

**EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS  
ALIGERADOS CON POLIPROPILENO Y SOMETIDOS A TRATAMIENTO  
TERMICO**

**SAMY DAIR BULA GRIEGO  
BETSY LILIANA OSPINO JULIO**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2019**

**EVALUACION DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS  
ALIGERADOS CON POLIPROPILENO Y SOMETIDOS A TRATAMIENTO  
TERMICO**

**SAMY DAIR BULA GRIEGO  
BETSY LILIANA OSPINO JULIO**

**Proyecto de grado para optar al título de ingeniería civil**

**DIRECTOR:  
ELKIN MAURICIO LOPEZ MORANTES  
Ing. Civil, MSc**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERIAS  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2019**

## **DEDICATORIA**

A Dios por ser mi principal guía durante este proceso que ha estado lleno de varias dificultades, pero de su mano todo ha sido posible y he podido llegar hasta acá. Y además por permitirme vivir momentos muy agradables y experiencias enriquecedoras para mi crecimiento como profesional y como persona.

A mis padres Esmelin y Nelcy, porque gracias a su constancia y paciencia, pudieron formarme con valores que me ayudaron a afrontar el reto de convertirme en una profesional integral. Además, por el gran esfuerzo de mi padre que con su entrega y amor hizo posible en el ámbito económico que yo me pudiera formar en una excelente universidad como es la Pontificia Bolivariana. Mi título profesional es completamente de mis padres, por siempre tomar la decisión de apoyarme en todas las etapas de mi vida.

A mis hermanos, porque siempre me sirvieron de apoyo moral y estuvieron ahí en los momentos de dificultad, o cuando quería desistir por el sentimiento de estar lejos de casa.

***BETSY LILIANA OSPINO JULIO***

Este proyecto investigativo ésta dedicada principalmente a Dios, por darme la fuerza para alcanzar una de tantas metas que anhelamos.

A mis padres, por su sacrificio, trabajo y amor a lo largo de todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta este punto de poder convertirme en lo que soy, me siento sumamente orgulloso y privilegiado de ser su hijo.

A mis hermanos, quienes siempre me apoyaron dándome apoyo moral que me han brindado a lo largo de mi vida.

A mi pareja, quien siempre confió en mis virtudes y conocimientos para la realización de este proyecto.

A todas esas personas que estuvieron a lo largo de este trayecto dándome ánimos para poder convertirme en lo que soy hoy en día.

**SAMY DAIR BULA GRIEGO**

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a Dios por darme la oportunidad de terminar mi carrera profesional, por darnos salud a mis padres y a mí, por darnos siempre fortaleza como familia para afrontar este camino unidos. Además, por brindarle a mí papa el trabajo necesario para acceder a esta universidad.*

*A mis padres por ser mi apoyo incondicional, por ser ejemplo de constancia, honestidad y porque con mucho amor me enseñaron que las cosas se consiguen con mucho esfuerzo y dedicación.*

*A mis compañeros de estudio y docentes que formaron parte importante de este proceso de formación, por siempre brindarme su ayuda y conocimiento con mucha paciencia y vocación.*

*A los laboratoristas de la universidad Pontificia Bolivariana porque me dedicaron todo el tiempo necesario y aportaron su conocimiento para poder realizar muchas de las pruebas que se llevaron a cabo para hacer posible este proyecto, a pesar de todos los inconvenientes que el proyecto traía para ellos.*

*Al ingeniero Elkin Mauricio López por estar siempre comprometido durante todo el proceso que tuvimos al realizar este proyecto, por aportarme con mucha vocación su conocimiento y con mucha paciencia brindarme su tiempo de forma constante.*

**BETSY LILIANA OSPINO JULIO**

*Agradezco principalmente a Dios por bendecirme con la vida, por darme el apoyo y fortaleza para lograr superar cada obstáculo cuando los momentos eran muy difíciles.*

*Gracias a mis padres: Samy Bula y Luisa Griego, por ser siempre los impulsores a realizar mis sueños, por ser ese apoyo incondicional que siempre confiar y creer en mí, por los valores y consejos que me han dado a lo largo de todo este camino.*

*Quiero expresar mi gratitud a mi pareja Karen Vesga, por ser una persona que ha tenido fe en mí y en que podía realizar este proyecto.*

*Agradezco a todo el personal docente de la facultad de ingeniería civil que alrededor de toda la carrera estuvieron directa o indirectamente preparándome para ser un buen profesional y una buena persona, mencionar al docente Elkin López director del proyecto de grado quien con paciencia y rectitud nos ha guiado a la finalización de nuestro proyecto.*

*Finalmente quiero agradecer a la Universidad Pontificia Bolivariana por abrirme las puertas y aprobarme para poder convertirme en un profesional, además de permitirme realizar nuestra investigación.*

**SAMY DAIR BULA GRIEGO**

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>INTRODUCCIÓN</b>	15
<b>1. OBJETIVOS</b>	17
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b>	17
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS</b>	17
<b>2. ANTECEDENTES</b>	18
<b>3. MARCO TEORICO</b>	21
<b>3.1 MORTERO</b>	21
<b>3.1.1 Tipos de mortero</b>	21
<b>3.1.2 Clasificación del mortero</b>	23
<b>3.1.3 Usos del mortero</b>	24
<b>3.1.4 Durabilidad y corrosión del mortero</b>	25
<b>3.1.5 Afectación de la temperatura al mortero</b>	26
<b>3.1.6 Aplicaciones del mortero en diferentes temperaturas</b>	27
<b>3.1.7 Morteros modificados</b>	28
<b>3.2 POLIPROPILENO</b>	29
<b>3.2.1 Reseña histórica del polipropileno</b>	30
<b>3.2.2 Clasificación del polipropileno</b>	30
<b>3.2.3 Características del polipropileno</b>	31
<b>3.2.4 Propiedades del polipropileno</b>	31
<b>3.2.5 Reciclado del polipropileno</b>	32
<b>3.2.6 Tipos de reciclaje del polipropileno</b>	32
<b>3.2.7 Trituración del polipropileno</b>	35
<b>3.2.8 Usos del polipropileno reciclado</b>	36
<b>3.2.9 Afectación de la temperatura al polipropileno</b>	39
<b>4. METODOLOGIA</b>	40
<b>4.1 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES</b>	42
<b>5.1.1.2 Polipropileno</b>	42
<b>5.1.1.3 Arena</b>	47
<b>5. DISEÑO DE MEZCLA</b>	54

<b>6. RESULTADOS OBTENIDOS .....</b>	<b>58</b>
• Resultados a los 7 días .....	58
• Resultados a los 14 días .....	59
• Resultados a los 28 días .....	59
<b>7. ANALISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>60</b>
<b>7.1 MICROGRAFÍAS CON SEM Y ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS.....</b>	<b>60</b>
<b>7.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN .....</b>	<b>64</b>
7.2.1 Análisis de resistencia para 7 días.....	64
7.2.2 Análisis de resistencia para 14 días.....	65
7.2.3 Análisis de resistencia para 28 días.....	66
7.2.4 Evolución de la resistencia a la compresión a las edades de 7,14 y 28 días con temperatura de 200°C .....	67
<b>7.3 ALIGERAMIENTO.....</b>	<b>68</b>
7.3.1 Análisis de aligeramiento a los 7 días .....	68
7.3.2 Análisis de aligeramiento a los 14 días .....	69
7.3.3 Análisis de aligeramiento a los 28 días .....	70
<b>8. ANALISIS ESTADÍSTICO .....</b>	<b>72</b>
<b>8.1 ANALISIS DE RESISTENCIA .....</b>	<b>72</b>
8.1.1 Análisis Estadístico para 7 días.....	72
8.1.2 Análisis Estadístico para 14 días.....	79
8.1.3 Análisis Estadístico para 28 días.....	86
<b>8.2 ANALISIS DE ALIGERAMIENTO .....</b>	<b>94</b>
8.2.1 Análisis para 7 días .....	94
8.2.2 Análisis para 14 días.....	98
8.2.3 Análisis para 28 días.....	102
<b>9. CONCLUSIONES .....</b>	<b>107</b>
<b>10. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>121</b>



## LISTA DE ILUSTRACIÓN

<b>Ilustración 1. Mezcla para mortero hidráulico.....</b>	<b>21</b>
<b>Ilustración 2. Materiales para la preparación del mortero .....</b>	<b>23</b>
<b>Ilustración 3. Mortero de cal y arena.....</b>	<b>23</b>
<b>Ilustración 4. Mortero hidráulico fraguado con aditivo.....</b>	<b>24</b>
<b>Ilustración 5. Regeneración estructural por corrosión del mortero .....</b>	<b>26</b>
<b>Ilustración 6. Prueba mortero refractario.....</b>	<b>27</b>
<b>Ilustración 7. Aplicación de anticongelantes .....</b>	<b>28</b>
<b>Ilustración 8. Proceso para el reciclaje mecánico de Rpp.....</b>	<b>33</b>
<b>Ilustración 9. Diagrama de reciclaje químico (pirólisis).....</b>	<b>34</b>
<b>Ilustración 10. Proceso para producir electricidad por medio de Rpp .....</b>	<b>35</b>
<b>Ilustración 11. Máquina para la trituración del Rpp .....</b>	<b>36</b>
<b>Ilustración 12. Aplicaciones del polipropileno reciclado .....</b>	<b>37</b>
<b>Ilustración 13. Tubería de polipropileno .....</b>	<b>38</b>
<b>Ilustración 14. Fibras de polipropileno .....</b>	<b>38</b>
<b>Ilustración 15. Polipropileno triturado .....</b>	<b>41</b>
<b>Ilustración 16. Montaje realizado para obtener el punto de Fusión.....</b>	<b>43</b>
<b>Ilustración 17. Probeta para ensayo de Charpy.....</b>	<b>46</b>
<b>Ilustración 18. Resultado del ensayo de Charpy .....</b>	<b>46</b>
<b>Ilustración 19. Probeta ensayo de Dureza .....</b>	<b>47</b>
<b>Ilustración 20. Ensayo de impureza Arena .....</b>	<b>52</b>
<b>Ilustración 21. Mortero sometido a compresión .....</b>	<b>58</b>
<b>Ilustración 22. Micrografías con SEM .....</b>	<b>60</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades del polipropileno reciclado (RPP) .....	43
Tabla 2. Datos necesarios para el cálculo de la densidad del RPP .....	44
Tabla 3. Módulo de finura del RPP.....	45
Tabla 4. Valores utilizados para graduar Durómetro .....	47
Tabla 5. Propiedades de la arena de rio.....	48
Tabla 6. Datos obtenidos en laboratorio para Densidad.....	48
Tabla 7. Modulo de finura Arena de rio.....	49
Tabla 8. Datos de Molde .....	51
Tabla 9. Equivalencia entre colores de la placa orgánica y los colores estándar Gardner .....	52
Tabla 10. Cantidad teórica de mortero para 1m <sup>3</sup> .....	55
Tabla 11. Cantidad teórica para un 1m <sup>3</sup> de mortero luego del ajuste .....	56
Tabla 12. Cantidad de material para un cubo de mortero luego del ajuste .....	57
Tabla 13. Cantidad de plástico a sustituir .....	57
Tabla 14. Resultados a los 7 días.....	58
Tabla 15. Resultados a los 14 días.....	59
Tabla 16. Resultados a los 28 días.....	59
Tabla 17. Análisis químico testigos .....	61
Tabla 18. Análisis químico sin tratamiento térmico.....	63
Tabla 19. Analisis químico con tratamiento térmico.....	64
Tabla 20. Análisis de varianza sin tratamiento vs testigo.....	73
Tabla 21. Análisis de varianza tratamiento vs sin tratamiento .....	75
Tabla 22. Análisis de varianza con tratamiento vs testigo.....	76
Tabla 23. Análisis de varianza sin tratamiento vs testigo 14 días .....	80
Tabla 24. Analisis de varianza tratamiento vs sin tratamiento 14 días.....	82
Tabla 25. Análisis de varianza con tratamiento vs testigos 14 días .....	83
Tabla 26. Análisis de varianza Sin tratamiento vs testigo 28 días.....	87
Tabla 27. Análisis de varianza con tratamiento vs sin tratamiento 28 días .....	89
Tabla 28. Análisis de varianza con tratamiento vs testigo 28 días.....	91
Tabla 29. Análisis de varianza: Peso con tratamiento vs testigo .....	95
Tabla 30. Análisis de varianza: Peso con tratamiento vs testigo .....	99
Tabla 31. Análisis de varianza: Peso con tratamiento vs testigo 28 días .....	103
Tabla 32. Resultados obtenidos por cubo a los 7 días Fuente: Propia .....	115
Tabla 33. Calculo de esfuerzos 7 días.....	116
Tabla 34. Resultados obtenidos por cubo a los 14 días .....	117
Tabla 35. Cálculo de esfuerzos 14 días.....	118
Tabla 36. Resultados obtenidos por cubo a los 28 días .....	119
Tabla 37. Cálculo de esfuerzos 28 días.....	120

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Metodología utilizada para realizar el proyecto de grado.....	40
Figura 2. Curva granulométrica RPP .....	45
Figura 3. Curva granulométrica de la Arena .....	50
Figura 4. Espectro de rayos X testigos .....	61
Figura 5. Espectro de rayos X con sustitución de RPP sin tratamiento térmico.....	62
Figura 6. Espectro de rayos X con tratamiento térmico .....	63
Figura 7. Resistencia a los 7 días .....	65
Figura 8. Resistencia a los 14 días .....	66
Figura 9. Resistencia a los 28 días.....	67
Figura 10. Resistencia a todas las edades.....	68
Figura 11. Peso a los 7 días .....	69
Figura 12. Peso a los 14 días .....	70
Figura 13. Peso a los 28 días .....	70
Figura 14. Grafica de probabilidad normal.....	72
Figura 15. Gráfico de Fisher entre sin tratamiento vs testigo.....	74
Figura 16. Grafico de Fisher con tratamiento y sin tratamiento .....	75
Figura 17. Grafico de Fisher tratamiento térmico VS testigos.....	77
Figura 18. Grafica de efectos principales .....	78
Figura 19. Grafica de interacción para mayor resistencia .....	79
Figura 20. Grafica de probabilidad normal 14 días.....	79
Figura 21. Gráfico de Fisher entre sin tratamiento vs testigo 14 días .....	81
Figura 22. Grafico de Fisher con tratamiento y sin tratamiento 14 días.....	82
Figura 23. Gráfico de Fisher con tratamiento térmico VS testigo 14 días .....	84
Figura 24. Grafica de efectos principales 14 días.....	85
Figura 25. Grafica de interacción para mayor resistencia 14 días.....	86
Figura 26. Grafica de probabilidad normal 28 días .....	87
Figura 27. Gráfico de Fisher entre sin tratamiento vs testigo 28 días .....	88
Figura 28. Gráfico de Fisher con tratamiento térmico vs sin tratamiento .....	90
Figura 29. Gráfico de Fisher con tratamiento VS testigo 28 días .....	91
Figura 30. Grafica de efectos principales 28 días.....	93
Figura 31. Grafica de interacción para mayor resistencia 28 días.....	93
Figura 32. Grafica de probabilidad normal.....	94
Figura 33. Gráfico de Fisher con tratamiento y testigos.....	96
Figura 34. Grafica de efectos principales .....	97
Figura 35. Grafica de interacción para mejor peso.....	98
Figura 36. Grafica de probabilidad normal 14 días .....	98
Figura 37. Gráfico de Fisher con tratamiento VS testigos 14 días.....	100
Figura 38. Grafica de efectos principales 14 días.....	101
Figura 39. Grafica de interacción para 14 días .....	102

<b>Figura 40. Grafica de probabilidad norma 28 días .....</b>	<b>102</b>
<b>Figura 41. Gráfico de Fisher con tratamiento VS testigos 28 días.....</b>	<b>104</b>
<b>Figura 42. Grafica de efectos principales 28 días.....</b>	<b>105</b>
<b>Figura 43. Grafica de interacción para mejor peso 28 días .....</b>	<b>106</b>
<b>Figura 44. Resistencia de 150°C a todas las edades .....</b>	<b>121</b>
<b>Figura 45. Resistencia de 230°C a todas las edades .....</b>	<b>121</b>

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** EVALUACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN MORTEROS ALIGERADOS CON POLIPROPILENO Y SOMETIDOS A TRATAMIENTO TÉRMICO.

**AUTOR(ES):** Samy Dair Bula Griego, Betsy Liliana Ospino Julio

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR(A):** Elkin Mauricio López Morantes

### RESUMEN

Los morteros convencionales son una mezcla de diversos materiales tales como agua, arena y material cementante (cemento portland, cal, entre otros) con un amplio espectro de aplicaciones en la industria de la construcción. Buscando evaluar la posibilidad de integrar materiales alternativos en la elaboración de morteros que resulten competentes respecto a los convencionales y que a su vez permita incluir materiales reciclados comúnmente contaminantes como lo es en este caso particular el Polipropileno Reciclado (RPP) proveniente de la trituración de tapas de envases plásticos. En esta investigación se logró evaluar la incidencia del RPP como sustituto de la arena en la resistencia a la compresión de morteros a diferentes edades (7, 14 y 28 días), sometidos a tratamiento térmico buscando una mejora en la adherencia. Para tal fin, se realizaron unas pruebas experimentales elaborando 240 especímenes o cubos de morteros incluyendo especímenes de referencia y con adiciones de RPP en porcentajes de 3%, 6% y 9%. El tratamiento térmico se realizó para valores de temperaturas cercanos al punto de fusión del RPP (150°C, 200°C y 230°C). Teniendo en cuenta la norma NTC 220 que expone las especificaciones que deben cumplir los morteros sometidos a la compresión y los rangos en la que esta debe estar; se puede concluir que los morteros ensayados con el 6% de polipropileno y a una temperatura de 200°C son óptimos, debido a que se obtuvieron resultados mayores a los testigos realizados y además se observó un aligeramiento en todos los especímenes con polipropileno.

### PALABRAS CLAVE:

Polipropileno, morteros, reciclaje, resistencia, tratamiento térmico, compresión.

## GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

**TITLE:** EVALUATION OF COMPRESSION RESISTANCE IN MORTARS LIGHTED WITH POLYPROPYLENE AND SUBJECT TO THERMAL TREATMENT

**AUTHOR(S):** Samy Dair Bula Griego, Betsy Liliána Ospino Julio

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Civil

**DIRECTOR:** Elkin Mauricio Lopéz Morantes

### ABSTRACT

Conventional mortars are composed of a mix of diverse materials such as water, sand, and cementitious material (Portland cement and lime, among others) with a wide spectrum of applications in the construction industry. This study evaluated the possibility of integrating alternative materials in the creation of mortars that are comparable in quality to conventional mortars, and that include recycled materials that are commonly contaminants, such as in the case of Recycled Polypropylene (RPP). RPP originates from the trituration of the lids of plastic containers. In this study, the researchers evaluated the impact of RPP as a substitute for sand in the resistance to compression of differently aged mortars (7, 14, and 28 days) subjected to a thermal treatment in order to find an improvement in adhesiveness. In order to do so, researchers completed several experimental tests, producing 240 specimens, or cubes of mortars, including model specimens and specimens with the addition of RPP at 3%, 6%, and 9%. The thermal treatment was done at temperature values close to the point of fusion of RPP (150°, 200° y 230° Celsius). The research complied with the I.N.V.E. 232 regulation, which sets forth the specifications with which mortars subjected to compression must comply, and the range in which they must remain. The results of the study show that the mortars containing 6% of polypropylene and treated at 200°C behaved the most optimally, yielding the greatest results. Additionally, all of the specimens containing polypropylene demonstrate an improvement.

### KEYWORDS:

Polypropylene, mortars, recycling, resistance, heat treatment, compression

## INTRODUCCIÓN

Entre los principales objetivos de la ingeniería civil esta aprovechar los recursos naturales para obtener el bienestar progresivo en la humanidad, por medio de la construcción de infraestructuras; teniendo en cuenta la responsabilidad social que esta tiene se hace necesario siempre hacer las respectivas verificaciones a cada uno de los materiales que se utilizan en cada obra. Pero además se debe buscar la manera de que contribuya a mitigar los posibles impactos ambientales.

El Polipropileno (PP) es actualmente en Colombia el plástico más utilizado, ya que sirve para realizar múltiples productos (tapas de botellas, botellas de detergente, sillas, entre otros). Debido a esto el reciclaje de los materiales plásticos se encuentra en auge. Actualmente la forma de reciclaje más común es la trituración; pero se espera que grandes empresas inviertan en maquinarias para generar un reciclaje industrializado de PP.

Por consiguiente, el presente proyecto de investigación ofrece una alternativa ecológica empleando material plástico (RPP) como sustituyente de porcentajes de arena (3%,6% y 9%) para la elaboración de un mortero, buscando analizar la incidencia de las propiedades del mismo y además comprobar que cumple con el estándar de resistencia de un mortero convencional.

Este proyecto se encuentra distribuido en 10 capítulos y un anexo que detallan la información de lo que se realizó durante todo el proceso; primero se encuentran plasmados los objetivos de este trabajo para ir confirmando su cumplimiento al ir analizando el libro.

En el capítulo dos se encuentra el estado del arte, que muestra de forma detallada que estas investigaciones sobre los plásticos en general han venido trascendiendo desde hace muchos años.

En el capítulo siguiente se encuentra el marco teórico, donde se evidencia una recopilación de múltiples citas bibliográficas, que son la base para iniciar esta investigación y entender las ventajas y desventajas que puede traer sustituir arena con RPP en una mezcla de mortero convencional.

En el cuarto capítulo se describe toda la metodología utilizada para obtener resultados positivos en la investigación, se describe además como se realizaron los ensayos para la caracterización de los materiales utilizados y las normas utilizadas para cada caso, con el fin de que este proyecto sirva de guía para incentivar nuevas investigaciones relacionadas con el tema en cuestión.

Luego, se encuentra el capítulo 5, donde hay un paso a paso detallado de cómo se realizó el diseño de mezcla para los morteros convencionales y también de qué

forma se sustituyó volumétricamente la arena por RPP en los porcentajes ya mencionados, el método utilizado para realizarlo y además en que libro pueden encontrar toda la información de forma detallada.

El capítulo 6 contiene toda la descripción sobre la prueba de compresión realizada a todos los especímenes (192) y los promedios de los resultados calculados.

En el siguiente capítulo se observa por medio de diagramas el respectivo análisis de los datos obtenidos, y unas comparaciones de como varia la resistencia a la compresión entre los especímenes que tienen las sustituciones (3%,6% y 9%), también con tratamiento térmico y la mezcla tradicional de un mortero convencional y además que beneficio nos causa el RPP junto con el tratamiento térmico en cuanto al aligeramiento de los morteros.

En el capítulo 8 se desarrolló un análisis estadístico, por medio de ANOVA y su representación en la gráfica de Fisher realizada que permite saber si en realidad existe una variación en la resistencia y el peso al momento de ponerle RPP y sumarle a esto el tratamiento térmico; además se realiza con la herramienta minitab una gráfica factorial que relaciona la resistencia y el peso con las variables que en este caso son los porcentajes sustituidos y las temperaturas.

En el capítulo final se encuentran las conclusiones sobre cual porcentaje es el óptimo, teniendo en cuenta que debe ser conveniente en cuanto a la resistencia y el aligeramiento, además si funciona o no un tratamiento térmico, luego toda la bibliografía que fue necesaria para realizar este proyecto. Para complementar este proyecto se realiza un anexo donde se puede observar los resultados obtenidos para cada cubo de mortero realizado, su peso, su área, la cara soportada y además el cálculo de los esfuerzos para cada uno.



## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL.**

- Evaluar la resistencia a la compresión en morteros aligerados con diferentes porcentajes de polipropileno y sometidos a tratamiento térmico.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Determinar la incidencia del aligeramiento con polipropileno en proporciones del 3%, 6% y 9% en la resistencia a la compresión de cubos normalizados de morteros.
- Analizar el efecto del tratamiento térmico en la resistencia a la compresión de cubos de morteros aligerados con polipropileno.

## 2. ANTECEDENTES

Con el pasar de los tiempos la industria de la construcción ha buscado la manera de utilizar materiales que sean reciclables o que sirvan para el aligeramiento o mejoramiento de las propiedades de los morteros. Entre esa búsqueda se logra apreciar un material que puede lograr ser reutilizable y, además puede llegar a ser favorable para la construcción.

En el año 1997 Oscar Magariños y Lucía Arias, miembros del Instituto de tecnología arquitectónica de Argentina, realizan un estudio denominado “Estudio de morteros que contienen escamas de plástico procedente de residuos post-industriales”. El estudio consistió en analizar las propiedades de los morteros convencionales versus los morteros con adición de plástico. Como conclusión de su estudio establecen que es favorable utilizar el PET como sustitutos de la arena en porcentajes de máximo el 66% con un efecto positivo en la pruebas de resistencia a la compresión. [1]

En el mismo año Miguel Sanjuán y Amparo Moragues, Miembros del Instituto de ciencias de la construcción en Madrid, España. Realizaron un estudio llamado “Polypropylene-fibre-reinforced mortar mixes: Optimization to control plastic shrinkage”. Esta investigación se encargó de optimizar mezclas de mortero con adición de fibras de polipropileno para mejorar la contracción plástica. Como resultado obtuvieron que los morteros con fibras reducían la contracción plástica un 25% en comparación con los morteros convencionales. [2]

En el 2004 Y. Ma y K. Wu miembros del State Key Laboratory of Concrete Materials Research en Shanghái, china. Desarrollaron una investigación acerca del “Effect of Y type polypropylene fiber on plastic shrinkage cracking of cement mortar”, el cual consistió en el estudio por contracción plástica de los morteros de cemento. Luego de los ensayos llegaron al resultado que el craqueo ponderado disminuyó un 88% a una fracción de volumen de fibra de 0.15%. [3]

En el año 2008 Luis Alesmar y María Korody, miembros del Departamento de ingeniería estructural de Caracas, Venezuela. Realizaron una investigación acerca de los “Diseños de mezcla de tereftalato de polietileno (PET) – cemento”. Este consistió en realizar diseños de mezcla con proporciones de 5%, 10% y 15% de PET, además del agregado fino y el agregado grueso. Donde se concluyó que el diseño que mejor resultado arrojó fue la mezcla del 15% de PET, Aunque esta no sea la mezcla más homogénea. [4]

En este mismo año Rosana Gaggino, estudiante de maestría del CEVE (centro experimental de la vivienda económica) de Argentina. Realizó un estudio sobre “RECYCLED PLASTIC BRICKS AND PANELS FOR SELFCONSTRUCTION”. Este proyecto tuvo como finalidad la fabricación de elementos utilizados para la

construcción utilizando materiales plásticos que sirvieran de aislamiento térmico y posean resistencia necesaria para la mampostería de muros laterales. Tras la investigación se llegó a la conclusión de que estos elementos pueden obtener un proceso de elaboración que no es nocivo para el medio ambiente y además de ello puede ser como una tecnología sustentable. [5]

Luego en el 2010 Ángela Pullaguari, estudiante de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito, Ecuador. Realiza una investigación sobre el “DISEÑO DE BLOQUES EN BASE A POLIETILENO-TEREFTALATO (PET)”. Este tuvo como finalidad la creación de bloques o ladrillos a base de PAT. Los resultados que arrojó la investigación fueron: al utilizar PET en la elaboración de los bloques aumenta la resistencia a comparación de los normales, el proceso de secado de los bloques con PET se tarda un día más. [6]

En el año 2012 Saúl Castillo, de la Universidad Veracruzana plantea una investigación llamada “PROPUESTA PARA SUSTITUCIÓN DE AGREGADOS PETREOS POR AGREGADOS PET, EN DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO CON RESISTENCIA  $f'c=150\text{KG}/\text{CM}^2$ , USADO PARA BANQUETAS, GUARNICIONES Y FIRMES”. Esta investigación consistió en el reciclado de materiales plásticos para la utilización de los mismos en la industria de la construcción. Esta investigación dio como resultado que la utilización de grava plástica da como resultados positivos al ser un sustituto de grava convencional para la realización de concretos con bajas resistencias y concretos utilizados para elementos estructurales que no sean a gran escala. [7]

En el mismo año Antonella Costa, magister en arquitectura de la Universidad Politécnica de Cataluña, realizó un estudio acerca de “Hormigones y morteros aligerados con agregados de plástico reciclado como árido y carga en la mezcla”, que tuvo como finalidad la utilización de gránulos de plástico mediante una sustitución del agregado fino para obtener un mejor aislamiento térmico y una reutilización del PVC reciclado. Como resultado obtuvo que una mezcla con un porcentaje entre el 30% y 40% de plástico son las más adecuadas debido a que poseen una mejor trabajabilidad, además estas mezclas son las que mejor se desempeñaron como aislamiento térmico. [8]

En el 2012 Youcef Ghernouti y Bahia Rabehi miembros de LSTE, Laboratoire des Sciences et Techniques de l'Eau, University of Mascara, Mascara, Algeria y UR/MPE, Unité de Recherche: Matériaux, Procédés et Environnement, Université de Boumerdes, Boumerdes, Algeria. Desarrollan una investigación acerca “Strength and Durability of Mortar Made with Plastics Bag Waste (MPBW)”, la cual consiste en reutilizar un material plástico reciclable que se produzca en gran cantidad, mientras se mejora la durabilidad y propiedades mecánicas del mortero. Como resultados se obtuvo que la resistencia se disminuyó entre un 18% - 23% con las mezclas que

contienen 10% y 20% del material plástico. Una conclusión de esta investigación es que PBW (Plastics Bag Waste) mejora la sensibilidad al agrietamiento. [9]

En el año 2016 Hemn Unis y Younis Alshkane, en la University of Sulaimani, Iraq. Elaboraron una investigación denominada “Mechanical properties of cement mortar by using polyethylene terephthalate fibers”, Proyecto que consiste en la elaboración de morteros de cemento con partículas de PET de diferentes tamaños y volúmenes. Como resultado de esta investigación se concluyó que las propiedades del mortero de cemento con plástico incorporado mejoran su resistencia, además de esto a través de las pruebas que realizaron descubrieron que en las edades de 7 y 28 días los morteros que contenían un 3% de plástico presentan mejoras en cuanto a las velocidades de pulso ultrasónico. [10]

A finales del año 2017 Raúl Di marco y Hugo León, en la Universidad de Santander (UIS) elaboraron un proyecto investigativo acerca de “Ladrillos con adición de PET: una solución amigable para núcleos rurales del municipio del Socorro” el cual consistió en una evaluación de las propiedades de la resistencia y absorción del ladrillo tipo tolete con adición de PP en porcentajes de 20% y 40%. Como resultados se obtuvo que los ladrillos que poseen plástico presentan una mejora favorable en el manejo de la mezcla y en la absorción, sin embargo, en comparación con el mortero convencional no arrojó resultados favorables. [11]

En el 2018 Aliyu Usman y Madzlan Napih miembros de Department of Civil & Environmental Engineering, Universiti Teknologi PETRONAS, 32610 Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia y Institute of Self Sustainable Building, Universiti Teknologi PETRONAS, 32610 Bandar Seri Iskandar, Perak, Malaysia. Realizaron una investigación sobre “Effect of Recycled Plastic in Mortar and Concrete and the Application of Gamma Irradiation” que consiste en analizar los efectos que produce la irradiación en los morteros con adición de residuos de plástico. El resultado principal del estudio fue que el mortero con los diferentes tipos de materiales plásticos fue sometido a la irradiación, incide con las propiedades del plástico ayudando así a restaurar las propiedades iniciales. [12]

A finales del año 2018 Paloma Rubio y Manuel Pedreño, miembros del Departamento de construcción arquitectónica de la universidad de Sevilla, España. Crearon un proyecto de investigación denominado “Reúse of plastic waste of mixed polypropylene as aggregate in mortars for the manufacture of pieces for restoring jack arch floors with timber beams” que tiene como finalidad la elaboración de relleno de vigas de construcción y rehabilitación de pisos de vigas utilizando plástico de polipropileno proveniente de residuos urbanos. Como resultado se obtuvo que los porcentajes más factibles para que posean la resistencia requerida son entre el 5% al 15% total del peso del agregado fino.

