la Compresión</i>	97
Tabla 17. <i>Requerimientos físicos de la norma ASTM C618</i>	99

1. Análisis de la variación de la resistencia a la compresión del mortero mediante la sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado

1.1 Planteamiento del problema

En el municipio de Ocaña como en cualquier parte del país el mortero juega un papel importante en la construcción de obras civiles, ya que, puede tener una función estructural en la elaboración de elementos estructurales, en mampostería como material de pega o de relleno en las celdas de los muros, cómo también una función no estructural destinándolo a recubrimientos en el caso de revoques o pañetes (Gutiérrez de López, 2003).

Para la elaboración del mortero, el cemento es el ingrediente principal, sin embargo, la producción de una tonelada de cemento Portland, libera aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera (Meyer, 2008), contribuyendo a la problemática ambiental con el 8% de las emisiones globales según el centro de estudios británico Chatham House.

De manera que, la ingeniería del siglo XXI asume un nuevo reto con respecto al componente ambiental, desarrollando construcciones ecológicas, y analizando el impacto que los materiales tienen sobre el medio ambiente. En este sentido también se crean nuevos materiales a partir de productos desechados por algunas industrias después de cumplir su vida

útil, reincorporándolos al ciclo productivo y reduciendo la carga contaminante que estos pueden generar.

Según datos del Departamento Nacional de Desarrollo (2015), el 30% de los residuos generados en Colombia, está compuesto por materiales que pueden ser aprovechados como el papel, metal, vidrio, textiles o plástico, pero, sólo el 17% de estos son reciclados y el resto va a los rellenos sanitarios que para el 2030 estarán llegando a su capacidad en varias ciudades del país.

El vidrio es precisamente uno de los materiales que se pueden aprovechar una vez finalizado su ciclo de vida, en el caso del Municipio de Ocaña, se observa un alto desperdicio de vidrio plano en todas las vidrierías que no sé está reciclando si no que va directo al relleno sanitario regional La Madera. Además, enviar este tipo de residuos a los vertederos es insostenible, teniendo en cuenta que el vidrio puede tardar hasta 4000 años en degradarse (RECICLAJES AVI, s.f.), y que estos sitios de disposición están llegando a su capacidad en algunas ciudades del país lo que da mayor relevancia al reciclaje para dar un nuevo uso a estos materiales.

1.2 Formulación del problema

¿Qué efecto tendrá en las propiedades del mortero normalizado como la densidad y resistencia a la compresión la sustitución parcial del cemento por vidrio pulverizado?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general.

Analizar la variación de la resistencia a la compresión del mortero normalizado mediante la sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado.

1.3.2 Objetivos específicos.

- Establecer las características físicas del cemento y el vidrio pulverizado
- Determinar la resistencia a la compresión del mortero normalizado para diferentes porcentajes de sustitución de cemento por vidrio pulverizado.
- Establecer la variación de la resistencia a la compresión del mortero normalizado en función del porcentaje de sustitución de cemento por vidrio pulverizado

1.4 Justificación

La sustitución parcial del cemento con materiales alternativos reciclados, podría llevar a una reducción del uso del cemento y la consecuente reducción del impacto ambiental que se genera en su fabricación (Espinoza, 2017). Además, el vidrio es un material no biodegradable, cuya disposición en vertederos puede generar una serie de problemáticas asociadas (Zainab,

Enas y AL-Hashmi, 2008), por lo cual es pertinente la implementación de alternativas que lo incluyan nuevamente dentro del ciclo productivo.

Las investigaciones realizadas por diversos autores como Nassar & Soroushian (2011) han demostrado que el vidrio reacciona con el cemento y mejora propiedades como la resistencia y la durabilidad, que se ve reflejado en la reducción de la densidad que se traduce en un menor peso de la estructura (Mitra, Srimany y Gopal, 2016).

El desarrollo de la investigación plantea una alternativa para el posible aprovechamiento de los residuos de vidrio plano generados en la ciudad, al incorporarlos en la fabricación de morteros. Adicionalmente, si se llega a implementar el uso de este residuo a escala industrial se podría reducir el costo en la fabricación de morteros y por ende el de los elementos en los que este interviene en una obra.

1.5 Delimitaciones

1.5.1. Geográfica.

El proyecto será realizado en el municipio de Ocaña, Norte de Santander, específicamente en los laboratorios adscritos a los departamentos académicos de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña.

1.5.2. Temporal.

Para el desarrollo del proyecto se tiene estimado un periodo correspondiente a un semestre académico.

1.5.3. Conceptual.

Para el desarrollo de la investigación propuesta, se tratarán aspectos relacionados con: Mortero, Cemento, Polvo de vidrio, Resistencia a la compresión, peso específico, capacidad cementante e índice de actividad puzolánica.

1.5.4. Operativa.

El polvo de vidrio plano a utilizar como sustituto del cemento dentro las mezclas de mortero, debe llevarse a un tamaño de partícula por debajo de los 38 μm (tamiz #400) para que se puedan desarrollar sus propiedades cementantes. El proyecto se va a realizar mediante el diseño de experimento, dado que el diseño experimental contempla realizar varias probetas de distintas dosificaciones a 3 edades especificadas.

Para la elaboración de las mezclas reemplazando parcialmente la cantidad de cemento portland tipo I se debe tener en cuenta un rango apropiado de sustitución entre el 0 % y 30 % basado en investigaciones desarrolladas por diferentes autores. Así mismo, se seguirá el procedimiento y recomendaciones descritos en la NTC 220 y ASTM C-311 correspondiente a la determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico e índice de actividad puzolánica respectivamente.

2. Marco referencial

2.1. Marco Histórico

Debido a que en el proyecto se investigará el uso del vidrio reciclado empleándolo como sustituto parcial de cemento para evaluar su resistencia y por consiguiente su actividad puzolánica, se hará una revisión de estos conceptos en el tiempo y como han variado con las investigaciones que se han hecho en el tema y su implementación en la industria de la construcción

2.1.1. Historia de los morteros.

Morteros prehistóricos.

Según (Álvarez, Martín, & García Casado, 1995) el uso del mortero de cal es milenario, se habla que desde la época neolítica se tiene conocimiento de el, y es que desde los antiguos escritos de la Biblia se menciona en (Deuteronomio 5, 25,2) la cal como ligante y el mortero de cal, pues algunos autores como (Malinowski & Garfinkel, Prehistory of Concrete., 1991) sitúan los primeros morteros de cal cuando el hombre prehistórico utilizaba este mortero para hacer pinturas rupestres en las cuevas, encontrando de esta forma el empleo de la cal apagada.

(Malinowski, R, 1982. p.2) expresa que “el primer uso conocido de morteros de cal fue en la Máscara de Jericó, una calavera cubierta con un emplasto de cal pulido, que data del año 7000 a de C”.

Morteros Egipcios

Según (Furlan & Bisseguer, 1975) en el antiguo imperio egipcio se encontró el uso del yeso puro como mortero, pues el yeso utilizado en los bloques de mampostería de la pirámide Keops así lo demuestran.

Álvarez, et al. (1995) citando a (Martinet, Deloye, & Golvin, 1992) afirma que, “en dichos yesos se ha encontrado la presencia de carbonatos, debido a la caliza presente en la roca de yeso empleada en la mezcla”. Un dato que causa especial sorpresa es la ausencia de morteros de cal en el antiguo imperio egipcio, contrastando con la cercanía de betas de caliza y el dominio de fabricación de yeso, tal vez puede explicarse dicha situación a la elevada energía que se necesita para la calcinación, conociendo las escasas fuentes de energía de la zona.

Morteros Griegos

El hallazgo de morteros en la antigua Grecia fue investigado por dos arqueólogos, los cuales llegaron a la conclusión que el uso del mortero de cal fue desarrollado de una forma

más compleja por parte de los griegos y romanos. (Furlan & Bisseguer, 1975; Malinowski, R, 1982).

Morteros Romanos

Comúnmente se llama a los romanos la civilización que expandió la cultura griega a occidente, pues esta tomó los principios culturales, religiosos y arquitectónicos del Helenismo; (Álvarez, Martín, & Garcia Casado, 1995) afirman que “los romanos también heredaron de los griegos la técnica de añadir a la mezcla diversas sustancias que favorecían las características del mortero. Por ejemplo, con frecuencia se añadía lava ligera como agregado”.

Los morteros romanos son citados por una gran cantidad de autores (Malinowski, 1982; Furlan, 1975; Rassinoux, Petit, & Meunier, 1989), por tener una gran consistencia y durabilidad.

Morteros Medievales

Álvarez, et al. (1995) citando a (Furlan & Bisseguer, 1975) afirma que en el periodo medieval no se logró un avance significativo en el uso del mortero, luego de la caída del imperio romano hubo un letargo en las construcciones e inventos en el campo de la construcción, sin embargo, se conoce que la edad medio solo ocurrió en los países más

importantes de Europa, es decir que este estancamiento en el desarrollo científico solo ocurrió ahí, no obstante no se tienen datos del manejo del mortero en otros países del mundo.

Morteros Modernos

La modernidad trajo consigo una gran cantidad en el ámbito científico, el método científico hizo que mucha gente empezara a investigar y a experimentar con materiales nuevos, y fue en el siglo de la “luz” cuando la investigación en el campo de los ligantes hidráulicos toma relevancia y se da el comienzo de una nueva era en la construcción, pues Jhon Smeaton, encargado de construir el faro de Eddystone en Plymouth, Inglaterra descubrió un material que lograra soportar el desgaste y la erosión que el mar genera, dando como resultado la caliza de Aberthaw, pues al hacer ensayos químicos se encontró presencia de arcilla, por lo que se llegó a la conclusión de que “la presencia de arcilla en la caliza debe ser uno de los factores principales o el único que determina la hidráulica”, citado por (Rassineux, Petit, & Meunier, 1989).

En 1812, Vicat, científico francés inventor del cemento artificial, investigó que las propiedades hidráulicas de los materiales cementantes dependen en gran medida de los compuestos generados durante la cocción de calizas puras y arcilla. Álvarez, et al. (1995).

Morteros Actuales.

Los morteros actuales son fabricados con cemento portland, arena y agua; el cemento portland tiene su origen en 1824, cuando Joseph Apsdin patentó un cemento de caliza, el cual tenía componentes de arcilla y tierra, que se hidrataban y se calcinaban en un horno para obtener el producto denominado cemento Portland, asemejándose a la resistencia de la piedra portland que da como referencia el nombre de este cemento. Afirma (Ashurst, 1983, p. 35).

(Furlan & Bisseguer, 1975) dice que “las principales objeciones al uso de cementos naturales y especialmente cemento Portland se basan en su alta resistencia, su carácter impermeable y el riesgo de transferencia de sales solubles, en concreto sales de sodio, que alteran los materiales de construcción”. Desde el comienzo del siglo XX los componentes del cemento Portland no han cambiado mucho, pero han mejorado las técnicas de producción, y ha habido un gran cambio en la tecnología aplicada a la producción industrial de este ligantes, así como la investigación en aditivos aplicables a productos específicos, expandiendo el uso cemento en diferentes campos de la ingeniería.

2.1.2. Historia de las puzolanas.

El descubrimiento de la cerámica se dio desde el comienzo de la civilización humana, y con la aparición de fuego aparecieron nuevos materiales con acciones cementantes hidráulicas, a tales descubrimientos se refiere (Salazar, s.f). Las puzolanas comparten la misma historia de los morteros de cal, pues en si tiene el mismo componente, los primeros en hacer uso de este material fueron los grandes imperios del mediterráneo, los griegos y romanos afortunados de

tener canteras volcánicas en sus territorios descubrieron este material con el cual izaron grandes construcciones por los que el mundo los recuerda en la actualidad; es así como el origen etimológico del término puzolana proviene de las cenizas romanas de Pozzuoli. (Salazar, s.f, p. 3).

2.1.3. Antecedentes a nivel internacional

Con respecto al residuo de vidrio molido como puzolana, investigadores como Shao, Lefort , Moras, Rodríguez, (2000), midieron la resistencia a las mezclas de cemento con vidrio triturado a diferentes tamaños de partícula como índice de actividad puzolánico, los tres tipos de tamaño de partícula de vidrio triturado fueron: residuo de vidrio que pasa el tamiz #100 (150 μ m) y material retenido en el tamiz #200 (75 μ m), residuo de vidrio que pasa el tamiz #200 (75 μ m) y material retenido en el tamiz #400 (38 μ m), y el material de vidrio que pasa tamiz #400 (38 μ m). los resultados de resistencia indicaron que el residuo de vidrio que pasa tamiz #400 cumplió con el requisito de resistencia mínima en la prueba de 7 días y alcanzó un aumento en la resistencia después de 21 días de curado en el agua, por su parte la resistencia de la mezcla con material de residuo de vidrio con tamaño de partícula de 150 μ m mostró que estaba muy por debajo de la resistencia mínima, debido a que el tamaño del vidrio era demasiado grueso para servir de puzolana, e igualmente el residuo de vidrio de tamaño de 75 μ m demostró que la resistencia a los 7 días fue ligeramente más bajo que el valor del umbral, mientras que su curado adicional de 21 días en agua mejoró la resistencia a un nivel satisfactorio, en la figura 1 se muestra los resultados a la compresión para el humo de sílice, ceniza volante, vidrio molido de tamaño de partícula de 150 μ m, 75 μ m, 38 μ m.

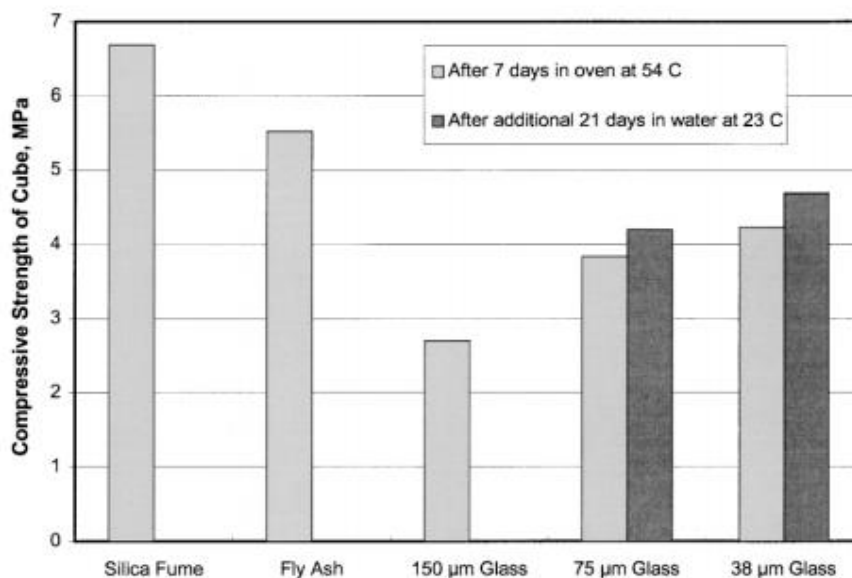


Figura 1. Resistencia a la compresión de las mezclas de aditivos minerales de cal. (Shao, Y; Lefort, T; Moras, S; Rodriguez, D.; (2000). Studies on concrete containing ground waste glasses. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 95-96. doi:10.1016/S0008-8846(99)00213-6

La resistencia a la compresión de cada serie en una determinada edad fue el promedio de cinco pruebas, la desviación estándar máxima de todas las pruebas fue del 10%, en los ensayos se puede constatar que todos los lotes de concreto de vidrio molido con sustitución del 30% en peso, tuvieron menor resistencia que en la muestra control a las edades de 3, 7, 28 y 90 días, exceptuando a la mezcla de vidrio de tamaño de partícula de 38µm y cemento a los 90 días, la cual excedió la resistencia obtenida en un 8% por la muestra control a una edad de 90 días. (Shao, Y; et al. 2000). Los resultados de resistencia a la compresión se muestran en la figura 2

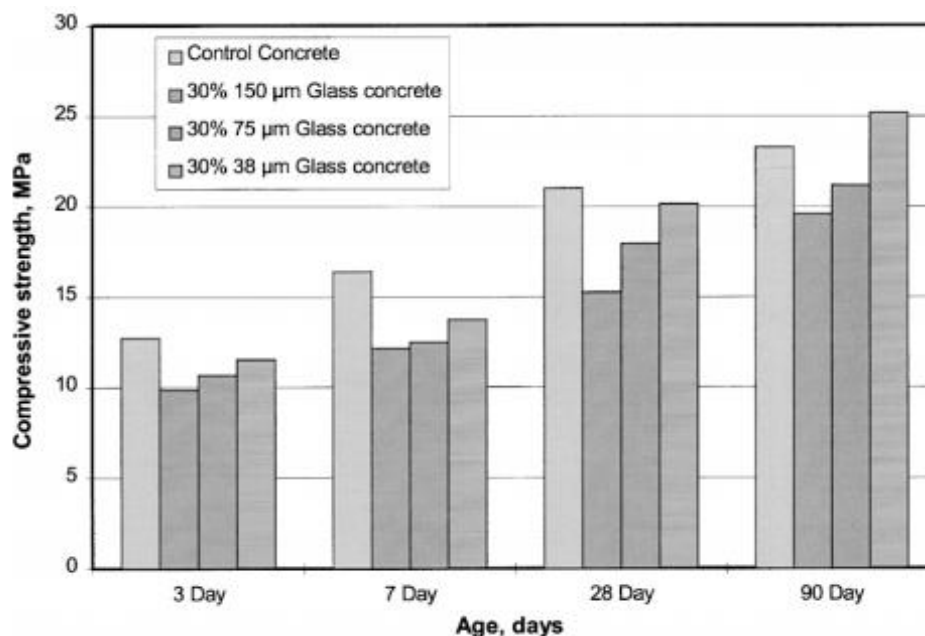


Figura 2. Resistencia a la compresión de concretos que contienen 30% de vidrio molido. (Shao, Y; Lefort, T; Moras, S; Rodriguez, D.; (2000). Studies on concrete containing ground waste glasses. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 95-96. doi:10.1016/S0008-8846(99)00213-6

En otra investigación, (Nishikawa, Takatsu , & Daimon , 1995) encontraron que la resistencia de la mezcla de cemento a los 90 días de curado aumentó con el contenido de vidrio hasta en un 25 %, midiendo también la finura con el aparato de Blaine dando como resultado aproximadamente 400 m²/kg como superficie específica, ligeramente mayor al cemento portland que tiene una finura de 380 m²/kg, sin embargo, en este estudio no se realizó ningún análisis químico del polvo de vidrio dado.

También se ha estudiado el tipo de vidrio que se puede utilizar en los concretos y morteros como sustitución parcial cemento, autores como (Dyer & Dhir, 2001), midieron el desarrollo de la resistencia al compresión en pastas de cemento que tienen vidrio reciclado de color blanco, verde y ámbar, donde hay una clara diferencia en el desarrollo de la resistencia

de morteros que contienen polvo de vidrio reciclado de diferentes colores: el blanco y el verde producen un ligero aumento de la resistencia a la compresión a los 28 días en relación con el control sin vidrio a niveles de reemplazo de alrededor del 10%, mientras que el vidrio de color ámbar simplemente logra resistencias similares a la muestra de control, La tasa de ganancia de resistencia en morteros que contiene vidrio finamente molido es notablemente más alto entre 7 y 28 días en comparación con el control. Este comportamiento implica que está ocurriendo una reacción puzolánica.

Un material también importante para su reciclaje es vidrio de aluminio-borosilicato (E-Glass), conocido como fibra de vidrio, y (Chen, Huang, Wu, & Yang, 2006) encontraron que el residuo de fibra de vidrio clase E se puede usar en concreto como material cementante, así como también en relleno inerte, que depende del tamaño de partícula, y ese tamaño de división o separación parece ser de 75 μm .

Recientemente se ha publicado una investigación que estudia el comportamiento del residuo de vidrio molido en mezclas de cemento, haciendo una comparativa con el microsílíce, en el cual se utilizaron dosificaciones de vidrio molido de 8, 16 y 24% en peso, y a través de ensayos de calorimetría por conducción, ensayo de Frattini, difracción de rayos X (DRX), mesa de flujo y resistencia a la compresión sobre morteros normalizados a 2, 7 y 28 días pudieron comprobar que “los estudios realizados muestran que la incorporación de vidrio molido como adición, desarrolla más lentamente actividad puzolánica y en menor medida que la MS, sin embargo no reduce la fluidez de los morteros y contribuye significativamente a la

resistencia mecánica.” (Trezza & Rahhal, 2018). En la figura 3 se muestra los resultados obtenidos de la resistencia a compresión en MPa de las diferentes mezclas utilizadas, incluyendo la muestra control de Cemento Portland (CP), mezcla de MicroSilice en 8% de adicción (MS) y mezcla de Vidrio Molido en 8% y 24% de adicción (BG) a los 2, 7 y 28 días de curado.