### 3. MARCO TEORICO

#### 3.1 MORTERO

El mortero es un conglomerado hecho a base de un material cementante, agua, arena y, en ocasiones, cal; la importancia de estos materiales radica en que, primero, la arena garantiza una cantidad volumen (depende de cómo esté dosificada) a la mezcla, y segundo, consecuentemente el cemento permite que las partículas permanezcan unidas. [13] El mortero es utilizado en la práctica constructiva para elementos de poca o baja resistencia.

Este posee diferentes consistencias y esto es debido a la fluidez que pueda presentar, las cuales son dura o seca (fluidez de 80% a 100%), media o plástica (de 100% a 115% de fluidez) y fluida o húmeda (de 120% a 150% de fluidez).

Dentro de la consistencia que sea necesaria para la utilización del mortero se puede observar una de ellas en la Ilustración 1:

**Ilustración 1. Mezcla para mortero hidráulico**



Fuente: APLITECME [14]

##### 3.1.1 Tipos de mortero

Los morteros se diferencian unos de otros según su tipología que pueden ser morteros secos o hidráulicos, los morteros secos son aquellos los cuales están compuestos por una mezcla de material cementante, arena, agua y aditivos usados según su función, los tipos de mortero seco son:

### **3.1.1.1 Tipo M**

Este tipo de mortero es específicamente utilizado para la pega de mampostería estructural cuando se requiere pañetería, también es utilizado para elementos estructurales que requieran mayor resistencia. Es recomendable usar este tipo de mortero cuando la mampostería está siendo afectada por fuertes corrientes de aire o cargas laterales.

El cual es regulado por ciertos parámetros para el control de la calidad del mismo, dichos parámetros están vigilados bajo las normas NTC 4050 y NTC 3546. [13]

### **3.1.1.2 Tipo N**

El tipo N es diseñado para el uso de pega para unidades de mampostería horizontal y vertical, así mismo, es utilizado para asegurar un buen acabado y presentación de muros; esencialmente para muros interiores no estructurales.

Tiene como ventaja que presenta mejor control para la interventoría.

Es regulado bajo la norma NTC 3329, la cual especifica que debe retener mínimo un 75% de agua y debe resistir como mínimo 75 kg/cm<sup>2</sup>. [15]

### **3.1.1.3 Tipo S**

El mortero tipo S tiene como función la pega de bloques hechos de concreto y arcilla, este tipo ofrece una mejor adherencia y trabajabilidad lo que le permite mayor facilidad a la hora de trabajar con él.

Este tipo posee una funcionalidad más la cual es usada para producción de pisos y contrapisos, además también puede ser usado para interiores como para exteriores.

Es controlado bajo las normas NTC 3356 y NTC 1032, las cuales estipulan que debe un contenido de aire no mayor al 12%. [16]

### **3.1.1.4 Tipo Grout**

Este mortero es diferente a los demás debido a que es una mezcla fluida que no posee segregación y es utilizado para el relleno de celdas en construcciones de mampostería.

Este mortero cumple con las especificaciones de la norma NTC 4048, la cual establece el procedimiento que debe llevar a cabo para la creación de este mortero. [17]

### 3.1.2 Clasificación del mortero

Se clasifican según su conglomerado, entre estos algunos poseen un uso más común que otros, estos morteros son:

#### 3.1.2.1 *Mortero de cemento y arena*

Estos cuentan con una alta resistencia, su proceso de secado y endurecimiento es más rápido, sin embargo, su desventaja es que no cuenta con demasiada flexibilidad lo cual hace que se fracture con más facilidad.

En la Ilustración 2 podemos ver los materiales que son necesarios para la preparación del mortero de arena y cemento.



Fuente: Materiales para construcción [18]

#### 3.1.2.2 *Mortero de cal y arena*

El mortero de cal y arena cuenta con una gran virtud respecto a los demás, tiene una gran flexibilidad y es sencillo de aplicar. Contiene una desventaja que no es impermeable y poco resistente.

El resultado de realizar la mezcla para esta clasificación del mortero queda como una pasta blanca de forma homogénea como se puede evidenciar en la Ilustración 3:

**Ilustración 3. Mortero de cal y arena**

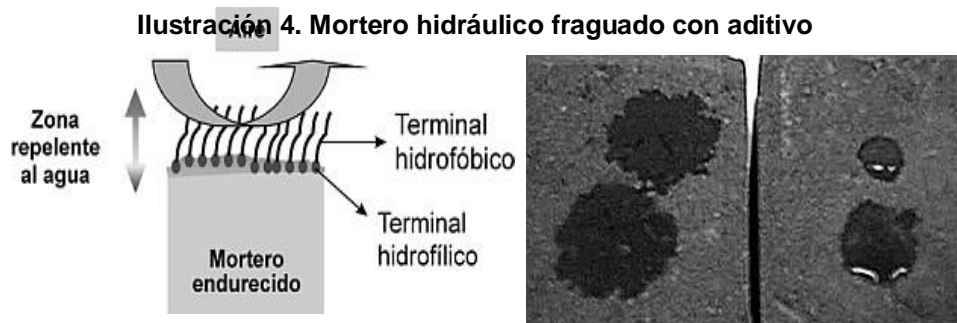


Fuente: OXICAL [19]

### 3.1.2.3 Mortero hidráulico

Son considerados morteros compuestos porque tiene la particularidad de fraguar bajo el agua, su aglomerante puede ser el cemento, la cal o ambos a la vez.

Para esta clasificación el mortero debe tener una zona repelente al agua, es decir, tienen una zona que no permite el paso del agua a la mezcla, a continuación, podemos evidenciar en la Ilustración 4 como es el proceso de repeler el agua.



### 3.1.3 Usos del mortero

Los usos de los morteros son diversos estos pueden ser para fines estructurales como no estructurales. Los morteros que son usados para fines estructurales son los siguientes:

#### 3.1.3.1 Mortero de pega

Este mortero es un elemento utilizado para empatar o empalmar las unidades de mampostería.

#### 3.1.3.2 Mortero de relleno

Consiste en obtener una mezcla fluida para depositarla en interiores de muros. Esto se utiliza con el fin de aumentar la resistencia en la sección en la cual se está utilizando, además sirve como una unión entre el refuerzo y la mampostería.

#### 3.1.3.3 Mortero de recubrimiento

El mortero de recubrimiento no es un mortero estructural pero es utilizado para la práctica constructiva, tiene como finalidad nivelar una estructura para obtener una uniformidad para realizar tareas como, por ejemplo, el pintado de una fachada. No es necesario que tenga una resistencia.



### 3.1.4 Durabilidad y corrosión del mortero

La durabilidad del mortero se define como la habilidad que posee el mortero para soportar la acción que genera el medio ambiente, que son ataques químicos, físicos, biológicos o cualquier otro proceso que lleve a la destrucción de este. Depende de ciertos factores como son la porosidad que contenga el material así como la exposición al ambiente.

Por el lado de la porosidad debemos observar cómo están organizados los macro poros y micro poros del conglomerado, debido a que es apto para el transporte de agentes deteriorantes, lo que provoca tensiones en las paredes internas y destruye la matriz cementante.

Por otro lado los efectos de deterioro por exposición al ambiente del material está conectado con la acción del agua ya sea como un agente deteriorante o como un agente directo, un ambiente concreto que afecta de manera dura o agresiva al mortero es el marino. [21]

La corrosión del mortero está ligada al medio ambiente el cual tiene múltiples factores que ocasionan el deterioro de la mezcla, factores que más influyen para que la mezcla o estructuras de mortero se corroan son las deposiciones secas o húmedas, es decir, las reacciones contaminantes y la lluvia ácida. Los efectos que causan estos es que el agua tenga un efecto de elemento contaminante a los demás elementos del mortero si se encuentra en contacto con un oxidante. Además, la superficie es de suma importancia debido a que entre mayor se haga mayor será la reacción del contaminante.

Por otro lado, la deposición húmeda produce la formación de yeso provocando que el elemento tenga un contacto con elementos no correspondientes al suyo, este provoca que el mortero vaya perdiendo su resistencia de una forma considerable.

La corrosión también puede ser ocasionada por los efectos de ambiente marino, ya sea el aire salado o el agua de mar, lo cual produce que el elemento se vaya deteriorando debido a las fuertes cantidades de salinidad que esto posean, este efecto va ocasionando una debilitación a la matriz cementante y deterioran las armaduras internas ocasionando un incremento en el volumen interior para luego fracturar o fallar la matriz cementante. [21]

Existen múltiples factores a los que se enfrenta el mortero para no ser corroído, entre ellos puede estar el mal estado del material, así como no darle un mantenimiento adecuado al mismo, en la Ilustración 5 podemos observar cómo se corroe y deteriora el material:

### **Ilustración 5. Regeneración estructural por corrosión del mortero**



Fuente: LEMARA [22]

#### **3.1.5 Afectación de la temperatura al mortero**

La elaboración de morteros tiene una gran variedad de problemas en relación a la producción del mismo. Estos problemas están relacionados con los cambios ambientales o climáticos que puedan generarse al momento de producir la mezcla.

Para los climas cálidos o en zonas muy áridas se tiene en cuenta que al poseer altas temperaturas provocando que el agua de mezclados se vaya evaporando de una forma más rápida, este problema también se evidencia en la fase de mezclado y curado del mortero. El tener una alta temperatura afecta los materiales que constituyen el mortero y además de eso ocasiona un incremento en la cantidad de agua a utilizar, lo que resulta en la aceleración del proceso de hidratación.

Por otra parte, para los climas fríos o condiciones de invierno es importante mencionar que la elaboración de la mezcla de mortero realizada bajo estas condiciones climáticas puede generar efectos en su fraguado debido a que el agua se absorbe más lento o no se absorbe en su totalidad, esto produce que los agregados que lo componen absorban menos agua a comparación de cuando se trataba en climas cálidos.

El efecto que ocasiona trabajar en climas fríos se le denomina “engranaje” y es producido al bajo nivel de humedad que contienen todos los elementos del material produce que la textura de los agregados sea superficial. [23].

De los morteros existentes hay un mortero denominado mortero refractario el cual puede lograr a alcanzar unas temperaturas altas, sin provocar afectación en sus propiedades, en la Ilustración 6 se observa este tipo de mortero:

**Ilustración 6. Prueba mortero refractario**



Fuente: Catalogo SIKA [24]

### **3.1.6 Aplicaciones del mortero en diferentes temperaturas**

Los morteros poseen ciertas aplicabilidades en cuestiones de cambios ambientales o cambios de temperatura ya sea que se esté trabajando en climas cálidos o climas fríos. A continuación, podemos ver la afectación del mortero y como poder mejorarlo:

#### **3.1.6.1 Climas Fríos**

Las afectaciones provocadas por el clima frío son: presenta un alto riesgo de congelación del agua, así como el amasado de la mezcla, incremento en su módulo elástico y de la viscosidad, reducción de las propiedades mecánicas a compresión y tracción.

Para el mejoramiento del trabajo en estos climas se puede tener en cuenta lo siguiente: disponer de los productos almacenados en temperaturas adecuadas antes de ser utilizados, elaborar las mezclas en las zonas horarias donde es mayor la temperatura, precalentar el agua para la mezcla del mortero. [25].

Para la aplicación del mortero en climas de bajas temperaturas (climas fríos) se debe hacer el uso de un material anticongelante el cual su función es no permitir que el mortero no se fisure por el frío, además de permitirle una mejor

maniobrabilidad. En la Ilustración 7 se observa la aplicación de anticongelantes.

**Ilustración 7. Aplicación de anticongelantes**



Fuente: YARA [26]

### **3.1.6.2 Climas Cálidos**

Las afectaciones provocadas por el clima cálido son: Pérdida de las propiedades de los polímeros presentes en el mortero, aceleración del tiempo de fraguado y la trabajabilidad, riesgo de evaporarse más rápido.

Para el mejoramiento del trabajo en climas cálidos podemos utilizar las siguientes aplicaciones: El uso de ventiladores para aislar o disminuir la temperatura, es recomendable utilizar morteros tolerantes con la humedad y si este es el caso se debe previamente mojar la superficie con agua, otra alternativa para mejorar las condiciones de trabajo en climas cálidos es utilizar agua fría para la elaboración de la mezcla.

El saber cómo mejorar las condiciones de trabajo del mortero es importante debido a que esto nos facilita la forma como trabajar o los mecanismos a utilizar en caso de estar presente a una de las temperaturas mencionadas, además se puede tomar medidas para acelerar el proceso de la elaboración del mismo. [25]

### **3.1.7 Morteros modificados**

A medida que pasa el tiempo la industria constructiva busca mejorar las propiedades de los elementos usados comúnmente para la realización de obras estructurales y no estructurales, además de buscar reducir la contaminación ambiental. Por este

motivo de búsqueda se han utilizado distintos tipos de fibras, algunas son favorables mientras que otras no.

A partir de los años 60's y 70's del siglo pasado en América del Norte y en partes de Europa se empieza a utilizar fibras para obtener una mejor consolidación de hormigones. Desde este hecho las fibras son indispensables para la creación de elementos constructivos, tales como, pavimentaciones, elaboración de puentes, revestimientos, estabilizar taludes y elaboración de bóvedas. Existen múltiples fibras que son usadas en la construcción, pero las 3 más comunes son; Fibra de vidrio, fibra metálicas y fibras de polipropileno. [27]

Las fibras de vidrio son principalmente utilizadas para repeler o prevenir la corrosión, los contaminantes ambientales y la aislación térmica. También son buenas actuando en medios alcalinos, sus más comunes aplicaciones son en columnas, vigas, losas y también son utilizadas para piezas de muy bajos espesores. [28]

Por otro lado, las fibras metálicas pueden llegar a sustituir el acero de refuerzo de algunas estructuras, estas proporcionan una gran capacidad de resistir la fuerza de flexión, son dúctiles y una capacidad de carga considerable. Estas fibras se clasifican según la fabricación y según su forma. En la primera opción se puede encontrar: fibras trefiladas, fibras fundidas o virutas de acero. Mientras que en la segunda opción son: fibras rectas, corrugadas, conformadas. [27]

Para las fibras del polipropileno posee una forma de multifilamentos los cuales le generan menor peso a las estructuras de hormigón que puede ir desde 600gr por cada  $m^3$ , también estos filamentos sirven de refuerzo que se disipan por toda la estructura permitiendo reforzarla por todas las direcciones, así como esparcir los esfuerzos recibidos.

Actúan como un gran ente para reducir el agrietamiento cuando la mezcla se encuentra en sus primeros días de fraguado y ayudan al agrietamiento estado endurecido cuando es sometido a alguna temperatura. Una de las principales ventajas de esta fibra es que el proceso de aglomeración o mezclado con los demás componentes del mortero es más eficaz debido a que su tamaño es más reducido en comparación de las demás fibras. Otra de las ventajas es el aumento de la cohesión de la mezcla y su resistencia en los ciclos como hielo-deshielo. [29]

### **3.2 POLIPROPILENO**

El polipropileno o PP es un termoplástico semicristalino de baja densidad, de 0.90 gr/cc; el cual está constituido a partir de enlaces simples, monómeros vinílicos, de carbono-carbono y carbono-hidrógeno. Por su estructura se conoce como polímero vinílico, similar al polietileno, pertenece a la familia de poliolefinas y se cataloga como "polímero versátil". [30]

Este material se obtiene por la polimerización del propileno (gas incoloro), el cual es extraído por la refinación del petróleo o del gas natural. Es 100% reciclable y no es contaminable. Puede ser usado como plástico (en envases y empaques de productos, o en juguetes y autos) o como fibra (en alfombras y tapices).

### **3.2.1 Reseña histórica del polipropileno:**

La historia del polipropileno se remonta al año 1951, donde J. Paul Hogan, químico de investigación estadounidense, y su compañero, Robert Banks, crean un catalizador que acelera las reacciones químicas, y así, mediante la obtención de una muestra de polipropileno se obtuvo el polipropileno cristalino. Posteriormente, en 1954 el químico y profesor universitario alemán, Karl Ziegler, galardonado en 1963 con el Premio Nobel de Química, obtuvo el polietileno de alta densidad a partir del uso de catalizadores organometálicos, y sin darse cuenta obtuvo ahí mismo polipropileno.

En el mismo año, Giulio Natta, químico y profesor universitario italiano, también galardonado en 1963 con el Premio Nobel de química, al catalizar el propileno de polimerización estereoselectiva obtuvo polipropileno isotáctico o polímero macromolecular, denominado así por su estructura espacial simétrica de cadenas regulares, el cual todos los grupos metilos se ubican en el mismo lado de la cadena molecular. Se considera que Giulio consiguió que el polipropileno desarrollara su uso industrial.

Consecuentemente, se le añadió al polipropileno antioxidantes específicos y pequeñas cantidades de monómeros, como el etileno, para que fuera resistente al calor y la luz. [31]

### **3.2.2 Clasificación del polipropileno**

El Polipropileno se puede clasificar en tres tipos según la materia prima que se utiliza y su estructura química; en otras palabras, la cantidad de monómeros diferentes al polímero (homopolímero, Copolímero Rándom y Copolímero de alto impacto) [32]:

#### **3.2.2.1 Los homopolímeros (propileno):**

Es un polímero construido a partir de la reiteración de un único monómero (cadena homogénea), las cuales son cadenas que poseen igual composición química, únicamente por moléculas de propileno. Este presenta alta resistencia a la temperatura y a los ácidos. Puede producir tres tipos de estructuras básicas, según la posición relativa de los grupos metilos (CH<sub>3</sub>) y los átomos de hidrógeno (H): Isotáctica, Atáctica y Sindiotáctica.

### **3.2.2.2 Copolímero Rándom o aleatorios (propileno-etileno):**

Está compuesto por dos o más monómeros, polipropileno unido por moléculas de un comonomero (etileno) que se ubican aleatoriamente a lo largo de la cadena. Este contiene una excelente resistencia a temperatura ambiente, elevada transparencia y flexibilidad.

### **3.2.2.3 Copolímero de impacto o bloque (propileno-etileno):**

Está compuesto por una fase bipolimérica de etileno/propileno con cualidades gomosas. Este presenta una alta resistencia al impacto, a bajas temperaturas y a la deformación por el calor, elevada rigidez. [33]

## **3.2.3 Características del polipropileno**

El polipropileno es uno de los polímeros con más variedad que se conoce, posee una doble funcionalidad las cuales una es como un plástico y la otra es como una fibra. Como plástico sirve para la creación de tapas de embaces de botellas, por otro lado como fibra puede ser utilizado para métodos constructivos, ya que este material posee un excelente balance de sus propiedades y es de fácil procesabilidad, además de esto es un polímero más ligero a los demás materiales plásticos lo que le otorga una mejor impermeabilidad y una vida útil más duradera.

Es un plástico rígido de alta cristalinidad, resistente y opaco; tiene un elevado punto de fusión, a partir de los 150 °C. Posee baja densidad, alta dureza y resistencia a la abrasión, tensión, compresión y al calor, alta rigidez, excelente resistencia química y excelente versatilidad. Es inodoro y no tóxico. [34].

## **3.2.4 Propiedades del polipropileno**

Las propiedades del polipropileno se caracterizan en físicas y químicas las cuales son:

### **3.2.4.1 Propiedades Físicas:**

La densidad del polipropileno está entre 0.90 y 0.93 gr/cm<sup>3</sup>, este material es mucho más rígido que los demás termoplásticos, al aplicarse una carga de 25.5 kg/cm<sup>3</sup> esta no producen variaciones si es sometida a la temperatura, tiene una gran capacidad de recuperar su elasticidad, posee una buena adaptabilidad con el medio, presenta una gran resistencia al impacto, tiene buena resistencia artificial, resiste el calor sin deformarse y resiste a la humedad, posee una buena estabilidad dimensional. [35]

#### **3.2.4.2 Propiedades Químicas:**

Tiene buena resistencia a agentes químicos, posee poca humedad y poca absorción, es resistente a detergentes comerciales, tiene una gran resistencia química, sin embargo, tiene una resistencia baja a los rayos UV, el instante de Ebullición es de 320 °F (160°C), el punto de Fusión (más de 160°C). [35]

#### **3.2.5 Reciclado del polipropileno**

El proceso de reciclado del polipropileno forma parte de los productos domésticos que se reciclan de manera selectiva, una vez que la persona separa los envases, latas, tapas y los deposita en el contenedor respectivo, la empresa encargada los transporta hasta la planta donde son separados los materiales, luego son llevados a industrias donde reciclen.

El porcentaje obtenido del proceso de selección del reciclaje es muy mínima debido a que el volumen de este material al provenir del uso doméstico es reducido al compararlo con otros plásticos, las industrias que más aporte dan al reciclado de este material son la textil y la automovilística.

#### **3.2.6 Tipos de reciclaje del polipropileno**

El reciclaje, la trituración y la reutilización del polipropileno consta de varios factores, como el estado del material y el uso al cual se había sometido. El proceso de reciclado se divide en 3 tipos, los cuales cada uno de ellos se compone de una forma diferente. Los procesos para la reciclaje del polipropileno son:

##### **3.2.6.1 Reciclaje Mecánico**

En este método se evidencia el uso que ha tenido el material los cuales pueden ser pos-consumo y pos-industria, para luego dar un acondicionamiento adecuado el cual debe cumplir ciertos requisitos que sea apropiados para el uso y aplicabilidad del mismo. Dicha aplicabilidad no debe representar un riesgo para la salud o para el medio ambiente. El reciclaje mecánico consta de varias etapas las cuales definen el proceso que se debe seguir para la adecuación del material. A continuación se explican las etapas que componen al reciclaje mecánico.

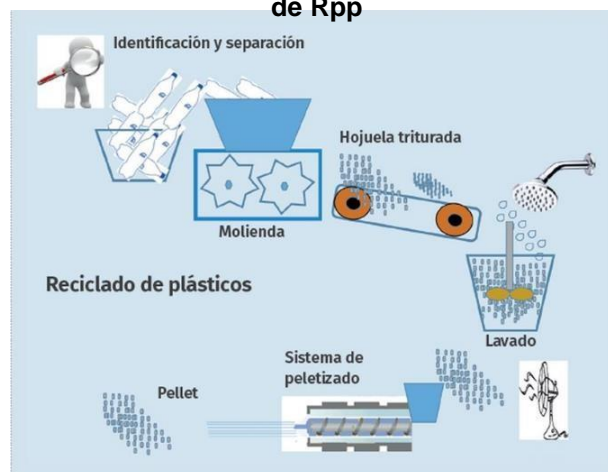
- **Acopio:** es el proceso mediante el cual se debe hacer una buena recolección del material plástico, la cual puede ser en puntos fijos o mediante recorridos. Es importante mencionar que un buen acopio proporciona un mejor funcionamiento de las etapas o pasos siguientes.
- **Limpieza:** Para este aspecto se revisa que el material este en muy buenas condiciones, para obtener un material que sea más fácil de tratar.



- Reducción del tamaño: En este paso se procede a la trituración del material recolectado y limpiado anteriormente, con el objetivo de facilitar las operaciones siguientes.
- **Lavado:** Este proceso es utilizado debido a que los plásticos normalmente están en un estado que poseen residuos de comida, polvo, aceite o residuos de productos industriales como solventes o líquidos tóxicos. Por ello deben ser limpiados para remover toda partícula contaminante.
- **Secado:** Proceso que tiene como fin retirar toda humedad posible del material, para poder ser procesado y comercializado.
- **Extrusión:** El material se funde y enfría para luego darle un baño de agua. En este proceso se le ejerce presión al plástico a través de una matriz metálica que le proporcione una forma o Figura definida, con el fin de evitar deformaciones.
- **Pelletización:** Este es el último paso en el cual se corta el plástico en pequeños pedazos los cuales son llamados pellets, este proceso se debe hacer con el plástico frío.

A continuación, mediante la Ilustración 8 se ve reflejado el proceso o los pasos a seguir para una buena reutilización del plástico o un buen proceso de reciclaje mecánico:

**Ilustración 8. Proceso para el reciclaje mecánico de Rpp**



Fuente: Plastics Tecnolghy [36]

### 3.2.6.2 **Reciclaje Químico**

Este proceso es utilizado cuando los residuos son complejos de manejar a través de métodos como el reciclaje mecánico, tales como plásticos compuestos, cables, tapetes, textiles, partes de automóviles, etc.

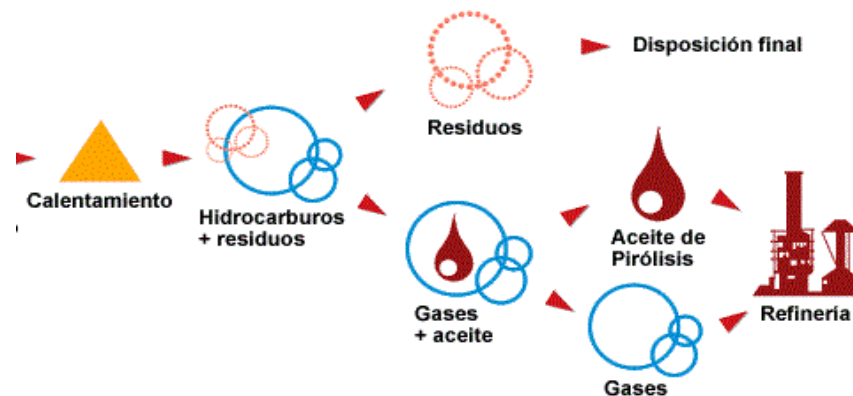
Hay diferentes procesos de reciclaje químico como puede ser la pirolisis la cual refleja una gran ventaja y es que no es necesario la separación por tipo del plástico,

lo que permite utilizar diferentes tipos. Este proceso se puede llevar a cabo mediante dos tipos diferentes, los cuales son:

- Los residuos se despolimerizan en monómeros que pueden ser reutilizados directamente mediante la quimiólisis o cuando las materias primas tienen un peso más bajo se utiliza la termólisis, las cuales pueden ser utilizadas con aceite natural.

En la Ilustración 9 se observa el proceso que tiene el plástico mediante un reciclaje químico, así mismo, se evidencia el lugar donde terminan estos residuos para una reutilización del material:

**Ilustración 9. Diagrama de reciclaje químico (pirólisis)**



Fuente: Reciclaje botellas [37]

El proceso que se debe seguir para el reciclaje químico es el siguiente:

- **Pirólisis:** Es el craqueo de las moléculas mediante ausencia de oxígeno. En este proceso se originan hidrocarburos los cuales luego pueden ser tratados mediante refinerías.
- **Hidrogenación:** En este proceso los plásticos son tratados mediante calor e hidrógeno, para poder romper sus cadenas poliméricas y convertirlos en material sintético.
- **Gasificación:** Los plásticos son preparados para ser calentados mediante aire, para obtener gases sintéticos para luego ser utilizados para la producción de amoníaco o metano.
- **Extrusión degradativa:** En este proceso se utilizan equipos de extrusión para la descomposición del plástico y poder obtener materias primas para el sector petroquímico.
- **Chemolysis:** Este paso se utiliza para la reutilización del material y convertirlo en nuevos plásticos.

- **Metanolisis:** Es un proceso muy avanzado utilizado mediante la incorporación de metanol con el fin de descomponer sus moléculas básicas para poder obtener una resina plástica virgen.

#### 4.2.6.3 Reciclaje Energético

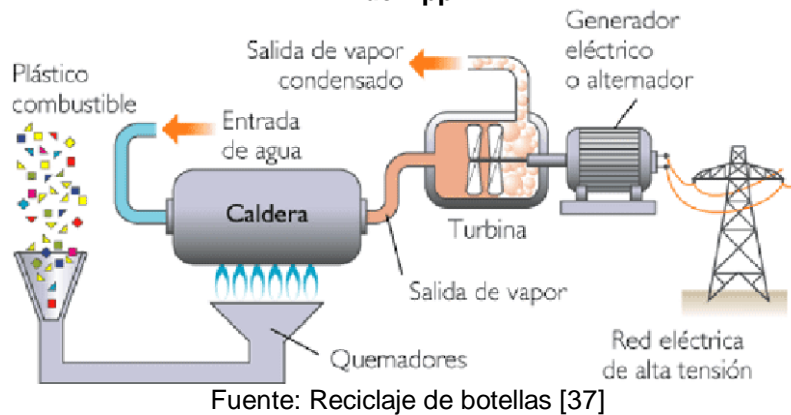
Es el proceso que se realiza mediante combustión controlada (incineración) lo cual permite el aprovechamiento el alto contenido energético de los residuos plásticos como combustible alternativo. En la industria hay múltiples residuos plásticos que generan daño al medio ambiente, sin embargo, hay materiales dispersos entre ellos que son pequeños, los cuales esta manera de reciclar produce una desventaja ambiental, además no serían reciclados.

Para la realización de este tipo de reciclaje se debe tener en cuenta la temperatura y el tiempo en que resida para optimizar al máximo la energía.

Este proceso puede generar electricidad debido a que hay partículas de plástico que son incorporadas en una caldera lo cual provoca una alta presión, luego sale de la caldera dirigiéndose a una turbina que transforma el vapor en energía mecánica, después se transmite a un generador para la obtención de la energía.

El proceso que se debe seguir para que el material plástico de un paso a la creación de energía además de la combustión se puede evidenciar mediante la Ilustración 10:

**Ilustración 10. Proceso para producir electricidad por medio de Rpp**



### 3.2.7 Trituración del polipropileno

El polipropileno es uno de los materiales que más destaca al momento de reciclar debido a que posee grandes propiedades, esto se debe a que es un material que

posee un gran volumen, pero muy poco peso. La trituración del polipropileno nos proporciona un material homogéneo y de un mismo tamaño.

El proceso de triturado inicia con la máquina o triturador, la cual posee una boca de entrada de gran tamaño para permitir el acceso de cantidades grandes de plástico y que ésta preparada para no dejar escapar partículas.

La máquina se compone de varias hélices de gran potencia las cuales gracias a su movimiento van cortando y triturando el plástico, además posee una rejilla o tamizador que proporciona una medida para el paso del plástico, por último, la máquina posee una cinta la cual conduce al material triturado hasta un depósito.

En la Ilustración 11 se muestra un ejemplo de una de las diversas máquinas trituradoras de plástico, en este caso se muestra un triturador que es utilizado para grandes cantidades de plástico.

**Ilustración 11. Máquina para la trituración del Rpp**



Fuente: Reciclaje de botellas [37]

### **3.2.8 Usos del polipropileno reciclado**

Este material se destaca por contener una gran resistencia al impacto, al aplastamiento y de soportar altas temperaturas, esto es lo que permite que su envejecimiento sea lento en comparación de los demás plásticos.

Este material posee múltiples usos y en este caso se analizan los usos constructivos que puedan generarse a través de este material, con este material se puede crear tuberías que son anticorrosivas y resistan a productos químicos. También se usa para la creación de piscinas o instalaciones de aire comprimido, a su vez sirve como conductor de sustancias agresivas. Entre los diversos usos que posee el polipropileno para la industria de la construcción se destacan las instalaciones y las fibras como se muestra en la Ilustración 12.

**Ilustración 12. Aplicaciones del polipropileno reciclado**



Fuente: Reciclaje de botellas [37]

### **3.2.8.1 Polipropileno en instalaciones**

El material presenta una disminución de la producción de ruido, así mismo, da una neutralidad antes los olores que hallan en el ambiente, también es un material que sirve como un gran aislante del calor.

En caso de las tuberías o sistemas de aguas tienen la ventaja que al ser hechas de este material no son rugosas sino completamente lisas, lo que permite mejor transporte del líquido sin deteriorarse. [38]

Uno de los usos del polipropileno son las instalaciones, ya sean hidráulicas, eléctricas o de conducción sean de un gas o líquido. En la Ilustración 13 se logra ver una de las formas con es usado el polipropileno para las tuberías.

**Ilustración 13. Tubería de polipropileno**



Fuente: IPT [39]

### **3.2.8.2 Polipropileno en fibras**

Las fibras de polipropileno poseen fines estructurales como no estructurales, un ejemplo de las no estructurales puede ser las fibras sustitutivas de mallas las cuales pueden ser utilizadas para las pavimentaciones mientras que para ser forjadas no soportan.

Por otro lado están las fibras aditivas las cuales tienen la misma finalidad de usarse en pavimentaciones para protegerlas de la abrasión así como servir de refuerzo para la prevención de la retracción del hormigón, son implementadas para reducir las fisuras que se puedan presentar, pero no poseen la capacidad de sustituir las mallas. [38]

Dentro de la industria de la construcción se busca mejorar las propiedades de los métodos de construcción convencional, en este caso se da el paso al uso de las fibras del polipropileno las cuales puede ayudar al mejoramiento de la resistencia de las diferentes mezclas usadas en la industria, en la Ilustración 14 observamos las fibras del polipropileno:

**Ilustración 14. Fibras de polipropileno**



Fuente: REDESMAR [40]

### **3.2.9 Afectación de la temperatura al polipropileno**

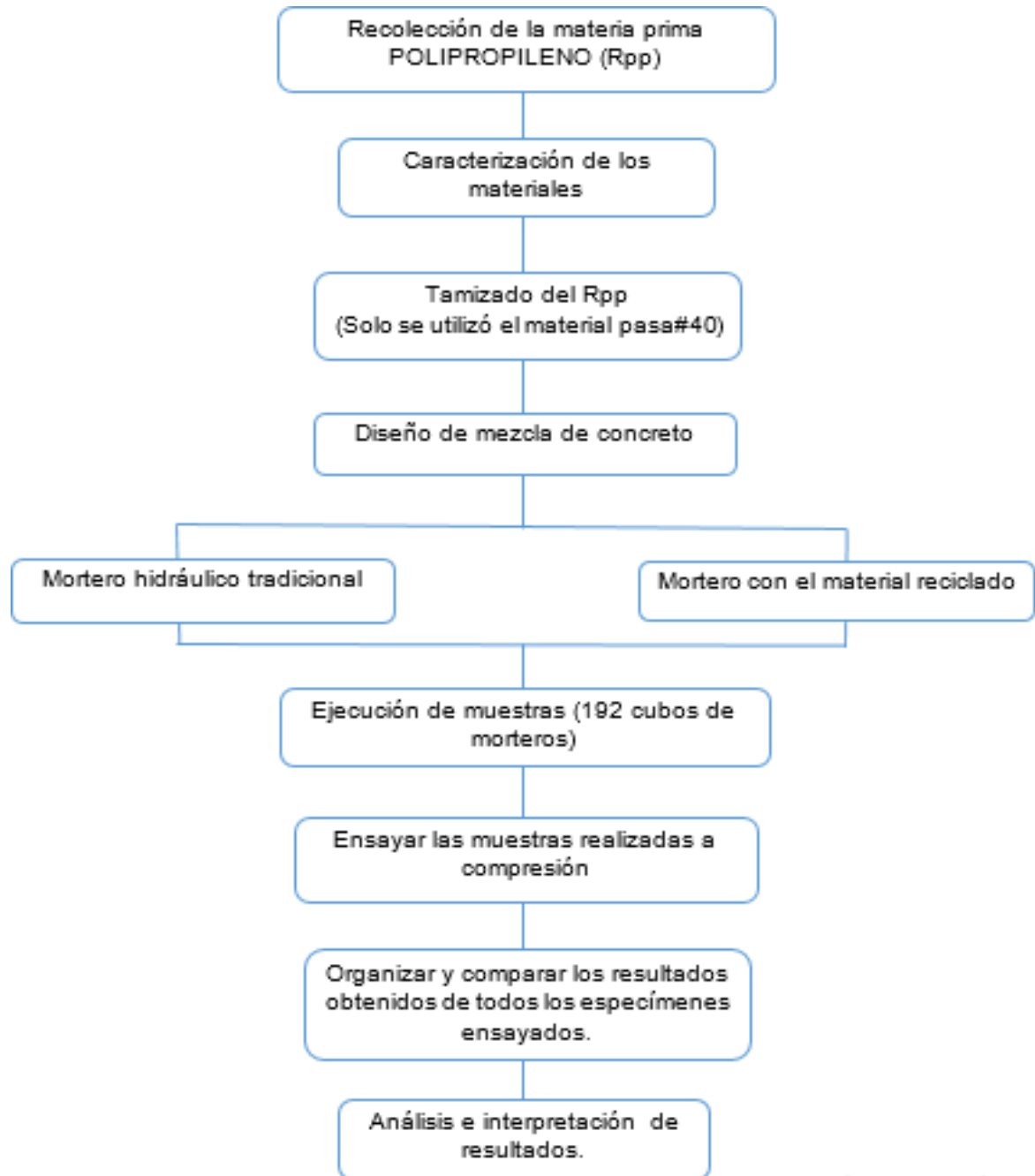
El polipropileno es un material que tiene una gran resistencia de calor debido a que su punto de fusión se encuentra por encima de los 200 °C esto lo hace una gran alternativa al momento de usar un material que disipe la temperatura, sin embargo, al sobre pasar dicha temperatura de fusión sus propiedades cambian duramente, debido a que al momento de volver a solidificar sus componentes internos cambian su formación provocando una menor resistencia a comparación de la inicial.

Al ser sometido a una temperatura más alta que el punto de fusión que este presenta produce una disminución en su peso molecular, así como la generación de crear una tendencia de sus cadenas poliméricas a fluir progresivamente. Al esfuerzo de compresión y corte asociados al proceso de transformación del material se da una degradación de una décima parte. [41].

## 4. METODOLOGIA

Para la realización y organización de este proyecto de grado se siguió la metodología expuesta en la Figura 1.

Figura 1. Metodología utilizada para realizar el proyecto de grado



Fuente: Propia



Las actividades realizadas para el desarrollo de este proyecto se describen a continuación:

Para iniciar, se desarrolló una investigación teórica sobre el tema, utilizando proyectos de grado de diferentes universidades y artículos científicos encontrados en las bases de datos.

La materia prima, es decir, el polipropileno triturado, como se observa en la Ilustración 15; se obtuvo de una fábrica dedicada al reciclaje de plásticos ubicada en el barrio Girardot, además de esto se utilizó también arena de río y el cemento que se compraron por bultos en la tienda Homecenter; después se procedió a tamizar el bulto de polipropileno para obtener el material que paso el tamiz #40 y este fue el que se utilizó para realizar la sustitución en la mezcla.

**Ilustración 15. Polipropileno triturado**



Fuente: Propia

Para conocer las propiedades del polipropileno y la arena se realizó una caracterización de materiales realizando los siguientes ensayos:

- Granulometría (RPP y arena)
- Densidad (RPP y arena)
- Dureza Rockwell (RPP)
- Punto de fusión (RPP)
- Resistencia al impacto Charpy (RPP)
- Prueba de impurezas (arena)
- Humedad y absorción (RPP y arena)
- Masas unitarias (arena)

Todos estos procedimientos fueron realizados en los laboratorios de la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga y tuvieron una duración aproximada de dos meses.

Conociendo las propiedades de los materiales con los que se va a trabajar, se procede a realizar el diseño de mezcla, para hacer 48 cubos de mortero con mezcla normal, 48 cubos sustituyendo el 3% de arena por polipropileno; de los cuales 4 cubos se sometieron a una temperatura de 150°C, 4 a 200°C, 4 a 230°C y 4 se dejaron sin tratamiento térmico; 48 cubos sustituyendo el 6% repitiendo el patrón anterior y 48 sustituyendo el 9% de la misma forma. Este proceso tuvo una duración aproximada de 2 meses incluyendo el tiempo necesario para que los cubos de mortero alcancen su máxima resistencia a los 28 días.

Después de haber fundido y desencofrado los especímenes, se realizó la prueba de resistencia a compresión de cada cubo a los 7, 14 y 28 días respectivamente como indica la norma NTC 220, para realizar el promedio entre estos resultados se tuvieron en cuenta los 4 morteros para cada caso, por lo que para la tabulación de datos se tuvo un total de 192 cubos de morteros finales.

Por último, se recolectaron todos los datos obtenidos de la resistencia a compresión, para realizar el debido análisis comparativo entre todos los porcentajes sustituidos y los morteros convencionales.

#### **4.1 CARACTERIZACION DE LOS MATERIALES**

La caracterización es la base o la primera fase para saber las propiedades de los materiales, con esta fase se determina si los materiales son viables para su utilización en un diseño de mezcla, este proceso se realiza mediante varios ensayos preliminares.

##### **4.1.1 Ensayos realizados**

Todos los ensayos para la caracterización de los materiales se realizaron basados en las especificaciones técnicas I.N.V.E, NTC, ISO y ASTM.

##### **5.1.1.2 Polipropileno**

El polipropileno triturado, es el principal material de este proyecto, para todos los ensayos requiere normas como la ISO y la ASTM; En la Tabla 1 se encuentran las propiedades del polipropileno.

**Tabla 1. Propiedades del polipropileno reciclado (RPP)**

Polipropileno reciclado (RPP)			
Propiedades físicas			
	Valor	Unidades	Método de ensayo
Punto de fusión	228		ISO 1133
Densidad	0.9102	$m^3$	ISO 1183
Módulo de finura	5.3		INVE 213
Propiedades mecánicas			
	Valor	Unidades	Método de ensayo
Resistencia al impacto Charpy	0.8	$m$	ISO 179
Dureza Rockwell	65.8		ASTM D785

Fuente: Propia

A continuación, se realiza una breve explicación de cómo se obtuvieron los resultados para la caracterización del polipropileno.

- **Punto de Fusión**

Ensayo realizado según norma **ISO 1133**, el resultado se tomó directamente del termómetro al caer la primera gota de material, como se expone en la Ilustración 16.

**Ilustración 16. Montaje realizado para obtener el punto de Fusión**



Fuente: Propia

Se obtuvo un resultado de **228°C**, resultado que se comparó con ensayos realizados en el CITIP (centro de investigación tecnológica para la industria plástica) y el resultado fue óptimo; con respecto a este ensayo se presentaron variaciones solo en los tiempos que tarda en caer la primera gota; en el laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana fue un tiempo de aproximadamente dos horas. [42]

- **Densidad**

El ensayo de densidad se realizó utilizando el **método B** para ensayos de muestras granulares de la norma **ISO 1183**, la densidad permite realizar un diseño de mezcla adecuado; para sustituir cantidades en volumen de arena y adicionando cantidades de plástico. En la Tabla 2 se exponen los datos necesarios obtenidos por medio de la experimentación para poder hallar la densidad del polipropileno.

**Tabla 2. Datos necesarios para el cálculo de la densidad del RPP**

Densidad del Rpp					
Recipiente		Líquido de inmersión		Muestra	
Picnómetro		ACPM		Polipropileno	
Peso ( g )	88.91	Peso ( g )	211.75	Peso ( g )	5
		Densidad ( $cm^3$ )	0.832		
Picnómetro+ACPM+ Rpp sin aire ( g )		301.09	ACPM SIN AIRE ( g )		207.18

Fuente: Propia

Con los datos de la Tabla 2 se puede proceder a aplicar la fórmula que indica el método B de la ISO 1183 de la siguiente forma:

**Ecuación 1. Densidad Polipropileno**

$$\rho_s = \frac{(ms)(\rho_{\text{liquido}})}{(m_1 - m_2)}$$

Donde:

$\rho_s$ : Densidad Muestra

$ms$ : Masa aparente en ramos de la muestra

$\rho_{\text{liquido}}$ : Densidad del líquido de inmersión en  $cm^3$

$m_1$ : Masa aparente en ramos del líquido requerido

$m_2$ : Masa aparente en ramos del líquido requerido, con la muestra para llenar el picnómetro

Aplicando la ecuación se obtiene una densidad de **0.9102 ( $g\ m^3$ )**, para el análisis ensayo se tomó como referencia la investigación realizada por la facultad de ciencias aplicada a la industria, sobre las propiedades de los plásticos reciclados [42] y permite concluir que se obtuvo un resultado óptimo, por lo que puede ser utilizado este valor de densidad para la dosificación en el diseño de mezcla.

- **Granulometría**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar la granulometría del polipropileno reciclado; para este ensayo se tomó como referencia la norma INV E- 213 y se omitió la preparación de la muestra, ya que este material no tiene humedad; por medio de este se determinó el módulo de finura, realizando la suma de los tamices indicados (Nº4, Nº8, Nº16, Nº30, Nº50, Nº100) y este permite conocer

que tan gruesas son las partículas. [43] En la Tabla 3 se muestra como se obtuvo el módulo de finura por medio de la granulometría.

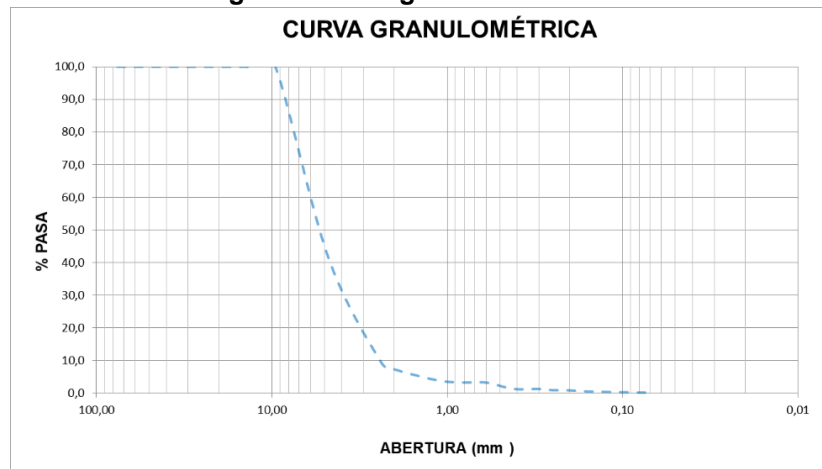
**Tabla 3. Módulo de finura del RPP**

Módulo de finura POLIPROPILENO (Rpp)				
Peso muestra seca:				1000
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		
		Parcial (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)
No.4	4,750	455,82	45,58	45,58
No.8	2,380	463,05	46,31	91,89
No.16	1,190	58,29	5,83	97,72
No.30	0,595	9,52	0,95	98,67
No.50	0,297	3,15	0,32	98,98
No.100	0,149	2,42	0,24	99,23
Fondo		2,80	0,28	99,51
Módulo de finura				5,3

Fuente: Propia

Se presenta la respectiva grafica de la curva granulométrica del Polipropileno, en su ordenada está los valores del porcentaje que pasa cada tamiz y en su abscisa, los tamaños de cada uno de ellos (ver Figura 2).

**Figura 2. Curva granulométrica RPP**



Fuente: Propia

Se obtuvo un módulo de finura de **5,3**, lo que significa que el polipropileno es un material en su mayoría con partículas de gran tamaño, pero la sustitución se realizó con arena fina; debido a esto se tamizó el material y solo se trabajó con el que pasó el tamiz#40 para realizar una sustitución razonable y además obtener una mejor consistencia en la mezcla.

- **Resistencia al impacto Charpy**

Ensayo realizado según la norma **ISO 179** para determinar la tenacidad y absorción de energía del polipropileno; la probeta para el ensayo se realizó teniendo en cuenta los parámetros de la norma **ISO 3167**. Que indica las especificaciones para probetas multiusos por medio de la inyección, donde se somete el material a altas

temperaturas para extruir en la formaleta. Debido a esto se acudió a calentar el material en una estufa y se llenó la formaleta como se muestra en la Ilustración 17.

**Ilustración 17. Probeta para ensayo de Charpy**



Fuente: Propia

Se realizó la prueba utilizando el péndulo de Charpy la cual arrojó un resultado de **0.8  $\text{kJ m}^2$**  que se interpreta como la energía empleada para producir la fractura como se muestra en la Ilustración 18.

**Ilustración 18. Resultado del ensayo de Charpy**



Fuente: Propia

El resultado dio de acuerdo a lo esperado ya que el plástico reciclado no es un material que posea un grado alto de tenacidad, por esta prueba podemos deducir que se está tratando un material frágil.

- **Dureza Rockwell**

Ensayo realizado con el procedimiento B de la norma **ASTM D785**, este ensayo permite conocer una propiedad mecánica la cual es la resistencia del polipropileno a ser penetrado, se utilizó una maquina llamada durómetro [44]. En la Tabla 4 se evidencian los valores que se utilizaron para llevar a cabo la prueba de Dureza, respetando el estándar de la norma ASTM D785 para plástico.

**Tabla 4. Valores utilizados para graduar Durómetro**

	unidades	valor
Identador	"	4.6
Carga	Kg	60
Grosor de la muestra	cm	7.4

Fuente: Propia

En la Ilustración 19 se muestra la probeta realizada para el ensayo de Dureza con un grosor de 7.4 respetando los valores estándar que presenta la ASTM, la probeta se realizó fundiendo el material y llenando la formaleta, imitando el proceso de inyección expuesto en la norma.

**Ilustración 19. Probeta ensayo de Dureza**



Fuente: Propia

Durante el ensayo se obtuvo un promedio entre 10 mediciones realizados de **65,8**, este se puede atribuir a que los ensayos realizados en la norma son para plásticos vírgenes; no reciclados y este resultado se comparó con los ensayos de referencia que tiene la norma para el método B que es un promedio de 12 mediciones para un resultado de 76.8.

### **5.1.1.3 Arena**

Entre los materiales para realizar un mortero, se encuentra el agregado fino. En este caso se tomó una arena de río comprada en Homecenter y se procedió a realizar

los ensayos pertinentes para conocer sus propiedades; estos resultados se exponen en la Tabla 5.

**Tabla 5. Propiedades de la arena de río**

Arena de río			
propiedades físicas	Valor	Unidades	Método de ensayo
Densidad	2.57	$m^3$	NTC 237
Módulo de finura	2.5		INVE 213
Humedad	1.5	%	NTC 237
Absorción	1.4	%	NTC 1776
Masas unitarias	0.0049	$m^3$	NTC 92
Impurezas	Nº1		NTC 127

Fuente: Propia

A continuación, se realiza una breve explicación de cómo se obtuvieron los resultados para la caracterización de la arena de río.

- **Densidad**

Ensayo realizado de acuerdo a la norma NTC 237 por el método del picnómetro, y funciona para realizar la dosificación de los morteros en volumen y además al momento de hacer la respectiva sustitución entre la arena y el plástico. En la Tabla 6 se muestran los datos obtenidos en laboratorio para aplicar la fórmula de la densidad se propone en la NTC 237.

**Tabla 6. Datos obtenidos en laboratorio para Densidad**

	Unidades	Valor
Picnómetro	( g )	161.8
Muestra	( g )	500
Picnómetro+ arena+agua	( g )	999.2
Picnómetro+ agua	( g )	690
Arena seca al horno	( g )	493

Fuente: Propia

Con los valores obtenidos en la Tabla 6 se procede a aplicar la fórmula de densidad de la siguiente forma:

**Ecuación 2. Densidad aparente**

$$\rho_a = \frac{(0.9975)(A)}{(+S - C)}$$

Donde:

$\rho_a$ : Densidad Muestra



A: Masa en gramos de la muestra secada al horno

: Masa en ramos del picnometro lleno con a ua

C: Masa en ramos del picnometro con la muestra y el a ua hasta la marca de calibración

S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca

Aplicando la formula se obtuvo un resultado de **2,57 g/cm<sup>3</sup>**, este valor será utilizado para utilizar en el diseño de los morteros [45]

- **Granulometría**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos al realizar la granulometría de la arena; para este ensayo se tomó como referencia la norma NTC 77, tomando un peso inicial de 1000 g, lavando y secando la arena, quedando con un peso final de 959,56 g. En la Tabla 7 se muestran los resultados obtenidos al realizar el cálculo del módulo de finura.

**Tabla 7. Modulo de finura Arena de rio**

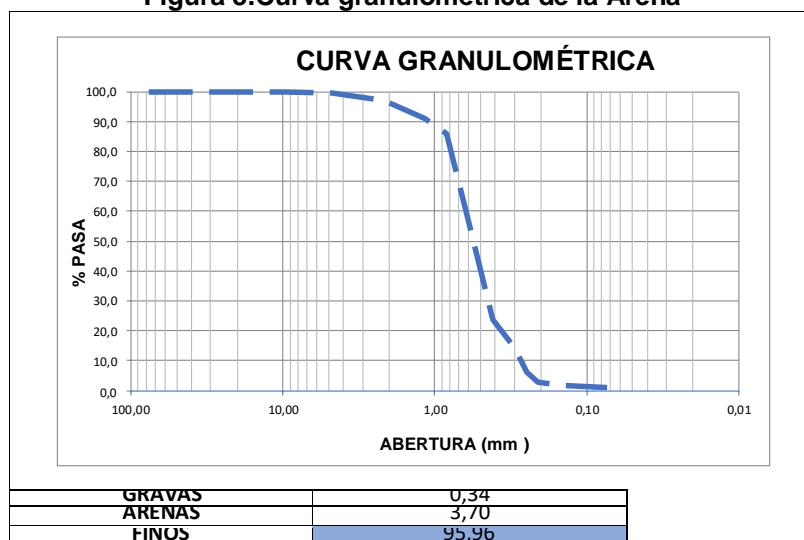
Módulo de finura ARENA				
Peso muestra seca:				959,56
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido		
		Parcial (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)
No.4	4,750	3,40	0,35	0,35
No.8	2,380	22,20	2,31	2,67
No.16	1,190	65,60	6,84	9,50
No.30	0,595	342,70	35,71	45,22
No.50	0,297	423,20	44,10	89,32
No.100	0,149	126,00	13,13	102,45
Fondo		8,40	0,88	103,33
Módulo de finura				<b>2,5</b>

Fuente: Propia

En la arena de rio que se compró para realizar los cubos de morteros, se obtuvo un módulo de finura de **2,5**; Este valor es necesario para realizar la dosificación adecuada para la mezcla de mortero.

Se presenta la respectiva grafica de la curva granulométrica de la arena de rio, en su ordenada, están los valores del porcentaje que pasa cada tamiz y en su abscisa, los tamaños de cada uno de ellos (Figura 3).

Figura 3. Curva granulométrica de la Arena



Fuente: Propia

De acuerdo a los resultados obtenidos, que son 0,34 en gravas y 3,70 de finos se concluye que, la arena de río se comporta como un material fino adecuado para realizar un mortero ya que el resultado fue de **95,96** y esto es viable para realizar un mortero.

- **Humedad**

Ensayo realizado mediante la norma **NTC 1776**, a través de este ensayo podemos observar la humedad que se encuentra en el momento de realizar el pesaje. Y se obtiene a partir de la ecuación 3.

**Ecuación 3. % de Humedad**

$$= \frac{(P_h - P_s)}{(p_s)} \times 100$$

Donde:

: % de humedad del suelo en el momento

$P_h$ : Masa en gramos de la arena húmeda

$P_s$ : Masa en gramos de la arena seca

Reemplazando los valores de  $P_h = 1000g$  y  $P_s = 985g$  se obtiene un porcentaje de absorción de **1.50%** para la arena de río.

- **Absorción**

Ensayo realizado mediante la norma **NTC 237**, el resultado de este ensayo permite conocer la capacidad que posee el material de absorber agua, este resultado sirve

para determinar la cantidad de agua que se le puede poner a la mezcla sin llegar a saturarlo. Y se obtiene a partir de la ecuación 4.