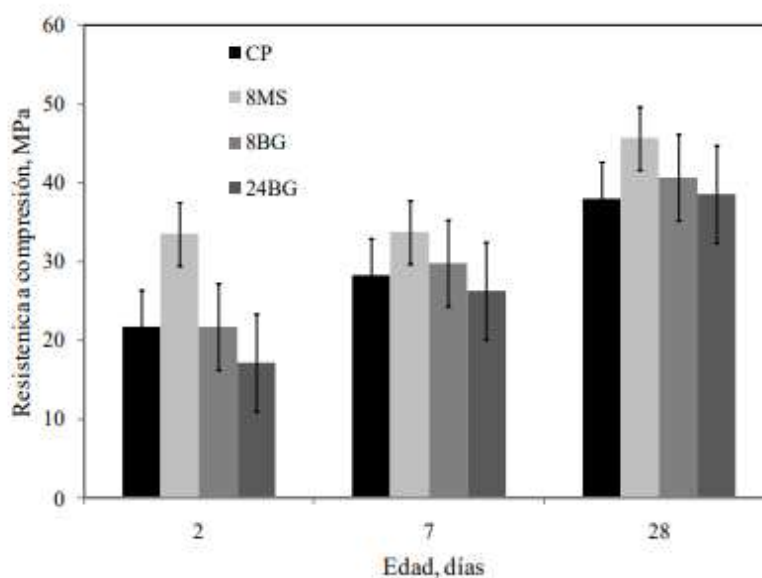


Figura 3. Resistencia a compresión de morteros a 2, 7 y 28 días. Trezza, M. A., & Rahhal, V. F. (2018). Comportamiento del residuo de vidrio. *Revista Materia*. doi:<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0311>.

2.1.4. Antecedentes a nivel nacional

Actualmente se tienen pocos estudios que relacionan el residuo de vidrio molido como agregado o material cementante en la fabricación de concretos y morteros a nivel nacional, sin embargo, se han desarrollado investigaciones como en la Universidad Nacional de diferentes

residuos industriales procedentes de la industria del petróleo, analizando la probabilidad de utilizar este desecho como sustitución para la producción de concretos y morteros, determinando la actividad puzolánica a partir de la resistencia a la compresión, según las normas ASTM C311 y C316, además de técnicas de Termogravimetría (TG) y calorimetría Diferencial (DCS), dando como resultado que “este desecho puede ser utilizado como adición al cemento en morteros y concretos, sumándole la importancia de la utilización de un residuo industrial” (Torres Agredo, Baquero, & Silva, 2008, p. 50).

2.1.5. Antecedentes a nivel local

En el plano local, en cuanto al municipio de Ocaña se refiere, se realizó una investigación en el año 2016 en la Universidad Francisco de Paula Santander como modalidad de proyecto de grado en el cual se hizo la evaluación de la aptitud de concretos, reemplazando parcialmente el cemento portland por cenizas volantes y cenizas de bagazo de caña de azúcar, en este estudio se realizó la mezcla de concreto con diferente porcentajes de sustitución parcial de cemento por cenizas volantes y cenizas de caña de azúcar desde el 5% al 20%, ensayando probetas a edades de 7, 14 y 28 días de curado, teniendo como resultado que la dosificación que mejor comportamiento presenta es la de 5% para ambas cenizas. (Durán Herrera & Velásquez Amado, 2016).

2.2. Marco Contextual

El desarrollo del proyecto de investigación “ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL MORTERO MEDIANTE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR VIDRIO PULVERIZADO”, tiene como finalidad de generar una alternativa novedosa y amigable con el medio ambiente al utilizar vidrio reciclado (Cullet) para sustituir parcialmente cemento portland en morteros normalizados; así pues conociendo la cantidad de desechos que son producidos por las vidrieras del municipio de Ocaña se decide enfocar el proyecto a estos residuos de vidrio plano que son dispuestos en el relleno sanitario La madera generando contaminación y un riesgo por la manipulación del mismo.

En tal sentido el proyecto se desarrollará en los laboratorios de Suelos y Pavimentos y laboratorio de resistencia de materiales del Departamento Académico de Ingeniería Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, con los materiales de la producción de vidrio del municipio y el agregado de la planta de producción ubicado en el Rio Algodonal. En la Figura 4 se muestra la ubicación de diferentes vidrieras del municipio de Ocaña y los laboratorios anteriormente descritos.

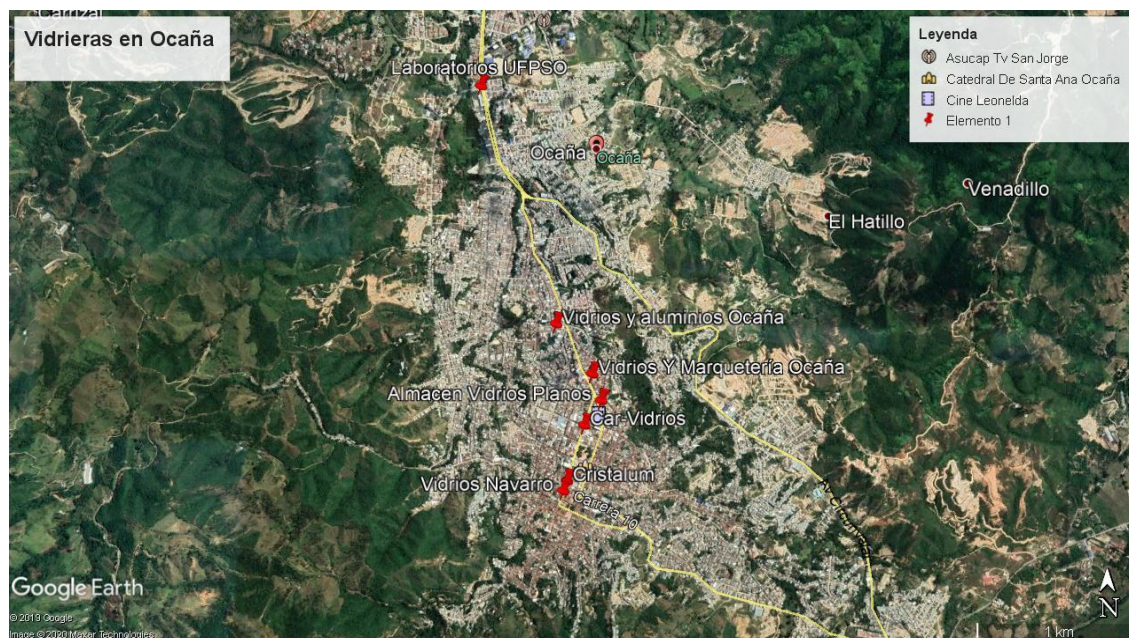


Figura 4. Ubicación de Vidrieras y laboratorios en Ocaña, N. de S. Google Earth, Consultado el 9 de diciembre de 2019.

2.3. Marco Conceptual

Para el desarrollo del análisis de la variación de la resistencia a la compresión del mortero mediante la sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado se abordarán conceptos como:

2.3.1. Agregados

(Gutiérrez de López, 2003) afirma que “Los agregados constituyen un factor determinante en la economía, durabilidad y estabilidad en las obras civiles, pues ocupan allí un volumen muy importante.”, con base en la anterior afirmación y extrayendo los conceptos del mismo autor se explica cada una de la terminología correspondiente a los agregados.

Los agregados son materiales usados en la construcción de obras civiles, procedentes de canteras y cuya composición mineral puede ser de origen natural o artificial, estos áridos se clasifican en áridos gruesos y finos, los primeros son aquellos cuyo tamaño de partícula es superior a 4.76 milímetros y los áridos finos son aquellos que tienen un tamaño de partícula entre 4.76 milímetros y 0.074 milímetros.

Agregados naturales

Proviene de la explotación de canteras o son producto del arrastre de los ríos. Los productos de explotación de cantera generalmente tienen una forma angulosa dada por la fractura o por el proceso de tamizaje que sufre el material, mientras que los materiales de arrastre de río tienen una forma redondeada debido al movimiento de transporte en las cuencas hidrográficas. (Gutiérrez de López, 2003)

Agregados Artificiales

La tecnología en la producción de materiales ha avanzado y hoy es posible encontrar agregados artificiales que son producidos en industrias a partir de otras materias primas, como arcillas expandidas, escoria de altos hornos y limaduras de hierro. En algunas ocasiones se utilizan productos orgánicos que son mezclados con agregados naturales con el fin de

conseguir determinada característica en un concreto o para abaratar los costos. (Gutiérrez de López, 2003, p. 16).

Alcali

Los álcalis son sustancias que están presentes en las arcillas y algunas materias primas de los cementos y pueden generar reacciones adversas en los concretos y morteros debido a su alto nivel de expansión. “Los álcalis son sustancias compuestas por óxidos de sodio y de potasio y pueden reaccionar con sílice activa” (Gutiérrez de López, 2003, p. 37).

Arena Normalizada

Arena de sílice, compuesta en gran parte por granos de cuarzo de alta pureza, de forma esférica, usada para preparar morteros en el ensayo de cementos hidráulicos (Norma Técnica Colombiana INCONTEC, 2016).

Arena 20-30

Arena normalizada, gradada predominante entre el tamiz de 850 μm (No. 20) y el tamiz de 600 μm (No. 30) (Norma Técnica Colombiana INCONTEC, 2016).

Arena gradada

Arena normalizada, gradada predominantemente en el tamiz de 600 μm (No. 30) y el tamiz de 150 μm (No. 100) (Norma Técnica Colombiana INCONTEC, 2016).

2.3.2. Cemento Hidráulico

Según (Gutiérrez de López, 2003, p. 35) “La palabra cemento se usa para nombrar a toda sustancia que tenga condiciones de pegante cualquiera sea su origen. El cemento Portland se define como el producto obtenido al pulverizar el Clinker con adición de yeso”. El cemento Portland está compuesto principalmente de Hidróxido de Calcio, Sílice, Alúmita y Óxido de Hierro, además de una sustancia adicional que es el yeso hidratado que se adiciona al clinker durante la molienda teniendo como finalidad retardar el tiempo de fraguado de la mezcla de cemento. (Gutiérrez de López, 2003, p. 35).

A parte de las sustancias antes mencionadas, es posible que al cemento Portland se le agreguen otras sustancias en las fases de producción, específicamente en la molienda del Clinker, un ejemplo de ello es el cemento portland siderúrgico, al cual se le adiciona escoria de hierro, así como el cemento portland puzolánico, el cual tiene adición de puzolanas.

2.3.3. Vidrio

Con respecto a la raíz etimológica del término vidrio se ha definido a la palabra del latín *vitrum* y del cual se han derivado las voces de todas las lenguas románticas, mientras que el origen del término anglosajón *glass* existen algunas discrepancias, pues dicha palabra puede derivarse del latín *glacies* (hielo), cabe resaltar que la terminología griega para referirse al vidrio no ha sido adoptada por otros vocablos. (Fernández Navarro, 2003).

Morey (1936) lo define como: “un vidrio es una sustancia inorgánica en una condición análoga a la de su estado líquido y continua con éste, que, como consecuencia de un cambio reversible en su viscosidad durante el enfriamiento”.

2.3.4. Puzolanas

Las puzolanas son “productos naturales o artificiales, silíceos que en sí mismos poseen poca propiedad aglomerante, pero finamente molidas, a temperaturas ordinarias y en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio formando compuestos que sí tienen propiedades aglomerantes e hidráulicas”. (Tobon, 2000. p.2).

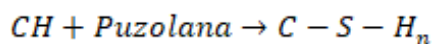
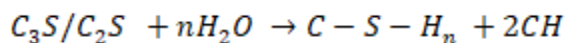
2.4. Marco Teórico

Los morteros de cemento están presentes en la mayoría de edificaciones pues este es ideal cuando se necesiten altas resistencias iniciales o resistencias elevadas, una vez que el mortero ha endurecido, se puede usar como aglomerante los cementos naturales o los cementos Portland. Las condiciones o propiedades de trabajabilidad varían en función de la proporción cemento: arena usada.

En tal sentido, diversos autores han realizado estudios materiales que cumplan la función del cemento Portland como aglomerante en los morteros, Trezza & Rahhal (2018) afirman que “una interesante aplicación implica el reemplazo parcial del Clinker por materiales residuales de composición química y mineralógica compatible”. Además, dichos autores citando a Shi & Zheng (2007) proponen que, el vidrio podría comportarse como material puzolánico cuando el tamaño de partícula es tan fino como cemento, debido a su alto contenido de sílice en estado amorfo. Tomando la definición de puzolana de ASTM (2012), como “materiales de silicio o silicio-aluminosos los cuales finamente molidos y presencia de humedad reaccionan con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente, formando compuestos con propiedades cementantes”.

Sabir, Wild, & Bai, (2001) afirman que la sílice presente en vidrio finamente molido reacciona con el hidróxido de calcio que se genera en el proceso de hidratación del cemento portland.

Las reacciones son de tipo:



De acuerdo con la norma técnica americana ASTM C618 y el requisito de composición química, el vidrio común puede clasificarse como puzolana natural de clase N si el contenido de Oxido de Sodio (Na₂O) en el polvo de vidrio no es excesivamente alto (Shi & Zheng, 2007).

Shao et al. (2000) afirman que el polvo de vidrio de tamaño de partícula menor o igual a 38µm alcanza la resistencia mínima a la prueba de 7 días y alcanza un aumento a los 28 días de curado en agua con probetas de mortero con adición parcial de polvo de vidrio del tamaño mencionado; mientras que, la mezcla de polvo de vidrio con tamaño de partícula de 150 µm tenía una resistencia muy por debajo de la esperada, esto debido a que es demasiado grueso para servir de puzolana.

Por su parte, Nassar & Soroushian, (2011) concluyen que “cuando el vidrio se usa en partículas finas (13 µm) como reemplazo parcial de cemento en concreto, se estima que sufre una reacción puzolánica que da como resultado una microestructura mejorada de material con concreto reciclado” (p. 376), con lo cual se tiene a través de la formación de una microestructura más densa y menos permeable que se espera sea el resultado del efecto del tamaño submicrónico de las partículas de vidrio.

Sin embargo, algunos investigadores advierten que antes de usarse el vidrio molido en las mezclas cementitas deben realizarse estudios de Reactividad Álcali-Sílice (RAS) (Rodríguez & Ruiz, 2016, p. 54). Teniendo en cuenta que las partículas de vidrio no generarán expansión perjudicial una vez que son más pequeños que 300 μm , pero el polvo de vidrio tiene un contenido muy alto de álcalis, y los álcalis en el polvo de vidrio se pueden lixiviar, lo que resulta una expansión de la reacción álcali-agregado (AAR), cuando el agregado es alcalino reactivo (Shi & Zheng, 2007, p. 244).

2.5. Marco Legal

Con motivo de establecer una base normativa de los procesos y ensayos pertinentes relacionados con el mortero y el vidrio pulverizado se consultan normas del Instituto Colombiano de Normas Técnicas (INCONTEC), la Norma Sismorresistente Colombiana (NSR-10) y la norma americana ASTM.

• NSR-10 Título D (Mampostería Estructural)

El título D de este reglamento establece los requisitos mínimos de diseño y construcción para las estructuras de mampostería y sus elementos. Específicamente lo concerniente a la calidad de los materiales en la mampostería estructural como los es el

mortero de pega y el mortero de relleno, los cuales deben cumplir los requisitos generales estipulados en las normas NTC 3329, NTC 3356 y NTC 4048.

En morteros de pega se ha hecho la clasificación de los morteros por propiedad o por proporción, estableciendo 4 tipos de morteros que van desde de tipo H hasta tipo N, la cantidad de componentes de los morteros de pega debe basarse en pruebas de laboratorio y se tipifican como H, M, S o N, teniendo presente una dosificación mínima y de acuerdo a la resistencia a la compresión, como se muestra en la figura 5.

Mortero tipo	Especificación de los morteros por propiedad ⁽¹⁾			Especificación de los morteros por proporción				
	Resistencia mínima a la Compresión f'_{cp} MPa ⁽²⁾	Flujo en (%) ⁽³⁾	Retención Mínima de Agua	Cemento Portland	Cal hidratada ⁽⁴⁾	Cemento para Mampostería ⁽⁷⁾	Arena/Material Cementante ⁽⁵⁾	
							Mín.	Máx.
H	22.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.00	2.5
M	17.5	115-125	75%	1	0.25	no aplica	2.25	3.0
				1	no aplica	1	2.25	2.5
S	12.5	110-120	75%	1	0.25 a 0.50	no aplica	2.50	3.5
				0.5	no aplica	1	2.50	3.0
N ⁽⁶⁾	7.5	105-115	75%	1	0.50 a 1.25	no aplica	3.00	4.5
				0	no aplica	1	3.00	4.0

Figura 5. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción. NSR-10 Título D. Obtenido de: <https://www.idrd.gov.co/sitio/idrd/sites/default/files/imagenes/4titulo-d-nsr-100.pdf>

- **NTC 111:2018** Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cemento hidráulico.

Esta norma técnica da los lineamientos y especificaciones de cómo debe ser el equipo de mesa de flujo utilizada en el ensayo de fluidez, así como el método de ensayo NTC 5784.

En la presente norma se establecen las medidas establecidas para la mesa de flujo y soporte, el molde y el calibrador, así como el procedimiento de montaje de la mesa de flujo y la lubricación de la misma.

- **NTC 5784:2017** Método para determinar la fluidez de morteros de cemento hidráulico.

Esta norma técnica establece el procedimiento de ensayo para calcular la fluidez de un mortero basado en el equipo de la NTC 111 y dando el parámetro de control de calidad de las pastas con cemento portland.

La fluidez se mide como el aumento promedio del diámetro de la base de una masa de mortero expresado como un porcentaje con respecto al diámetro de la base original de dicha masa.

- **NTC 220:2017** Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado.

Este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico utilizando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado. El mortero que se utiliza está formado por una relación 1:2.75 veces partes de cemento y arena respectivamente, en proporción en masa. Los cementos se mezclan agua de mezclado debe ser aquella que produzca una fluidez de 110 +/- 5 en 25 golpes con la mesa de flujo. Los cubos de 50 mm o 2 pulgadas se apisonan en dos capas. Y se mantienen por un día en el molde bajo una cámara húmeda, luego se desmoldan para ser sumergidos en una solución de agua con cal hasta el momento del ensayo.

- **NTC 3937:2019** Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico.

Esta norma es aplicable a la arena normalizada utilizada en los ensayos de cemento hidráulicos. Los valores indicados en unidades si se consideran normativos y establece la gradación para arena 20-30 y para arena gradada, la cual debe cumplir con los requisitos mostrados en la tabla 1.

Tabla 1.

Requisitos de la arena normalizada

Características	Arena 20-30	Arena Gradada
Gradación porcentaje que pasa a través del tamiz		
1.18 mm (No. 16)	100	100
850 µm (No. 20)	85 a 100	100
600 µm (no. 30)	0 a 5	96 a 100
425 µm (No. 40)		60 a 75
300 µm (No. 50)		16 a 30
150 µm (No. 100)		0 a 4

Nota: Obtenido de INCONTEC, Norma NTC 3937. <https://tienda.icontec.org/gp-cementos-arena-normalizada-para-ensayos-de-cemento-hidraulico-ntc3937-2019.html>

- **NTC 33:2019** Método de ensayo para determinar la finura del cemento hidráulico por medio del aparato Blaine de permeabilidad al aire.

Esta norma técnica establece el método de ensayo para conocer la finura de un cemento portland mediante la utilización del aparato de Blaine, el cual mide este parámetro en términos de superficie específica, expresada como área total en centímetros cuadrados por gramos de cemento.

- **NTC 221:2019** Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico

Esta norma tiene como objetivo determinar la densidad del cemento hidráulico. Dando un parámetro que sirve como control de calidad y además en el diseño de mezclas de mortero y concreto.

El equipo utilizado para este ensayo es el Frasco ILe Chatelier, que es llenado con un líquido como queroseno libre de agua o nafta con una densidad mayor a 0.73 g/mL.

- **NTC 1512:2018** Ensayo para determinar la actividad puzolánica en cementos con puzolana.

Esta norma describe el método para medir la actividad puzolánica en cemento con puzolana. La actividad puzolánica se evalúa comparando la concentración del ion calcio, expresado como óxido de calcio presente en la solución acuosa en contacto con el cemento hidratado, después de un periodo de tiempo establecido, con la cantidad de ion calcio capaz de saturar una solución de la misma alcalinidad. El cemento se considera que cumple ensayo, es decir, da un resultado positivo, si la concentración de ion calcio en la disolución es menor que la concentración de saturación.

- **NTC 3512:2014** Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos.

Esta norma técnica establece las condiciones para el almacenamiento de las probetas de mortero o concreto cuando se realizan para el control de calidad, así como el tiempo y solución alcalina donde se curan dichas muestras.

- **ASTM C311:2018** Métodos de prueba estándar para tomar muestras y analizar cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en concreto de cemento Portland.

Esta norma tiene una serie de ensayos que cubren los procedimientos para tomar muestras y analizar cenizas volantes y puzolanas en bruto o calcinadas para su uso en concreto de cemento portland.

Uno de esos ensayos está relacionado con el índice de actividad de resistencia: la prueba del índice de actividad de resistencia se usa para determinar si la ceniza volante o la puzolana natural dan como resultado un nivel aceptable de desarrollo de resistencia cuando se usa con cemento hidráulico en concreto. Dado que la prueba se realiza con mortero, los resultados pueden no proporcionar una correlación directa de cómo las cenizas volantes o la puzolana natural contribuirán a la resistencia en el concreto.

- **ASTM C618:2019** Especificación estándar para cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales crudas o calcinadas para uso en concreto.

Esta especificación cubre cenizas volantes de carbón y puzolanas naturales en bruto o calcinadas para su uso en concreto donde se desea acción cementosa o puzolánica, o ambas, o donde se pueden desear otras propiedades normalmente atribuidas a cenizas volantes o puzolanas, o donde ambos objetivos deben ser logrado. Las cenizas volantes y las puzolanas naturales deben cumplir con los requisitos de composición química y los requisitos físicos prescritos. Los materiales deben ser probados para finura, índice de actividad de resistencia, requerimiento de agua, solidez y expansión.

- **DECRETO 0280 DEL 2015.** Comisión Interinstitucional de Alto Nivel para el alistamiento y la efectiva implementación de la Agenda de Desarrollo Post 2015 y sus Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

El gobierno nacional aunado al comité de las Naciones Unidas para el desarrollo de los Objetivos de Desarrollo Sostenible gestiona cada uno de estos objetivos en la agenda 2030; este proyecto involucra el objetivo 11: *lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles* y el objetivo 12: *Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles*; debido a que con la reutilización de vidrio reciclado en mezclas de mortero se puede reducir el impacto generado con el vidrio desechado en rellenos sanitario u otros lugares sin tratamiento final.

- **RESOLUCIÓN 1407 DE 2018.** Por el cual se reglamenta la gestión ambiental de los residuos de envases y empaquetes de papel, cartón, plástico, vidrio, metal y se toman otras determinaciones.

Esta resolución reglamenta la disposición final y la reutilización de los envases, cartón, vidrio y metal, así como un plan a 10 años en el cual se establecen unas metas de reducción y reutilización de dichos envases. Para el caso específico de este proyecto toma relevancia el tema del vidrio, pues según un estudio realizado en 2015 por el ministerio del medio ambiente, el porcentaje de residuos de estos envases es 30% del total de residuos de este tipo.

Capítulo 3. Diseño Metodológico

3.1. Tipo de investigación.

El enfoque del presente proyecto corresponde a una investigación de tipo experimental y de carácter cuantitativo. En términos de Sampieri el enfoque cuantitativo es “Un enfoque que utiliza la recolección de datos para comprobar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías.” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 4).

Así mismo, (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 129) define el tipo de investigación experimental como “un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas causas antecedentes), para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos consecuentes), en una situación de control para el investigador”. Por lo tanto, este tipo de estudios tiene como propósito conocer la relación que exista entre dos o más conceptos, categorías o variables en un concepto en particular.

Para este proyecto se utilizarán variables tales como la dosificación del porcentaje de sustitución parcial de vidrio pulverizado por cemento portland y las edades a las cuales se ensayaran las probeta en la prueba de resistencia a la compresión, esto con el fin de conocer el grado de relación entre estas variables, pues autores como (Trezza & Rahhal, 2018, p. 7)

indican que hay una variación de la resistencia a la compresión a medida que aumentan los días de curado de las probetas de mortero.

Dado el alcance correlacional de la investigación es necesario formular una hipótesis que requiera establecer una relación entre las variables antes mencionadas, por lo tanto, se plantea como hipótesis que: al aumentar la edad de la muestra esta alcanza una mayor resistencia a la compresión con un porcentaje de sustitución de vidrio pulverizado por cemento portland alrededor del 20%.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población que sea determinado para este estudio corresponde a las dosificaciones o porcentajes de sustitución en masa de vidrio pulverizado por cemento portland que se encuentran en un rango de 0% hasta 30%, teniendo como edades para el ensayo 7, 14 y 28 días de curado.

3.2.2. Muestra

Para determinar el tamaño de la muestra se ha recurrido al método de análisis factorial, pues este “fundamentalmente lo que se pretende con el análisis factorial (análisis de Componentes Principales o de Factores Comunes) es simplificar la información que nos da una matriz de correlaciones para hacerla más fácilmente interpretable”. (Morales Vallejo, 2011, p. 3).

En tal sentido, se ha tomado como porcentajes de sustitución en masa de vidrio pulverizado por cemento portland para la fabricación de probetas de mortero normalizado, el 10%, 20%, 30%, pues así se tiene un amplio espectro de las variaciones que pueda haber con respecto a la muestra patrón, la cual tiene un porcentaje de sustitución de 0%; por otro parte, se estableció como edades para los ensayos los 7, 14, 28 días de curado en solución alcalina.

El análisis factorial determina los niveles y factores en los cuales se va a realizar la investigación, para este estudio se ha definido como factores a las dosificaciones de porcentajes de sustitución antes mencionadas y la edad de los ensayos, teniendo 4 y 3 niveles respectivamente, tal como se representa en la tabla 2.

Tabla 2.

Diseño del análisis factorial de la muestra

Dosificación	Edad (días)		
	7	14	28
0%	RESULTADOS DE ENSAYO DE RESISTENCIA		
10%			
20%			
30%			

Nota: Fuente: (Autores, 2020)

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de la información

Las técnicas de recolección de información empleadas para desarrollar la investigación, corresponde a la Norma Técnica Colombiana (NTC), la Norma Americana ASTM y la Norma Sismorresistente colombiana (NSR-10) como fuente primaria y recopilación bibliográfica de artículos de revistas científicas, tesis de grado y libros académicos.

3.4. Diseño experimental

Los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula. (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, p. 130). En tal sentido se hará uso del diseño experimental por análisis factorial, mediante el software Minitab 19 en su versión de prueba gratuita por un mes. (ver Anexo 1).

Se eligió el diseño factorial completo, puesto que los factores no tienen el mismo número de niveles, para el factor de edad de la muestra se tienen los niveles de 7, 14 y 28 días y para el factor de la dosificación se tienen los factores de 0%, 10%, 20% y 30%; por medio del software se hicieron las combinaciones de los factores a analizar, estableciendo la aleatoriedad entre ellos y teniendo 3 repeticiones o réplicas. En la tabla 3 se muestran el diseño experimental.

Tabla 3.
Diseño experimental

Orden Aleatorio	Orden de Corrida	Dosificación (%)	Edad del ensayo (días)
5	1	20	14
1	2	30	7
2	3	0	14
7	4	0	28
8	5	10	7
3	6	30	14
4	7	10	14
9	8	10	28
12	9	0	7
10	10	20	7
6	11	20	28
11	12	30	28

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

3.5. Análisis de la información

Se determinó que la cantidad de vidrio desperdiciado y que no es reciclado en las 6 vidrierías de la zona céntrica del municipio de Ocaña (Vidrios y Aluminios Ocaña, Car-Vidrios, Almacén Vidrios Planos, Cristalum, Vidrios y Marquetera Ocaña y Vidrios Navarro) durante un mes equivale a 2152,24 kg, los cuales van directamente a la basura y posteriormente al relleno sanitario.

De cada vidriería se obtuvieron 5 tipos de vidrio diferente por sus características físicas, se denominaron de la siguiente manera: V. transparente, V. azul, V. verde, V. marrón, Espejo y Espejo azul. En total se recolectaron 2152,24 kg de vidrio en un mes. Tal como se muestra en la figura 6

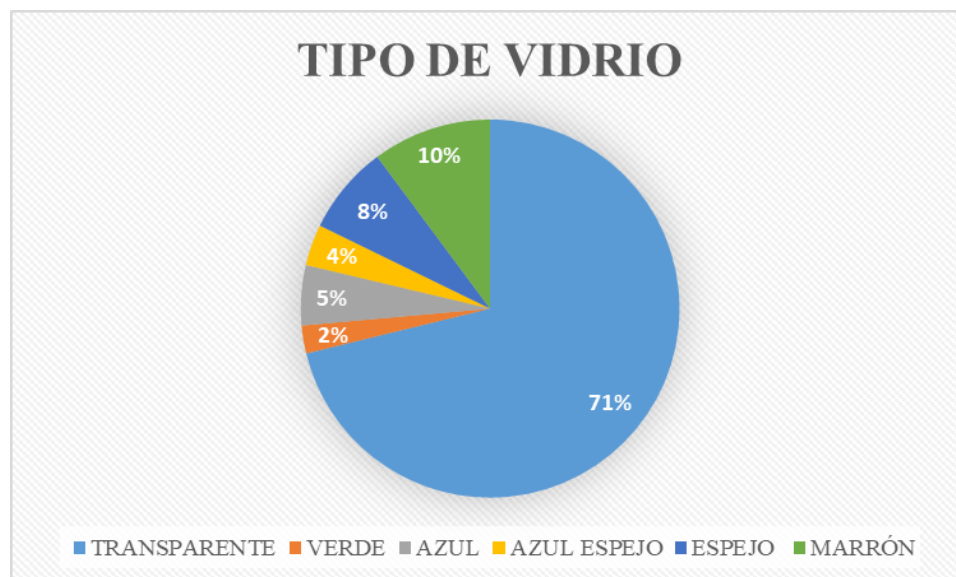


Figura 6. *Tipo de vidrio según recolección de vidrio realizada en las diferentes vidrieras de Ocaña.* (Autores, 2020)

3.6. Cronograma de actividades

La tabla 4 muestra el cronograma de actividades a desarrollar de acuerdo a los objetivos planteados del proyecto y el plazo de ejecución de cada uno de ellos. Estableciendo un plazo de ejecución del proyecto de 4 meses.

Capítulo 4. Resultados

4.1. Establecer las características físicas del cemento y el vidrio pulverizado

Para el desarrollo del proyecto se definieron las materias primas a utilizar, las cuales fueron el cemento portland tipo 1 de uso general y el residuo de vidrio pulverizado, inicialmente se buscó el residuo de vidrio en su estado natural, para lo cual se acudió a las vidrieras de la zona centro del municipio de Ocaña (Vidrios y Aluminios Ocaña, Car-Vidrios, Almacén Vidrios Planos, Cristalum, Vidrios y Marquetera Ocaña y Vidrios Navarro), en estas vidrieras se logró recolectar 2152,24 kilogramos de residuo vidrio de 5 tipos diferentes: vidrio transparente, vidrio azul, vidrio verde, vidrio marrón, espejo azul, la figura 7 muestra el peso de recolección del residuo de vidrio ; de estos tipos de vidrio solo se utilizó el vidrio plano transparente, pues según (Dyer & Dhir, 2001) este tipo de vidrio tiene incidencias en la resistencia a la compresión del mortero, en tal sentido se procesó el residuo de vidrio estableciendo una metodología para obtener un material con un tamaño de partícula inferior a 38 μm , con base en lo descrito por Shao, Lefort , Moras y Rodríguez, (2000).



Figura 7. Recolección de residuo de vidrio. (Autores, 2020)

El proceso de molienda del residuo de vidrio se hizo con la máquina de desgaste o máquina de los ángeles, puesto que en las instalaciones de los laboratorios de la universidad no se cuenta con un molino específico para esta actividad, dado esto, se desarrolló la metodología para obtener un tamaño de partícula homogéneo después de cada proceso de molienda, la cual consistió en utilizar 24 esferas de acero en moliendas de 500 vueltas en dos tandas, para tener como resultado un material molido después de 1000 vueltas en la máquina de desgaste, dicho material fue tamizado en la malla 1/4'' de diámetro, el material pasante era nuevamente molido en la máquina de desgaste con 24 esferas a 500 vueltas, la figura 8 muestra este proceso.



(a)



(b)

Figura 8. Molienda y tamizaje del residuo de vidrio. (Autores, 2020)

El material resultante del proceso anterior era tamizado en una tamizadora eléctrica por un arreglo de mallas desde el tamiz #40 (0,425 mm), seguido por el tamiz #200 (0,75 mm) y el tamiz #400 (38 μm), tamizando alrededor de un kilogramo de material en la malla superior para obtener aproximadamente 75 gramos residuo de vidrio con un tamaño de partícula inferior a 38 μm , tal como se muestra en la figura 9.



Figura 9. Tamizaje del residuo de vidrio. (Autores, 2020)

El material tamizado fue almacenado en bolsas plásticas con cierre hermético sin aire incluido para evitar la acción de la intemperie y de este modo no tener ninguna reacción del residuo de vidrio con el aire; luego de realizar el proceso anterior en repetidas ocasiones se logró obtener aproximadamente 1500 gramos de residuo de vidrio con un tamaño inferior a 38 μm , muestra suficiente para realizar las pruebas de laboratorio y especímenes a ensayar con la base en la metodología establecida, el material almacenado luego del proceso del tamizado se muestra en la figura 10.



Figura 10. Residuo de vidrio pulverizado. (Autores, 2020)

Una vez obtenido el residuo de vidrio con el tamaño de partícula deseado se procedió a realizar los ensayos a las materias primas, como lo es la densidad del residuo de vidrio y del cemento portland de uso general, así como los resultados de la superficie específica de Blaine o finura proporcionados por el grupo de investigación Gigma.

4.1.1. Densidad de las materias primas

El ensayo de densidad se realizó de acuerdo a lo establecido en la NTC 221 “Método de ensayo para determinar la densidad del cemento hidráulico” y fue aplicada tanto al cemento portland como al residuo de vidrio con el tamaño de partícula inferior a $38\mu\text{m}$, la figura 11 muestra los materiales utilizados para realizar el ensayo de densidad, como lo son el queroseno libre de agua con una densidad mayor a 0.73 g/mL , el frasco de Le Chatelier, el embudo, la

espátula y el termómetro. El procedimiento consistió en la graduación del líquido inflamable en el frasco Le Chatelier hasta quedar situado entre la marca de 0 mL a 1 mL y ser pesado, posteriormente se introdujo en el agua para tomar la primera lectura.



Figura 11. Ensayo de densidad del cemento. (Autores, 2020)

Así pues, la nota 4 de la NTC 221 establece que para cemento hidráulico se debe utilizar una muestra de 64 gramos, los cuales fueron introducidos cuidadosamente con el embudo plástico en el frasco, procurando siempre que no quedara parte de la muestra adherida a las paredes del envase, registrando la masa, y llevando al agua para mantener una temperatura constante, tal como se aprecia en la figura 12, finalmente se mueve el frasco en giros con el envase inclinado para eliminar las burbujas de aire atrapadas y de este modo registrar la lectura final manteniendo una temperatura constante en todo el proceso..

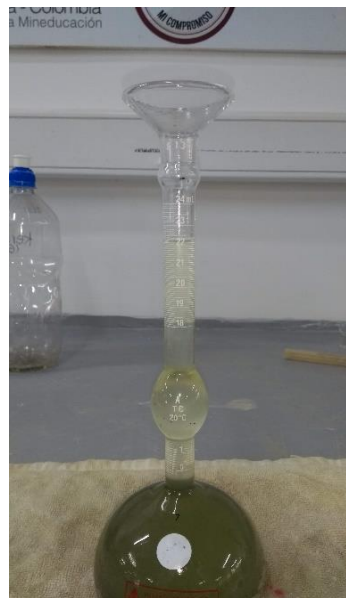


Figura 12. Baño maría del Frasco le Chatelier para densidad de cemento. (Autores, 2020)

El procedimiento anteriormente descrito basado en la NTC 221 para calcular la densidad del cemento hidráulico, se usará para calcular la densidad del residuo de vidrio debido ya que el tamaño de partícula es muy pequeño y que se infiere tiene características cementantes, sin embargo, la cantidad de material utilizada en el ensayo no fue la misma que en el cemento hidráulico, pues en la nota 4 de la presente norma se establece que para otros tipos de cementos se debe utilizar algo menos de material, entonces se decidió utilizar 55 gramos de residuo de vidrio con tamaño de partícula inferior a $38\mu\text{m}$, la figura 13 (a) muestra la cantidad de material utilizado y la figura 13 (b) muestra la lectura final del ensayo.



(a)



(b)

Figura 13. Ensayo de densidad para el residuo de vidrio. (Autores, 2020)

La tabla 5 muestra los resultados de los ensayos de densidad a los materiales cementantes, en la cual se desarrollaron 3 ensayos para cada material, encontrando que el cemento portland tiene una densidad media de 2.94 g/cm^3 , mientras que el residuo de vidrio tiene una densidad media de 2.5 g/cm^3 , lo que significa que el residuo de vidrio tiene un menor peso por unidad de volumen, estando en concordancia con lo descrito por (Mitra, Srimany y Gopal, 2016).

Tabla 5.
Densidad de las materias primas

Material	Muestra	Densidad g/cm ³	Densidad media
Cemento Hidráulico	C1	2,93	2,94 g/cm ³
	C2	2,96	
	C3	2,94	
Vidrio Pulverizado	V1	2,54	2,50 g/cm ³
	V2	2,49	
	V3	2,48	

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

4.1.2. Superficie específica de Blaine

La superficie específica de Blaine o finura del cemento hidráulico es un ensayo que mide la superficie específica expresada como área total en centímetros cuadrados por gramo de cemento, utilizando el aparato de Blaine de permeabilidad al aire, dicho ensayo fue realizado por el grupo de investigación Gigma y los resultados fueron compartidos para el desarrollo del presente trabajo de grado, la norma técnica que se utilizó para el ensayo de finura del cemento hidráulico y del residuo de vidrio fue la NTC 33 o ASTM C204-18), los materiales utilizados en este ensayo fueron los mismo que para el ensayo de densidad descrito anteriormente.

Para el desarrollo del ensayo de finura se utilizó una masa de 3.066 gramos de cemento portland y 2.608 gramos para el residuo de vidrio, estas masas fueron calculadas de acuerdo a la calibración del equipo y teniendo en cuenta la densidad de la muestra, los resultados obtenidos se observan en la tabla 6.

Tabla 6.
Superficie específica de Blaine para las materias primas

Ensayo Número	Cemento		Residuo de vidrio	
	Peso muestra Gramos	Tiempo Segundos	Peso muestra Gramos	Tiempo Segundos
1	3,066	221,87	2,086	67,37
2	3,066	214,23	2,086	67,94
3	3,066	214,27	2,086	69,38
Promedio		216,79		68,23
Superficie específica de Blaine	3634,5 cm ² /g		2569,8 cm ² /g	

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos se pudo demostrar que el residuo de vidrio tiene superficie específica de 2569.8 cm²/g o 256.98 m²/Kg y el cemento portland de 3634.5 cm²/g o 363.45 m²/Kg, lo que significa que el cemento portland tiene una mayor superficie específica que el residuo de vidrio pulverizado, y según lo descrito por Cyr, Lawrence y Ringot (2005), la superficie específica está relacionada con el tamaño de las partículas, por lo tanto, el vidrio pulverizado al tener un tamaño de partícula mayor que el cemento tiene una finura inferior a este, lo dicho anteriormente influye en la hidratación de la mezcla, haciéndola más lenta cuando se tenga incorporación de residuo de vidrio pulverizado.

4.1.3. Imágenes en microscopio del residuo de vidrio y mortero

4.1.3.1. Imágenes en microscopio del residuo de vidrio

El residuo de vidrio pulverizado tiene un tamaño de partícula inferior a $38\ \mu\text{m}$, dado que todo el material utilizado para los ensayos pasó por la malla del tamiz #400 que tiene una abertura de $38\ \mu\text{m}$, sin embargo, el tamaño de partícula no es homogéneo y por medio de tamizaje es difícil conocer la gradación de este material porque no hay tamices que permitan hacer esta labor, por tal motivo se optó por el microscopio óptico que se encuentra en el laboratorio de metales y aleaciones de la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, este microscopio tiene una capacidad para ampliar una imagen 10X, 50X, 100X, 300X debido a que tiene 4 lentes para ver de una mejor manera objetos a distintas distancias. En la figura 14 se muestra una imagen obtenida del grupo de investigación Gigma, de 1mm de largo por 0,76 mm de alto del residuo de vidrio pulverizado, en esta se tiene una escala de $50\ \mu\text{m}$ y se observan partículas de distintos diámetros inferiores a $38\ \mu\text{m}$.

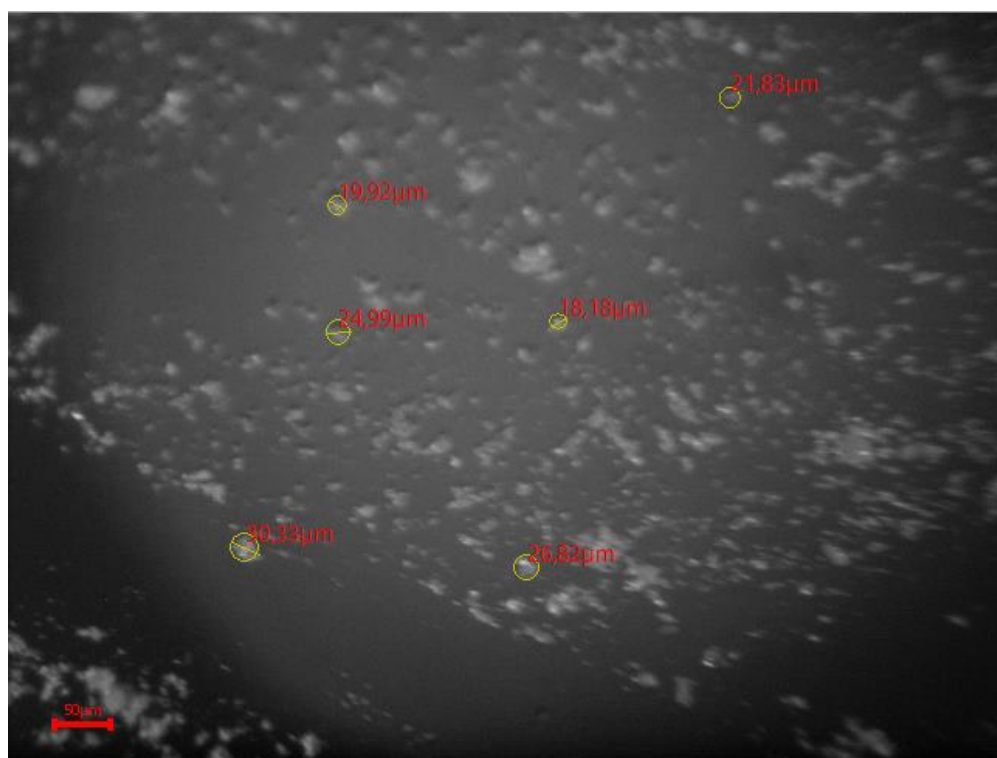


Figura 14. Imagen microscópica del residuo de vidrio pulverizado. Fuente (GIGMA, 2020)

4.1.3.2. Imágenes en microscopio del mortero de cemento con sustitución de residuo de vidrio pulverizado

El mortero de cemento con sustitución de residuo de vidrio pulverizado al 30% también fue examinado en el microscopio óptico, se obtuvo una imagen a 100 aumentos de un trozo de cubo de mortero, el cual fue observado mediante el software Toup View con el rango de color verde del lente de microscopio, en ella se puede ver la aglomeración de la arena gradada con el material cementante a una escala de 50 μm , tal como se observa en la figura 15.