**Ecuación 4. % de absorción**

$$W_m = \frac{(M_w - M_d)}{(M_d)} \times 100$$

Donde:

$W_m$ : % de absorcion

$M_w$ : Masa en ramos de la arena saturada superficialmente seco

$M_d$ : Masa en ramos de la arena secada al horno

Reemplazando los valores de  $M_w = 500g$  y  $M_d = 493g$  se obtiene un porcentaje de absorción de **1.40%** para la arena de rio.

- **Masas unitarias**

Ensayo realizado según la norma **NTC 92**, este ensayo es realizado para determinar como es el comportamiento del agregado cuando es usado en la mezcla de mortero. A través de este ensayo determinamos el porcentaje de vacíos con base a la masa suelta y compacta. En la Tabla 8 se presentan los datos necesarios que se midieron en el laboratorio para hallar el volumen del molde y aplicar la fórmula que presenta la NTC.

**Tabla 8. Datos de Molde**

Molde	Unidades	Valor
Masa	(kg)	3.0674
Altura	(m)	0.186
Radio	(m)	0.0925
Diametro	(m)	0.185
Volumen	(m <sup>3</sup> )	0.0049

Fuente: Propia

Con el resultado del volumen del molde calculado en la Tabla 8 y la masa del agregado más el molde que se obtuvo en el laboratorio y fue de **9.265 Kg**; se procede a aplicar la siguiente formula.

**Ecuación 5. Masa unitaria**

$$M = \frac{(G - T)}{V}$$

Donde:

*M*: Masa unitaria del a re ado ( $K m^3$ )

*G*: Masa del a re ado mas el molde ( $K$ )

*T*: Masa del molde ( $K$ )

*V*: Volumen del molde ( $m^3$ )

Reemplazando en la ecuación 3 se obtiene un resultado de masa unitaria para la arena de rio utilizada para este proyecto de **1264.82 ( $Kg m^3$ )**

- **Impurezas**

Ensayo realizado según la NTC 127 Mediante la Ilustración 20 se pueden ver los colores y matices que presenta la muestra de arena de rio para dar pasó a la determinación de su valor.

**Ilustración 20. Ensayo de impureza Arena**



Fuente: Propia

El resultado se toma directamente comparando con la paleta de colores y se toma como valores de referencia la Tabla 9.

**Tabla 9. Equivalencia entre colores de la placa orgánica y los colores estándar Gardner**

<b>Color Gardner estándar No.</b>	<b>Placa orgánica No.</b>
5	1
8	2
11	3 (estándar)
14	4
16	5

Fuente: NTC 127

El color de la arena seleccionada es el N°1 de la paleta como se muestra en la Ilustración 20, lo que corresponde a una arena con un nivel de materia orgánica dentro de lo normal (observar tabla 19) para ser usada en los morteros, debido a que no contiene compuestos orgánicos perjudiciales.

## 5. DISEÑO DE MEZCLA

Para la realización del diseño de mezcla de mortero se tiene en cuenta el proceso ACI 211, planteado en el libro tecnología del concreto y del mortero de Diego Sánchez de Guzmán, el cual establece unas Tablas de las cuales a través de ella se puede determinar los valores como el contenido de cemento y la relación agua/cemento dependiendo de la resistencia con la cual queremos hacer el diseño.

Para la realización de este proyecto de grado se diseña un mortero de resistencia de 210 *cm* o 3000 psi, para lo cual se determinó una relación agua/cemento (*a/c*) de 0.6 y un contenido de cemento de 490 *m*<sup>3</sup>.

- **Cálculo del contenido de agua**

**Ecuación 6. Contenido de agua**

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{\text{agua}}{\text{Relación agua cemento}}$$

$$\text{Contenido de a ua} = \text{Contenido de cemento} * \text{elación a ua cemento}$$

$$Ca = 490 * 0.6 = 294\text{Lt } m^3$$

- **Cálculo del volumen de agua, cemento y arena**

**Ecuación 7. Volumen de agua**

$$Va = \frac{Va = a Da}{1000} = 0.294\text{Dm}^3$$

**Ecuación 8. Volumen de cemento**

$$Vc = \frac{Vc = c Dc}{3000} = 0.163\text{Dm}^3$$

**Ecuación 9. Volumen de arena**

$$Var = 1 - Vc - Va$$
$$Var = 1 - 0.294 - 0.163 = 0.542\text{Dm}^3$$

- **Cálculo de la cantidad de arena**

**Ecuación 10. Contenido de arena**

$$\text{Contenido de arena} = Var * Dar$$
$$Car = 0.542 * 2570 = 1394.65\text{K } m^3$$

➤ **CANTIDADES DE MATERIAL PARA 1m<sup>3</sup> DEMORTERO**

En siguiente Tabla (10) se muestran las cantidades de material para 1m<sup>3</sup> de mortero.

*Tabla 10. Cantidad teórica de mortero para 1m<sup>3</sup>*

<b>Cantidad de material por cada metro</b>			
<b>Material</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Densidad (Kg/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cemento</b>	490	3000	0,163333
<b>Arena</b>	1394,653	2570	0,542667
<b>Agua</b>	294	1000	0,294

Fuente: Propia

➤ **AJUSTE POR FLUIDEZ DEL MORTERO**

- Para la elaboración del ensayo de fluidez se tomaron cantidades correspondientes a 3 cubos de mortero, a lo cual se calculó que la cantidad necesaria de agua para un metro cúbico de mortero es de 400lt m<sup>3</sup>. Luego se procede al ajuste de las demás cantidades:

- **Cantidad de cemento tras el ajuste**

**Ecuación 11. Contenido de cemento**

$$C = \frac{400}{0.6} = 666.67K m^3$$

- **Volumen de agua, arena y cemento tras el ajuste**

**Ecuación 7. Volumen de agua**

$$Va = \frac{400}{1000} = 0.4Dm^3$$

**Ecuación 8. Volumen de cemento**

$$Vc = \frac{666.67}{3000} = 0.222Dm^3$$

**Ecuación 9. Volumen de arena**

$$Var = 1 - 0.222 - 0.4 = 0.378Dm^3$$

- **Cantidad de arena tras ajuste**

**Ecuación 10. Contenido de arena**

$$Car = 0.378 * 2570 = 970.88K m^3$$

➤ **CANTIDADES DE MATERIAL PARA 1m<sup>3</sup> DE MORTERO TRAS EL AJUSTE**

En la siguiente gráfica (Tabla 11) se evidencia las cantidades de cada material para cada metro cúbico de mortero después del ajuste.

**Tabla 11. Cantidad teórica para un 1m<sup>3</sup> de mortero luego del ajuste**

<b>Cantidades de material para un metro cúbico luego del ajuste</b>			
<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>	<b>Densidad (kg/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cemento</b>	666,67	3000	0,222222
<b>Arena</b>	970,89	2570	0,377778
<b>Agua</b>	400,00	1000	0,4

Fuente: Propia

➤ **CANTIDADES DE MATERIAL PARA UN CUBO DE MORTERO**

- Cantidad de cemento para un cubo de mortero

Un cubo de mortero tiene una medida de 5cm por cada lado, a esto corresponde un volumen de 0.000125 m<sup>3</sup>.

**Ecuación 12. Cemento para un cubo**

$$C = 0.000125 * 666.67 = 0.083K$$

- Cantidad de arena para un cubo de mortero

**Ecuación 13. Arena para un cubo**

$$Ar = 0.000125 * 970.89 = 0.12136K$$

- Cantidad de agua para un cubo de mortero

**Ecuación 14. Agua para un cubo**

$$A = 0.000125 * 400 = 0.05Lt$$

➤ **CANTIDADES DE MATERIAL PARA UN CUBO DE MORTERO**



En la siguiente Tabla (12) se observan los valores resumidos de las cantidades necesarias para cada cubo de mortero:

**Tabla 12. Cantidad de material para un cubo de mortero luego del ajuste**

<b>Cantidades de material para un cubo luego del ajuste</b>		
<b>Material</b>	<b>Peso ( g )</b>	<b>Densidad (Kg/cm<sup>3</sup>)</b>
<b>Cemento</b>	0,08	3000
<b>Arena</b>	0,12	2570
<b>Agua</b>	0,05	1000

Fuente: Propia

➤ **CANTIDADES DE PLÁSTICO A SUSTITUIR**

En la siguiente gráfica (Tabla 13) se evidencia la cantidad y los porcentajes a utilizar de plástico para la realización del proyecto:

**Tabla 13. Cantidad de plástico a sustituir**

<b>Cantidad de plástico a sustituir</b>		
<b>cantidad de arena para un m<sup>3</sup> en</b>	<b>Volumen de arena para un m<sup>3</sup></b>	
970,89	0,38	
<b>Calculo para la cantidad de plástico a usar</b>		
<b>Porcentaje</b>	<b>Volumen (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Kilogramos ( )</b>
<b>3%</b>	0,01	10,31
<b>6%</b>	0,02	20,63
<b>9%</b>	0,03	30,94

Fuente: Propia

## 6. RESULTADOS OBTENIDOS

Para este trabajo de grado se realizó ensayo de compresión a todos los cubos que se realizaron; siguiendo la norma NTC 220 que indica como debe ser el ensayo para morteros de cemento hidráulico. En la Ilustración 21 se muestra un cubo de mortero con un porcentaje de plástico de 3% con tratamiento térmico sometido a compresión.

**Ilustración 21. Mortero sometido a compresión**



Fuente: Propia

Luego de fallar todos los morteros de 7, 14 y 28 días, se procedió a realizar la tabulación y a organizar todos los resultados obtenidos. Las Tablas expuestas a continuación son un promedio realizado entre los 4 especímenes que se fabricaron para cada porcentaje y temperatura analizada; los resultados de manera detallada se encuentran en el **Anexo A**.

- **Resultados a los 7 días**

En la Tabla 14 se muestran los promedios de las áreas, carga, esfuerzos de resistencia a la compresión y pesos obtenidos de los 4 cubos a los 7 días.

**Tabla 14. Resultados a los 7 días**

Resistencia a la compresión 7 Días					
Temperatura (°C)	Porcentajes (%)	Peso Promedio (g)	Area Promedio $cm^2$	Carga Promedio (KN)	Esfuerzo Promedio (Mpa)
150°C	0%	258,33	25,16	38,69	15,49
	3%	215,00	24,34	44,19	17,96
	6%	216,33	24,32	49,88	20,58
	9%	213,33	24,50	47,54	19,30
200°C	0%	258,66	24,99	39,82	16,09
	3%	216,00	24,49	44,95	18,53
	6%	216,66	23,69	52,38	22,06
	9%	211,33	24,49	53,70	21,80
230°C	0%	261,33	25,49	39,49	15,48
	3%	214,33	24,50	35,96	14,59
	6%	218,33	24,33	46,20	19,16
	9%	211,00	24,66	43,42	17,82
Sin tratamiento	0%	263,33	25,00	41,96	16,71
	3%	258,00	25,16	39,81	16,01
	6%	252,33	23,84	36,22	15,10
	9%	246,00	24,33	33,13	13,51

Fuente: Propia

- **Resultados a los 14 días**

En la Tabla 15 se muestran los promedios de las áreas, carga, esfuerzos de resistencia a la compresión y pesos obtenidos de los 4 cubos a los 14 días.

**Tabla 15. Resultados a los 14 días**

Resistencia a la compresión a los 14 Días					
Temperatura (°C)	Porcentajes (%)	Peso Promedio (g)	Area Promedio $cm^2$	Carga Promedio (KN)	Esfuerzo Promedio (Mpa)
150°C	0%	259,25	25,24	41,46	16,44
	3%	226,25	24,38	43,73	17,95
	6%	229,25	24,49	50,55	20,66
	9%	226,50	24,86	45,13	18,17
200°C	0%	260,50	24,48	44,07	18,00
	3%	212,50	25,24	45,15	17,89
	6%	213,50	24,37	53,50	21,96
	9%	209,50	24,75	53,05	21,47
230°C	0%	259,75	24,87	41,70	16,79
	3%	210,50	24,75	42,18	17,08
	6%	212,00	24,63	51,69	21,04
	9%	207,00	24,37	46,81	19,18
Sin tratamiento	0%	259,75	24,75	45,81	18,51
	3%	255,25	25,24	44,29	17,54
	6%	255,00	23,88	40,84	17,12
	9%	248,50	24,13	39,54	16,39

Fuente: Propia

- **Resultados a los 28 días**

En la Tabla 16 se muestran los promedios de las áreas, carga, esfuerzos de resistencia a la compresión y pesos obtenidos de los 4 cubos a los 28 días.

**Tabla 16. Resultados a los 28 días**

Resistencia a la compresión a los 28 Días					
Temperatura (°C)	Porcentajes (%)	Peso Promedio (g)	Area Promedio $cm^2$	Carga Promedio (KN)	Esfuerzo Promedio (Mpa)
150°C	0%	261,25	25,75	53,9	20,93
	3%	209,75	24,5	56,77	23,19
	6%	212	25,25	65,72	26,08
	9%	208,25	24,13	58,68	24,37
200°C	0%	261	24,61	57,29	23,3
	3%	211,5	24,75	58,69	23,73
	6%	213,5	25	69,54	27,84
	9%	206,25	25,51	68,97	27,08
230°C	0%	260,5	24,75	54,21	22
	3%	207,75	24,76	54,83	22,21
	6%	211,75	23,63	64,61	27,34
	9%	206	24,24	60,84	25,09
Sin tratamiento	0%	263	25,37	59,54	23,47
	3%	258	24,51	57,58	23,51
	6%	253,5	25	53,1	21,3
	9%	243,75	24,87	51,66	20,79

Fuente: Propia

## 7. ANALISIS DE RESULTADOS

### 7.1 MICROGRAFÍAS CON SEM Y ANÁLISIS QUÍMICO POR EDS.

Los ensayos del microscopio electrónico de barrido (SEM) y de espectroscopia de rayos-x por dispersión de energía (EDS) son utilizados para el análisis de muestras sólidas, secas o sin humedad cuyo tamaño debe ser de (3cm\*3cm\*3cm). El equipo SEM emite electrones que son direccionados para la interacción de los átomos que se encuentran en la superficie de la muestra, esto produce varios tipos de radiación que son sendos tipos receptores para proporcionar información sobre la forma y tamaño de las partículas, así como las características de la superficie que se está analizando. Además, con un detector EDS se obtienen las cantidades de los elementos químicos de la muestra analizada. También se evidencian mapas donde se muestra la localización de los elementos químicos de la muestra.

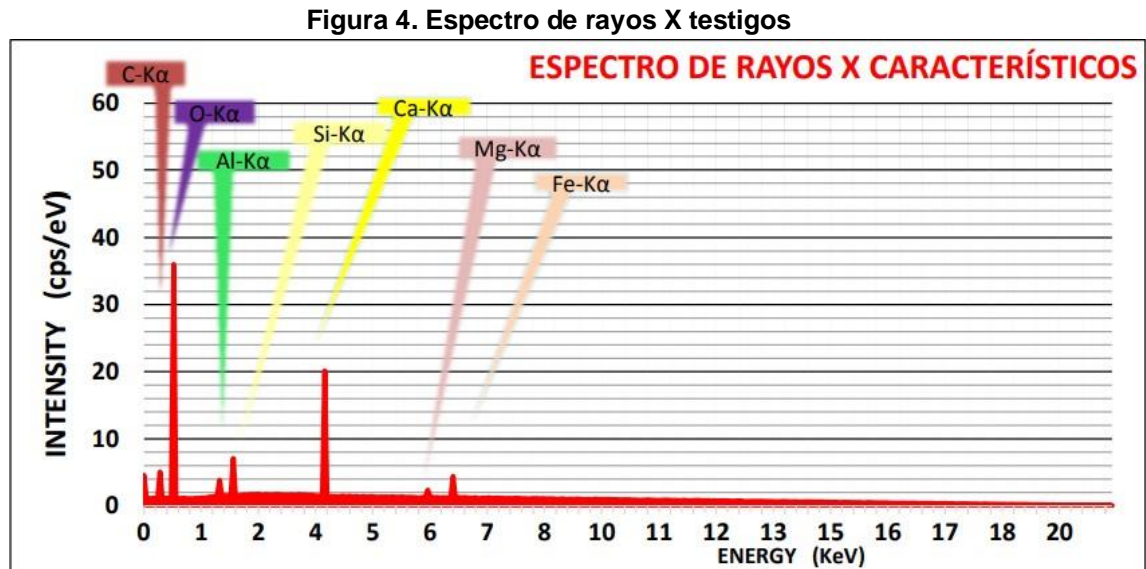
En la Ilustración 22 se muestran los resultados obtenidos de las micrografías con SEM realizados en el laboratorio de nanotecnología de la Universidad Pontificia Bolivariana, con el objetivo de analizar las propiedades morfológicas de las mezclas cuando se le aplica o no tratamiento térmico.



Fuente: Propia

Comparando las 3 muestras obtenidas en la Ilustración 22 se deduce que el tratamiento térmico aplicado efectivamente causa una unión entre las partículas de la mezcla, mientras que las sustituciones realizadas crean una mezcla con más espacios entre partículas, afectando la adherencia normal que debería tener un mortero para lograr la resistencia requerida.

En la Figura 4 se muestran los resultados del análisis químico realizado a los morteros testigo, en el eje y se muestra el número de fotones de rayos X obtenidos y en el eje x la energía de rayos X implementada.



El espectro de emisión de rayos X es una representación de la distribución por energías de los fotones que constituyen el haz, La parte en forma de picos se denomina radiación característica, y depende del número atómico del material; indica de qué elementos está constituido el material que en este caso es carbono, oxígeno, calcio, silicio, hierro, aluminio y manganeso.

Con el fin de conocer la composición química de un mortero testigo se muestra la Tabla 17 que arroja el análisis químico por EDS de un mortero tradicional.

**Tabla 17. Análisis químico testigos**

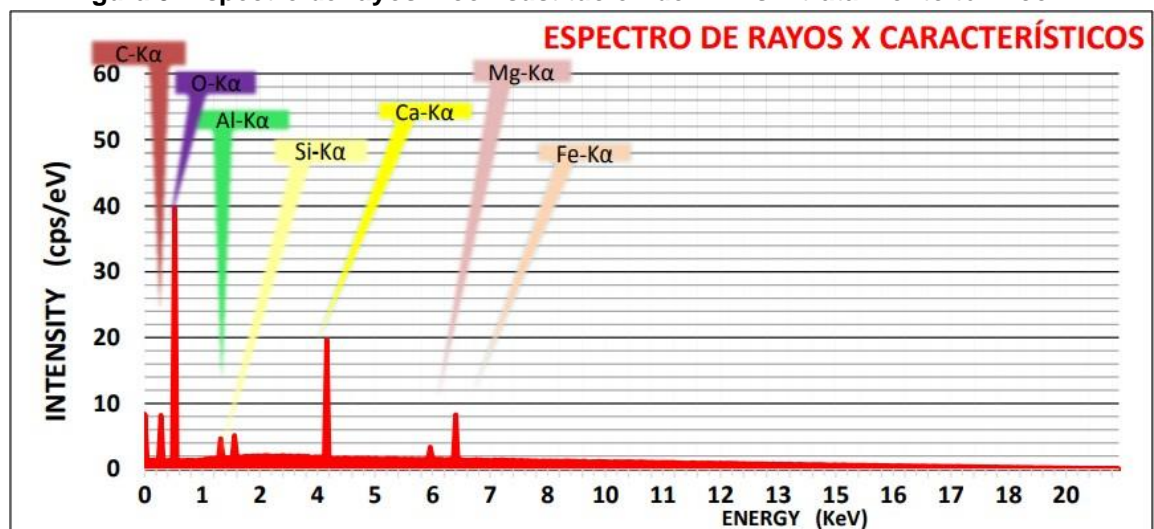
Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	32382,7	5,015	5,90	7,45	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	17485,7	26,496	36,80	53,94	1,28	2,55	3,83
Calcio	20	K-serie	2714,71	17,51	20,60	16,75	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5275,86	8,8938	10,98	6,02	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1565,38	10,5	12,50	9,01	0,2	0,39	0,59
Aluminio	13	K-serie	6641,99	7,803	9,18	5,72	0,39	0,79	1,18
Manganeso	25	K-serie	1648,3	2,9088	4,04	1,12	0,24	0,49	0,73
				<b>79,13</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

Fuente: Propia

Se realiza el análisis con los porcentajes de masa normal, que indica que una mezcla convencional de mortero tiene bajas concentraciones de carbono, aluminio y manganeso. Y por contener cemento debe poseer los elementos químicos que constituyen a este como el carbono, el oxígeno, silicio y el calcio en mayores cantidades. [46]

En la Figura 5 se muestran los resultados del análisis químico realizado a los morteros con sustitución de arena por polipropileno sin ser sometidos a un tratamiento térmico, en el eje y se muestra el número de fotones de rayos X obtenidos y en el eje x la energía de rayos X implementada.

Figura 5. Espectro de rayos X con sustitución de RPP sin tratamiento térmico



Fuente: Propia

El espectro de emisión de rayos X es una representación de la distribución por energías de los fotones que constituyen el haz, La parte en forma de picos se denomina radiación característica, y depende del número atómico del material; indica de qué elementos está constituido el material que en este caso es carbono, oxígeno, calcio, silicio, hierro, aluminio y manganeso. Es decir que posee los mismos elementos que un mortero convencional.

Para conocer la composición química de un mortero con sustituciones, sin realizarle ningún tratamiento térmico se muestra la Tabla 18, que arroja el análisis químico por EDS de un mortero tradicional; que indica que porcentaje de cada elemento químico contiene el mortero.

**Tabla 18. Análisis químico sin tratamiento térmico**

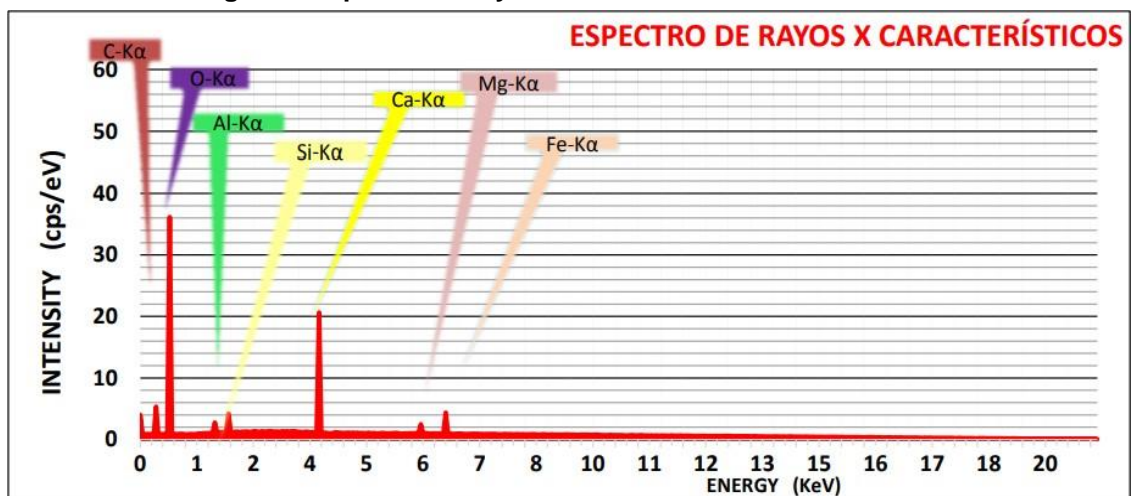
Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	34873,6	4,776	5,97	6,90	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	18285,7	22,908	30,54	40,54	1,28	2,55	3,83
Calcio	20	K-serie	2283,93	18,5977	25,13	21,23	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5310,34	9,54162	12,08	10,00	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1466,96	8,78625	12,38	10,38	0,2	0,39	0,59
Aluminio	13	K-serie	6742,93	7,74425	10,47	8,72	0,39	0,79	1,18
Manganeso	25	K-serie	1566,9	2,98758	3,43	2,23	0,24	0,49	0,73
				<b>75,34</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

Fuente: Propia

Los resultados de la Tabla 18 indican valores muy similares con respecto a los testigos, esto se puede atribuir a que una de las propiedades del RPP es ser inerte, es decir, no produce reacciones químicas en la composición del mortero.

En la Figura 6 se muestran los resultados del análisis químico realizado a los morteros con sustitución de arena por polipropileno sometidos a un tratamiento térmico, en el eje y se muestra el número de fotones de rayos X obtenidos y en el eje x la energía de rayos X implementada.

**Figura 6. Espectro de rayos X con tratamiento térmico**



Fuente: Propia

El espectro de emisión de rayos X es una representación de la distribución por energías de los fotones que constituyen el haz, La parte en forma de picos se denomina radiación característica, y depende del número atómico del material; indica de qué elementos está constituido el material que en este caso es carbono, oxígeno, calcio, silicio, hierro, aluminio y manganeso. Es decir que las sustituciones realizada de 3%, 6% y 9% sometidas a tratamiento térmico no influyen en el número de elementos químicos que componen una mezcla de mortero.

La composición química de un mortero con sustituciones, y realizando tratamiento térmico se muestra la Tabla 19, que arroja el análisis químico por EDS de un mortero tradicional; que indica que porcentaje de cada elemento químico contiene el mortero.

**Tabla 19. Analisis químico con tratamiento térmico**

Element	At. No.	Line S.	Netto	Mass [%]	Mass Norm. [%]	Atom [%]	Abs. Error [%] 1 sigma	Abs. Error [%] 2 sigma	Abs. Error [%] 3 sigma
Carbono	6	K-serie	31732,9	5,40166	6,21	9,67	6,18	12,36	18,54
Oxígeno	8	K-serie	18114,3	25,776	32,22	40,78	1,28	2,55	3,83
Calcio	20	K-serie	2625,3	15,3054	21,86	17,13	0,28	0,55	0,83
Silicio	14	K-serie	5793,1	8,83506	11,47	10,07	0,46	0,92	1,38
Hierro	26	K-serie	1420,09	12,2253	13,74	12,36	0,2	0,39	0,59
Aluminio	13	K-serie	6278,6	10,2664	11,41	7,50	0,39	0,79	1,18
Manganeso	25	K-serie	1449,89	2,37976	3,09	2,49	0,24	0,49	0,73
				<b>80,19</b>	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>			

Fuente: Propia

Analizando la Tabla 19 y comparando con el testigo (Tabla 17) se observa que el tratamiento térmico causa un aumento del carbono, el calcio, el hierro y el aluminio; lo que se podría interpretar como un factor desde el punto de vista químico que genera un aumento en la resistencia.

## 7.2 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

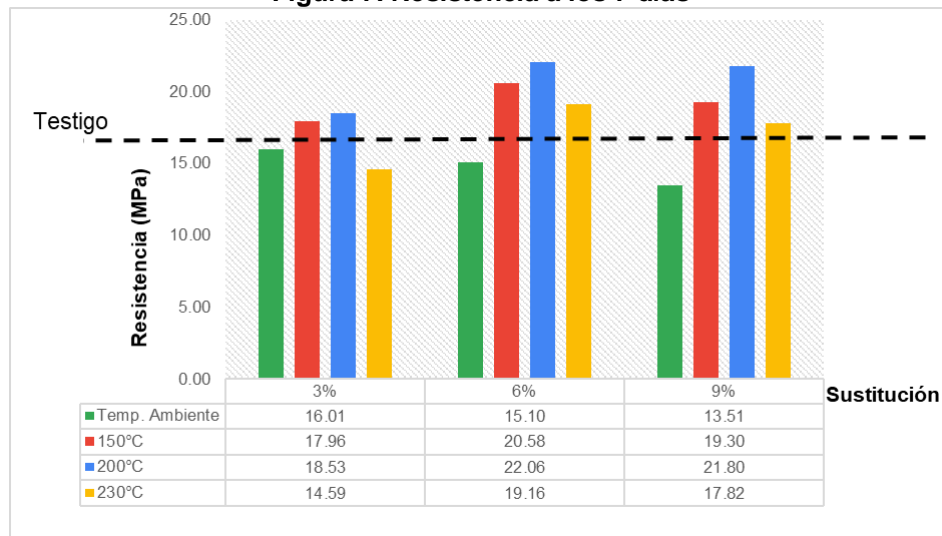
De acuerdo con la NTC 220, se realiza el ensayo de resistencia a la compresión, con la finalidad de comparar la incidencia del RPP en todas las edades (7, 14 y 28 días); Además analizar qué porcentaje ofrece una mayor resistencia y si es realmente necesario realizar tratamiento térmico a los cubos de mortero con sustitución.

### 7.2.1 Análisis de resistencia para 7 días

Teniendo en cuenta que un mortero a los 7 días se espera alcanzar el 65% de la resistencia que tendrá a los 28 días, se realizan testigos para comprobar la mezcla y además los valores sustituidos (3%, 6% y 9%). En la Figura 7 se observa un diagrama de barras que permite analizar con que temperatura y cual porcentaje sería el mejor comparando con los testigos; en el eje Y se tienen los valores de resistencia y en el eje X los porcentajes sustituidos, cada una de las barras representa la temperatura a la que fueron sometidos los cubos y la línea punteada los testigos realizados y fallados a los 7 días.