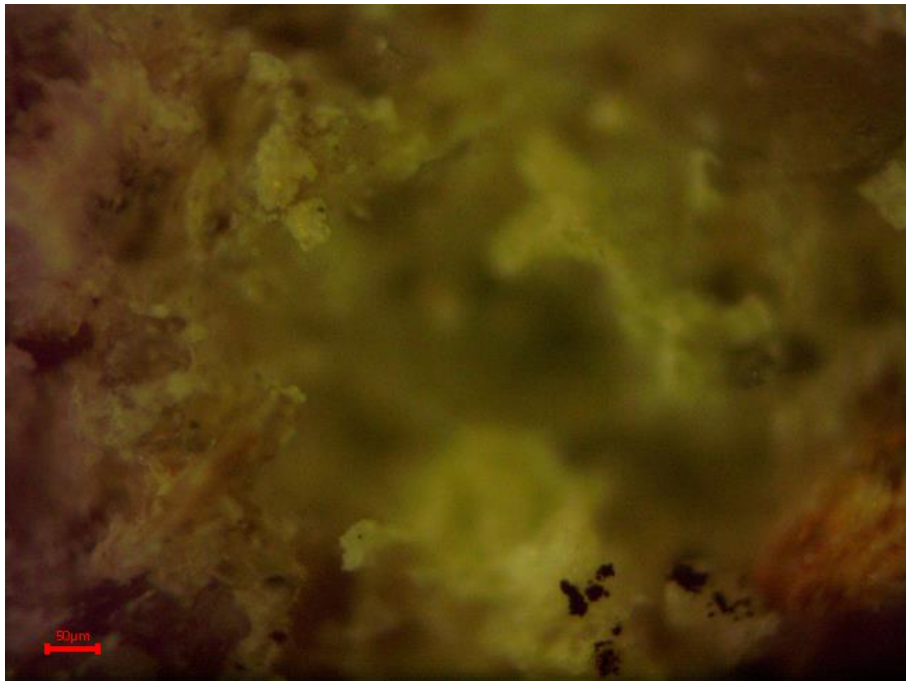


Figura 15. Imagen microscópica del mortero. (Autores, 2020)

4.2. Determinar la resistencia a la compresión del mortero normalizado para diferentes porcentajes de sustitución de cemento por vidrio pulverizado.

La evaluación de la resistencia a la compresión del mortero normalizado requiere de un diseño de experimento, el DOE (Desing Of Experiments) está planteado en la metodología, y este se basa en el diseño factorial general, en el cual hay dos factores con 3 y 4 niveles, los factores corresponden a la dosificación de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado y la edad de ensayo de estos, así pues, el diseño factorial general se realizó en el Software estadístico Minitab en su versión 19, arrojando una tabla con orden estadístico, orden de corrida, dosificación y edad, dicha información se muestra en la tabla 7, debido a la complejidad que representa realizar un cubo de mortero de forma individual se decidió hacer las 3 réplicas correspondiente a cada serie de forma conjunta, con lo cual la información mostrada solo muestra la serie de cubos de mortero sin repetición

Tabla 7.
Orden de corrida del diseño experimental.

Orden Estadístico	Orden Corrida	Dosificación (%)	Edad (días)
7	1	20	14
10	2	30	7
2	3	0	14
8	4	0	28
1	5	10	7
12	6	30	14
4	7	10	14
11	8	10	28

Tabla 8. *Continuación*
Orden de corrida del diseño experimental

Orden Estadístico	Orden Corrida	Dosificación (%)	Edad (días)
5	9	0	7
9	10	20	7
6	11	20	28
3	12	30	28

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

La norma NTC 220 utilizada para el desarrollo de este objetivo establece parámetros tanto para el método de ensayo como para los materiales a utilizar, por lo cual es necesario conocer estos valores a establecer en la ejecución del proyecto, dado esto, la fluidez de la muestra se erige como un factor fundamental para conocer la manejabilidad del mortero, y tiene un valor de 110 ± 5 , este valor es obtenido a partir del ensayo de fluidez (NTC 5783) y depende de muchos factores, entre los cuales está la humedad de la arena, por lo que se decidió mantener una relación agua cemento fija y determinar el valor del índice de fluidez para cada mezcla realizada, esta fase de establecer la fórmula de trabajo se realizó con la mezcla patrón, es decir la mezcla con el 0% de sustitución de vidrio pulverizado por cemento.

1. Sin embargo, se planteó tener una elaboración de la mezcla estandarizada y para esto se hizo uso de la norma NTC 112, en la que se establece el procedimiento de preparación de la mezcla de mortero, el procedimiento de mezclado es el siguiente: En una tara agregar el agua definida para la mezcla

2. Agregar la mezcla de material cementante (cemento + residuo de vidrio según corresponda)
3. Dejar en reposo durante 30 segundos
4. Mezclar con durante 30 segundo a velocidad lenta (con mezcladora de mortero o batidora eléctrica)
5. Dejar en reposo por 15 segundos y reintegrar manualmente la mezcla en el recipiente
6. Mezclar la pasta a velocidad media durante 60 segundos
7. Agregar toda la arena lentamente durante 30 segundos a velocidad lenta
8. Mezclar la pasta de mortero durante 20 segundos a velocidad media
9. Dejar reposar la mezcla por 90 segundos
10. Reincorporar toda la mezcla de forma manual en los primeros 15 segundos y tapar el recipiente
11. Finalmente mezclar a velocidad media por 60 segundos

Una vez realizado este procedimiento se determinó la relación agua cemento con la cual el índice de fluidez sea de 110 ± 5 , la figura 16 muestra el ensayo de fluidez para la muestra patrón sin sustitución de residuo de vidrio.



Figura 16. Ensayo de fluidez para determinar la fórmula de trabajo. (Autores, 2020)

Los resultados de los ensayos de fluidez para obtener el valor dado por la NTC 220 se muestran en la tabla 8, donde inicialmente se empezó con 157 ml de agua hasta 175 ml de agua, dando este último valor la fluidez necesaria para cumplir con el requisito de la norma antes mencionada, lo cual deja una relación de agua – cemento de 0.8, es decir que de 1 parte de material cementante se utilizaron 0.8 partes de agua en masa.

Tabla 9.

Resultados ensayo de fluidez

Cantidades				
Muestra	Cemento (gr)	Arena (gr)	Agua ml	% Fluidez
1	220	605	157	92,19
2	220	605	167	98,79
3	220	605	175	108,47

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

Con respecto a los materiales, se decidió utilizar el cemento gris de uso general de la marca Argos y tal como lo indica la NTC 220 el uso de arena gradada normalizada seca, la cual se rige

por la NTC 3937, y exige una gradación estricta, difícil de conseguir en las arenas de la zona, la tabla 1 reseñada en el marco legal muestra los requisitos que debe tener esta arena para utilizarse en cubos de mortero, sin embargo el rango entre los tamices #40 y #50 es muy alto, lo que hace que cualquier arena del municipio de Ocaña no clasifique o esté dentro los rangos de su granulometría, así pues se decidió la “fabricación” de la arena gradada, puesto que fue necesario tamizar altas cantidades de arena para obtener los valores dados en la granulometría, el proceso de tamizado de la arena se muestra en la figura 17.



Figura 17. Tamizado de la arena gradada normalizada. (Autores, 2020)

El proceso de homogenización de la arena se realizó con una mezcladora eléctrica, para que todas las partículas quedaran mezcladas y se tuviera una arena con una gradación que cumpla lo especificado en la NTC 3937, el proceso de mezclado se muestra en la figura 18.



Figura 18. Mezclado de la arena gradada normalizada. (Autores, 2020)

4.2.1. Fluides de las mezclas de mortero.

El ensayo de fluidez está contemplado en la norma NTC 220 para conocer la manejabilidad de la mezcla de mortero y debe tener un parámetro de calidad de 110 ± 5 , como se mencionó anteriormente, este parámetro está influenciado por la relación agua cemento que en la fórmula de trabajo se estableció de 0.8, es así como la fluidez de las distintas mezclas de mortero se evaluara teniendo esta relación de agua cemento siempre fija, pues la condición de humedad de la arena fue la misma para todos los ensayos.

En tal sentido los materiales y equipos para realizar el ensayo de fluidez fueron la arena gradada normalizada seca, agua potable, residuo de vidrio pulverizado, cemento portland gris y la mesa de flujo, tal como se muestra en la figura 19



Figura 19. Materiales utilizados en el ensayo de fluidez. (Autores, 2020)

El ensayo de fluidez se realizó antes de el llenado de los moldes de cubos de mortero para cada una de las series descritas en el diseño experimental, lo que significa que para cada dosificación y edad se realizó un ensayo de fluidez, el proceso de mezclado está dado por la fórmula de trabajo y la obtención el índice de fluidez por la NTC 5784, en la figura 20 se muestra el proceso de llenado de la copa en la mesa de flujo (a) y la medición de torta de mortero generada luego de 25 golpes (b).



(a)



(b)

Figura 20. Ensayo de fluidez. (Autores, 2020)

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9 en orden a como fueron preparados los cubos de mortero de acuerdo al diseño experimental, en este ensayo la edad a la cual se ensayaron los cubos no cobra relevancia, puesto que la mezcla se preparó con la misma cantidad de material según la dosificación establecida, sin embargo, se muestran algunos resultados que se encuentran dispersos.

Tabla 10.

Resultados ensayo de fluidez

Dosificación	Edad	Fluidez
0	14	115,95
0	28	115,41
0	7	115,02
10	7	114,12
10	14	109,98
10	28	107,23
20	14	101,15
20	7	105,59
20	28	103,76

Tabla 11. *Continuación*
Resultados ensayo de fluidez

Dosificación	Edad	Fluidez
30	7	110,10
30	14	103,38
30	28	99,99

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

Los resultados arrojaron que a medida que se aumenta la dosificación de la mezcla, la fluidez de la misma tiende a disminuir, teniendo un valor mínimo del índice de fluidez en la dosificación del 30% de sustitución parcial de cemento portland por vidrio pulverizado de 99.42, por su parte las mezclas con 0% de sustitución mostraron el índice de fluidez más alto de todos los ensayos.

4.2.2. Densidad de los cubos de mortero.

Una propiedad de los cubos de mortero con sustitución parcial de cemento por residuo de vidrio pulverizado es la densidad de los mismos, dicha propiedad depende de la densidad de los materiales cementantes, pues la arena y el agua se mantiene constante, sin embargo, el porcentaje de sustitución parcial de cemento por vidrio con tamaño de partícula inferior a 38 μm influye en la densidad de los cubos pues el vidrio tiene menor densidad que el cemento; el método de ensayo con el cual se calculó la densidad de los cubos está basado en la norma NTC 220.

Los cubos de mortero tienen un periodo de curado que depende del diseño experimental, y justo antes de ensayar los cubos se realiza el proceso de medición y pesado de los mismos, los cubos en teoría deberían tener 2 pulgadas de lado o 5cm, sin embargo, estas medidas no son

exactas, pues depende de los moldes en los cuales se hicieron, por lo cual para obtener la medida de cada lado se hizo una medición en la parte superior, media e inferior de cada lado del cubo y luego se obtiene la media para tener una medida más precisa de cada lado de un cubo, el proceso de medición se muestra en la figura 21.



Figura 21. Medición de los lados de un cubo de mortero. (Autores, 2020)

La medición de la masa de los cubos de mortero se hizo en una balanza de sensibilidad de 0.01 gramos, el proceso de medición se hizo luego de secar superficialmente el cubo, ya que al sacarlo del recipiente de curado queda con algunas impurezas de hidróxido de calcio, la medición de la masa de los cubos de mortero se muestra en la figura 22



Figura 22. Medición de la masa de un cubo de mortero. (Autores, 2020)

Los resultados obtenidos de la densidad de los cubos de mortero muestran que hay una reducción de esta al aumentar el porcentaje de sustitución parcial de cemento portland por residuo de vidrio pulverizado con respecto a la mezcla patrón, pues las densidades varían desde 2.049 g/cm^3 para la muestra con 0% de sustitución hasta 1.918 g/cm^3 para la mezcla con 30% de sustitución, lo que representa una reducción de la masa por unidad de volumen del 5.34%, en la tabla 10 se muestran los resultados obtenidos de las densidades de los cubos.

Tabla 12.
Densidad de los cubos de mortero

Serie	Dosificación	Edad	Densidad (g/cm ³)
0-7-A	0	7	1,956
0-7-B	0	7	1,976
0-7-C	0	7	1,952
0-14-A	0	14	2,030
0-14-B	0	14	2,039
0-14-C	0	14	2,042
0-28-A	0	28	2,044
0-28-B	0	28	2,049
0-28-C	0	28	2,045
10-7-A	10	7	2,048
10-7-B	10	7	2,050
10-7-C	10	7	2,041
10-14-A	10	14	1,982
10-14-B	10	14	1,986
10-14-C	10	14	1,993
10-28-A	10	28	1,953
10-28-B	10	28	1,970
10-28-C	10	28	1,969
20-7-A	20	7	1,942
20-7-B	20	7	1,948
20-7-C	20	7	1,958
20-14-A	20	14	1,990
20-14-B	20	14	1,987
20-14-C	20	14	1,967
20-28-A	20	28	1,954
20-28-B	20	28	1,970
20-28-C	20	28	1,977
30-7-A	30	7	1,959
30-7-B	30	7	1,927
30-7-C	30	7	1,929
30-14-A	30	14	1,936
30-14-B	30	14	1,934
30-14-C	30	14	1,935
30-28-A	30	28	1,918
30-28-B	30	28	1,965
30-28-C	30	28	1,950

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

4.2.3. Resistencia a la compresión

Los ensayos de la resistencia a la compresión de las mezclas de mortero con sustitución parcial de cemento portland por vidrio pulverizado fueron realizados por medio de cubos de mortero de 2 pulgadas de lado se acuerdo a lo establecido en la norma NTC 220, el ensayo de estas probetas fue hecho de acuerdo al diseño experimental y al cronograma previsto para tal fin, es así como se hicieron los cubos de mortero con las lechadas de mortero utilizadas para los ensayos de fluidez, la figura 23 (a) y (b) muestra el proceso de mezclado del mortero.



(a)



(b)

Figura 23. Proceso de mezclado de la lechada de mortero. (Autores, 2020)

Así pues, el proceso de compactación del mortero en los moldes cúbicos se realizó siguiendo la secuencia dada en la NTC 220, procurando llenar los moldes con mortero lo antes posible luego de hacer el ensayo de fluidez, el llenado y compactación de los cubos de mortero se puede evidenciar en la figura 24.



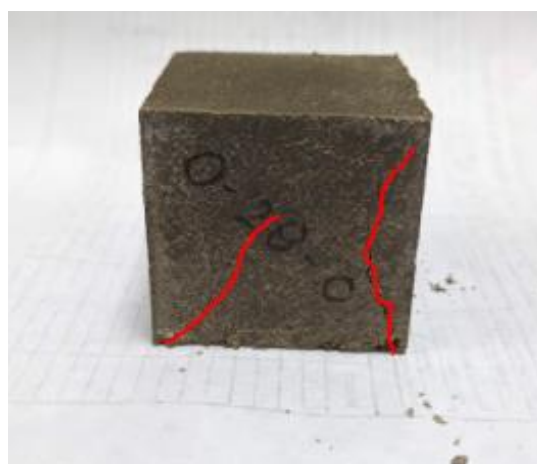
Figura 24. Compactación de cubos de mortero. (Autores, 2020)

El proceso de curado de los cubos de mortero se realizó en una pileta con una solución de hidróxido de calcio al 0.4% disuelta en agua, con lo cual los moldes fueron desencofrados al día siguiente de su preparación y fueron depositados en el recipiente mencionado; los cubos fueron ensayados a las edades de 7, 14 y 28 días de curado, de acuerdo al diseño experimental planteado, el ensayo de resistencia a la compresión se realizó en la máquina de ensayos de 100 KN del Laboratorio de Resistencia de Materiales en la figura 25 se muestra el proceso de ensayo.



Figura 25. Ensayo de resistencia a la compresión. (Autores, 2020)

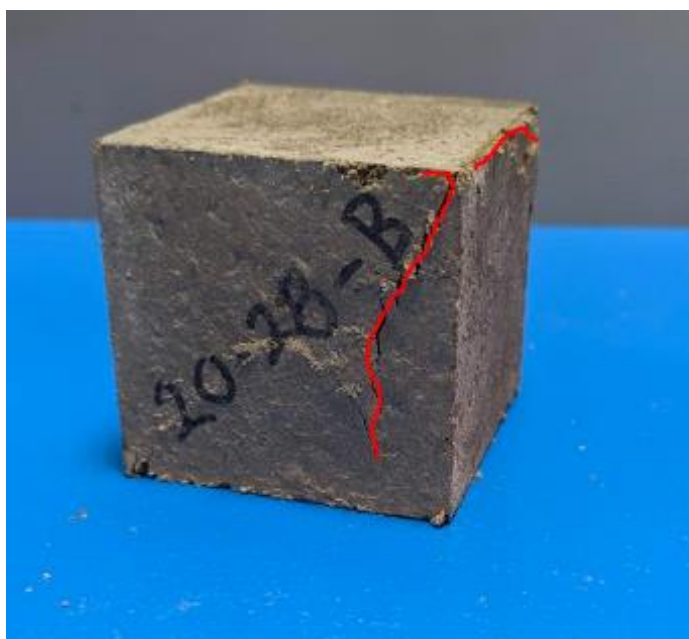
Las fallas en las probetas de mortero para la edad de ensayo de 28 días, para la muestra patrón son mostradas en la figura 26 (a), para el 10% de sustitución (b), para el 20% de sustitución (c) y para el 30% de sustitución (d)



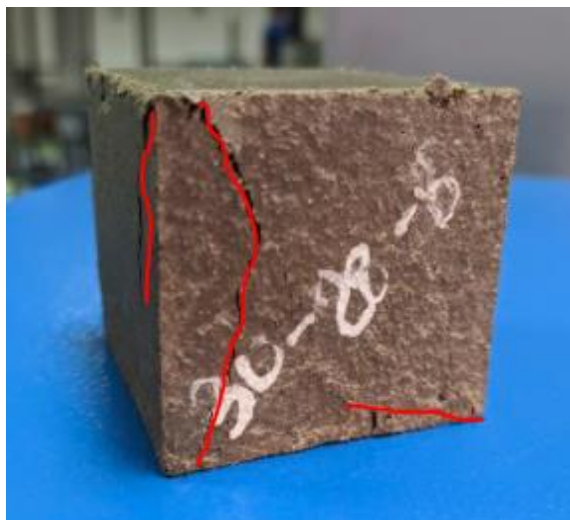
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 26. Fallas en los cubos de mortero. (Autores, 2020)

Los resultados obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión son mostrados en la tabla 11, en ella se puede apreciar una disminución de los valores de resistencia a medida que se aumenta la proporción de sustitución de vidrio pulverizado por cemento, pero a su vez al aumentar la edad de curado en todas las dosificaciones aumenta la resistencia.

Tabla 13.

Resultados de resistencia a la compresión

Muestra	Dosificación	Edad	Resistencia (Mpa)
0-7-A	0	7	6,635
0-7-B	0	7	6,913
0-7-C	0	7	7,178
0-14-A	0	14	8,320
0-14-B	0	14	9,194
0-14-C	0	14	9,179
0-28-A	0	28	12,421
0-28-B	0	28	11,142
0-28-C	0	28	12,207
10-7-A	10	7	6,209
10-7-B	10	7	6,129

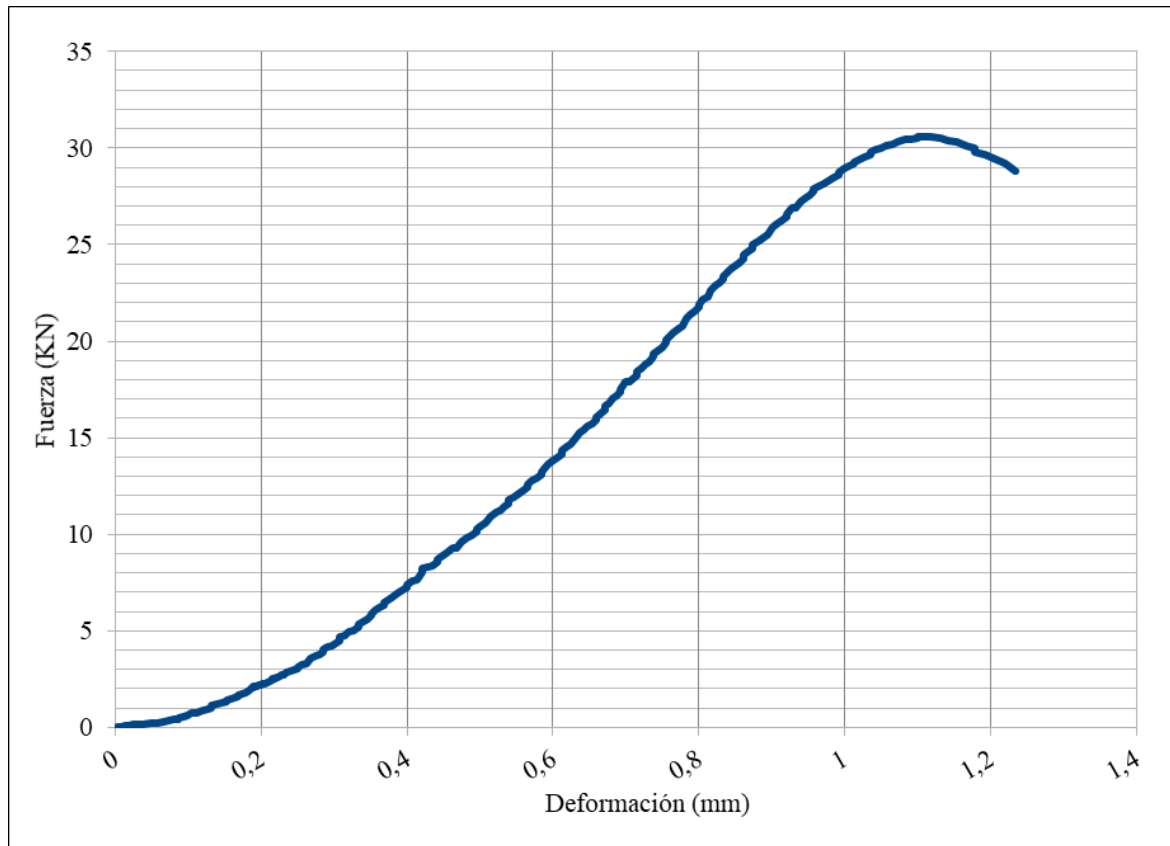
Tabla 14. *Continuación*
Resultados de resistencia a la compresión

Muestra	Dosificación	Edad	Resistencia (Mpa)
10-7-C	10	7	6,096
10-14-A	10	14	8,003
10-14-B	10	14	7,024
10-14-C	10	14	8,220
10-28-A	10	28	9,691
10-28-B	10	28	9,183
10-28-C	10	28	9,295
20-7-A	20	7	4,782
20-7-B	20	7	4,790
20-7-C	20	7	4,854
20-14-A	20	14	5,621
20-14-B	20	14	5,730
20-14-C	20	14	5,689
20-28-A	20	28	7,540
20-28-B	20	28	8,499
20-28-C	20	28	7,895
30-7-A	30	7	3,995
30-7-B	30	7	4,270
30-7-C	30	7	4,346
30-14-A	30	14	4,977
30-14-B	30	14	5,828
30-14-C	30	14	5,079
30-28-A	30	28	6,486
30-28-B	30	28	6,132
30-28-C	30	28	7,268

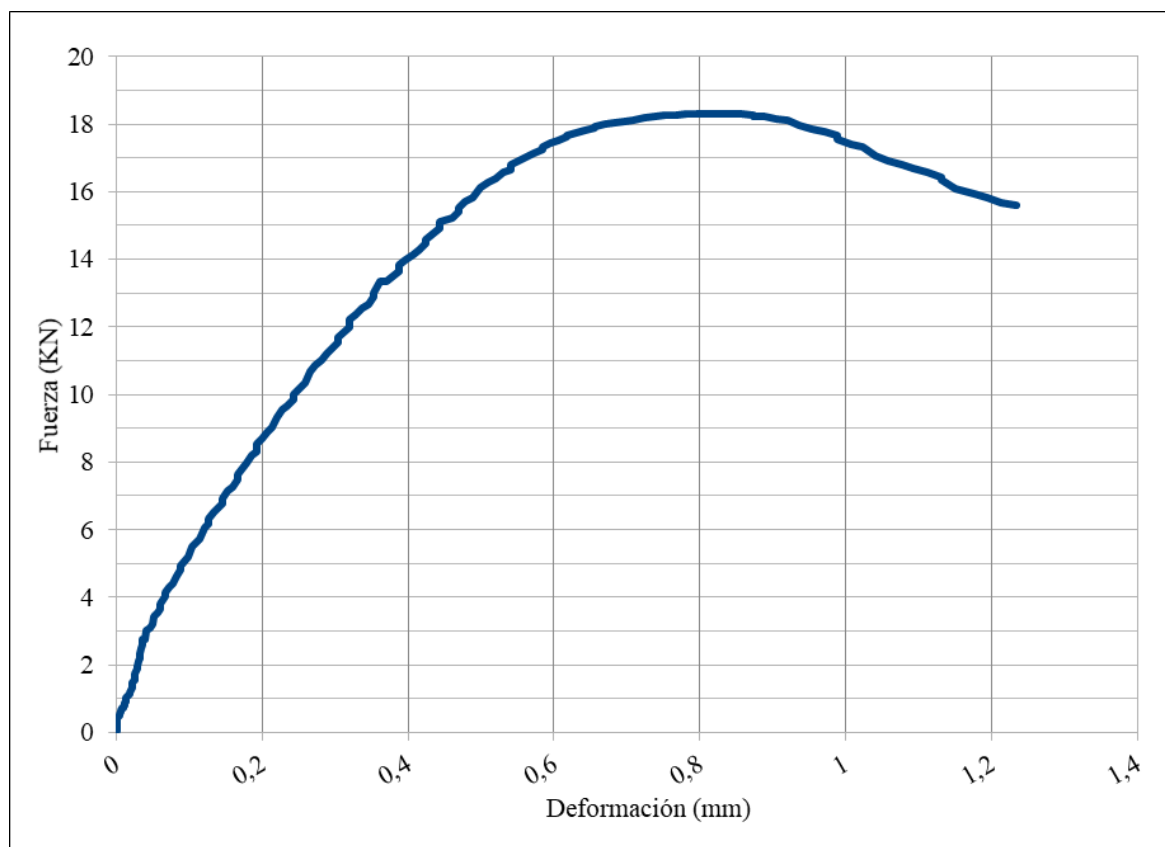
Nota: Fuente. (Autores, 2020)

El ensayo de resistencia a compresión para dos muestras en específicos es mostrado en la figura 27, en la que se puede evidenciar la gráfica de fuerza en KN frente a la deformación en mm para una muestra patrón a los 28 días de curado (a), en ella se aprecia que se obtuvo una fuerza máxima de aplastamiento de 30,58 KN, un desplazamiento en la zona de fuerza máxima de 1,12 mm y un desplazamiento máximo de 1,235 mm en la zona de rotura, por otra parte se tiene una muestra de 30% de sustitución parcia de cemento por vidrio pulverizado a los 28 días de curado (b), en la cual se puede ver un descenso de la fuerza aplicada para lograr la falla del

bloque, la cual es de 18,32 KN, así mismo se nota una disminución del desplazamiento en el cual ocurre la fuerza máxima, que es de 0,81 mm, sin embargo el desplazamiento final en el que se termina el ensayo es similar a la muestra patrón de 1,23 mm.



(a)



(b)

Figura 27. Curva de fuerza-deformación de cubos de mortero. (Autores, 2020)

Los resultados de los ensayos hechos a cada una de las 3 probetas por dosificación y edad son mostrados en la tabla 8, en la que se muestra la serie, la edad, la dosificación, y la resistencia alcanzada en mega pascales; sin embargo y de acuerdo a la norma técnica NTC 220, se debe realizar una depuración de las probetas defectuosas, esto se hace con rangos permisibles, es decir, para tres probetas como es este el caso, los resultados deben estar en un rango de $\pm 8,7\%$ de la media (Apéndice B), posteriormente, se realiza la media con estos nuevos resultados depurados para obtener el valor de la resistencia en MPa por cada dosificación y edad, tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 15.
Media de resistencia a la compresión

Dosificación %	Edad (días)	Resistencia a compresión Mpa
0	7	6,90835
10	7	6,14462
20	7	4,80880
30	7	4,20395
0	14	8,89774
10	14	8,11119
20	14	5,67995
30	14	5,02796
0	28	11,92341
10	28	9,38967
20	28	7,97775
30	28	6,30930

Nota: Fuente. (Autores, 2020)

La figura 28 muestra la gráfica de resistencia a la compresión de los valores medios obtenidos luego del análisis de valores atípicos descrito en la norma NTC 2020, muestran que la resistencia disminuye conforme se aumenta el porcentaje de sustitución

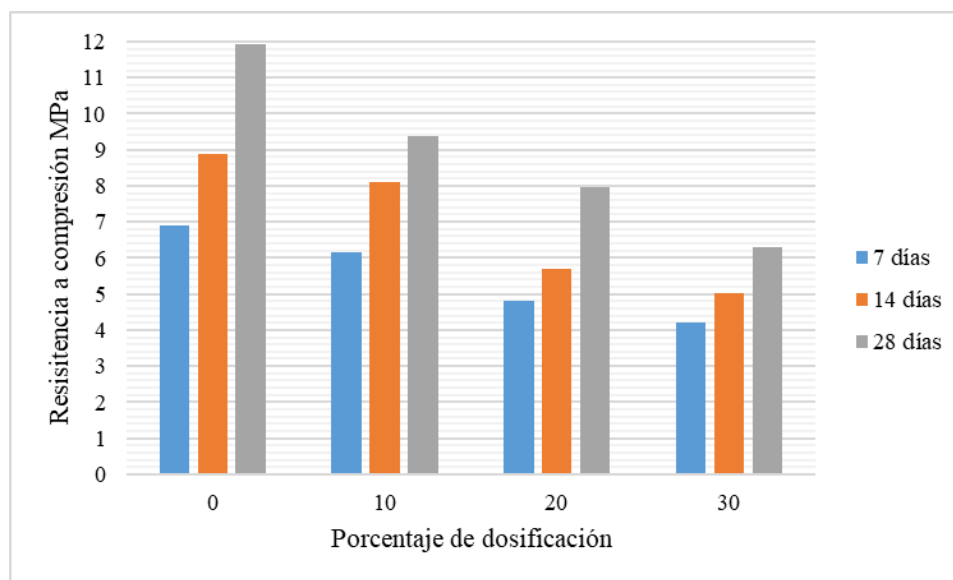


Figura 28. Resistencia a la compresión para valores promedio. (Autores, 2020)

4.3. Establecer la variación de la resistencia a la compresión del mortero normalizado en función del porcentaje de sustitución de cemento por vidrio pulverizado

4.3.1. Análisis de la fluidez de las mezclas de mortero

La manejabilidad es una propiedad de los morteros que mide la facilidad de la colocación de la mezcla, esta propiedad está directamente relacionada con la consistencia, es decir, al estado de fluidez del mortero, cuan dura o blanda es la mezcla cuando se ubica en estado plástico. (Sánchez de Guzman, 2001). La fluidez o el índice de fluidez guarda estrecha relación con el tamaño de partícula de los áridos, pues según (Harini, Shaalini, & Dhinakaran, 2012) los morteros con áridos bien gradados y con tamaños de partícula redondeado tienen una mejor fluidez que aquellos con partículas con un alto grado de irregularidad, además este estudio concluyó que la fluidez del mortero disminuye con el aumento del contenido de agregados y la disminución de la relación agua-cemento para un tamaño particular de agregados.

El análisis de la fluidez en las mezclas de mortero con sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado está dado por dos factores divididos en varios niveles, es decir, que la fluidez tiene relación con el análisis factorial general, donde los dos factores son la dosificación del porcentaje de sustitución parcial y la edad de curado de las muestras, los niveles son 0%, 10%, 20% y 30% para la dosificación y 7 días, 14 días y 28 días para la edad. El diseño experimental se realizó teniendo en cuenta 3 réplicas, sin embargo, para hacer el ensayo de fluidez se requirió

una muestra de cada dosificación y edad para tres probetas de mortero, con lo cual el número de datos para fluidez es menor que las otras dos variables de densidad y resistencia.

El análisis que mejor muestra el comportamiento de la fluidez en las mezclas de la regresión lineal, por lo tanto, se hizo uso del software estadístico Minitab en su versión de prueba para el análisis de regresión de la variable fluidez. Este análisis tuvo en cuenta el nivel de significancia " α ", que permite evaluar la hipótesis nula, es decir, que no hay asociación entre el termino y la respuesta, por lo general, se utiliza un nivel de significancia o alfa de 0,05 ya que funciona adecuadamente porque un nivel de significancia de 0,05 indica un riesgo de 5% de concluir que hay una asociación cuando no hay una asociación real (Minitab, 2020).

Un parámetro importante a tener en cuenta es "p" o la evaluación de la hipótesis nula, pues si este valor es menor o igual que α la asociación es estadísticamente significativa, mientras que, si el valor de p es mayor que α no hay una asociación significativa entre las variables, y por lo tanto se descarta el modelo.

El primer modelo de regresión para la fluidez de las mezclas de mortero incluyó todos los datos obtenidos en la fase experimental, inicialmente el modelo fue revisado bajo el parámetro de R-cuadrado, el cual es una medida estadística que indica cuan cerca están datos de una línea de regresión ajustada, también se denomina coeficiente de determinación, aunque la ecuación puede ser bastante confusa la interpretación es sencilla, pues el valor de R-cuadrado varía entre 0 y 100%, y cuan más cerca se esté de 100% el modelo explica toda la variabilidad de los datos con

respecto a su media. El valor para el primer modelo de regresión por ajuste lineal es de 64,86%, un valor pequeño y mejorable con un nuevo ajuste.

Por otra parte, también se revisó la correlación entre las variables, este parámetro varía entre -1 y 1, mostrando la variabilidad inversa y directamente proporcional de las variables respectivamente, es decir, cuando la correlación esté más cerca de -1 se tiene unas variables inversamente proporcionales, mientras que si se está cerca de 1 las variables serán directamente proporcionales, para este primer análisis de -0,81, estando un poco lejos del negativo perfecto, pero dando un contexto de que las variables son inversamente proporcionales.

Ya conociendo que el modelo debe ser ajustado, se realiza el análisis de residuos que son la diferencia entre el valor observado y el valor ajustado, este parámetro indica que dato se encuentra fuera del modelo ajustado, en la figura 29 se muestra los residuos obtenidos frente los valores ajustados, en ella se puede apreciar un residuo grande que implica que ese dato está fuera del modelo ajustado y que debe suprimirse.

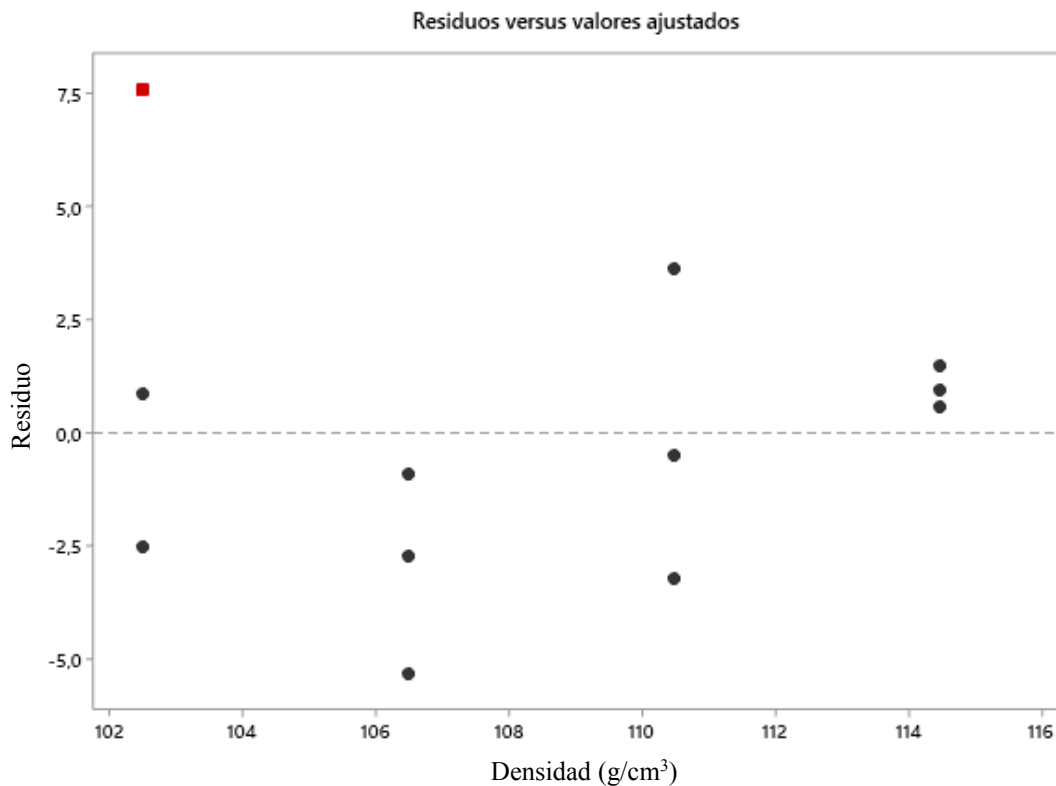


Figura 29. Residuos frente a valores ajustados para primer modelo de fluidez. (Autores, 2021)

La ubicación del residuo grande es mostrada en la figura 30, la cual indica que se trata de un valor extremo para la dosificación del 30%, así mismo se puede conocer la ecuación lineal que explica el modelo ajustado a la línea roja $y=114-0,39585x$, por otro lado, se puede conocer la desviación estándar que es de 3,592 y el valor de p que es de 0,002.

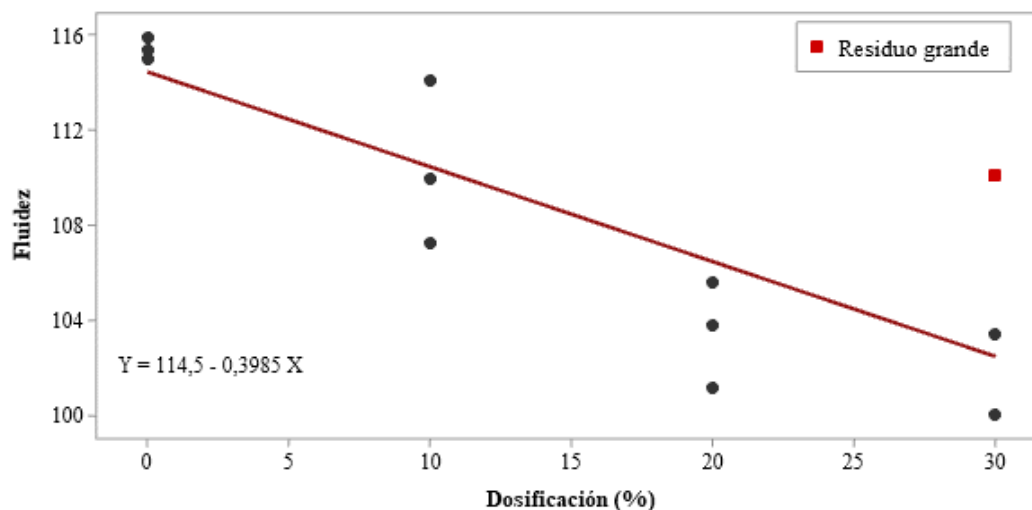


Figura 30. Línea ajustada en modelo lineal para primer modelo de fluidez. (Autores, 2021)

Luego de suprimir un valor atípico en la dosificación del 30% se sustitución de cemento por vidrio pulverizado se realizó el segundo modelo de fluidez, consiguiendo un valor para el parámetro de R-cuadrado de 85,29%, valor que se ubica en el séptimo decil y que da una alta confiabilidad al modelo, pues el valor de p se aproxima a cero (0,001) y esto explica un alto nivel de confiabilidad para un nivel de significancia de 0,05, con lo que se puede decir que el modelo de ajusta los valores observado con un margen de error del 5%

Por otra parte, la correlación se aproximó al negativo perfecto con un valor de -0,91 indicando que cuando la dosificación aumenta la fluidez tiende a disminuir, además no se observan residuos grandes que impliquen valores atípicos, la regresión lineal con un intervalo de predicción del 95% y un ajuste lineal dado por la recta $y=115,1-0,4977x$ se muestra en la figura 31.