**Figura 7. Resistencia a los 7 días**



Fuente: Propia

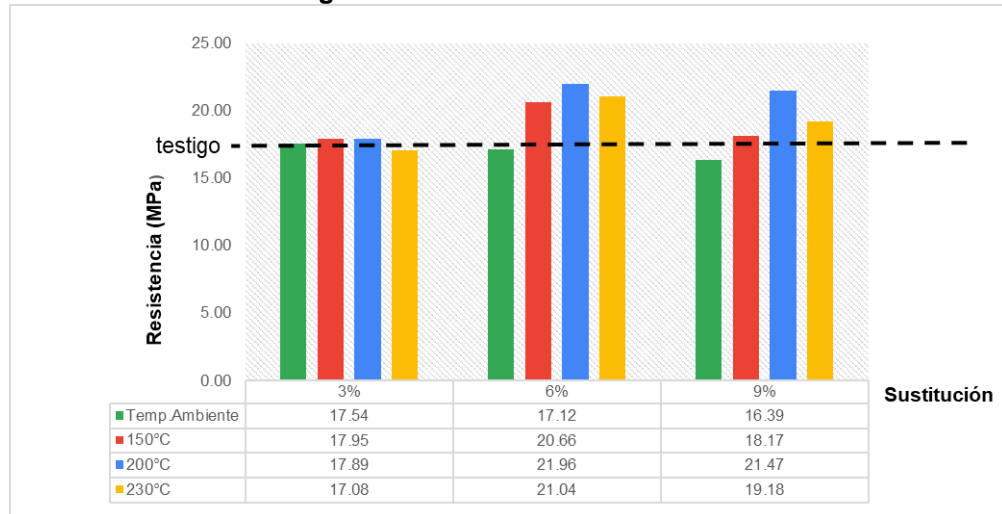
Con los resultados obtenidos en la Figura 7, se puede deducir que realizar sustituciones con los porcentajes evaluados sin aplicar un tratamiento térmico no se aprecia una mejora significativa en la resistencia a la hora de realizar un mortero, además se infiere que la temperatura óptima entre todos los especímenes a los 7 días es de 200°C, aunque el tratamiento térmico resulta efectivo en todos los casos, también se nota que el porcentaje de sustitución que mejores resultados arroja para la resistencia es el de 6%.

El mayor aumento en la resistencia es con 6% de sustitución, sometido a 200°C, con un resultado de 22.06 MPa; se tiene un aumento en la resistencia de más del 35% con respecto a la resistencia obtenida por el mortero convencional, que fue de 15.94 MPa a los 7 días.

### 7.2.2 Análisis de resistencia para 14 días

En la Figura 8 se observa un diagrama de barras con las mismas características del expuesto en Figura 7 que permite analizar con que temperatura y cual porcentaje sería el mejor comparando con los testigos realizados y fallados a los 14 días.

**Figura 8. Resistencia a los 14 días**



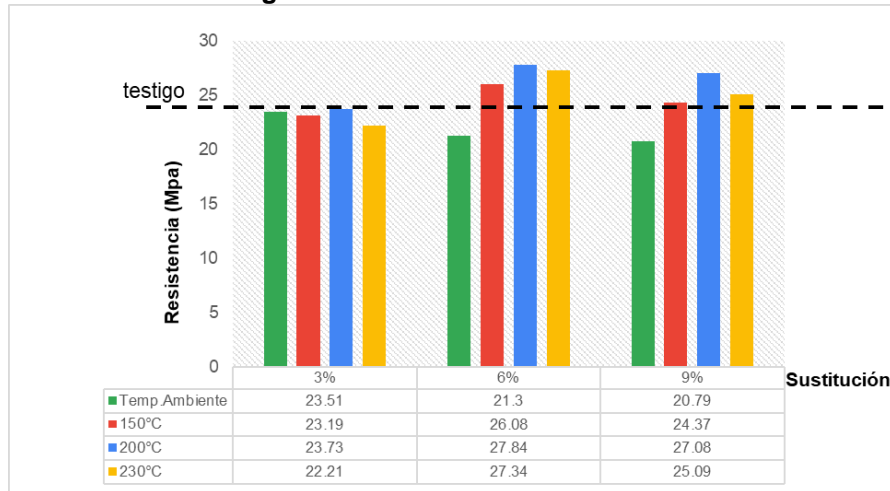
Fuente: Propia

Con los resultados obtenidos en la Figura 8, se puede observar que existe una tendencia en el incremento de la resistencia a la compresión para morteros con sustituciones del 6% con un resultado de 21.96 MPa a 200°C, se presenta un aumento en la resistencia del 25% en comparación con los testigos realizado que tienen un resultado de 17.435 MPa como se observa en la Tabla 15. Además, a los 14 días se sostiene la hipótesis de que realizar sustituciones sin aplicar tratamiento térmico no es viable para el aumento de la resistencia, al contrario, la disminuye con respecto al testigo.

### 7.2.3 Análisis de resistencia para 28 días

En la Figura 9 se observa un diagrama de barras con las mismas características del expuesto en las Figuras 7 y 8 que permite analizar con que temperatura y cual porcentaje sería el mejor comparando con los testigos realizados y fallados a los 28 días que ya tiene su resistencia al 100%.

**Figura 9. Resistencia a los 28 días**



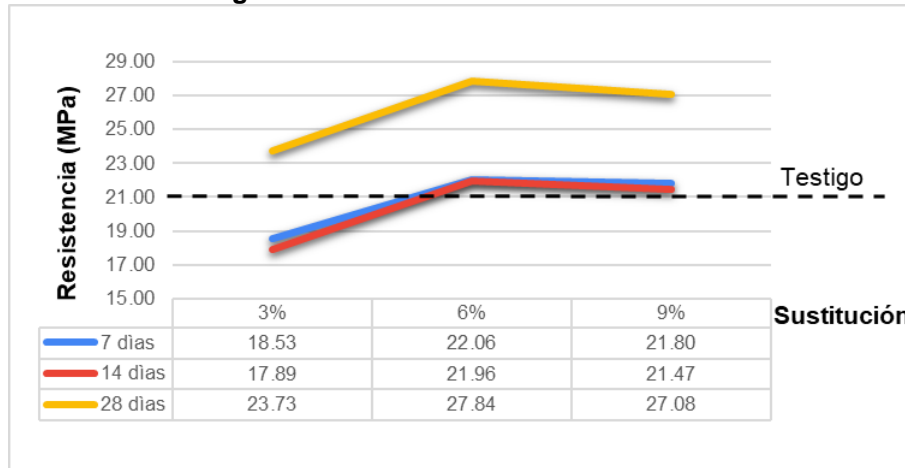
Fuente: Propia

Con los resultados obtenidos en la Figura 9, se mantiene la tendencia de que la mayor resistencia es con un 6% sustitución con un resultado de 27.84 MPa a 200°C, se presenta un aumento en la resistencia de más del 20% en comparación con los testigos realizado que tienen un resultado de 22.425 MPa como se observa en la Tabla 16. Además, a los 28 días se sigue observando que realizar sustituciones sin aplicar tratamiento térmico no es viable para el aumento de la resistencia, al contrario, la disminuye con respecto al testigo.

#### **7.2.4 Evolución de la resistencia a la compresión a las edades de 7,14 y 28 días con temperatura de 200°C**

En la Figura 10 se observa un gráfico de dispersión que involucra los datos obtenidos para la resistencia a los 7,14 y 28 días, para analizar la importancia de dejar cumplir los tiempos de fraguado en los morteros. Se inicia el grafico teniendo en cuenta que la temperatura a considerar de las Figuras 7, 8 y 9 es de 200°C dado que, con 150° y 230° no existe mayor variación (observar anexo B); entonces, En el eje Y se presentan los valores de las resistencias, en el eje X los porcentajes sustituidos y el testigo es la línea punteada, para el que se toma un valor teórico de 21 MPa.

**Figura 10. Resistencia a todas las edades**



Fuente: Propia

Observando y analizando la Figura 10 se puede inferir que, aunque se aplique tratamiento térmico, el tiempo de fraguado sigue siendo necesario para alcanzar la resistencia teórica de 21 MPa. Y se observa que para todos los casos el tratamiento térmico es viable en porcentajes de 6% y 9% hay diferencias de menos del 1% entre estos.

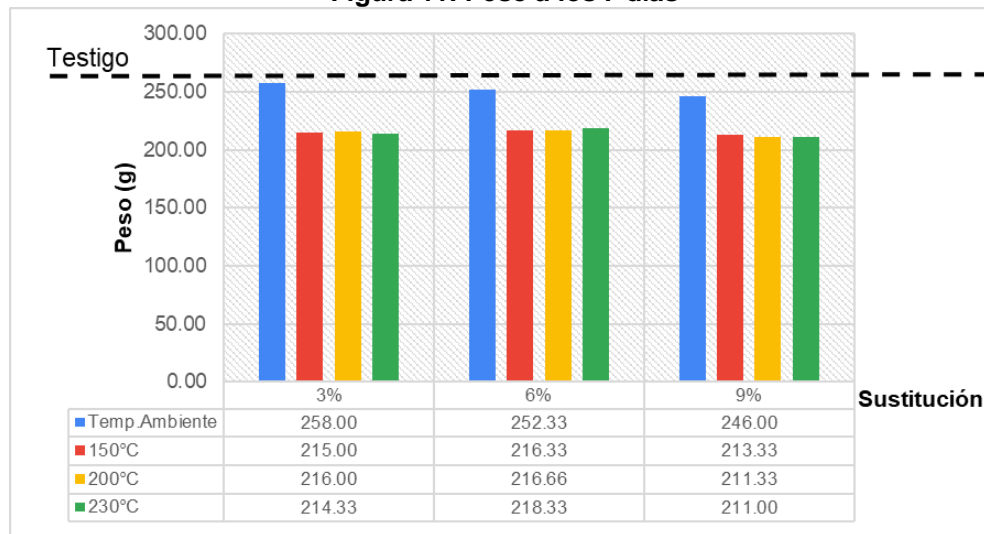
### 7.3 ALIGERAMIENTO

Tener estructuras más livianas es una ventaja que ayuda en el ámbito de la resistencia que se debe tener para soportarlas, lo que disminuye los costos y entre los beneficios del RPP también se encuentra que genera un aligeramiento en la estructura, porque su peso en comparación con el de la arena es muy bajo. Por esto también se realiza un análisis comparativo entre todos los pesos de los cubos realizado, para verificar la hipótesis de que entre más polipropileno de ponga en el mortero, más liviano será.

#### 7.3.1 Análisis de aligeramiento a los 7 días

En la Figura 11 se observa un diagrama de barras que permite analizar si la temperatura y los porcentajes realmente influyen en el peso de los morteros comparando con un mortero convencional; en el eje Y se tienen los valores del peso y en el eje X los porcentajes sustituidos, cada una de las barras representa la temperatura a la que fueron sometidos los cubos y la línea punteada los testigos realizados y fallados a los 7 días.

**Figura 11. Peso a los 7 días**



Fuente: Propia

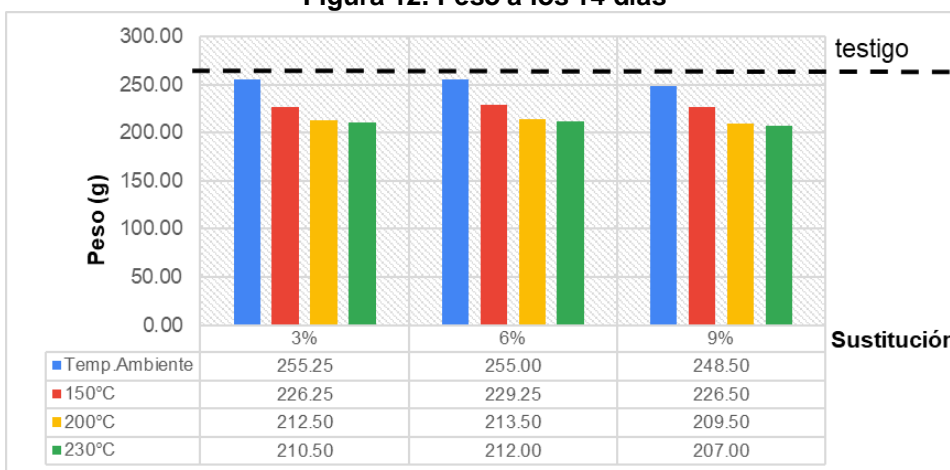
Analizando el diagrama de barras de la Figura 11, se puede deducir que existe una relación inversa entre la cantidad de polipropileno y el peso de los cubos de mortero, también, en el grado de la temperatura se nota esta relación inversa; por lo tanto, entre más RPP se le agregue al mortero y se le someta a mayor temperatura menor será su peso. Se debe tener en cuenta que siempre en un diseño se debe respetar el estándar de la resistencia que deben tener los materiales. Además, el tratamiento térmico resulta benéfico para el aligeramiento y comparando con los morteros a los que no se le realizó tratamiento tienen un gran aligeramiento; es decir, que la sustitución sin tratamiento no es significativa.

Existe un aligeramiento de más del 20% comparando el testigo que tuvo un peso de 260.41 g y el porcentaje con mayor aligeramiento que para 7 días fue el 9% a una temperatura de 230°C con un peso de 211 g.

### 7.3.2 Análisis de aligeramiento a los 14 días

En la Figura 12 se observa un diagrama de barras con las mismas características del expuesto en la Figura 11 que permite analizar con que temperatura y cual porcentaje tiene el mejor peso comparando con los testigos realizados a los 14 días.

**Figura 12. Peso a los 14 días**



Fuente: Propia

Con los resultados obtenidos en la Figura 12, se puede observar que existe una tendencia en cuanto a que el peso sigue disminuyendo con un 9% de sustitución con un resultado de 207 g a 230°C, se presenta un aligeramiento en los morteros del 25% en comparación con los testigos realizado que tienen un resultado de 259.812 g como se observa en la Tabla 15. Además, a los 14 días se sostiene la hipótesis de que realizar sustituciones sin aplicar tratamiento térmico no es significativo al buscar un aligeramiento, ya que no disminuye su peso ni un 5%.

### 7.3.3 Análisis de aligeramiento a los 28 días

En la Figura 13 se observa un diagrama de barras con las mismas características del expuesto en la Figura 11 y 12 que permite analizar con que temperatura y cual porcentaje tiene mayo aligeramiento comparando con los testigos realizados a los 28 días.

**Figura 13. Peso a los 28 días**



Fuente: Propia

Con los resultados obtenidos en la Figura 13, se mantiene una tendencia en cuanto a que el mayor aligeramiento es con una sustitución de 9% con un resultado de 206 g a 230°C, se presenta una disminución en el peso de más del 25% en comparación con los testigos realizado que tienen un resultado de 261.4375 g como se observa en la Tabla 16. Además, a los 28 días se sigue observando que realizar sustituciones sin aplicar tratamiento térmico si produce una disminución en el peso, pero en valores del 1% lo que no resulta significativo.

## 8. ANALISIS ESTADÍSTICO

Con el objetivo de identificar tendencias con todos los valores recolectados se realiza un análisis estadístico, utilizando herramientas como minitab y Excel. Primero se identifica con qué tipo de muestras se va a trabajar, de esta forma se identifica el análisis que se puede realizar, en este caso se realiza un análisis de varianza, y se revisa una gráfica factorial.

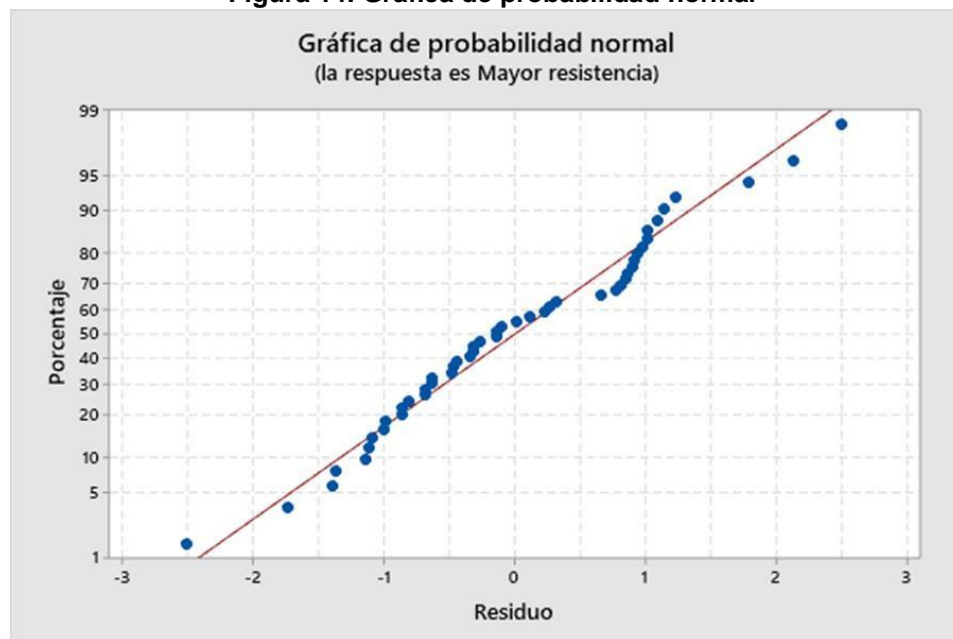
### 8.1 ANALISIS DE RESISTENCIA

La finalidad de realizar un análisis con la respuesta resistencia es identificar qué factores influyen directamente en los cambios de la misma, si son significativos o no. Revisar detalladamente si el tratamiento térmico es benéfico. se realiza un análisis para cada edad del cubo de mortero (7,14 y 28 días)

#### 8.1.1 Análisis Estadístico para 7 días

En la Figura 14 se observa una gráfica de probabilidad normal realizada en minitab, que tiene como objetivo determinar si las muestras obtenidas siguen o no la distribución normal supuesta.

Figura 14. Grafica de probabilidad normal



Fuente: Propia

Analizando la Figura 14 se deduce que las muestras obtenidas para 7 días, efectivamente siguen la línea supuesta por el programa por lo que se concluye que no se viola la suposición de normalidad; debido a esto se procede a realizar pruebas paramétricas.



### 8.1.1.1 Análisis de varianza

Se realiza un análisis de varianza con la finalidad de comparar todas las muestras obtenidas, este consiste en una hipótesis inicial de que todos los valores serán iguales, es decir no existen variaciones entre las muestras por lo que implementar esto sería innecesario; pero si la hipótesis es rechazada puede haber un efecto positivo.

- **ANOVA entre los cubos con sustitución sin tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 20 se tiene la ANOVA que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones VS las muestras con mezcla convencional.

**Tabla 20. Análisis de varianza sin tratamiento vs testigo**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Sin tratamiento vs Testigo 7 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
RPP	23,13465	3	7,71155	7,223173202	0,005006675	3,490294819
Interacción	12,81135	12	1,0676125			
Total	35,946	15				

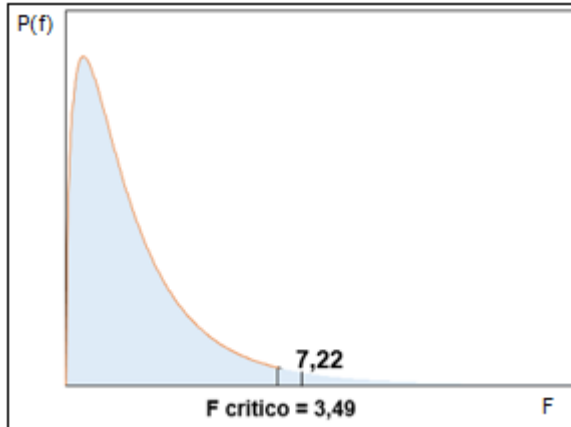
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 3.49 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 7.22 que es el valor correspondiente a las muestras y nos permite observar si la variación obtenida es realmente significativa por medio del gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 15 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 20 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras. Sirve para comprobar si es viable o no agregar plástico a las muestras de mortero.

Figura 15. Gráfico de Fisher entre sin tratamiento vs testigo



Fuente: Propia

**Hipótesis inicial:**

En la ecuación 15 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras sin tratamiento térmico VS los testigos.

**Ecuación 15. Hipótesis inicial para 7 días**

$$H_0: M_c = M3\% = M6\% = M9\%$$

Donde:

*M<sub>c</sub>* = mortero convencional

*M3%* = mortero con sustitución de 3%

*M6%* = mortero con sustitución de 6%

*M9%* = mortero con sustitución de 9%

Se analiza la Figura 15 con un  $F_c = 3.49$  y un  $F = 7.22$  de la siguiente forma:

$$F = 7.22 > F_c = 3.49$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 16. Hipótesis final para 7 días**

$$H_f: M_c \neq M3\% \neq M6\% \neq M9\%$$

Después de todo el análisis realizado se deduce que el mortero con adiciones de plástico si presenta ciertas variaciones a la mezcla convencional; pero se debe analizar además el valor de la probabilidad y en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 pero la diferencia del valor es mínima con respecto a la probabilidad, así que puede no ser tan significativo.

- **ANOVA entre los cubos con sustitución sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico**

En la Tabla 21 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones VS las muestras con sustitución y tratamiento térmico.

**Tabla 21. Análisis de varianza tratamiento vs sin tratamiento**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Con tratamiento vs Sin tratamiento 7 días							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Temperatura	167,4123688	3	55,80412292	43,71814943	9,05742E-14	2,798060635	
Porcentaje	100,7812313	3	33,59374375	26,31806097	3,26264E-10	2,798060635	
Interacción	129,6246438	9	14,40273819	11,28341469	3,13222E-09	2,081730394	
Dentro del grupo	61,2697	48	1,276452083				
Total	459,0879438	63					

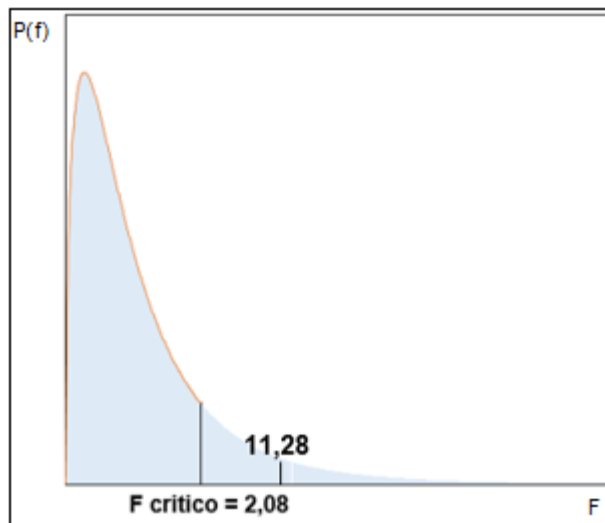
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 2.08 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 11.28, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si los porcentajes sustituidos tienen variaciones aplicando tratamiento, o si es lo mismo sustituir sin tratamiento; luego estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 16 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 21 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras. Sirve para comprobar si es viable o no aplicar el tratamiento térmico.

**Figura 16. Grafico de Fisher con tratamiento y sin tratamiento**



Fuente: Propia

### Hipótesis inicial:

En la ecuación 17 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras sin tratamiento térmico VS con tratamiento térmico.

#### Ecuación 17. Hipótesis inicial para 7 días

$$H^{\circ}: M_t = M3\% = M6\% = M9\%$$

Donde:

*M<sub>t</sub>* = mortero con tratamiento termico

*M3%* = mortero con sustitucion de 3%

*M6%* = mortero con sustitucion de 6%

*M9%* = mortero con sustitucion de 9%

Se analiza la Figura 16 con un  $F_c = 2.08$  y un  $F = 11.28$  de la siguiente forma:

$$F = 11.28 > F_c = 2.08$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

#### Ecuación 18. Hipótesis final para 7 días

$$H_f: M_t \neq M3\% \neq M6\% \neq M9\%$$

Después de todo el análisis realizado se deduce que la interacción entre la temperatura y el porcentaje tiene grandes variaciones sobre la respuesta que en este caso es la resistencia y al analizar el valor de la probabilidad en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 en gran magnitud lo que confirma el rechazo de la hipótesis inicial.

- **ANOVA entre los cubos con tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 22 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones y se les aplico tratamiento térmico VS los testigos.

**Tabla 22. Análisis de varianza con tratamiento vs testigo**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Con tratamiento vs Testigo 7 días							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Porcentajes	16.38381667	2	8.191908333	9.401727903	0.014155238	5.14325285	
Temperaturas	46.56383333	3	15.52127778	17.81353312	0.002162884	4.757062663	
Interacción	5.227916667	6	0.871319444				
Total	68.17556667	11					

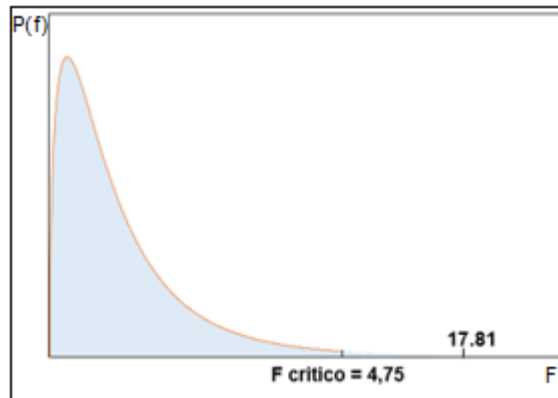
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 4.75 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 17.81, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si el tratamiento térmico con los porcentajes causa variaciones en la resistencia a la compresión de los testigos; estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 17 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 19 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras.

**Figura 17. Grafico de Fisher tratamiento térmico VS testigos**



Fuente: Propia

**Hipótesis inicial:**

En la ecuación 22 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras con tratamiento térmico VS testigos.

**Ecuación 19. Hipótesis inicial para 7 días**

$$H^{\circ}: Mc = Mt3\% = Mt6\% = Mt9\%$$

Donde:

*Mc = mortero convencional*

*Mt3% = mortero con sustitucion de 3% y tratamiento termico*

*Mt6% = mortero con sustitucion de 6% y tratamiento termico*

*Mt9% = mortero con sustitucion de 9% y tratamiento termico*

Se analiza la Figura 17 con un  $F_c = 4.75$  y un  $F = 17.81$  de la siguiente forma:

$$F = 17.81 > F_c = 4.75$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 20. Hipótesis final para 7 días**

$$H_f: M_c \neq M_{t3\%} \neq M_{t6\%} \neq M_{t9\%}$$

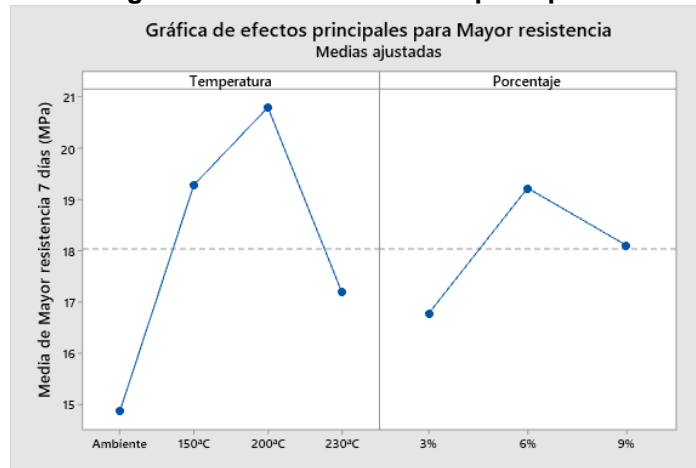
Después de todo el análisis realizado se deduce que el tratamiento térmico tiene grandes variaciones sobre la respuesta que en este caso es la resistencia y al analizar el valor de la probabilidad en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 en gran magnitud lo que confirma el rechazo de la hipótesis inicial.

**8.1.1.2 Grafica factorial**

Las gráficas factoriales permiten conocer la relación entre una respuesta que en este caso es la resistencia y las variables, es decir; cómo influye la temperatura y los porcentajes en la resistencia a los 7 días.

En la Figura 18 se observa una gráfica de efectos principales, que en este caso son la temperatura y el porcentaje en el eje de las Y tenemos la respuesta y en el eje X las variables que causan los efectos. Esta grafica sirve para revisar cuál de las temperaturas realizadas arroja un mejor resultado y lo mismo en el caso de los porcentajes.

**Figura 18. Grafica de efectos principales**

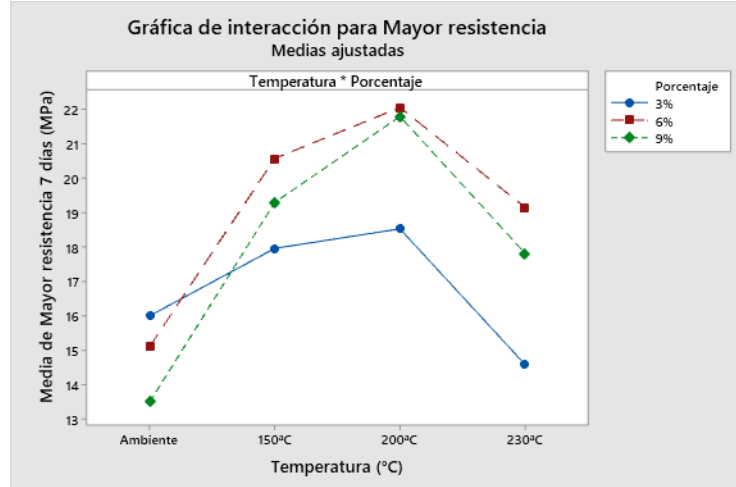


Fuente: Propia

Analizando la Figura 18 se infiere que la temperatura a considerar es 200°C y el valor óptimo de sustitución de arena por RPP es de 6% para obtener la mejor resistencia a la compresión de los cubos de mortero a la edad de 7 días.