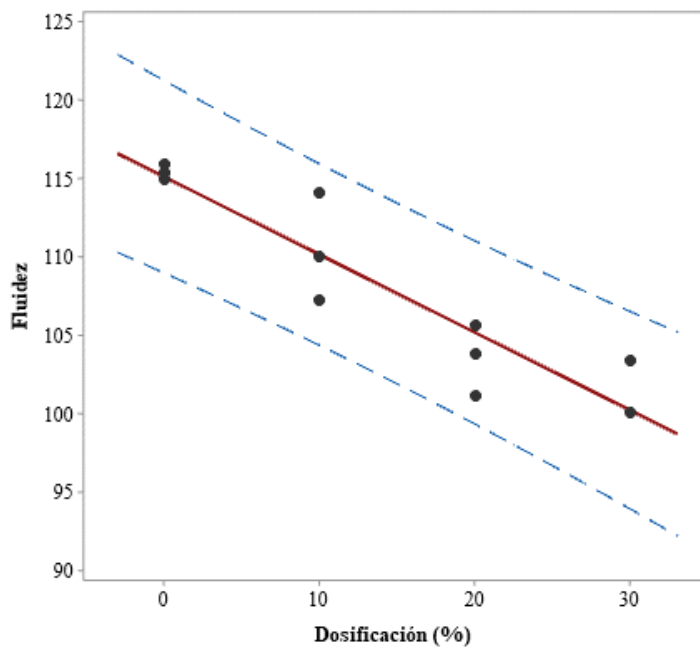


Figura 31. Gráfica de predicción para el segundo modelo de fluidez. (Autores, 2021)

Dado el modelo anterior de regresión, se muestra en la tabla 13 la predicción de la fluidez para distintos valores de dosificación desde la muestra patrón hasta el 30% de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado con los rangos calculados bajo el 95% predicción y un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 16.

Fluidez pronosticada con índice de predicción de 95%

X	Y pronosticada	IP de 95%
0	115,11	(108,97; 121,26)
1,5	114,37	(108,30; 120,44)
3	113,62	(107,62; 119,62)
4,5	112,87	(106,93; 118,81)
6	112,13	(106,24; 118,01)
7,5	111,38	(105,53; 117,23)
9	110,63	(104,82; 116,45)
10,5	109,89	(104,10; 115,67)
12	109,14	(103,37; 114,91)
13,5	108,39	(102,63; 114,16)
15	107,65	(101,88; 113,42)
16,5	106,90	(101,12; 112,68)
18	106,15	(100,35; 111,96)
19,5	105,41	(99,568; 111,25)
21	104,66	(98,780; 110,54)
22,5	103,91	(97,984; 109,84)
24	103,17	(97,178; 109,16)
25,5	102,42	(96,364; 108,48)
27	101,67	(95,542; 107,81)
28,5	100,93	(94,712; 107,14)
30	100,18	(93,875; 106,49)

Nota: Fuente. Autores, 2020. (Autores, 2021)

4.3.2. Análisis de la densidad de los cubos de mortero.

La densidad en los morteros de cemento es una propiedad muy importante, porque influye directamente en el peso de la estructura, ya que puede ser utilizado en mortero de pega o de revoque; el análisis de la densidad en los cubos de 5cm de lado de mortero con sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado se realizó igual que en la fluidez, es decir, por medio de ajuste por regresión lineal, sin embargo para la densidad se tiene un mayor número de datos, debido a que se tienen valores de densidad para cada uno de los cubos realizados.

Por lo cual se realizó la medición de la densidad de los cubos de mortero por medio del procedimiento descrito en la norma técnica NTC 220, en la que se midieron los cubos en sus tres dimensiones y se tomó la longitud tres veces por dimensión en el momento antes del ensayo de los cubos, el peso se tomó con los cubos superficialmente secos y de esta forma se obtuvo la densidad de los cubos de morteros.

El análisis hecho con el software Minitab arrojó que se necesitaron 4 iteraciones para obtener un alto valor de correlación de las variables, eliminando datos atípicos en cada uno de estas iteraciones, se inició con el total de los datos, el cual fue de 36 datos, dando un valor del ajuste de R cuadrado de 50.7% y un coeficiente de correlación entre las variables X y de -0.71, que muestra una clara tendencia a que al aumentar el valor de sustitución de vidrio pulverizado por cemento disminuye la densidad de los cubos, sin embargo se observan valores atípico en la figura 32, estos residuos grandes afectan el valor de la correlación de las variables.

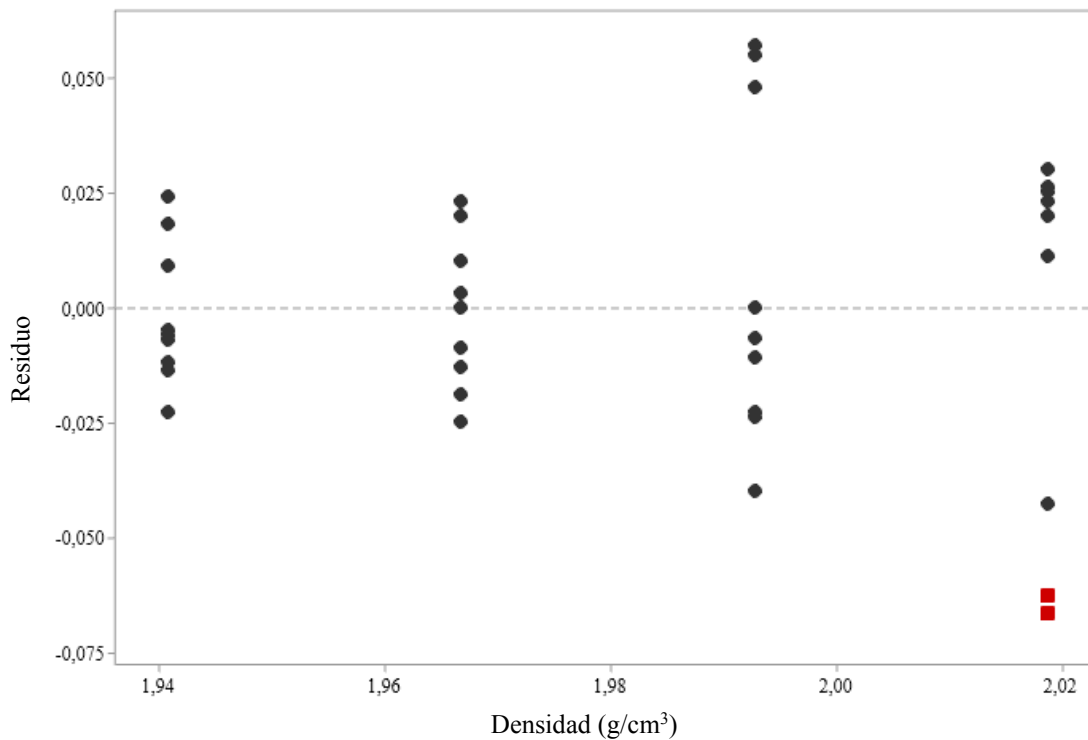


Figura 32. Residuos frente a valores ajustados para primer modelo de densidad. (Autores, 2021)

La ubicación de estos valores atípicos puede verse en la figura 33, la cual muestra la línea ajustada para valor de densidad, que tiene una clara tendencia a disminuir conforme aumenta el porcentaje de dosificación, los valores atípicos se ubican en la dosificación.

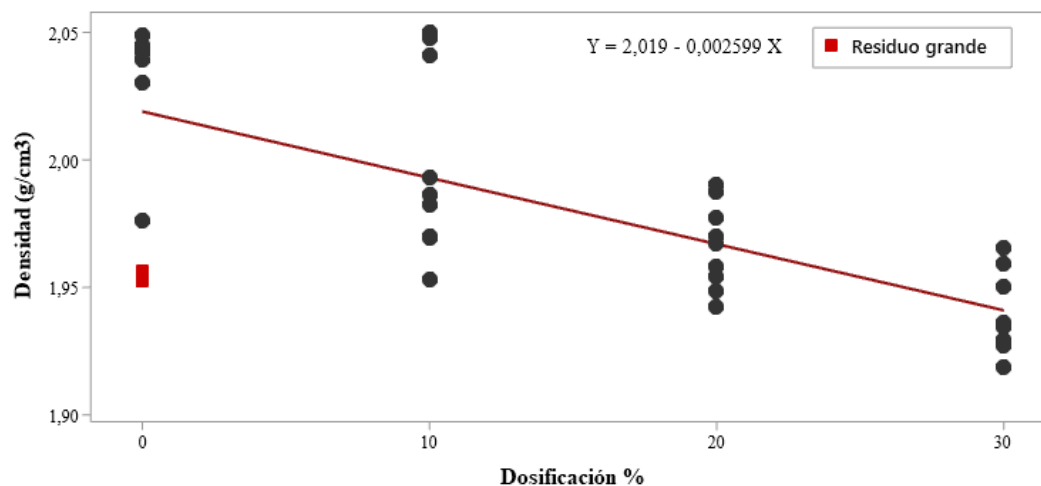


Figura 33. Línea ajustada en modelo lineal para primer modelo de densidad. (Autores, 2021)

Dado que se tienen datos erróneos o atípicos se procede a eliminarlos del análisis y realizar una segunda regresión, esta vez se obtuvo un R- Cuadrado de 66,84%, es decir que el modelo de regresión puede explicar 66,84% de la variación en la densidad, por otra parte, la correlación entre las variables de densidad y dosificación aumento hacia el negativo perfecto ubicándose en - 0,82, lo que indica que cuando la dosificación aumenta, la densidad tiende a disminuir; así mismo, la relación entre la densidad y la dosificación es estadísticamente significativa, pues el valor de “p” es menor a 0.001. Sin embargo se observan residuos grandes de +/- 0.05 g/cm³, en la figura 34 se muestran los residuos versus los valores ajustados para el segundo análisis de regresión.

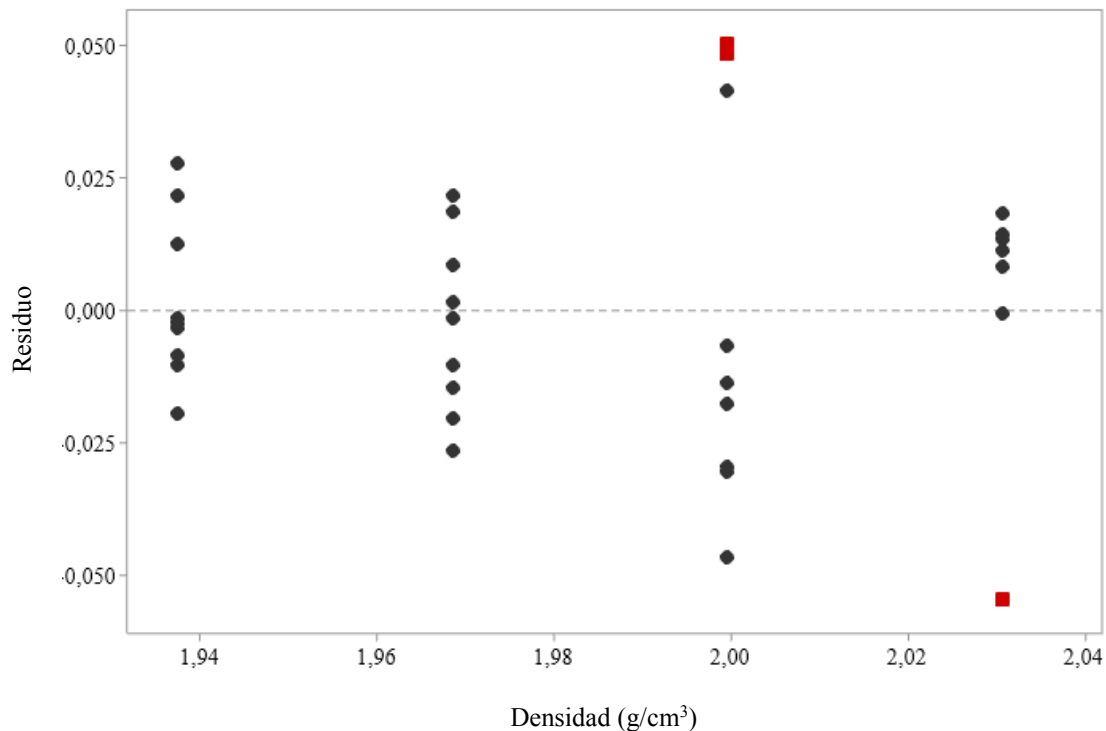


Figura 34. Residuos frente a valores ajustados para el segundo modelo de densidad. (Autores, 2021)

La línea de regresión muestra que la tendencia a disminuir la densidad conforme se aumenta el porcentaje de sustitución es clara, sin embargo, hay dos grupos de valores que se encuentran dispersado del modelo ajustado, estos están ubicados en la muestra patrón y en el 10% de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado, tal como se ve en la figura 35.

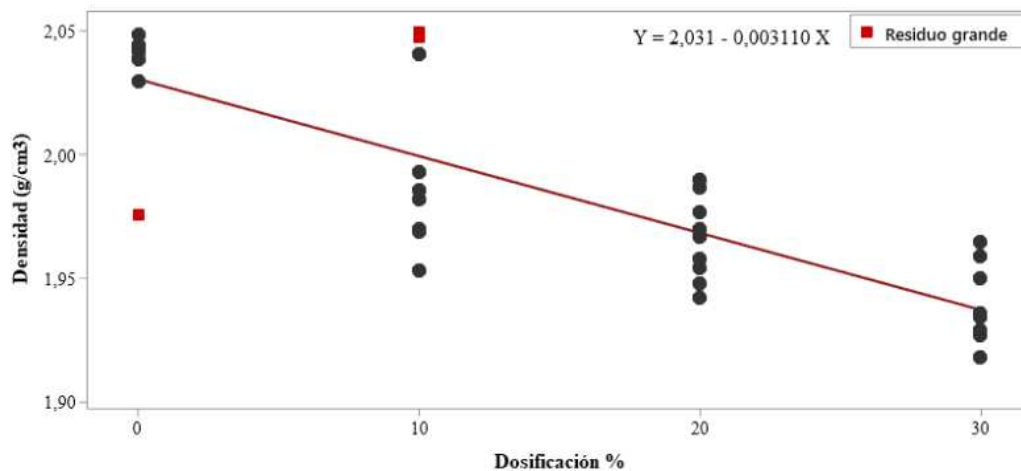


Figura 35. Línea ajustada en modelo lineal para el segundo modelo de densidad. (Autores, 2021)

Dado que en la segunda iteración del modelo de regresión lineal de la densidad frente a la dosificación se hace necesario un tercer análisis, luego de la eliminación de los datos atípicos encontrados, en este análisis se obtuvo un valor de R-Cuadrado de 74,34%, mostrando un ajuste más cercano a la unidad, de este mismo modo se calculó la correlación entre las variables, muestran un r de -0,86 y una desviación de los residuos de $0,021 \text{ g/cm}^3$, en la figura 36 se muestra el valor de los residuos encontrados en los valores atípicos de la tercera iteración.

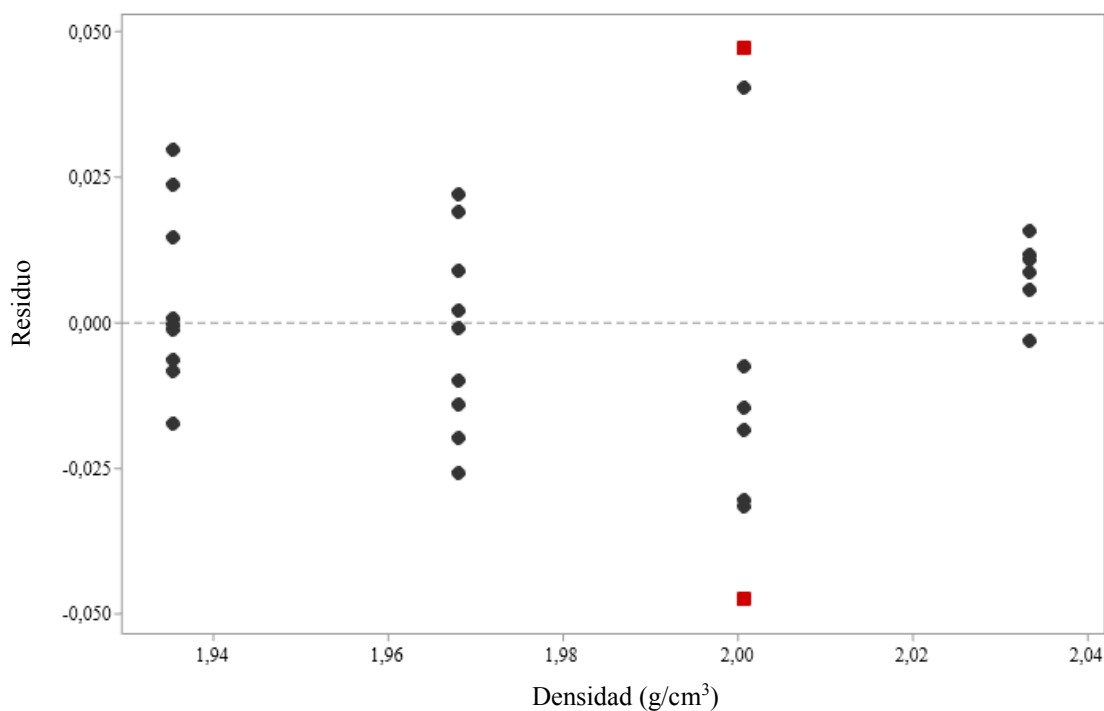


Figura 36. Residuos frente a valores ajustados para el tercer modelo de densidad. (Autores, 2021)

La ubicación de los residuos grandes se ubica en el 10% de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado, tanto hacia arriba como hacia debajo de la media, estos puntos se muestran en la figura 37.

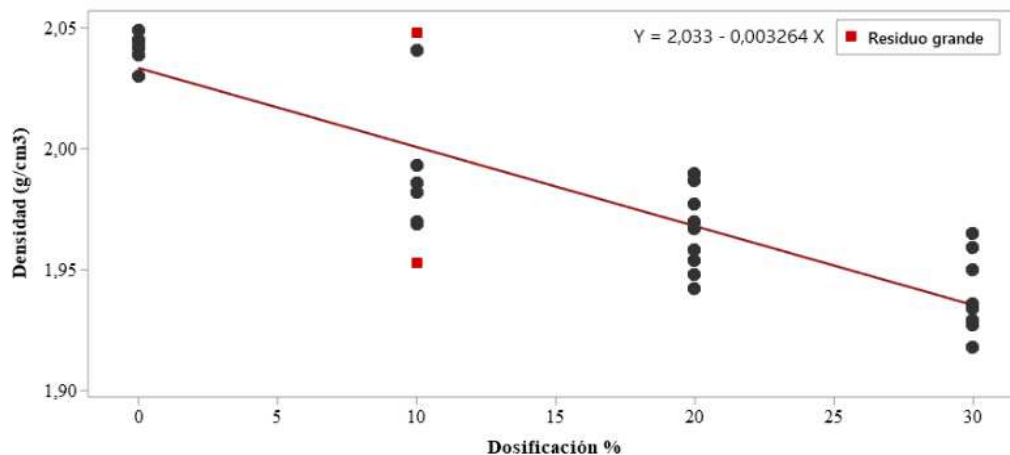


Figura 37. Residuos frente a valores ajustados para el tercer modelo de densidad. (Autores, 2021)

En la siguiente iteración se toma en cuenta las recomendaciones del análisis anterior y se eliminan los datos defectuosos, en la cuarta regresión se llega al umbral de 80,83% para el estadístico de R-Cuadrado, mientras que el coeficiente de correlación se aproxima al negativo perfecto en -0,90; dicho lo anterior en necesario la verificación de puntos atípicos, en la figura 38 se muestran los residuos grandes frente al modelo ajustado del cuarto análisis de regresión.

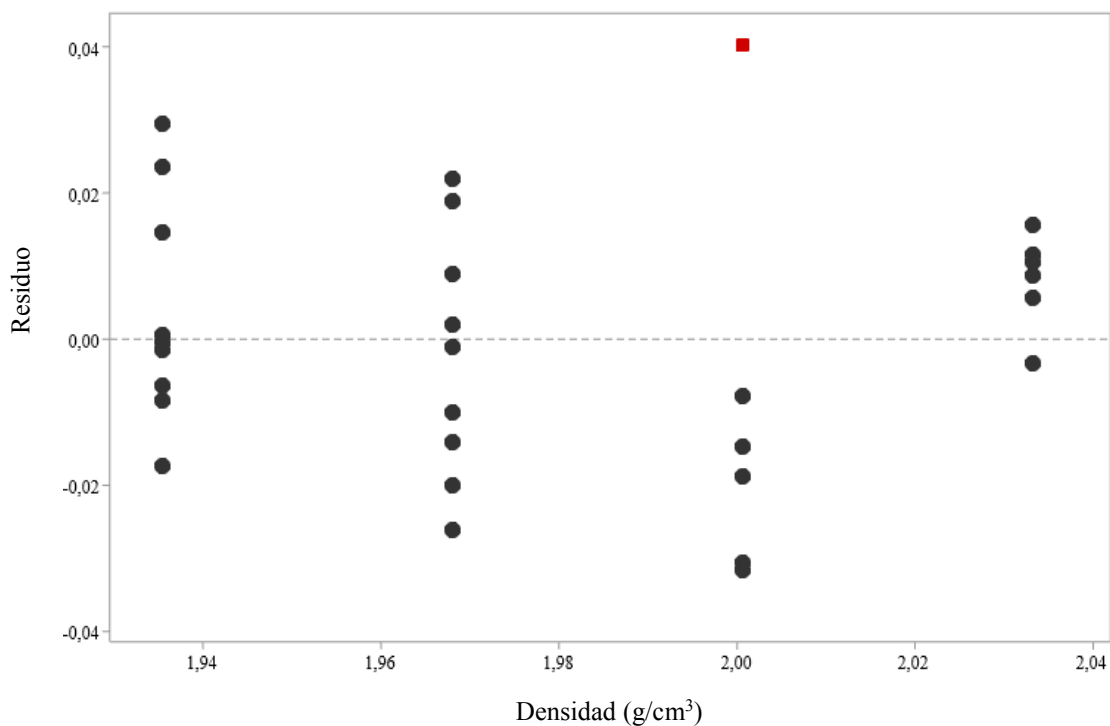


Figura 38. Residuos frente a valores ajustados para el cuarto modelo de densidad. (Autores, 2021)

La ubicación del punto extraño se encuentra en la dosificación del 10%, es un punto que está ubicado en la parte superior, en esta fase del análisis se tiene una desviación estándar de los residuos de $0,018 \text{ g/cm}^3$ ampliamente reducida desde la primera iteración, en la figura 39 se muestra la línea ajustada de regresión lineal para el cuarto modelo.

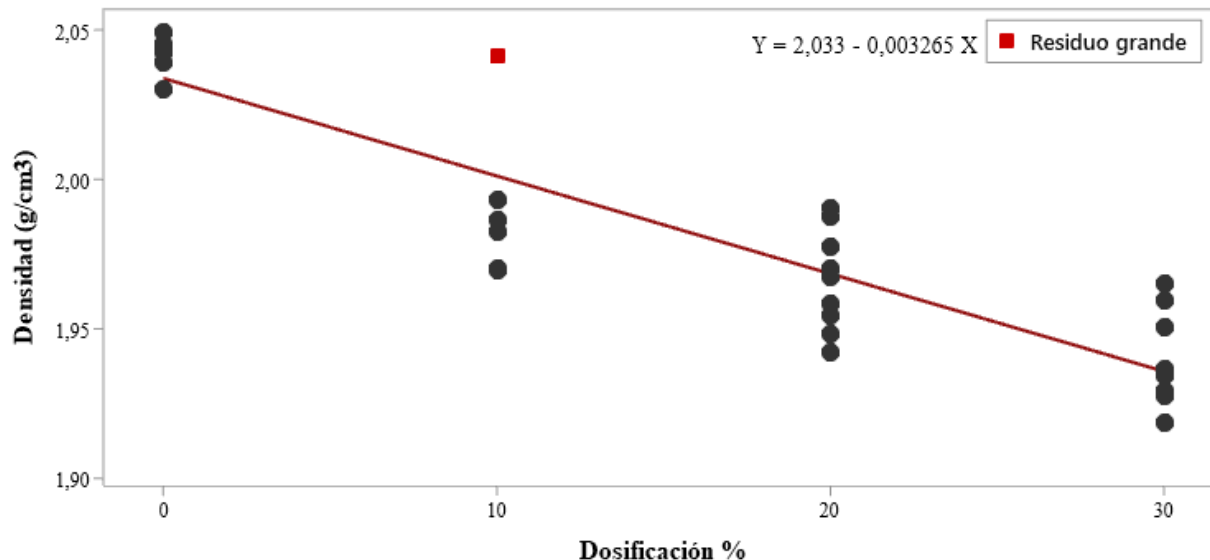


Figura 39. Línea ajustada en modelo lineal para el cuarto modelo de densidad. (Autores, 2021)

La iteración final deja como resultado un alto coeficiente de determinación R-Cuadrado de 82,86%, lo cual indica que hay una fuerte relación entre las variables, concluyendo que, al aumentar dosificación, disminuye la densidad, esto también está dado por el coeficiente de correlación, el cual fue de -0,91, una cifra significativa puesto que está cerca del negativo perfecto, además se logró tener una desviación estándar de los residuos de $0,017 \text{ g/cm}^3$, con tan solo la disminución de 6 datos de la población, en la figura 40 se muestra la no presencia de residuos grandes en el quinto modelo de regresión para la densidad.

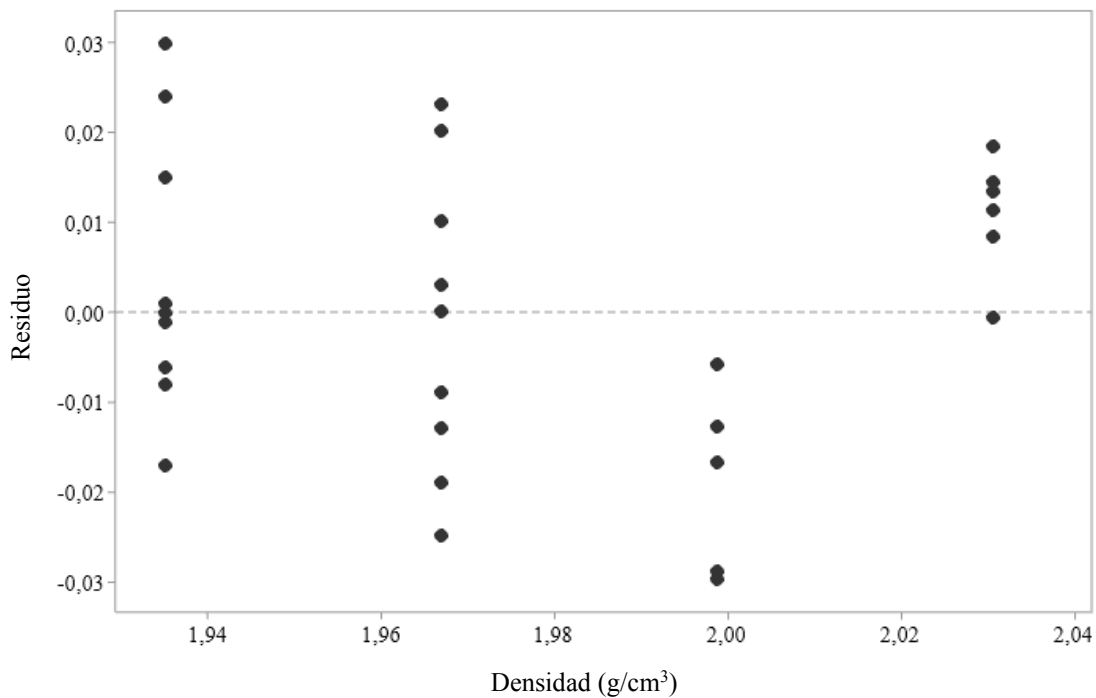


Figura 40. Residuos frente a valores ajustados para el quinto modelo de densidad. (Autores, 2021)

En la figura 41 se muestra la gráfica de predicción para la densidad, la línea ajustada roja muestra el valor pronosticado de Y para cualquier valor de X. Las líneas discontinuas azules muestran el intervalo de predicción de 95%. Lo que indica que para el rango mencionado todos descritos en el modelo entra, la ecuación lineal que a línea de tendencia es

$$y = 2,031 - 0,003184x.$$

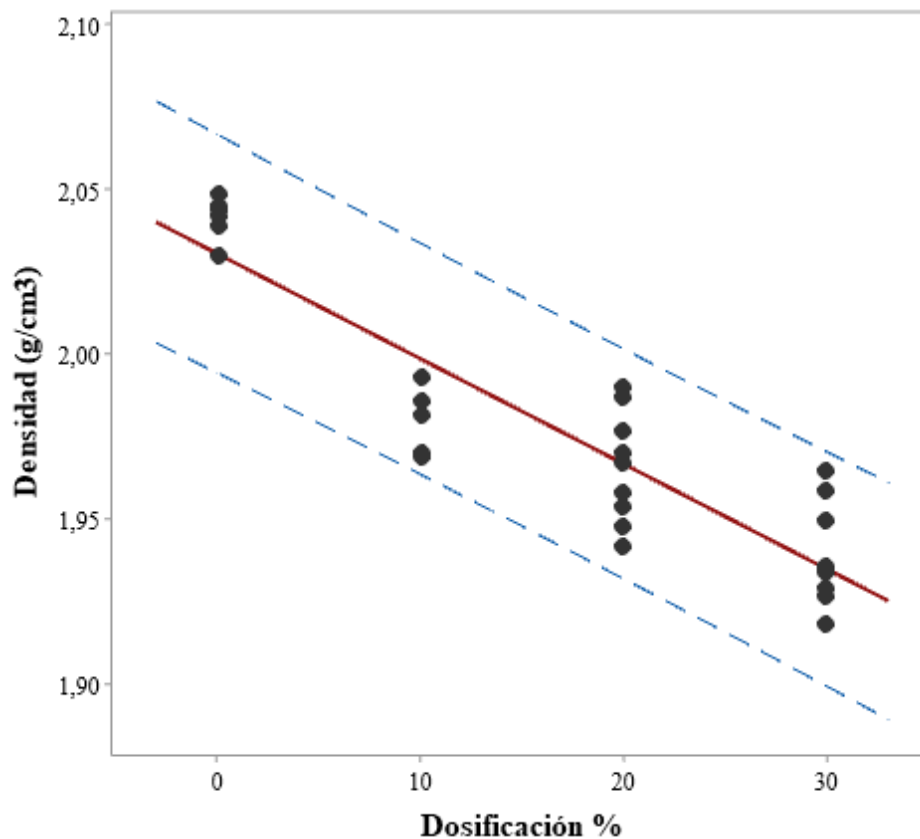


Figura 41. Gráfica de predicción para el quinto modelo de densidad. (Autores, 2021)

Dado el modelo anterior de regresión, se muestra en la tabla 14 la predicción de la densidad para distintos valores de dosificación desde la muestra patrón hasta el 30% de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado con los rangos calculados bajo el 95% predicción y un nivel de significancia de 0,05.

Tabla 17.
Densidad pronosticada con índice de predicción de 95%

X Y pronosticada		IP de 95%
0	2,0306	(1,9945; 2,0667)
1,5	2,0258	(1,9899; 2,0617)
3	2,0210	(1,9854; 2,0567)
4,5	2,0163	(1,9808; 2,0517)
6	2,0115	(1,9762; 2,0468)
7,5	2,0067	(1,9715; 2,0419)
9	2,0019	(1,9669; 2,0370)
10,5	1,9972	(1,9622; 2,0321)
12	1,9924	(1,9575; 2,0272)
13,5	1,9876	(1,9528; 2,0224)
15	1,9828	(1,9481; 2,0176)
16,5	1,9780	(1,9433; 2,0128)
18	1,9733	(1,9385; 2,0080)
19,5	1,9685	(1,9338; 2,0032)
21	1,9637	(1,9289; 1,9985)
22,5	1,9589	(1,9241; 1,9938)
24	1,9542	(1,9192; 1,9891)
25,5	1,9494	(1,9144; 1,9844)
27	1,9446	(1,9095; 1,9798)
28,5	1,9398	(1,9045; 1,9752)
30	1,9351	(1,8996; 1,9705)

Nota: Fuente. Autores, 2020

4.3.3. Análisis de la resistencia a la compresión

El análisis de la resistencia a la compresión estadísticamente se realizó mediante el software Minitab, ya que en el diseño de experimentos (DOE) se utilizó el diseño factorial general para 2 factores, 3 y 4 niveles, los cuales son la edad y la dosificación. En tal sentido se evaluó la respuesta a las variables dadas, con lo cual la regresión factorial general fue el mejor modelo estadístico para revisar el nivel confiabilidad y obtener con certeza el comportamiento del estudio.

El análisis estadístico está compuesto por las siguientes variables:

- Factores: Edad (días); Dosificación (Porcentaje)
- Niveles: 7, 14, 28 días; 0%, 10%, 20%, 30%
- Variable de Respuesta: Resistencia a la compresión (MPa)

A nivel estadístico, el análisis se realizó por el método escalonado, utilizando el Criterio de Información de Akaike corregido (AICc), el cual se basa en la utilización de un serie de pruebas de hipótesis que perimen ir definiendo paso a paso el mejor ajuste al modelo establecido, pues (Akaike, 1974) dice que “estudiar el problema de la identificación desde la perspectiva de la teoría de la decisión estadística, lo que traslada el problema del ajuste de un modelo a la elección de la función de pérdida más adecuada”, ahora bien, la solución que propone Akaike es tomar como función de pérdida al menor o mínimo AICc, este valor entre más pequeño sea indica una mayor relación entre las variables, en el caso de este análisis el valor de Criterio de información de Akaike es de 67.37, un valor de comparación para futuros estudios.

El parámetro estadístico más conocido puede ser el coeficiente de determinación R-Cuadrado, este tiene un valor de 97.43%, lo que indica que el modelo tiene un alto nivel de confiabilidad, en la tabla 15 se muestra las medias ajustas y el estar estándar de la media para cada serie de datos.

Tabla 18.
Medias ajustadas para la Resistencia a la Compresión

Dosificación	Media Ajustada (MPa)	Error estándar de la media ajustada
0	9,243	0,139
10	7,761	0,139
20	6,155	0,139
30	5,376	0,139

Edad	Media Ajustada (MPa)	Error estándar de la media ajustada
7	5,516	0,121
14	6,905	0,121
28	8,98	0,121

Dosificación	Media Ajustada (MPa)	Error estándar de la media ajustada
0; 7	6,908	0,242
0; 14	8,898	0,242
0; 28	11,923	0,242
10; 7	6,145	0,242
10; 14	7,749	0,242
10; 28	9,39	0,242
20; 7	4,809	0,242
20; 14	5,68	0,242
20; 28	7,978	0,242
30; 7	4,204	0,242
30; 14	5,295	0,242
30; 28	6,629	0,242

Nota: Fuente. Autores, 2020

La grafica de probabilidad normal mostrada en la figura 42 indica la distribución de los residuos ajustados a una línea recta, entre más cerca estén a esta línea más normalidad hay en los datos, como en este caso hay datos muy cercanos a la línea recta se puede decir que hay

normalidad en el modelo, sin embargo, hay valores que están alejados y estos pueden ser valores atípicos.

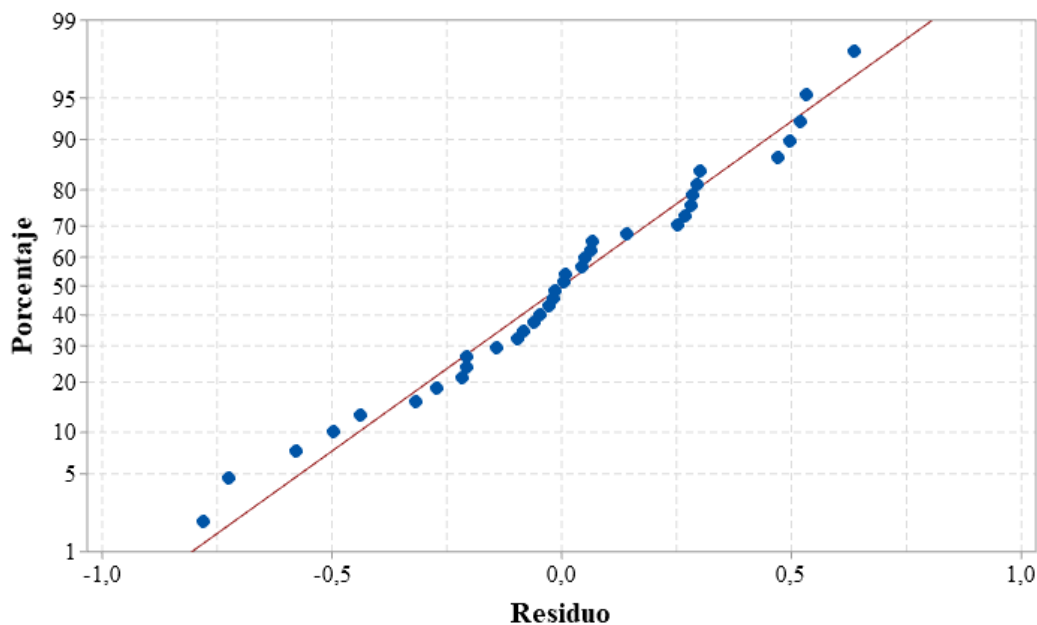


Figura 42. Gráfica de probabilidad normal de la resistencia a la compresión. (Autores, 2021)

Otro aspecto importante es el histograma de frecuencia de residuos, esta gráfica mostrada en la figura 43 indica la cantidad de veces que se repite un residuo o la marca de clase de un intervalo de residuo, en este caso la mayor cantidad de datos no tiene residuos grandes, sin embargo, se tienen dos datos que tienen un residuo de $-0,8$ MPa, estos datos requieren revisión y se ubican en la serie de 0-28-B y 10-14-B, datos a tener en cuenta para el análisis.

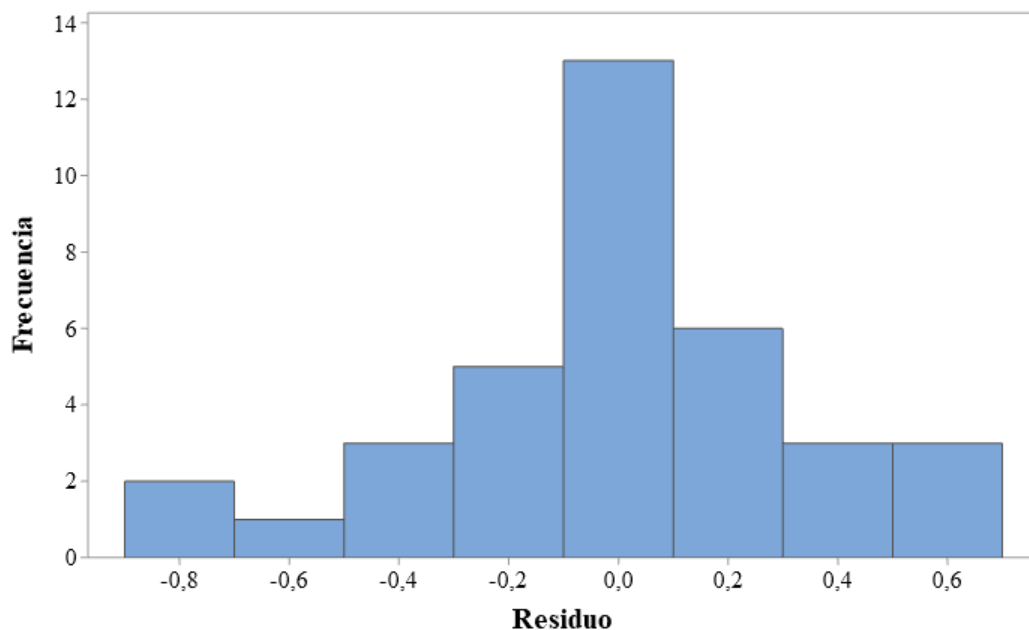


Figura 43. Histograma de frecuencia de residuos para la resistencia a la compresión. (Autores, 2021)

Ahora bien, en la figura 44 se presenta la gráfica de efectos principales con medias ajustadas muestra que la resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta el porcentaje de sustitución, dado que se pasa de 9,24 MPa a 5,27 MPa, desde la muestra patrón al 30% de sustitución parcial, por su parte la edad de curado tiene un importancia radical, pues al aumentar la edad de ensayo aumenta la resistencia a la compresión en gran medida, pues la media para 7 días es de 5,51 MPa, para 14 días es de 6,90 MPa y para 28 días de 8,97 MPa.

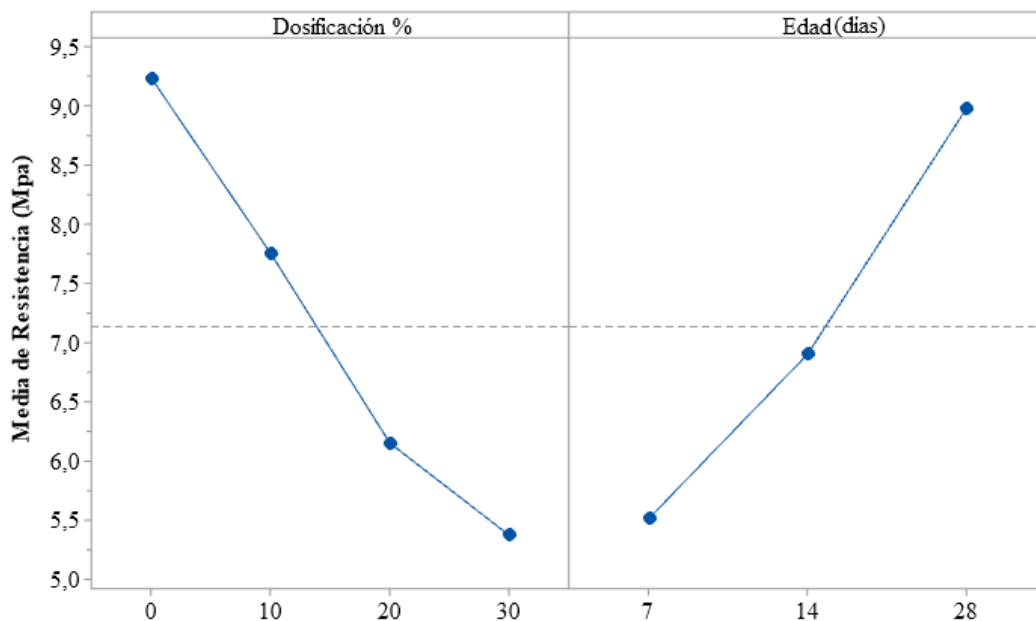


Figura 44. Grafica de efectos principales con medias ajustadas para la resistencia a la compresión. (Autores, 2021)

Lo anterior indica ambos efectos principales o predictores tiene una gran importancia en la variable respuesta, sin embargo, es necesario identificar la acción de los dos efectos diferenciados por serie de edad. La grafica de interacción para la resistencia a la compresión muestra que hay una clara tendencia a disminuir la resistencia a la compresión conforme aumenta la sustitución parcial de cementante, con la figura 45 se puede apreciar que el 10% de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado es el porcentaje óptimo para hacer dicha sustitución, pues aunque no da mayor resistencia a la compresión que la muestra patrón, si es el rango en la cual se tiene menor perdida y podría ser útil el residuo de vidrio pulverizado.