En la Figura 19 ya se observa una gráfica que arroja el valor óptimo de la interacción entre la temperatura y el porcentaje sobre la resistencia. En el eje Y se encuentran los valores de resistencia, en el eje X se presentan las temperaturas y cada una de las líneas de colores representa un porcentaje de sustitución diferente.

**Figura 19. Gráfica de interacción para mayor resistencia**



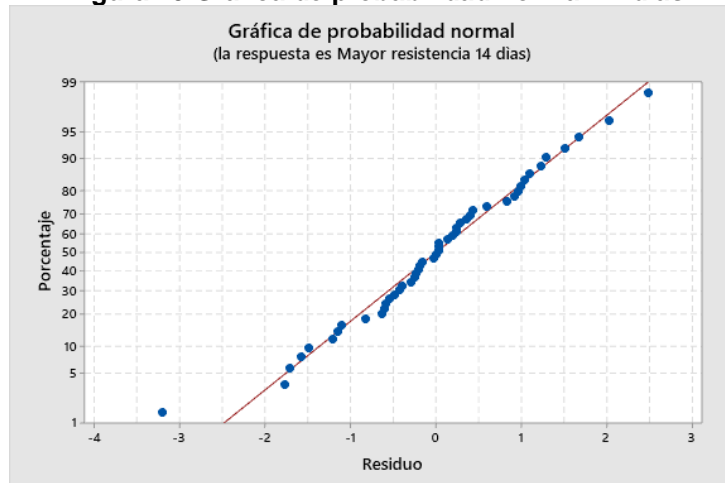
Fuente: Propia

Analizando la Figura 19, se puede concluir que a los 7 días el tratamiento térmico resulta óptimo en la mayoría de los casos, y que la interacción entre el tratamiento térmico a 200°C y los porcentajes de sustitución en especial 6% es positiva y aumenta los valores de la resistencia.

### 8.1.2 Análisis Estadístico para 14 días

En la Figura 20 se observa una gráfica de probabilidad normal realizada en minitab, que tiene como objetivo determinar si las muestras obtenidas siguen o no la distribución normal supuesta.

**Figura 20. Gráfica de probabilidad normal 14 días**



Fuente: Propia

Analizando la Figura 20 se deduce que las muestras obtenidas para 14 días, efectivamente siguen la línea supuesta por el programa por lo que se concluye que no se viola la suposición de normalidad; debido a esto se procede a realizar pruebas paramétricas.

### 8.1.2.1 **Análisis de varianza**

Se realiza un análisis de varianza con la finalidad de comparar todas las muestras obtenidas, este consiste en una hipótesis inicial de que todos los valores serán iguales, es decir no existen variaciones entre las muestras por lo que implementar esto sería innecesario; pero si la hipótesis es rechazada puede haber un efecto positivo.

- **ANOVA entre los cubos con sustitución sin tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 23 se tiene la ANOVA que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones VS las muestras con mezcla convencional.

**Tabla 23. Análisis de varianza sin tratamiento vs testigo 14 días**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Sin tratamiento vs Testigo 14 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
RPP	9.3702	3	3.1234	2.125243819	0.150329688	3.490294819
Interacción	17.636	12	1.469666667			
Total	27.0062	15				

Fuente: Propia

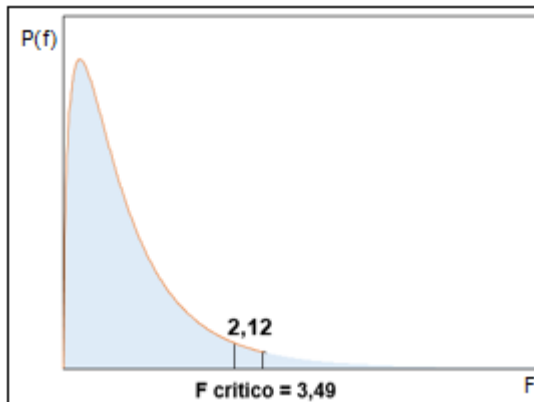
Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 3.49 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 2.12 que es el valor correspondiente a las muestras y nos permite observar si la variación obtenida es realmente significativa por medio del gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 21 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 23 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras. Sirve para comprobar si es viable o no agregar plástico a las muestras de mortero.



Figura 21. Gráfico de Fisher entre sin tratamiento vs testigo 14 días



Fuente: Propia

### Hipótesis inicial:

En la ecuación 21 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras sin tratamiento térmico VS los testigos.

#### Ecuación 21. Hipótesis inicial para 14 días

$$H^{\circ}: M_c = M3\% = M6\% = M9\%$$

Donde:

*M<sub>c</sub>* = mortero convencional

*M3%* = mortero con sustitución de 3%

*M6%* = mortero con sustitución de 6%

*M9%* = mortero con sustitución de 9%

Se analiza la Figura 21 con un  $F_c = 3.49$  y un  $F = 2.12$  de la siguiente forma:

$$F = 2.12 < F_c = 3.49$$

Por lo tanto, se acepta la hipótesis. Entonces;

#### Ecuación 22. Hipótesis final para 14 días

$$H^{\circ}: M_c = M3\% = M6\% = M9\%$$

Después de todo el análisis realizado se deduce que el mortero con adiciones de plástico no presenta variaciones significativas a la mezcla convencional fallada a los 14 días.

- **ANOVA entre los cubos con sustitución sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico**

En la Tabla 24 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones VS las muestras con sustitución y tratamiento térmico.

**Tabla 24. Analisis de varianza tratamiento vs sin tratamiento 14 días**

ANALISIS DE VARIANZA: Con tratamiento vs Sin tratamiento 14 días							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Temperatura	48,6898875	3	16,2299625	10,66523284	1,73363E-05	2,798060635	
Porcentaje	78,150225	3	26,050075	17,11834611	1,07421E-07	2,798060635	
Interacción	72,7510375	9	8,083448611	5,311895304	5,03965E-05	2,081730394	
Dentro del grupo	73,04465	48	1,521763542				
Total	272,6358	63					

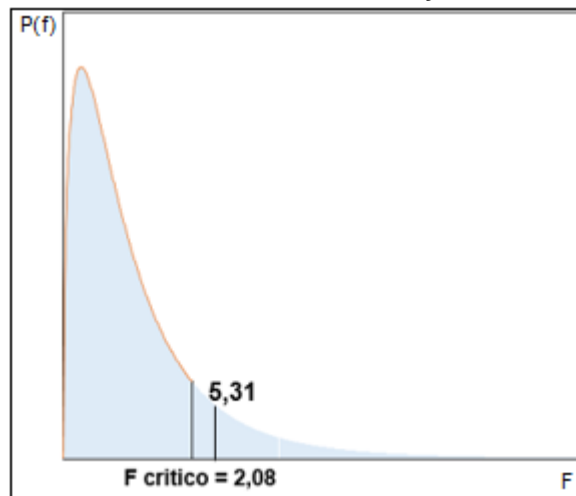
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 2.08 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 5.31, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si los porcentajes sustituidos tienen variaciones aplicando tratamiento, o si es lo mismo sustituir sin tratamiento; luego estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 22 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 24 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras. Sirve para comprobar si es viable o no aplicar el tratamiento térmico.

**Figura 22. Grafico de Fisher con tratamiento y sin tratamiento 14 días**



Fuente: Propia

### Hipótesis inicial:

En la ecuación 23 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras sin tratamiento térmico VS con tratamiento térmico.

#### Ecuación 23. Hipótesis inicial para 14 días

$$H^{\circ}: M_t = M3\% = M6\% = M9\%$$

Donde:

$M_t$  = mortero con tratamiento termico

$M3\%$  = mortero con sustitucion de 3%

$M6\%$  = mortero con sustitucion de 6%

$M9\%$  = mortero con sustitucion de 9%

Se analiza la Figura 22 con un  $F_c = 2.08$  y un  $F = 5.31$  de la siguiente forma:

$$F = 5.31 > F_c = 2.08$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

#### Ecuación 24. Hipótesis final para 14 días

$$H_f: M_t \neq M3\% \neq M6\% \neq M9\%$$

Después de todo el análisis realizado se deduce que la interacción entre la temperatura y el porcentaje tiene grandes variaciones sobre la respuesta que en este caso es la resistencia y al analizar el valor de la probabilidad da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 en gran magnitud lo que confirma el rechazo de la hipótesis inicial; existe variación significativa.

- **ANOVA entre los cubos con tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 25 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones y se les aplico tratamiento térmico VS los testigos.

**Tabla 25. Análisis de varianza con tratamiento vs testigos 14 días**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Con tratamiento vs Testigo 14 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Porcentajes	5,457916667	2	2,728958333	5,4785831	0,044299	5,14325285
Temperaturas	32,42929167	3	10,80976389	21,70139024	0,001272048	4,757062663
Interacción	2,988683333	6	0,498113889			
Total	40,87589167	11				

Fuente: Propia

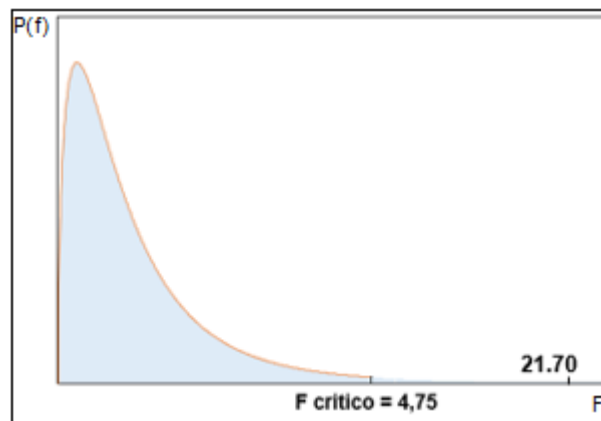
Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un  $F_{critico}$  de 4.75 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además,

se obtiene un F de 21.70, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si el tratamiento térmico con los porcentajes causa variaciones en la resistencia a la compresión de los testigos; estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 23 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 22 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras.

**Figura 23. Gráfico de Fisher con tratamiento térmico VS testigo 14 días**



Fuente: Propia

**Hipótesis inicial:**

En la ecuación 25 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras con tratamiento térmico VS los testigos.

**Ecuación 25. Hipótesis inicial para 14 días**

$$H_0: Mc = Mt3\% = Mt6\% = Mt9\%$$

Donde:

*Mc = mortero convencional*

*Mt3% = mortero con sustitucion de 3% y tratamiento termico*

*Mt6% = mortero con sustitucion de 6% y tratamiento termico*

*Mt9% = mortero con sustitucion de 9% y tratamiento termico*

Se analiza la Figura 23 con un  $F_c = 4.75$  y un  $F = 21.70$  de la siguiente forma:

$$F = 21.70 > F_c = 4.75$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 26. Hipótesis final para 7 días**

$$H_f: M_c \neq M_{t3\%} \neq M_{t6\%} \neq M_{t9\%}$$

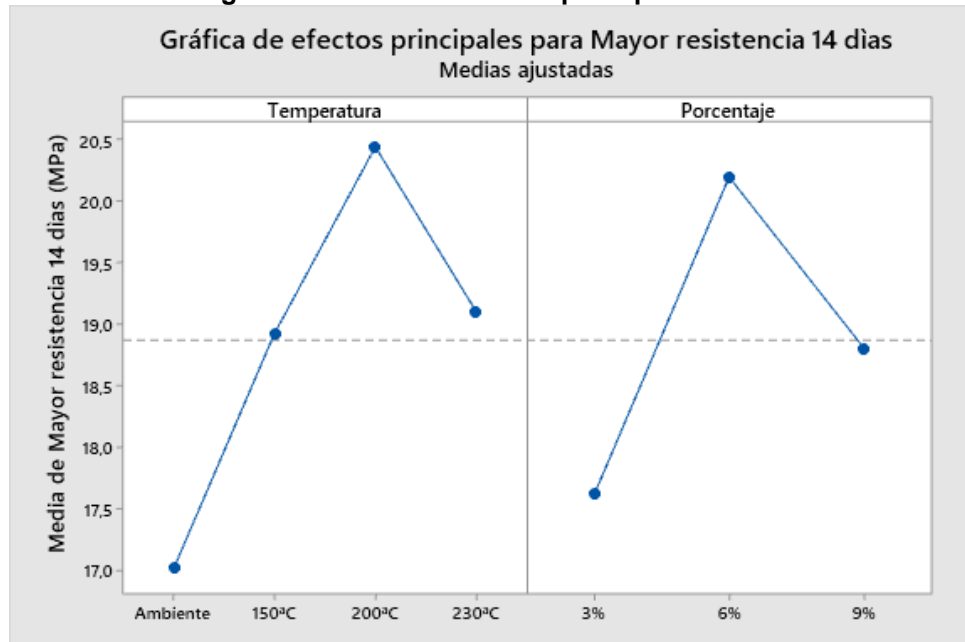
Después de todo el análisis realizado, se deduce que el tratamiento térmico tiene grandes variaciones sobre la respuesta que en este caso es la resistencia y al analizar el valor de la probabilidad en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 en gran magnitud lo que confirma el rechazo de la hipótesis inicial.

### 8.1.2.2 Gráfica factorial

Las gráficas factoriales permiten conocer la relación entre una respuesta que en este caso es la resistencia y las variables, es decir; cómo influye la temperatura y los porcentajes en la resistencia a los 14 días.

En la Figura 24 se observa una gráfica de efectos principales, que en este caso son la temperatura y el porcentaje en el eje de las Y tenemos la respuesta y en el eje X las variables que causan los efectos. Esta grafica sirve para revisar cuál de las temperaturas realizadas es la óptima y lo mismo en el caso de los porcentajes.

**Figura 24. Gráfica de efectos principales 14 días**

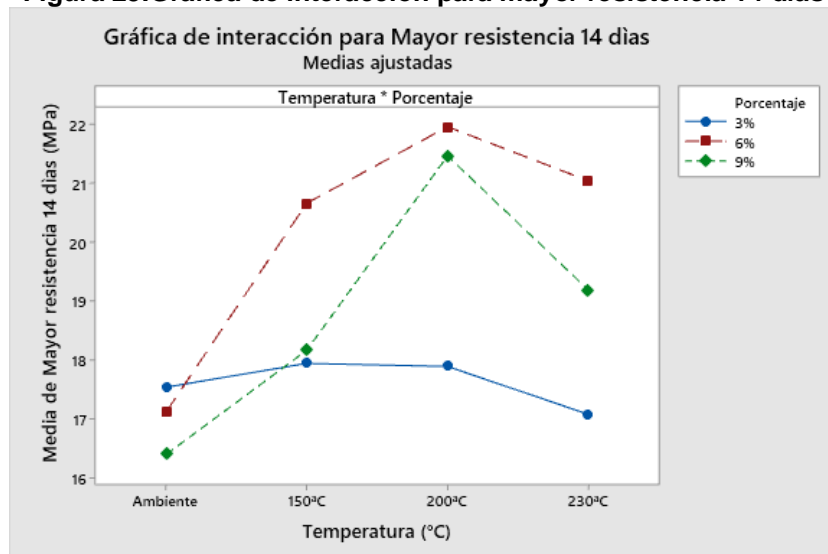


Fuente: Propia

Analizando la Figura 24 se infiere que la temperatura óptima es 200°C y el valor óptimo de sustitución de arena por RPP es de 6% para obtener la mejor resistencia a la compresión de los cubos de mortero a la edad de 14 días, lo que confirma una tendencia de aumento en la resistencia igual a los de 7 días.

En la Figura 25 se observa una gráfica que arroja el valor óptimo de la interacción entre la temperatura y el porcentaje sobre la resistencia. En el eje Y se encuentran los valores de resistencia, en el eje X se presentan las temperaturas y cada una de las líneas de colores representa un porcentaje de sustitución diferente.

**Figura 25. Gráfica de interacción para mayor resistencia 14 días**



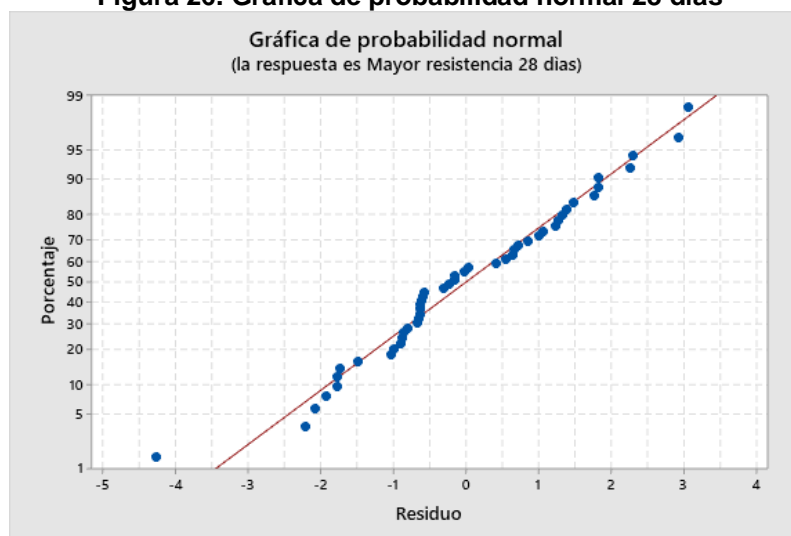
Fuente: Propia

Analizando la Figura 25, se puede concluir que a los 14 días el tratamiento térmico resulta óptimo en la mayoría de los casos, y que la interacción entre el tratamiento térmico a 200°C y los porcentajes de sustitución en especial 6% es positiva y aumenta los valores de la resistencia, igual que a los 7 días.

### 8.1.3 Análisis Estadístico para 28 días

En la Figura 26 se observa una gráfica de probabilidad normal realizada en minitab, que tiene como objetivo determinar si las muestras obtenidas siguen o no la distribución normal supuesta.

**Figura 26. Grafica de probabilidad normal 28 días**



Fuente: Propia

Analizando la Figura 26 se deduce que las muestras obtenidas para 28 días, efectivamente siguen la línea supuesta por el programa por lo que se concluye que no se viola la suposición de normalidad; debido a esto se procede a realizar pruebas paramétricas.

### 8.1.3.1 Análisis de varianza

Se realiza un análisis de varianza con la finalidad de comparar todas las muestras obtenidas, este consiste en una hipótesis inicial de que todos los valores serán iguales, es decir no existen variaciones entre las muestras por lo que implementar esto sería innecesario; pero si la hipótesis es rechazada puede haber un efecto positivo.

- **ANOVA entre los cubos con sustitución sin tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 26 se tiene la ANOVA que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones VS las muestras con mezcla convencional.

**Tabla 26. Análisis de varianza Sin tratamiento vs testigo 28 días**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Sin tratamiento vs Testigo 28 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
RPP	24,39496436	3	8,131654788	2,692502202	0,093110788	3,490294819
Interacción	36,24132875	12	3,020110729			
Total	60,63629311	15				

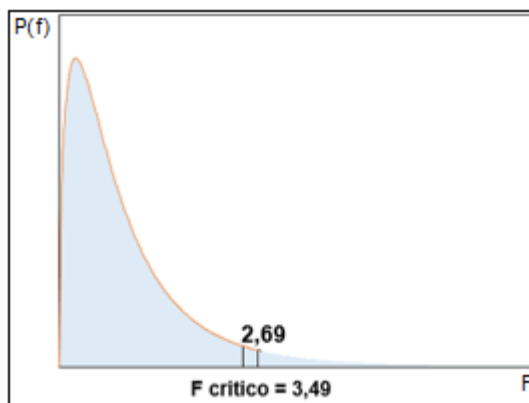
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 3.49 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 2.69 que es el valor correspondiente a las muestras y nos permite observar si la variación obtenida es realmente significativa por medio del gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 27 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 26 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras. Sirve para comprobar si es viable o no agregar plástico a las muestras de mortero sin aplicar un tratamiento térmico.

**Figura 27. Gráfico de Fisher entre sin tratamiento vs testigo 28 días**



Fuente: Propia

**Hipótesis inicial:**

En la ecuación 27 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras sin tratamiento térmico VS los testigos.

**Ecuación 27. Hipótesis inicial para 28 días**

$$H_0: M_c = M_{3\%} = M_{6\%} = M_{9\%}$$

Donde:

***M<sub>c</sub>** = mortero convencional*

***M<sub>3%</sub>** = mortero con sustitución de 3%*

***M<sub>6%</sub>** = mortero con sustitución de 6%*

***M<sub>9%</sub>** = mortero con sustitución de 9%*

Se analiza la Figura 27 con un  $F_c = 3.49$  y un  $F = 2.69$  de la siguiente forma:

$$F = 2.69 < F_c = 3.49$$



Por lo tanto, se acepta la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 28. Hipótesis final para 28 días**

$$H_0: M_c = M_3\% = M_6\% = M_9\%$$

Después de todo el análisis realizado se deduce que el mortero con adiciones de plástico no presenta variaciones significativas a la mezcla convencional fallada a los 28 días.

- **ANOVA entre los cubos con sustitución sin tratamiento térmico y con tratamiento térmico**

En la Tabla 27 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones VS las muestras con sustitución y tratamiento térmico.

**Tabla 27. Análisis de varianza con tratamiento vs sin tratamiento 28 días**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Con tratamiento vs Sin tratamiento 28 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Temperatura	84,97972136	3	28,32657379	9,39950352	5,37746E-05	2,798060635
Porcentaje	94,95971183	3	31,65323728	10,50337812	1,99804E-05	2,798060635
Interacción	127,0214885	9	14,11349873	4,683230735	0,000176416	2,081730394
Dentro del grupo	144,6539744	48	3,013624467			
Total	451,6148961	63				

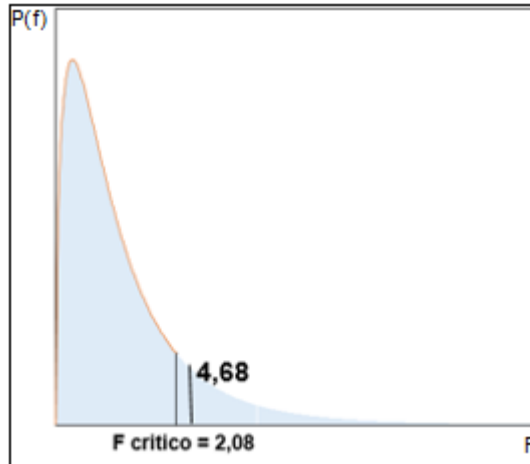
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 2.08 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 4.68, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si los porcentajes sustituidos tienen variaciones aplicando tratamiento, o si es lo mismo sustituir sin tratamiento; luego estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 28 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 27 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras. Sirve para comprobar si es viable o no aplicar el tratamiento térmico.

Figura 28. Gráfico de Fisher con tratamiento térmico vs sin tratamiento



Fuente: Propia

### Hipótesis inicial:

En la ecuación 29 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras sin tratamiento térmico VS con tratamiento térmico.

#### Ecuación 29. Hipótesis inicial para 28 días

$$H^{\circ}: M_t = M3\% = M6\% = M9\%$$

Donde:

*M<sub>t</sub>* = mortero con tratamiento termico

*M3%* = mortero con sustitucion de 3%

*M6%* = mortero con sustitucion de 6%

*M9%* = mortero con sustitucion de 9%

Se analiza la Figura 28 con un  $F_c = 2.08$  y un  $F = 4.68$  de la siguiente forma:

$$F = 4.68 > F_c = 2.08$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

#### Ecuación 30. Hipótesis final para 28 días

$$H_f: M_t \neq M3\% \neq M6\% \neq M9\%$$

Después de todo el análisis realizado se deduce que la interacción entre la temperatura y el porcentaje tiene grandes variaciones sobre la respuesta que en este caso es la resistencia y al analizar el valor de la probabilidad da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 en gran magnitud lo que confirma el rechazo de la hipótesis inicial; existe variación significativa.

- **ANOVA entre los cubos con tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 28 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones y se les aplico tratamiento térmico VS los testigos.

**Tabla 28. Análisis de varianza con tratamiento vs testigo 28 días**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Con tratamiento vs Testigo 28 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Filas	7,24545	2	3,622725	9,268376056	0,014621857	5,14325285
Columnas	47,07753333	3	15,69251111	40,1477049	0,000229532	4,757062663
Error	2,345216667	6	0,390869444			
Total	56,6682	11				

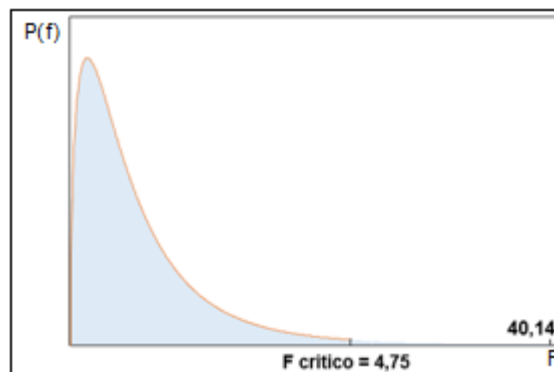
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 4.75 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 40.14, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si el tratamiento térmico con los porcentajes causa variaciones en la resistencia a la compresión de los testigos; estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 29 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 28 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras.

**Figura 29. Gráfico de Fisher con tratamiento VS testigo 28 días**



Fuente: Propia

**Hipótesis inicial:**

En la ecuación 25 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras con tratamiento térmico VS los testigos.

### **Ecuación 31. Hipótesis inicial para 28 días**

$$H_0: Mc = Mt3\% = Mt6\% = Mt9\%$$

Donde:

*Mc* = mortero convencional

*Mt3%* = mortero con sustitución de 3% y tratamiento térmico

*Mt6%* = mortero con sustitución de 6% y tratamiento térmico

*Mt9%* = mortero con sustitución de 9% y tratamiento térmico

Se analiza la Figura 29 con un  $F_c = 4.75$  y un  $F = 21.70$  de la siguiente forma:

$$F = 21.70 > F_c = 4.75$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

### **Ecuación 32. Hipótesis final para 7 días**

$$H_f: Mc \neq Mt3\% \neq Mt6\% \neq Mt9\%$$

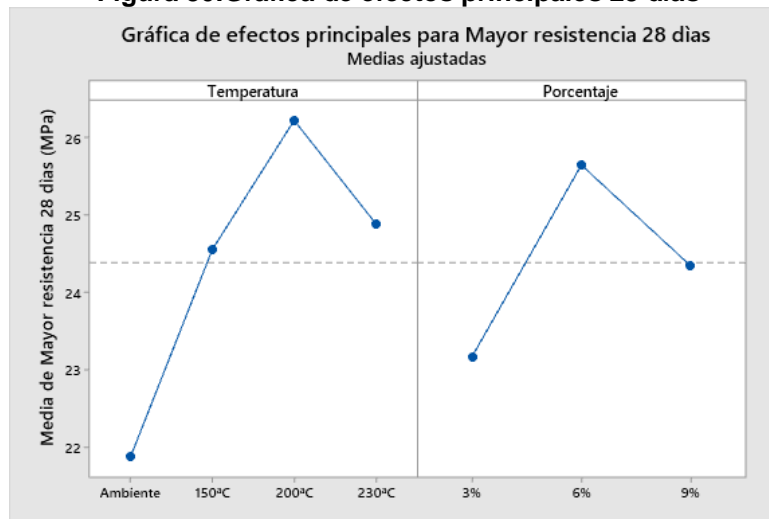
Después de todo el análisis realizado, se deduce que el tratamiento térmico tiene grandes variaciones sobre la respuesta que en este caso es la resistencia y al analizar el valor de la probabilidad en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 en gran magnitud lo que confirma el rechazo de la hipótesis inicial.

#### **8.1.3.2 Gráfica factorial**

Las gráficas factoriales permiten conocer la relación entre una respuesta que en este caso es la resistencia y las variables, es decir; cómo influye la temperatura y los porcentajes en la resistencia a los 28 días.

En la Figura 30 se observa una gráfica de efectos principales, que en este caso son la temperatura y el porcentaje en el eje de las Y tenemos la respuesta y en el eje X las variables que causan los efectos. Igual a las realizadas para 7 y 14 días.

**Figura 30. Grafica de efectos principales 28 días**

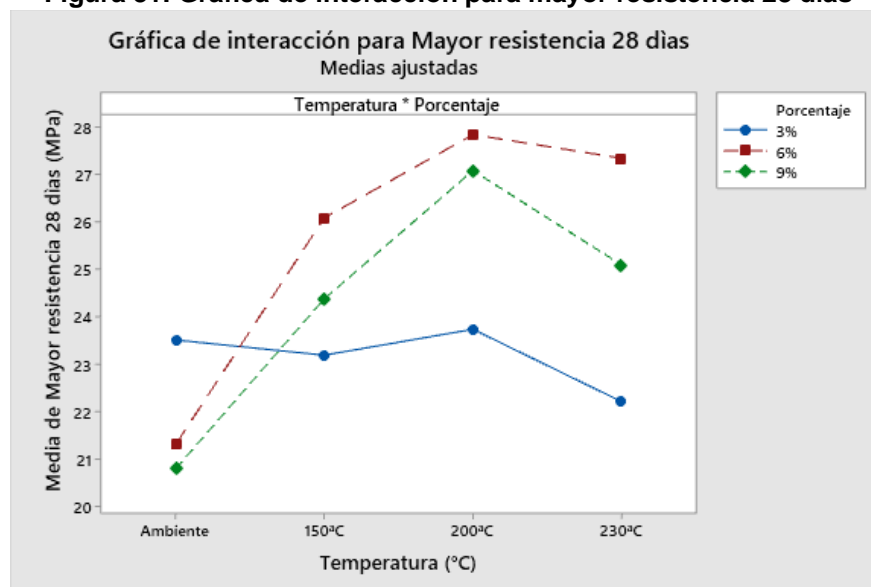


Fuente: Propia

Analizando la Figura 30 se infiere que la temperatura óptima es 200°C y el valor óptimo de sustitución de arena por RPP es de 6% para obtener la mejor resistencia a la compresión de los cubos de mortero a la edad de 28 días, lo que confirma una tendencia de aumento en la resistencia igual a los de 7 y 14 días.

En la Figura 31 se observa una gráfica que arroja el valor óptimo de la interacción entre la temperatura y el porcentaje sobre la resistencia. En el eje Y se encuentran los valores de resistencia, en el eje X se presentan las temperaturas y cada una de las líneas de colores representa un porcentaje de sustitución diferente.

**Figura 31. Grafica de interacción para mayor resistencia 28 días**



Fuente: Propia

Analizando la Figura 31, se puede concluir que a los 28 días el tratamiento térmico resulta óptimo en la mayoría de los casos, y que la interacción entre el tratamiento térmico a 200°C y los porcentajes de sustitución en especial 6% es positiva y aumenta los valores de la resistencia, igual que a los 7 y 14 días, en la Figura 28 se observa además que se llega a una resistencia de 28MPa, lo que resulta factible, teniendo en cuenta que el valor de resistencia tomado para realizar el diseño de mezcla fue de 21 MPa y los todos los testigos dieron valores menores de 28Mpa(observar Figura 6).

## 8.2 ANALISIS DE ALIGERAMIENTO

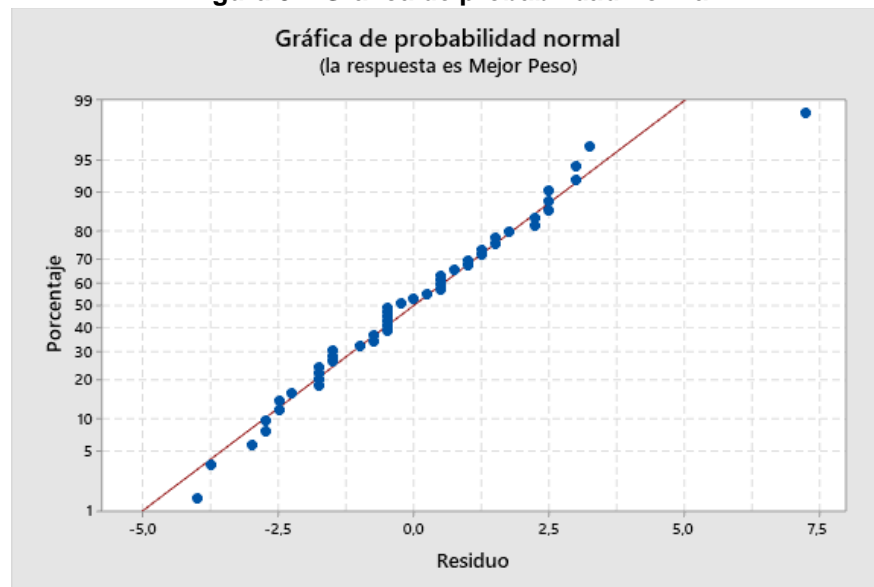
La finalidad de realizar un análisis con la respuesta peso es identificar qué factores influyen directamente en los cambios de la misma, si son significativos o no. Revisar detalladamente si el tratamiento térmico es benéfico.se realiza un análisis para cada edad del cubo de mortero (7,14 y 28 días).

En este caso el análisis se hará solo para los cubos con tratamiento térmico y los morteros convencionales, ya que entre los morteros sin tratamiento térmico y testigos no se identifica una variación significativa (observar Figura 10)

### 8.2.1 Análisis para 7 días

En la Figura 32 se observa una gráfica de probabilidad normal realizada en minitab, que tiene como objetivo determinar si las muestras obtenidas siguen o no la distribución normal supuesta.

Figura 32. Grafica de probabilidad normal



Fuente: Propia

Analizando la Figura 32 se deduce que las muestras obtenidas para 7 días, efectivamente siguen la línea supuesta por el programa por lo que se concluye que no se viola la suposición de normalidad; debido a esto se procede a realizar pruebas paramétricas, como es el análisis de varianza (ANOVA).

### 8.2.1.1 **Análisis de varianza**

Se realiza un análisis de varianza con la finalidad de comparar todas las muestras obtenidas, este consiste en una hipótesis inicial de que todos los valores serán iguales, es decir no existen variaciones entre las muestras por lo que implementar esto sería innecesario; pero si la hipótesis es rechazada puede haber un efecto positivo.

- **ANOVA entre los cubos con tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 29 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones y se les aplico tratamiento térmico VS los testigos.

**Tabla 29. Análisis de varianza: Peso con tratamiento vs testigo**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Peso Con tratamiento vs Peso Testigo 7 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Porcentajes	0,799266667	2	0,399633333	0,208423395	0,817501844	5,14325285
Temperaturas	4545,153358	3	1515,051119	790,154553	3,5172E-08	4,757062663
Interacción	11,50446667	6	1,917411111			
Total	4557,457092	11				

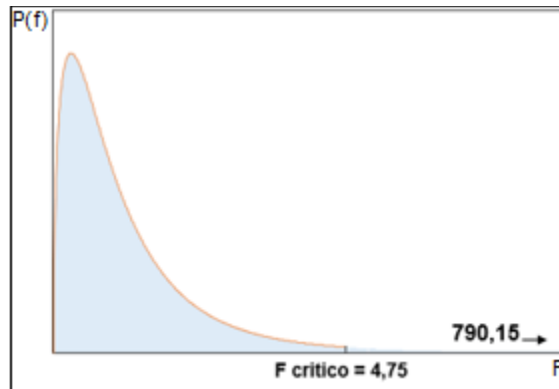
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 4.75 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 790.15, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si el tratamiento térmico con los porcentajes causa variaciones en cuanto al peso de los testigos; estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 33 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 28 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras.

Figura 33. Gráfico de Fisher con tratamiento y testigos



Fuente: Propia

**Hipótesis inicial:**

En la ecuación 15 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras con tratamiento térmico VS los testigos.

**Ecuación 33. Hipótesis inicial para 7 días aligeramiento.**

$$H^{\circ}: Mc = Mt3\% = Mt6\% = Mt9\%$$

Donde:

*Mc = mortero convencional*

*Mt3% = mortero con sustitucion de 3% y tratamiento termico*

*Mt6% = mortero con sustitucion de 6% y tratamiento termico*

*Mt9% = mortero con sustitucion de 9% y tratamiento termico*

Se analiza la Figura 33 con un  $F_c = 4.75$  y un  $F = 790.15$  de la siguiente forma:

$$F = 790.15 > F_c = 4.75$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 34. Hipótesis final para 7 días aligeramiento.**

$$H_f: Mc \neq Mt3\% \neq Mt6\% \neq Mt9\%$$

Después de todo el análisis realizado al gráfico de distribución Fisher se deduce que el mortero con adiciones de plástico y sometido a tratamiento térmico presenta grandes variaciones a la mezcla convencional; para tener seguridad de esta variación se debe analizar además el valor de la probabilidad y en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 con una diferencia grande, por



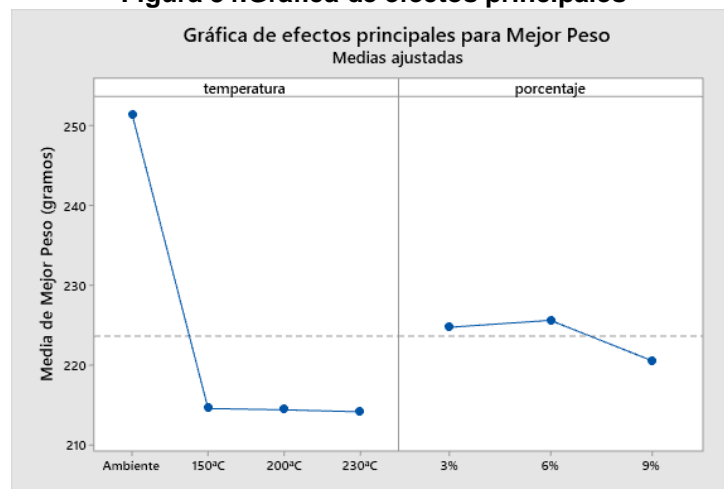
lo que se deduce que el tratamiento térmico tiene gran efecto sobre la respuesta peso.

### 8.2.1.2 *Grafica factorial*

Las gráficas factoriales permiten conocer la relación entre una respuesta que en este caso es el peso y las variables, es decir; cómo influye la temperatura y los porcentajes en la resistencia a los 7 días.

En la Figura 34 se observa una gráfica de efectos principales, que en este caso son la temperatura y el porcentaje, en el eje de las Y tenemos el peso en g y en el eje X las variables que causan los efectos.

**Figura 34. Grafica de efectos principales**

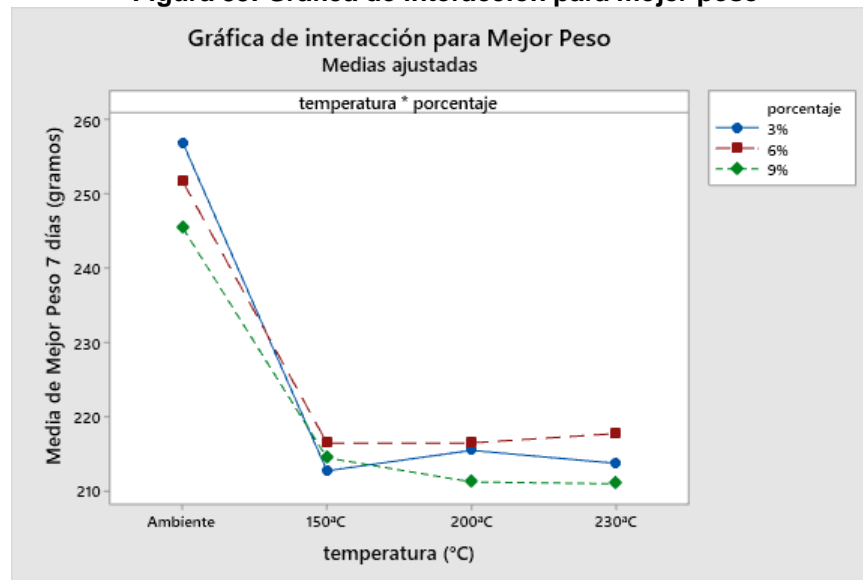


Fuente: Propia

Analizando la Figura 34 se infiere que la temperatura óptima es de 230°C y el valor óptimo de sustitución de arena por RPP es de 9% para obtener el mayor aligeramiento de los cubos de mortero a la edad de 7 días.

En la Figura 35 se observa una gráfica que arroja el valor óptimo de la interacción entre la temperatura y el porcentaje sobre el peso. En el eje Y se encuentran los valores del peso, en el eje X se presentan las temperaturas y cada una de las líneas de colores representa un porcentaje de sustitución diferente.

**Figura 35. Grafica de interacción para mejor peso**



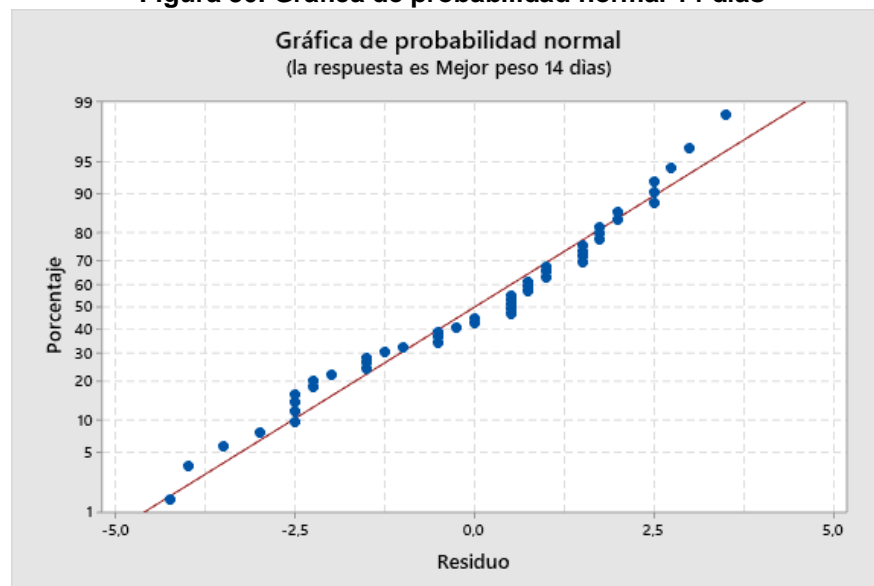
Fuente: Propia

Analizando la Figura 35, se puede concluir que a los 7 días el tratamiento térmico resulta óptimo en la mayoría de los casos, y que la interacción entre el tratamiento térmico a 230°C y los porcentajes de sustitución en especial 6% es positiva y ocasiona que disminuyan los pesos.

### 8.2.2 Análisis para 14 días

En la Figura 36 se observa una gráfica de probabilidad normal realizada en minitab, que tiene como objetivo determinar si las muestras obtenidas siguen o no la distribución normal supuesta.

**Figura 36. Grafica de probabilidad normal 14 días**



Fuente: Propia

Analizando la Figura 36 se deduce que las muestras obtenidas para 28 días, efectivamente siguen la línea supuesta por el programa por lo que se concluye que no se viola la suposición de normalidad; debido a esto se procede a realizar pruebas paramétricas, como es el análisis de varianza (ANOVA).

### 8.2.2.1 **Análisis de varianza**

Se realiza un análisis de varianza con la finalidad de comparar todas las muestras obtenidas, este consiste en una hipótesis inicial de que todos los valores serán iguales, es decir no existen variaciones entre las muestras por lo que implementar esto sería innecesario; pero si la hipótesis es rechazada puede haber un efecto positivo.

- **ANOVA entre los cubos con tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 30 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones y se les aplico tratamiento térmico VS los testigos.

**Tabla 30. Análisis de varianza: Peso con tratamiento vs testigo**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Peso Con tratamiento vs Peso Testigo 14 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Porcentajes	399,7604167	2	199,8802083	7,694379469	0,022074811	5,14325285
Temperaturas	4280,604167	3	1426,868056	54,92722048	9,36003E-05	4,757062663
Interacción	155,8645833	6	25,97743056			
Total	4836,229167	11				

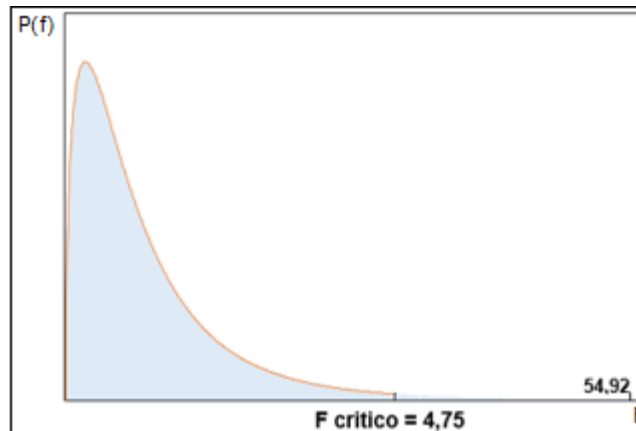
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 4.75 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 54.92, se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si el tratamiento térmico con los porcentajes causa variaciones en cuanto al peso de los testigos; estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 37 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 31 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras.

**Figura 37. Gráfico de Fisher con tratamiento VS testigos 14 días**



Fuente: Propia

### **Hipótesis inicial:**

En la ecuación 35 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras con tratamiento térmico VS los testigos.

**Ecuación 35. Hipótesis inicial para 14 días aligeramiento.**

$$H_0: Mc = Mt3\% = Mt6\% = Mt9\%$$

Donde:

*Mc = mortero convencional*

*Mt3% = mortero con sustitución de 3% y tratamiento térmico*

*Mt6% = mortero con sustitución de 6% y tratamiento térmico*

*Mt9% = mortero con sustitución de 9% y tratamiento térmico*

Se analiza la Figura 37 con un  $F_c = 4.75$  y un  $F = 54.92$  de la siguiente forma:

$$F = 54.92 > F_c = 4.75$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 31. Hipótesis final para 14 días aligeramiento**

$$H_f: Mc \neq Mt3\% \neq Mt6\% \neq Mt9\%$$

Después de todo el análisis realizado al gráfico de distribución Fisher se deduce que el mortero con adiciones de plástico y sometido a tratamiento térmico sigue presentando grandes variaciones a la mezcla convencional tal como se observó a los 7 días; se analiza además el valor de la probabilidad y en este caso da menor

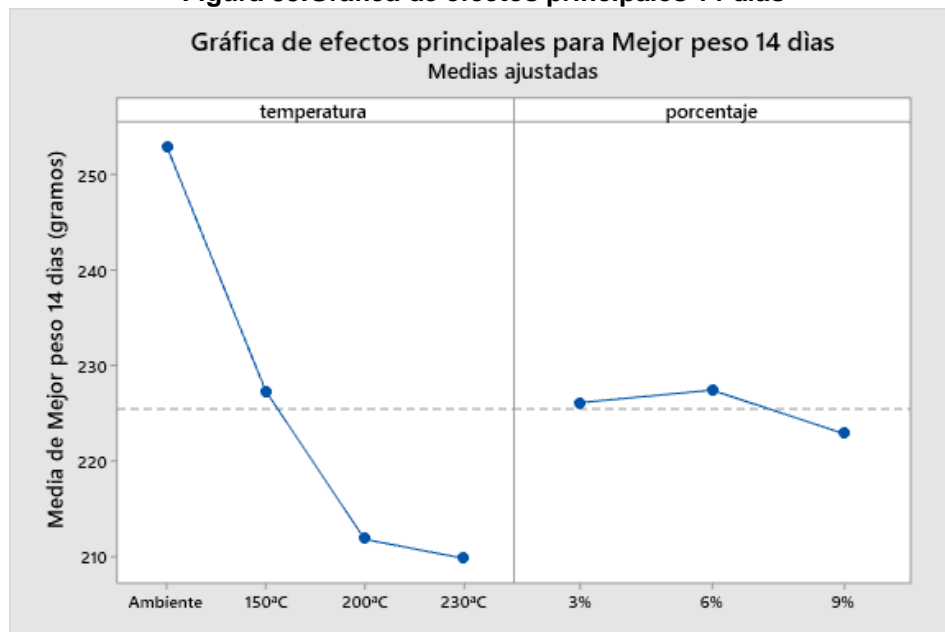
que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 con una diferencia grande, por lo que se deduce que el tratamiento térmico resulta efectivo para un aligeramiento.

### 8.2.2.2 Grafica factorial

Las gráficas factoriales permiten conocer la relación entre una respuesta que en este caso es el peso y las variables, es decir; cómo influye la temperatura y los porcentajes en la resistencia a los 14 días.

En la Figura 38 se observa una gráfica de efectos principales, que en este caso son la temperatura y el porcentaje, en el eje de las Y tenemos el peso en g y en el eje X las variables que causan los efectos.

Figura 38. Grafica de efectos principales 14 días

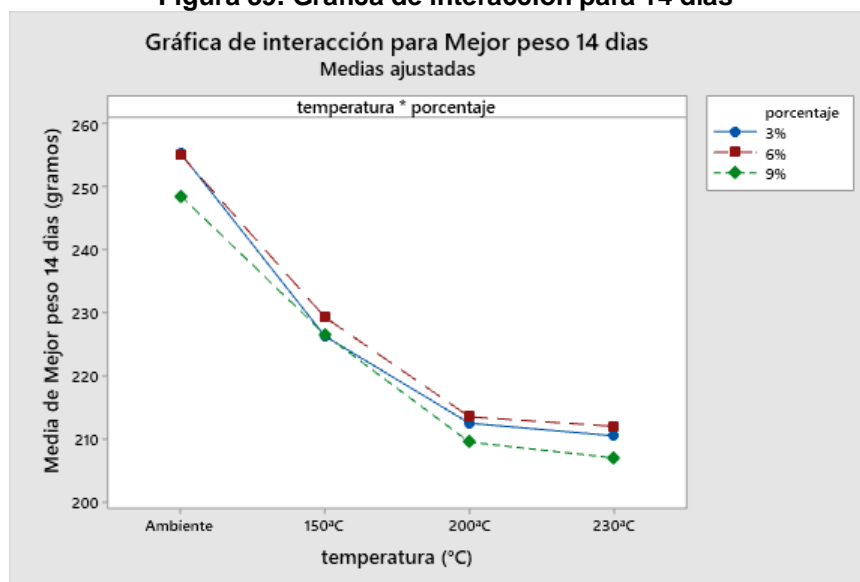


Fuente: Propia

Analizando la Figura 38 se infiere que la temperatura óptima es de 230°C y el valor óptimo de sustitución de arena por RPP es de 9% para obtener el mayor aligeramiento de los cubos de mortero a la edad de 14 días.

En la Figura 39 se observa una gráfica que arroja el valor óptimo de la interacción entre la temperatura y el porcentaje sobre el peso. En el eje Y se encuentran los valores del peso, en el eje X se presentan las temperaturas y cada una de las líneas de colores representa un porcentaje de sustitución diferente.

**Figura 39. Grafica de interacción para 14 días**



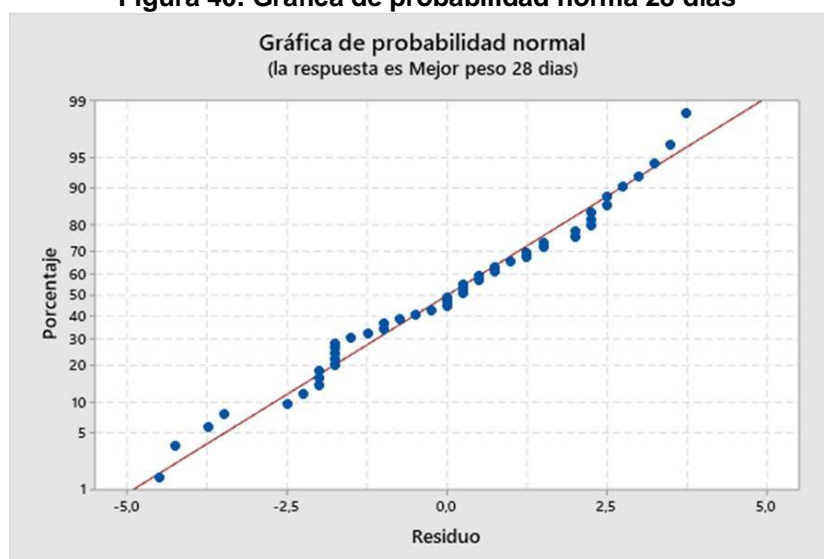
Fuente: Propia

Analizando la Figura 39, se puede concluir que a los 14 días el tratamiento térmico resulta óptimo en la mayoría de los casos, y que la interacción entre el tratamiento térmico a 230°C y los porcentajes de sustitución en especial 6% es positiva y ocasiona que disminuyan los pesos.

### 8.2.3 Análisis para 28 días

En la Figura 40 se observa una gráfica de probabilidad normal realizada en minitab, que tiene como objetivo determinar si las muestras obtenidas siguen o no la distribución normal supuesta.

**Figura 40. Grafica de probabilidad norma 28 días**



Fuente: Propia

Analizando la Figura 40 se deduce que las muestras obtenidas para 28 días, efectivamente siguen la línea supuesta por el programa por lo que se concluye que no se viola la suposición de normalidad; debido a esto se procede a realizar pruebas paramétricas, como es el análisis de varianza (ANOVA).

### 8.2.3.1 **Análisis de varianza**

Se realiza un análisis de varianza con la finalidad de comparar todas las muestras obtenidas, este consiste en una hipótesis inicial de que todos los valores serán iguales, es decir no existen variaciones entre las muestras por lo que implementar esto sería innecesario; pero si la hipótesis es rechazada puede haber un efecto positivo.

- **ANOVA entre los cubos con tratamiento térmico y los testigos**

En la Tabla 31 se tiene una ANOVA de 2 factores que permite revisar la varianza que existe entre todas las muestras a las que se le realizaron las respectivas sustituciones y se les aplico tratamiento térmico VS los testigos.

**Tabla 31. Análisis de varianza: Peso con tratamiento vs testigo 28 días**

ANÁLISIS DE VARIANZA: Peso Con tratamiento vs Peso Testigo 28 días						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Porcentajes	5,635416667	2	2,817708333	2,588516746	0,154694223	5,14325285
Temperaturas	5962,9375	3	1987,645833	1825,971292	2,86386E-09	4,757062663
Interacción	6,53125	6	1,088541667			
Total	5975,104167	11				

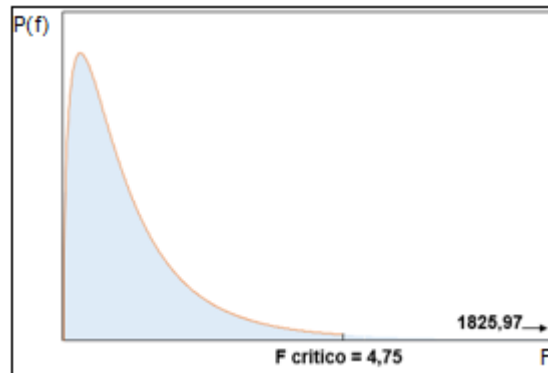
Fuente: Propia

Después de realizar el análisis en la ANOVA se obtiene un F crítico de 4.75 que es el valor que se debe tener como referencia para comprobar la hipótesis y además se obtiene un F de 1825,97 se toma este valor para el análisis ya que la idea es revisar si el tratamiento térmico con los porcentajes causa variaciones en cuanto al peso de los testigos; estos valores se estudian por medio de el gráfico de Fisher realizado en Excel.

- **GRAFICA DE FISHER**

En la Figura 41 se observa un gráfico de distribución Fisher que se realiza con los valores obtenidos con la ANOVA de la Tabla 34 ubicando los valores de F crítico y F correspondiente a las muestras.

Figura 41. Gráfico de Fisher con tratamiento VS testigos 28 días



Fuente: Propia

### Hipótesis inicial:

En la ecuación 37 se presenta la hipótesis inicial realizada para analizar el caso de las muestras con tratamiento térmico VS los testigos.

**Ecuación 37. Hipótesis inicial para 28 días aligeramiento.**

$$H_0: Mc = Mt3\% = Mt6\% = Mt9\%$$

Donde:

*Mc* = mortero convencional

*Mt3%* = mortero con sustitución de 3% y tratamiento térmico

*Mt6%* = mortero con sustitución de 6% y tratamiento térmico

*Mt9%* = mortero con sustitución de 9% y tratamiento térmico

Se analiza la Figura 41 con un  $F_c = 4.75$  y un  $F = 1825.97$  de la siguiente forma:

$$F = 1825.97 > F_c = 4.75$$

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis. Entonces;

**Ecuación 38. Hipótesis final para 28 días aligeramiento**

$$H_f: Mc \neq Mt3\% \neq Mt6\% \neq Mt9\%$$

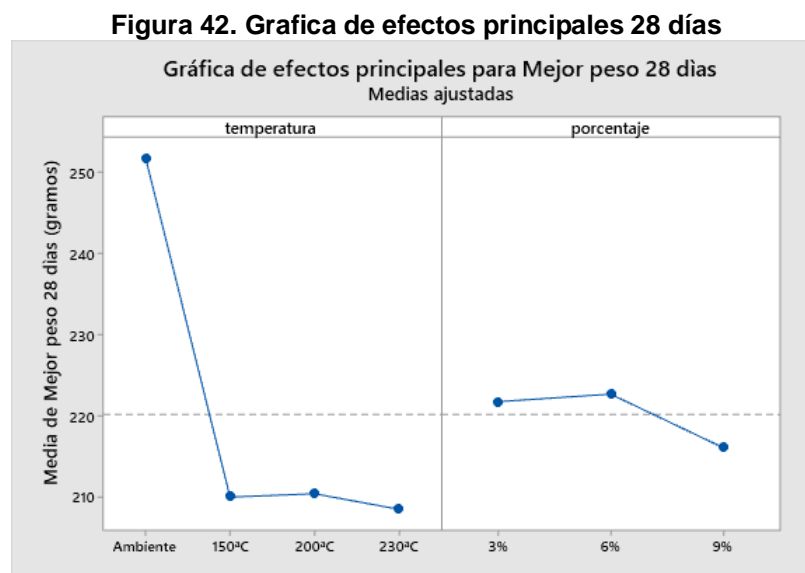
El mortero con adiciones de plástico y sometido a tratamiento térmico sigue presentando grandes variaciones a la mezcla convencional tal como se observó a los 7 y 14 días; se analiza además el valor de la probabilidad y en este caso da menor que el  $\alpha$  teórico tomado inicialmente de 0.05 con una gran diferencia, por lo que se deduce que el tratamiento térmico resulta efectivo para un aligeramiento.