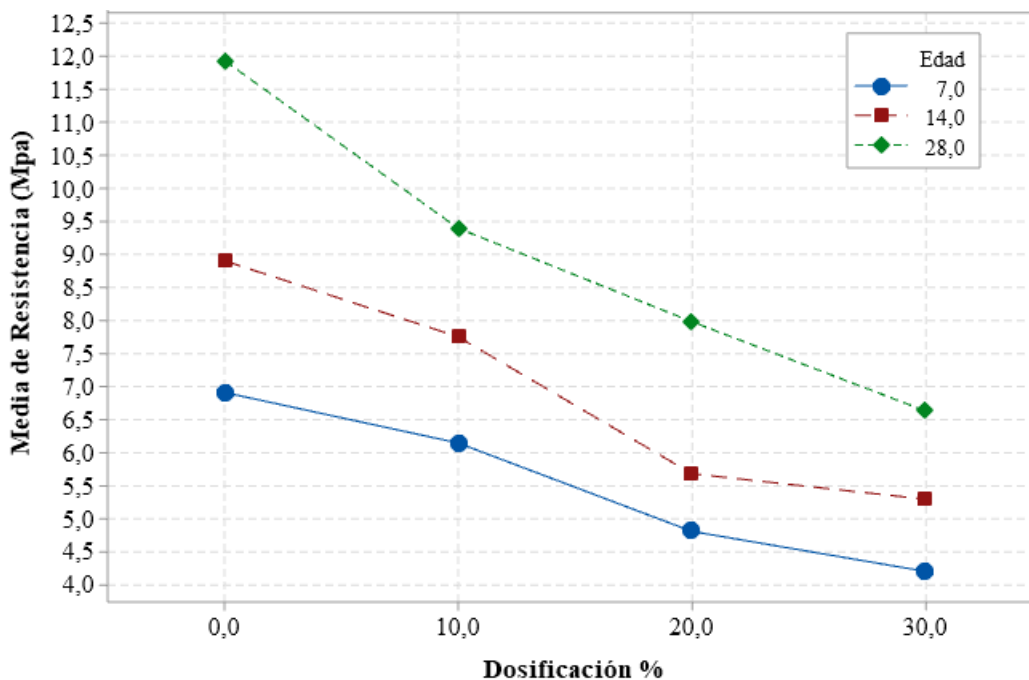


Figura 45. Grafica de interacción con medias ajustadas para la resistencia a la compresión. (Autores, 2021)

4.3.4. Evaluación de la resistencia a la compresión con la norma ASTM C311 y ASTM C618

Uno de los principales objetivos de este proyecto es identificar si el residuo de vidrio pulverizado que actúa como puzolana pura funciona como cementante en morteros de cemento, para ello se acudió a las normas técnicas de la American Society of Testing Materials (ASTM) en especial la norma ASTM C311 de 2018 que establece los métodos de prueba estándar para muestreo y ensayo de cenizas volantes o puzolanas naturales para su uso en concreto o mortero de cemento portland.

En el numeral 29 de la norma ASTM C311 se establece el uso de la resistencia a la compresión por medio de tres especímenes de la mezcla control y tres especímenes de la mezcla de prueba (con sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado) a edades de 7 días y 28 días, el cálculo del índice de actividad de resistencia con respecto al cemento portland se calcula mediante $(A/B) * 100$, siendo:

A = Resistencia media a la compresión de los cubos de la mezcla de prueba, en MPa

B = Resistencia media a la compresión de los cubos de la mezcla de control, en MPa

En la tabla 16 se muestra el cálculo de índice de actividad de resistencia a la compresión con cemento portland para cada uno de los porcentajes de sustitución a las edades de 7 días y 28 días.

Tabla 19.
Índice de Actividad de Resistencia a la Compresión

Dosificación	A	B	Índice de Actividad de Resistencia a la Compresión
7 días			
10%	6,144	6,908	88,94%
20%	4,808	6,908	69,60%
30%	4,203	6,908	60,84%
28 días			
10%	9,389	11,923	78,75%
20%	7,977	11,923	66,90%
30%	6,628	11,923	55,59%

Nota: Fuente. Autores, 2020

El método de ensayo propone los requisitos de comparación de especificación para el índice de actividad de resistencia a la compresión con cemento portland en la norma ASTM

C618, esta norma habla de especificación estándar para cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para su uso en mortero o concreto de cemento, esta especificación se refiere a las cenizas volantes de carbón y a la puzolana natural cruda o calcinada para su uso en el hormigón cuando se desea una acción cementante o puzolánica, o ambas, o cuando se pueden desear otras propiedades normalmente atribuidas a las cenizas volantes o a las puzolanas, o cuando se quieren alcanzar ambos objetivos.

La clasificación de las puzolanas está dada de la siguiente manera:

- Clase N: puzolanas naturales crudas o calcinadas que cumplen con los requisitos aplicables para la clase tal como se indica en este documento, tales como algunas tierras de diatomeas, cretas y pizarras opalinas, tobas y cenizas volcánicas o pumicitas, calcinadas o sin calcinar, y diversos materiales que requieren calcinación para inducir propiedades satisfactorias, tales como algunas arcillas y pizarras.
- Clase F: Cenizas volantes que cumplen con los requisitos aplicables para esta clase tal y como se indica en este documento. Esta clase de cenizas volantes tiene propiedades puzolánicas.
- Clase C: Cenizas volantes que cumplen con los requisitos aplicables para esta clase tal y como se indica en este documento. Esta clase de cenizas volantes, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades cementantes.

Dada la anterior clasificación, el material utilizado para este proyecto es clase N, puesto que se está utilizando puzolana natural producto de residuo de vidrio pulverizado o sílice, en tal

sentido se presenta la tabla 17, la cual muestra las especificaciones para el índice de actividad de resistencia para las tres clases de puzolana descritas.

Tabla 20.
Requerimientos físicos de la norma ASTM C618

	Class		
	N	F	C
<i>Fineness:</i>			
Amount retained when wet-sieved on 45 μm (No. 325) sieve, max, %	34	34	34
<i>Strength activity index:^A</i>			
With portland cement, at 7 days, min, percent of control	75 ^B	75 ^B	75 ^B
With portland cement, at 28 days, min, percent of control	75 ^B	75 ^B	75 ^B
Water requirement, max, percent of control	115	105	105
<i>Soundness:^C</i>			
Autoclave expansion or contraction, max, %	0.8	0.8	0.8
<i>Uniformity requirements:</i>			
The density and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the ten preceding tests, or by all preceding tests if the number is less than ten, by more than:			
Density, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45- μm (No. 325), max variation, percentage points from average	5	5	5

Nota: Tabla 2 de la norma ASTM C618-12^a

Tanto para los 7 días de ensayo como para los 28 días se tiene un mínimo de índice de actividad de resistencia a la compresión de 75%, lo que indica que solo para el 10% de sustitución parcial de cemento portland por residuo de vidrio pulverizado (88,94% para 7 días y 78,75 %) puede ser considerado como un material cementante y con una actividad puzolanica importante.

Otro aspecto a tener en cuenta es el requerimiento de agua máximo, este está calculado por medio de la fluidez de la mezcla y tiene un valor de comparación de 115, en el caso de 10% de dosificación se tiene como valor máximo 114.12, con lo cual se cumple este requisito y se puede afirmar que el 10% de dosificación es el porcentaje óptimo de sustitución

5. CONCLUSIONES

En el apartado de las materias primas utilizadas en el proyecto se puede concluir que la densidad tanto del residuo de vidrio como del cemento portland juegan un papel importante en la mezcla de mortero, pues la densidad del residuo de vidrio con tamaño de partícula de $38 \mu\text{m}$ es de $2,5 \text{ g/cm}^3$, menor de los $2,94 \text{ g/cm}^3$ que tiene el cemento portland, lo que hace el primer material más liviano que el cemento y que tenga una propiedad aprovechable en el peso de la estructuras de mortero al tener una menor densidad en las mezclas que se realicen con este residuo.

La finura o superficie específica de Blaine es una propiedad que influye en el fraguado de la mezcla, pues la hidratación del material cementante depende de cuan gran sea este valor, en el caso de residuo se tiene una finura de $256.98 \text{ m}^2/\text{Kg}$ y el cemento portland de $363.45 \text{ m}^2/\text{Kg}$, lo que significa que el cemento portland tiene una mayor superficie específica que el residuo de vidrio pulverizado, dado que la superficie específica está relacionada con el tamaño de las partículas, por lo tanto por lo tanto el vidrio pulverizado al tener un tamaño de partícula mayor que el cemento tiene una finura inferior a este, lo dicho anteriormente influye en la hidratación de la mezcla, haciéndola más lenta cuando se tenga incorporación de residuo de vidrio pulverizado.

En cuanto a la mezcla de mortero se logró concluir que la fluidez o el requerimiento de agua en la mezcla varía según el porcentaje de dosificación de residuo de vidrio pulverizado que

se sustituya, pues al manejar una relación agua-cemento invariable de 0,81 se determinó que el índice de fluidez parte en promedio desde 115,11 para la muestra patrón, es decir con 0% de sustitución hasta 100,18 para el 30% de sustitución de cemento por residuo de vidrio pulverizado, lo que indica una variación porcentual del -12.97% para el mayor porcentaje de sustitución, haciendo al residuo de vidrio pulverizado un material que permite disminuir la consistencia o manejabilidad en las mezclas de mortero, cuando no se requieran mezcla tan fluidas.

En la elaboración y ensayo de los cubos de mortero se midió una propiedad del mortero que es la densidad, y según el análisis de regresión realizado a esta propiedad disminuye conforme aumenta el porcentaje de sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado, pues para la muestra patrón se tiene una densidad de $2,03 \text{ g/cm}^3$, para el 10% de sustitución una densidad de $2,00 \text{ g/cm}^3$, para el 20% de sustitución una densidad de $1,96 \text{ g/cm}^3$ y finalmente para el 30% una densidad de $1,93 \text{ g/cm}^3$, lo que indica una variación porcentual del -4,92% para el mayor porcentaje de sustitución, haciendo al mortero con residuo de vidrio pulverizado un material liviano que se puede utilizar como mortero de pega o de revoque reduciendo el peso de la estructura que contenga estos materiales.

Finalmente, se puede concluir que la resistencia a la compresión para las mezclas realizadas con sustitución parcial de cemento por vidrio pulverizado es menor que la mezcla patrón en todas las edades, dado que la resistencia de la mezcla patrón a 28 días es de 11,923 MPa, para 10% de sustitución 9,389 MPa, para el 20% de sustitución 7,977 MPa y para el 30% de sustitución 6,628 MPa, sin embargo, según la norma ASTM C618 se puede afirmar que las mezclas con el 10% de

sustitución de cemento por vidrio pulverizado tienen un índice de actividad de resistencia la compresión que considera el residuo de vidrio como una puzolana que se comporta como el cemento, dado que la relación mezcla patrón/mezcla de prueba está dentro del rango del 75% mínimo. Por otra parte, el residuo de vidrio tiene un tamaño de partícula mayor que el cemento portland, posible motivo por el cual no se alcanzaron resistencias similares a la muestra patrón, por lo tanto, se debe estudiar mezclas con el mismo tamaño de partícula tanto para el residuo de vidrio como para el cemento.

En síntesis, el residuo de vidrio es un material aprovechable en mezclas de mortero para un porcentaje máximo de sustitución del 10%, dado que se cumple con lo requerido por el índice de actividad de resistencia y se está reciclando un residuo altamente peligroso y contaminante, reduciendo costos en la menor utilización del cemento portland y sobre todo apostando a las construcciones sostenibles con el uso de este residuo.

6. RECOMENDACIONES

El residuo de vidrio es un material altamente peligroso por sus terminaciones puntiagudas y cortantes, por lo cual es necesario el uso de elementos de protección personal para su manipulación, así mismo el correcto almacenamiento del residuo; en la obtención de partículas más finas mediante la moliendo o el proceso de tamizaje se recomienda el uso de mascarilla y tener una buena ventilación del sitio de trabajo.

La determinación de la fórmula de trabajo es indispensable para tener una modelo común en los ensayos y poder trabajar con una metodología clara, pues un propósito de este trabajo es que pueda replicarse y en caso realizar una investigación similar tener una guía para realizarlo.

Dado que el porcentaje óptimo de sustitución según la norma ASTM C 618 fue el 10%, se recomienda para futuras investigaciones trabajar con porcentaje menor a este, así mismo buscar reducir el tamaño de partícula de residuo de vidrio al tamaño del cemento que esta alrededor de los 15 μm con un molino de mayor de capacidad, u otro procedimiento de molienda y pulverización y de este modo lograr tener una interacción mucho más similar en cuanto a granulometría se refiere.

REFERENCIAS

- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. Autom. Control*, 19(6), 716-723. doi:doi.org/10.1109/TAC.1974.1100705
- Álvarez, J. I., Martín, A., & Garcia Casado, P. (1995). Historia de los morteros. *Materiales y Técnicas, Universidad de Navarra*, 53-59. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/273110688_Historia_de_los_morteros
- Ashurst, J. (1983). *Mortars, Plasters and Renders in Conservation*. Ecclesiastical Architects' and Surveyors' Association.
- ASTM. (2012). ASTM C618-12a: Standard Specification for Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete.
- Chen, C., Huang, R., Wu, J., & Yang, C. (2006). Waste E-glass Particles used in cementitious mixtures. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 450-451.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.010>
- Departamentnto Nacional de Planeación. (2016). Política Nacional para la gestión integral de residuos solidos. Obtenido de <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Conpes/Econ%C3%B3micos/3874.pdf>
- Durán Herrera, N., & Velásquez Amado, N. (2016). (Tesis de pregrado). Evaluación de la aptitud de concretos, reemplazando parcialmente el cemento portland por cenizas volantes y cenizas de bagazo de caña de azucar. *Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*.

Obtenido de

<http://repositorio.ufpso.edu.co:8080/dspaceufpso/bitstream/123456789/1227/1/28818.pdf>

Dyer, T., & Dhir, R. (2001). Chemical reactions of glass cullet used as cement component.

Journal Of Materials In Civil Engineering, 412-413. doi:doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2001)13:6(412)

Espinoza-Rivero, E. A. (2017). Estudio de Vidrio Reciclado como componente para la

Elaboración de Cementos Terciarios. *Institut Tecnologico de Costa Rica*, 1-82. Obtenido de

https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/7283/Estudio_vidrio_reciclado_componente_elaboracion_cementos_terciarios.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Fernández Navarro , J. M. (2003). *El vidrio*. Madrid: Consejo Superior de Investigaciones Científicas.

Furlan, V., & Bisseguer, P. (1975). Les mortiers anciens. Histoire et essais d'analyse scientifique.

Revue suisse d'Art et d'Archéologie, 1-14.

González Salcedo , L. (2008). Conceptos generales sobre los agregados. *Universidad Nacional de Colombia* , 28-29.

Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales:

Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de

http://bdigital.unal.edu.co/6167/5/9589322824_Parte1.pdf

Gutiérrez de López, L. (2003). El Concreto y otros materiales para la construcción. *Universidad*

Nacional de Colombia, 36-37. Obtenido de

http://bdigital.unal.edu.co/6167/8/9589322824_Parte2.pdf

- Gutiérrez de López, L. (2003). El Concreto y otros materiales para la construcción. *Universidad Nacional de Colombia*, 35. Obtenido de http://bdigital.unal.edu.co/6167/8/9589322824_Parte2.pdf
- Harini, M., Shaalini, G., & Dhinakaran, G. (2012). Effect of size and type of fine aggregates on flowability of mortar. *KSCE J Civ Eng*(16), 162-168. doi:<https://doi.org/10.1007/s12205-012-1283-4>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. d. (2014). *Metodología de la investigación*. México D.F. : Mc Graw Hill.
- Instituto Nacional Del Cancer. (s.f.). *Diccionario del Cancer*. Recuperado el 9 de Diciembre de 2019, de s.f: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionario/def/alkali>
- Ismail, Z. Z.-H. (2009). Recycling of waste glass as a partial replacent for fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 29(2), 655-659.
- Malinowski , R. (1982). Ancient mortars and concretes: Aspects of their durability. *Histoire of Technology 7th Annual Volume*, 89-101.
- Malinowski, R., & Garfinkel, Y. (1991). Prehistiry of Concrete. *Concrete International*, 62-68.
- Martinet, G., Deloye, F., & Golvin, J. (1992). Caractérisation des mortiers pharaoniques du temple d'Amon à Karnak. *Bull.liaison Labo*, 39-45.
- Meyer, C. (2008). Materiales reciclados en hormigón. *Desarrolllos en la formulación de refuerzos en hormigón*, 208-230.
- Minitab. (2020). *Interpretar los resultados clave para Ajustar modelo de Poisson*. Obtenido de Soporte de Minitab: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/19/help-and-how->

to/statistical-modeling/regression/how-to/fit-poisson-model/interpret-the-results/key-results/

- Mitra, S., Srimay, A., & Dey, B. G. (2016). A practical study on Effective Utilisation of Waste Glass in Concrete. *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, 5(3), 696-696. Obtenido de <http://ijsetr.org/wp-content/uploads/2016/03/IJSETR-VOL-5-ISSUE-3-694-696.pdf>
- Morales Vallejo, P. (2011). El análisis factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios. *Universidad Pontificia Comillas*, 45.
- Morey, G. W. (1936). *La Composición del vidrio*. Washington : Instituto Carnegie de Washington .
- Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (2011). Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement. *Construction and Building Materials*, 368-377.
- Nishikawa, T., Takatsu , M., & Daimon , M. (1995). Fracture behavior of hardened cement paste incorporating mineral additions. *Cement and Concrete Research*, 1218-1219. doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00114-R](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00114-R)
- Norma Técnica Colombiana INCONTEC. (2016). NTC 3937. *Arena normalizada para ensayos de cemento hidráulico*, 2.
- Rassineux, F., Petit, J., & Meunier, A. (1989). Ancient analogues of modern cement: calcium hydrosilicates in mortars and concretes from Gallo-Roman Thermal Baths of Western France. *Journal of the American Ceramic Society*, 72(6), 1026-1036. doi: doi.org/10.1111/j.1151-2916.1989.tb06263.x

Reciclaje Avi. (s.f.). *¿Sabes cuántos años tardan en degradarse el cartón, el plástico o el vidrio?*

Obtenido de <http://reciclajesavi.es/sabes-cuantos-anos-tardan-en-degradarse-el-carton-el-plastico-o-el-vidrio/>

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 UNC*, 56-60.

Sabir, B., Wild, S., & Bai, J. (2001). Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement and Concrete Composites*, 441-454.

Salazar, A. (s.f.). ¿Qué es una puzolana?

Sánchez de Guzman , D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (Quinta ed.). Bogotá: Bhandar Editores.

Shao , Y; Lefort , T; Moras, S; Rodriguez, D;. (2000). Studies on concrete containing ground waste glasses. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 95-96. doi:10.1016 / S0008-8846 (99) 00213-6

Shi, C., & Zheng, K. (2007). A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 234-247.

Tobon, J. I. (2000). Puzolanas en los alrededores de irra. *Universidad Nacional de Colombia*, 2.

Torres Agredo, J., Baquero, E. A., & Silva, A. R. (11 de Octubre de 2008). Evaluación De La Actividad Puzolánica De Un Residuo De La Industria Del Petróleo. *Dyna rev.fac.nac.minas*, Vol 72, 49-50. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532009000200005

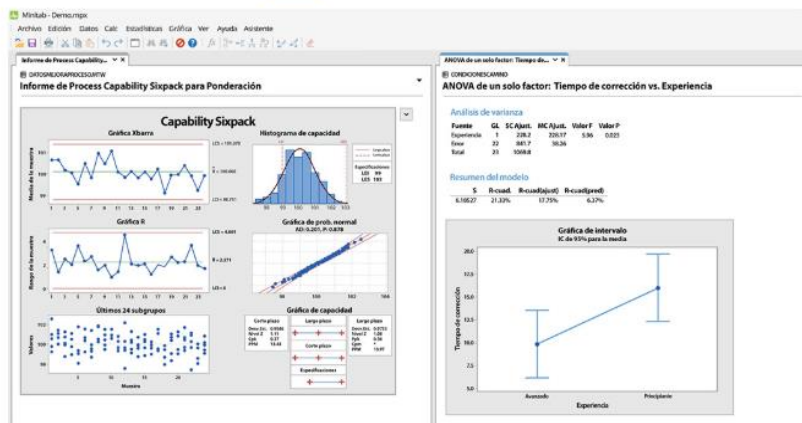
Trezza, M. A., & Rahhal, V. F. (2018). Comportamiento del residuo de vidrio. *Revista Materia*.

doi:<http://dx.doi.org/10.1590/s1517-707620170001.0311>.

Apéndices

Apéndice A,

Versión de prueba de Minitab



Un potente software de estadística que todos pueden usar.

Analice los datos y encuentre soluciones significativas a sus desafíos más difíciles.

Descargue nuestra prueba gratis por 30 días

Fuente: <https://www.minitab.com/es-mx/products/minitab/free-trial/>

Apéndice B.**Informe de resultados de laboratorio.**

Apéndice C.

Consolidación de ensayos de densidad y de resistencia de compresión