### 8.2.3.2 Gráfica factorial

Las gráficas factoriales permiten conocer la relación entre una respuesta que en este caso es el peso y las variables, es decir; cómo influye la temperatura y los porcentajes en la resistencia a los 28 días.

En la Figura 42 se observa una gráfica de efectos principales, que en este caso son la temperatura y el porcentaje, en el eje de las Y tenemos el peso en g y en el eje X las variables que causan los efectos.

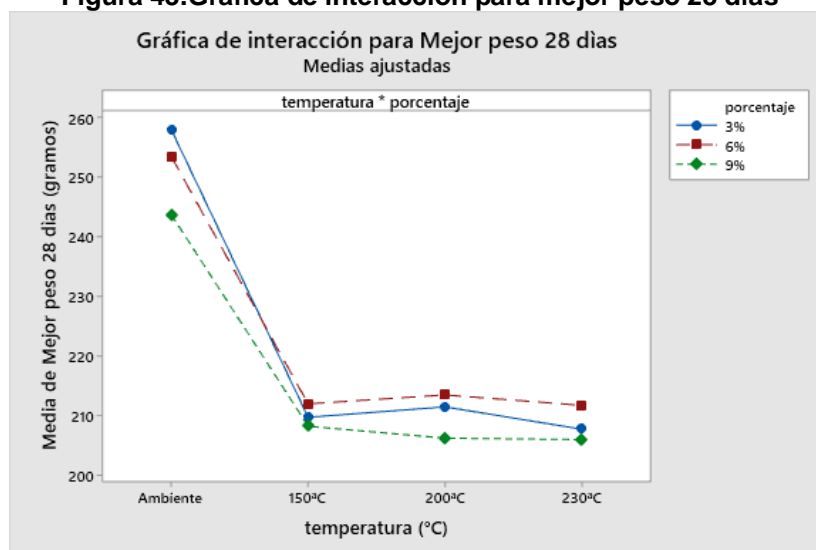


Fuente: Propia

Analizando la Figura 42 se infiere que la temperatura óptima es de 230°C y el valor óptimo de sustitución de arena por RPP es de 9% para obtener el mayor aligeramiento de los cubos de mortero a la edad de 28 días.

En la Figura 43 se observa una gráfica que arroja el valor óptimo de la interacción entre la temperatura y el porcentaje sobre el peso. En el eje Y se encuentran los valores del peso, en el eje X se presentan las temperaturas y cada una de las líneas de colores representa un porcentaje de sustitución diferente.

**Figura 43. Grafica de interacción para mejor peso 28 días**



Fuente: Propia

Analizando la Figura 43, se puede concluir que a los 28 días el tratamiento térmico resulta óptimo en la mayoría de los casos, y que la interacción entre el tratamiento térmico a 230°C y los porcentajes de sustitución en especial 6% es positiva y ocasiona que disminuyan los pesos.

## 9. CONCLUSIONES

De los resultados obtenidos, el análisis estadístico y el análisis de resultados se concluye que:

- Del análisis realizado a las diferentes mezclas de mortero, con sustituciones volumétricas de diferentes porcentajes de RPP (3%, 6%, 9%) y sometidos a diferentes temperaturas (150°C, 200°C, 230°C); se deduce que con respecto al parámetro de resistencia a la compresión los mejores resultados se obtienen con una sustitución de RPP del 6% sometido a un tratamiento térmico de 200°. Mejorando hasta un 20% respecto a los testigos.
- Del análisis comparativo realizado para determinar el aligeramiento obtenido, se concluye que la mezcla con sustitución del 9% de RPP proporciona el máximo aligeramiento (hasta un 25%) respecto al mortero testigo, cuando se somete a una temperatura de 230°C (ver Figura 39).
- De acuerdo al análisis de varianza (ANOVA) realizado entre los morteros con sustitución de RPP sin tratamiento térmico y los morteros testigos, se determina que para las edades de 7, 14 y 28 días no existe una variación significativa entre la resistencia a la compresión de estos. Obteniéndose un F menor al FC en todos los casos.
- El análisis estadístico realizado entre los morteros con sustitución sin tratamiento térmico y con tratamiento, muestra que existe una variación significativa entre estos, lo cual se concluye analizando la probabilidad obtenida en la ANOVA (ver Tabla 27). Esta tendencia también se observa en el análisis de resultados (ver Figura 9), en donde los morteros con tratamiento térmico arrojaron un incremento en la resistencia a la compresión del 30% con respecto a los morteros sin tratamiento.
- Analizando el diagrama de distribución Fisher realizado entre los morteros con RPP sometidos a tratamiento térmico y los testigos, se concluye que al realizar tratamiento térmico se presenta una variación significativa en términos de incrementos de resistencia a la compresión; lo cual se refleja en valores de F superiores que el FC a todas las edades, y los valores de probabilidad son menores que el  $\alpha$  inicial tomado de 0.05.

- En el análisis estadístico realizado al comportamiento de resistencia a compresión entre las mezclas sustituidas con RPP sin ser sometidas a un tratamiento térmico, y la mezcla de mortero convencional. Se observó que los porcentajes analizados de 3%, 6% y 9% a edades de 7, 14 y 28 días, no presentan incidencia considerable, debido a que los valores no presentaron ningún tipo de varianza. Por lo tanto, se concluye que realizar sustituciones para los porcentajes estudiados sin someter los especímenes a tratamiento térmico no conduce a mejoras significativas en las resistencias a compresión. Por el contrario se registran ligeras disminuciones (alrededor de 1%).
- Relacionando las variables aligeramiento y resistencia a la compresión, se concluye que los resultados más satisfactorios se obtienen para el caso de estudio de morteros con sustituciones de RPP del 9% con tratamiento térmico a 200 °C en todas las edades de falla (7,14 y 28 días). En general la reducción del peso fue del orden del 25% y la ganancia de resistencia máxima del orden del 20%.

## 10. BIBLIOGRAFIA

- [1] L. A. O. Magariños, «Master construcc,» instituto de tecnología aquitectonica, 19 Agosto 1997. [En línea]. Available: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/viewFile/477/525> . [Último acceso: 6 Noviembre 2019].
- [2] A. M. M. Sanjuán, «ScienceDirect,» Elsevier, 1997. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266353897000122>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [3] K. W. Y. Ma, «Springer link,» Materials and Structures, Marzo 2004. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/bf02486604>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [4] M. K. L. Alesmar, «Scielo,» Universidad Central de Venezuela, Marzo 2008. [En línea]. Available: [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652008000100006](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652008000100006). [Último acceso: 6 11 2019].
- [5] R. Gaggio, «Revista invi,» Centro experimental de la vivienda económica, 2008. [En línea]. Available: <http://revistainvi.uchile.cl/index.php/INVI/article/view/446/955>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [6] A. Pullaguari, «Escuela Politécnica Nacional,» Escuela de formación de tecnólogos, Enero 2010. [En línea]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1842/1/CD-2787.pdf>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [7] S. Castillo, «Universidad Veracruzana,» Facultad de ingeniería civil, 2012. [En línea]. Available: <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/123456789/30611/MendezSilva.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [8] A. Costa, «Universidad Politécnica de Cataluña,» Arquitectura, energía y medio ambiente, 2012. [En línea]. Available: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/16661/CostadelPozoAntonella\\_TFM.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/16661/CostadelPozoAntonella_TFM.pdf). [Último acceso: 6 11 2019].
- [9] .. G. B. Rabehi, «Springer link,» International Journal of Concrete Structures and Materials, Septiembre 2012. [En línea]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40069-012-0013-0>. [Último acceso: 6 11 2019].

- [10] Y. A. H. Ahmed, «ResearchGate,» University of Sulaimani, Octubre 2016. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/310443419\\_MECHANICAL\\_PROPERTIES\\_OF\\_CEMENT\\_MORTAR\\_BY\\_USING\\_POLYETHYLENE\\_TEREPTHALATE\\_FIBERS](https://www.researchgate.net/publication/310443419_MECHANICAL_PROPERTIES_OF_CEMENT_MORTAR_BY_USING_POLYETHYLENE_TEREPTHALATE_FIBERS). [Último acceso: 6 11 2019].
- [11] H. L. R. Dimarco, «unilibre,» Universidad de Santander, 16 Septiembre 2017. [En línea]. Available: <http://www.unilibre.edu.co/bogota/pdfs/2017/5sim/39D.pdf>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [12] M. N. A. Usman, «ResearchGate,» University Technology PETRONAS, Enero 2018. [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/329186203\\_Effect\\_of\\_Recycled\\_Plastic\\_in\\_Mortar\\_and\\_Concrete\\_and\\_the\\_Application\\_of\\_Gamma\\_Irradiation\\_-\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/329186203_Effect_of_Recycled_Plastic_in_Mortar_and_Concrete_and_the_Application_of_Gamma_Irradiation_-_A_Review). [Último acceso: 6 11 2019].
- [13] c. cemex, «mortero seco tipo M,» *cementos cemex*, 2010.
- [14] APLITECME. [En línea]. Available: [http://www.aplitecme.es/servicios\\_pavimentos\\_rehabilitacion.php](http://www.aplitecme.es/servicios_pavimentos_rehabilitacion.php).
- [15] c. argos, «mortero seco tipo N,» *cementos argos*, 2012.
- [16] M. tequendama, «Mortero seco tipo s,» *Morteros tequendama*.
- [17] cemex, «Mortero seco tipo grout,» *cemex colombia*, 2014.
- [18] «Materiales basicos para construccion,» [En línea]. Available: [http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6708s/x6708s03.htm](http://www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6708s/x6708s03.htm).
- [19] OXICAL. [En línea]. Available: <https://oxical.mx/mortero.html>.
- [20] CONSTRUMATICA. [En línea]. Available: [https://www.construmatica.com/construpedia/Mortero\\_Hidráulico](https://www.construmatica.com/construpedia/Mortero_Hidráulico).
- [21] Scielo, *Scielo*, p. Estudio de durabilidad y corrosión en morteros armados adicionados con toba volcánica y ceniza de bagazo de caña de azucar, 2012.
- [22] LEMARA. [En línea]. Available: <https://www.lemara.es/nueva-obra-finalizada-regeneracion/>.
- [23] Scielo, *Scielo*, p. nfluencia de la temperatura ambiental sobre las propiedades de trabajabilidad y microestructurales de morteros y pastas de cemento, 2009.

- [24] SIKA, «Sika Monotop. 100 Fire Resistant,» *SIKA*, nº 1.
- [25] M. builders, «Master builders,» [En línea]. Available: <https://www.master-builders-solutions.basf.es/es-es/quienes-somos/noticias-y-comunicacion/aplicaciones-de-morteros-a-distintas-temperaturas>.
- [26] YARA. [En línea]. Available: <https://www.yara.com.ar/productos-quimicos-nitrogenados-y-soluciones-medioambientales/aditivo-acelerador-para-hormigon/anticongelante-del-cemento/>.
- [27] Cymper, «Cymper.com,» 15 septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.cymper.com/blog/fibras-para-el-refuerzo-de-hormigones-y-morteros/>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [28] A. Díaz, «Universidad Politécnica de Madrid,» Escuela superior de ingenieros de caminos, canales y puertos, 2008. [En línea]. Available: [http://oa.upm.es/1338/1/ALEJANDRO\\_ENFEDAQUE\\_DIAZ.pdf](http://oa.upm.es/1338/1/ALEJANDRO_ENFEDAQUE_DIAZ.pdf). [Último acceso: 6 11 2019].
- [29] P. D. C. Mendoza, «Scielo,» Concreto y cemento, 17 enero 211. [En línea]. Available: <http://www.scielo.org.mx/pdf/ccid/v2n2/v2n2a3.pdf>. [Último acceso: 6 11 2019].
- [30] Colombiaplast, «Acoplásticos,» [En línea]. Available: <https://www.acoplasticos.org/index.php/mnu-pre/opm-bus-pref/38-opc-fag-pre6>.
- [31] I. A. Roberto, «Historias de empaques,» 2015. [En línea]. Available: <https://historiasdeempaques.wordpress.com/2015/05/09/el-polipropileno/>.
- [32] Petroquim, «PPETROQUIM, tecnología y servicio en polipropileno,» [En línea]. Available: <http://www.petroquim.cl/que-es-el-polipropileno/>.
- [33] petroken, «Petrocuyo,» [En línea]. Available: <http://www.petrocuyo.com/es/tecnologia/el-polipropileno>.
- [34] Lopez y Dominguez, «Polipropileno,» 2016. [En línea]. Available: <https://ppqujap.files.wordpress.com/2016/05/proceso-de-polipropileno.pdf>.
- [35] Quiminet, «Quiminet,» 2006. [En línea]. Available: <https://www.quiminet.com/articulos/propiedades-del-polipropileno-2671066.htm>.
- [36] p. technology. [En línea]. Available: <https://www.pt-mexico.com/art%3%adculos/rutas-opcionales-para-el-reciclado-de-materiales-plsticos>.
- [37] v. avila, «reciclaje de botellas plasticas,» julio 2014. [En línea]. Available: <http://recicladebotellasypropileno.blogspot.com/>.

- [38] L. Santalla, «Teoría de construcción», 8 septiembre 2010. [En línea]. Available: <http://teoriadeconstruccion.net/blog/polipropileno-en-construccion/>.
- [39] IPT. [En línea]. Available: <https://tuberias.com.mx/tuberia-polipropileno/>.
- [40] REDESMAR, «fibra de polipropileno», [En línea]. Available: [https://redesmar.com/?attachment\\_id=1825](https://redesmar.com/?attachment_id=1825).
- [41] Scielo, «Propiedades termo-mecánicas del polipropileno: efectos durante el reprocesamiento», *Scielo*, 2017.
- [42] A. GUAJARDO, L. NAJAR y S. PROSPERI, «FACULTAD DE CIENCIAS APLICADAS A LA INDUSTRIA», [En línea]. Available: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/resisoli/peru/argres027.pdf>.
- [43] J. Patarroyo, «UIS», 2018. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/Dell/Desktop/anteproyecto/bibliografia%20uis.pdf>.
- [44] G. Calle. [En línea]. Available: <http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezarockwell.pdf>.
- [45] I. G. Rivera, «Dosificación de morteros», [En línea]. Available: <file:///D:/Downloads/Cap.%2009%20-%20Dosificacion%20de%20morteros.pdf>.
- [46] Puertas, Gutierrez y Fernandez, «Universidad del valle, cali», [En línea]. Available: [https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/51532697/Alkaline\\_cement\\_mortars.\\_Chemical\\_resist20170127-6726-1jnwjal.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DAlkaline\\_cement\\_mortars.\\_Chemical\\_resist.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/51532697/Alkaline_cement_mortars._Chemical_resist20170127-6726-1jnwjal.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DAlkaline_cement_mortars._Chemical_resist.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-)
- [47] N. 127, 2013. [En línea]. Available: [https://kupdf.net/download/ntc-127-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-impurezas-organicas-en-agregado-fino-para-concretopdf\\_59e56c1f08bbc56958e653c0\\_pdf](https://kupdf.net/download/ntc-127-concretos-metodo-de-ensayo-para-determinar-las-impurezas-organicas-en-agregado-fino-para-concretopdf_59e56c1f08bbc56958e653c0_pdf).
- [48] N. 92, 2013. [En línea]. Available: [https://issuu.com/wilson2996/docs/ntc\\_92\\_determinacion\\_de\\_la\\_masa\\_un](https://issuu.com/wilson2996/docs/ntc_92_determinacion_de_la_masa_un).
- [49] N. 237, 2013. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/301000821/NTC-237-Metodo-para-Determinar-la-Densidad-y-la-Absorcion-del-Agregado-Fino-pdf>.
- [50] N. 1776, 2013. [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/188981548/NTC-1776-Metodo-de-Ensayo-para-Determinar-por-Secado-el-Contenido-Total-de-Humedad-de-los-Agregados>.



- [51] «Calle, Gabriel,» [En línea]. Available: <http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezrockwell.pdf>.
- [52] N. SORIANO, «AIMPLAS,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-de-dureza/>.
- [53] I. 3146, 2001. [En línea]. Available: <https://www.sis.se/api/document/preview/616658/>.
- [54] I. 1183, 2012. [En línea]. Available: <http://www.abhayat.com/Download/Standard/ISO1183-174.pdf>.
- [55] J. S. Cañas. [En línea]. Available: <http://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/PESOS%20UNITARIOS%20Y%20%25%20VACIOS.pdf>.
- [56] C. Patarroyo, «UIS,» 2018. [En línea].
- [57] D. ASTM, 2015. [En línea]. Available: [http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm\\_d785.pdf](http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d785.pdf).
- [58] D.Sanchez, Tecnología del concreto y del mortero (5ta ed.), Bhandar editores, 2001.
- [59] L. I. A. Cordoba, «omniascience,» 2015. [En línea]. Available: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/32770/capitulo%206.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [60] J. A. B. Patarroyo, «Universidad Industrial de Santander,» 2018. [En línea]. Available: <file:///C:/Users/Dell/Desktop/anteproyecto/bibliografia%20uis.pdf>.
- [61] j. m. d. m. j. r. carlos cordoba, «aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados,» diciembre 2010. [En línea]. Available: <http://www.ehu.es/reviberpol/pdf/DIC10/cordoba.pdf>.
- [62] I.-E. 402, «CURADO EN EL LABORATORIO DE MUESTRAS DE CONCRETO PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN,» 2007. [En línea]. Available: [ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones\\_Normas\\_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-402-07.pdf](ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-402-07.pdf).
- [63] ALBIZ. [En línea]. Available: <https://pe.all.biz/polipropileno-homopolmero-extrusin-inyeccin-g36989>.
- [64] construmatica, «<https://www.construmatica.com/construpedia/Morteros>,» [En línea].
- [65] ISO, «1183, ISO,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.abhayat.com/Download/Standard/ISO1183-174.pdf>.

- [66] ISO, «3146, ISO,» 2001. [En línea]. Available: <https://www.sis.se/api/document/preview/616658/>.
- [67] N. soriano, «AIMPLAS,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.aimplas.es/tipos-ensayos/propiedades-mecanicas-de-los-materiales-plasticos/ensayo-de-dureza/>.
- [68] ASTM, 2015. [En línea]. Available: [http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm\\_d785.pdf](http://mahshahr.aut.ac.ir/lib/exe/fetch.php?media=labs:astm_d785.pdf).
- [69] T. delta, «Tex delta,» [En línea]. Available: <https://texdelta.com/blog/aplicaciones-y-ventajas-del-uso-de-fibras-de-polipropileno/>.

## ANEXO A

En el siguiente anexo se encuentran los datos de cada cubo de mortero ensayado para la realización de esta investigación.

En la Tabla 32 se exponen los resultados obtenidos para cada cubo de mortero hidráulico (carga, peso y área) ensayado a los 7 días.

**Tabla 32. Resultados obtenidos por cubo a los 7 días**

7 Días									
150 °C					230 °C				
Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo		Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo	
50,17	47,63	45,37	40,86	1	44,39	47,21	39,31	40,44	1
47,91	53,69	43,82	35,79	2	44,25	44,81	35,65	37,91	2
45,42	49,61	42,98	38,47	3	40,72	46,78	31,42	40,44	3
46,66	48,62	44,59	39,66	4	44,32	46,01	37,48	39,17	4
Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo		Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo	
214	216	215	255	1	214	215	215	262	1
217	219	213	261	2	207	215	215	261	2
213	217	211	260		211	216	212	260	3
214	214	212	259	3	212	225	213	261	4
Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo		Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo	
24,99	24,5	24	25	1	24,48	24,99	23,5	26	1
25	24	23,52	25,5	2	25,5	23,52	24	24,48	2
23,52	24,48	25,5	24,99	3	24,01	24,99	26,01	26,01	3
25	24,01	25,5	24,5	4	23,52	23,03	25,48	25,5	4
200 °C					Sin tratamiento				
Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo		9%	6%	3%	Testigo	Cubo
49,88	57,77	40,3	43,68	1	29,17	38,89	42,27	40,16	1
57,77	49,46	43,82	37,34	2	35,17	37,05	39,23	41,85	2
54,81	51,72	49,18	37,62	3	36,03	33,61	38,75	44,81	2
52,34	50,59	46,5	40,65	4	32,17	35,33	38,99	41,05	4
Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo		Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo	
212	217	215	260	1	247	255	260	263	1
213	214	216	255	2	246	248	256	262	2
211	216	214	258	3	244	250	254	260	3
209	219	217	261	4	245	254	258	265	4
Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo		Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo	
23,97	23,52	24	25,5	1	23,52	24	25	25	1
25,5	22,56	24,48	24,99	2	24,5	23,03	24,99	25,5	2
24,01	24,99	25	24,48	3	24,99	24,5	25,5	24,5	3
25	24,01	23,52	24	4	25	24,5	24,01	25,5	4

Fuente: Propia

Después de haber realizado todas las mediciones necesarias se calculó el esfuerzo de cada cubo, que es definido como una fuerza que actúa sobre un área unitaria. En la Tabla 33 se muestra el cálculo de esfuerzos para cada cubo realizado, ensayado a los 7 días.

**Tabla 33. Calculo de esfuerzos 7 días**

Esfuerzo 150°C				Esfuerzo 230°C			
9%	6%	3%	Testigo	9%	6%	3%	Testigo
20,07603	19,44082	18,90417	16,344	18,13317	18,89156	16,72766	15,55385
19,164	22,37083	18,63095	14,03529	17,35294	19,05187	14,85417	15,48611
19,31122	20,26552	16,8549	15,39416	16,9596	18,71949	12,07997	15,54787
18,664	20,2499	17,48627	16,18776	18,84354	19,97829	14,70958	15,36078
Esfuerzo 200°C				Esfuerzo sin tratamiento			
9%	6%	3%	Testigo	9%	6%	3%	Testigo
20,80935	24,56207	16,79167	17,12941	12,40221	16,20417	16,908	16,064
22,6549	21,92376	17,90033	14,94198	14,3551	16,08771	15,69828	16,41176
22,82799	20,69628	19,672	15,36765	14,41777	13,71837	15,19608	18,2898
20,936	21,07039	19,77041	16,9375	12,868	14,42041	16,23907	16,09804

Fuente: Propia

En la Tabla 34 se exponen los resultados obtenidos para cada cubo de mortero hidráulico (carga, peso y área) ensayado a los 14 días.

**Tabla 34. Resultados obtenidos por cubo a los 14 días**

14 Días									
150 °C					230 °C				
Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo		Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo	
45,93	51,56	41,99	44,25	1	46,08	49,26	41,57	42,55	1
42,55	52,55	46,21	37,34	2	50,58	54,25	45,51	36,21	2
47,2	48,23	43,82	41,43	3	42,27	52,42	40,58	45,86	3
44,87	49,89	42,9	42,84	4	48,33	50,84	41,07	42,2	4
Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo		Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo	
226	231	224	260	1	203	214	212	260	1
230	231	226	261	2	209	209	212	258	2
224	227	228	259	3	208	210	211	260	3
226	228	227	257	4	208	215	207	261	4
Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo		Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo	
24,48	24,99	25	25,5	1	23,97	25,48	24	25,5	1
25,5	23,52	24,01	26,01	2	25	23,04	24,48	25,5	2
24,5	23,97	25	24,48	3	23,52	25,5	26,52	24,99	3
24,96	25,5	23,52	25	4	25	24,5	24	23,52	4
200 °C					Sin tratamiento				
Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo		9%	6%	3%	Testigo	Cubo
54,53	53,41	43,4	41,43	1	39,6	33,4	45,94	45,65	1
51,71	52,35	47,08	45,09	2	39,6	44,11	42,27	46,92	2
53,41	55,38	44,39	44,81	3	39,46	42,55	45,23	45,23	3
52,56	52,88	45,73	44,95	4	39,53	43,33	43,75	45,44	4
Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo		Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo	
207	211	214	262	1	247	256	256	260	1
212	212	213	259	2	249	255	251	258	2
209	215	213	260	3	247	254	256	260	3
210	216	210	261	4	251	255	258	261	4
Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo		Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo	
24,99	24,5	24,5	25	1	23,52	24	25	25	1
26,01	24,48	24,96	24,48	2	24,5	23,03	24,99	25,5	2
23,52	25,5	26	23,97	3	24,99	24,5	25,5	24,5	3
24,48	23,03	25,5	24,5	4	23,52	24,01	25,5	24	4

Fuente: Propia

En la Tabla 35 se muestra el cálculo de esfuerzos para cada cubo realizado, ensayado a los 14 días.

**Tabla 35. Cálculo de esfuerzos 14 días**

Esfuerzo 150°C				Esfuerzo 230°C			
9%	6%	3%	Testigo	9%	6%	3%	Testigo
18,76225	20,63225	16,796	17,35294	19,22403	19,33281	17,32083	16,68627
16,68627	22,34269	19,24615	14,35602	20,232	23,54601	18,59069	14,2
19,26531	20,12098	17,528	16,92402	17,97194	20,55686	15,30166	18,35134
17,97676	19,56471	18,2398	17,136	19,332	20,75102	17,1125	17,94218
Esfuerzo 200°C				Esfuerzo sin tratamiento			
9%	6%	3%	Testigo	9%	6%	3%	Testigo
21,82073	21,8	17,71429	16,572	16,83673	13,91667	18,376	18,26
19,88082	21,3848	18,86218	18,41912	16,16327	19,15328	16,91477	18,4
22,70833	21,71765	17,07308	18,6942	15,79032	17,36735	17,73725	18,46122
21,47059	22,96135	17,93333	18,34694	16,80697	18,04665	17,15686	18,93333

Fuente: Propia

En la Tabla 36 se exponen los resultados obtenidos para cada cubo de mortero hidráulico (carga, peso y área) ensayado a los 28 días.

**Tabla 36. Resultados obtenidos por cubo a los 28 días**

150 °C					230 °C				
Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo		Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo	
59,71	67,01	54,59	57,53	1	59,9	61,58	54,04	55,31	1
55,35	68,32	60,07	48,54	2	65,75	67,81	59,16	47,07	2
61,36	62,7	56,67	53,86	3	54,91	65,53	52,75	59,62	3
58,33	64,88	55,77	55,69	4	62,83	63,55	53,39	54,86	4
Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo		Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo	
210	211	207	260	1	203	214	212	260	1
206	209	208	263	2	209	209	212	258	2
209	213	210	263	3	208	210	211	260	3
207	210	213	261	4	208	215	207	261	4
Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo		Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo	
23,52	24,5	25,5	26	1	24,48	23,03	24,5	25	1
24,5	24,48	24,5	26	2	24	23,52	23,52	26,52	2
23,03	24,99	24	24,99	3	24,01	24,48	26,01	24,48	3
25,48	27,04	24,01	26,01	4	24,5	23,5	25	23,04	4
200 °C					Sin tratamiento				
Carga 9%	Carga 6%	Carga 3%	Carga Testigo		9%	6%	3%	Testigo	Cubo
70,89	69,43	56,42	53,86	1	51,48	43,42	59,72	59,35	1
67,22	68,01	61,2	58,62	2	52,48	57,34	54,95	60,96	2
69,44	71,99	57,7	58,25	3	51,3	55,32	58,8	58,8	2
68,33	68,74	59,45	58,44	4	51,39	56,33	56,88	59,07	4
Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo		Peso 9%	Peso 6%	Peso 3%	Peso Testigo	
206	205	208	265	1	247	255	260	263	1
206	212	206	262	2	246	248	256	262	2
205	207	206	260	3	244	250	254	260	3
207	210	213	260	4	245	254	258	265	4
Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo		Area 9%	Area 6%	Area 3%	Area Testigo	
25,5	25,48	24	24,99	1	24,01	25,5	24,5	25,5	1
26,52	24,99	24	23,97	2	24	23,52	24,01	24,99	2
24,01	26,01	25	25,5	3	25,5	26	26,01	24,99	3
26,01	23,52	26	24	4	26	24,99	23,52	26,01	4

Fuente: Propia

En la Tabla 37 se muestra el cálculo de esfuerzos para cada cubo realizado, ensayado a los 28 días.

**Tabla 37. Cálculo de esfuerzos 28 días**

Esfuerzo 150°C				Esfuerzo 230°C			
9%	6%	3%	Testigo	9%	6%	3%	Testigo
25,3869	27,35102	21,40784	22,12692	24,46895	26,73904	22,05714	22,124
22,59184	27,9085	24,51837	18,66923	27,39583	28,83078	25,15306	17,74887
26,64351	25,09004	23,6125	21,55262	22,86964	26,76879	20,28066	24,35458
22,89246	23,99408	23,22782	21,411	25,6449	27,04255	21,356	23,81076
Esfuerzo 200°C				Esfuerzo sin tratamiento			
9%	6%	3%	Testigo	9%	6%	3%	Testigo
27,8	27,24882	23,50833	21,55262	21,44107	17,02745	24,37551	23,27451
25,34691	27,21489	25,5	24,45557	21,86667	24,37925	22,8863	24,39376
28,92128	27,67782	23,08	22,84314	20,11765	21,27692	22,60669	23,52941
26,27067	29,22619	22,86538	24,35	19,76538	22,54102	24,18367	22,7105

Fuente: Propia



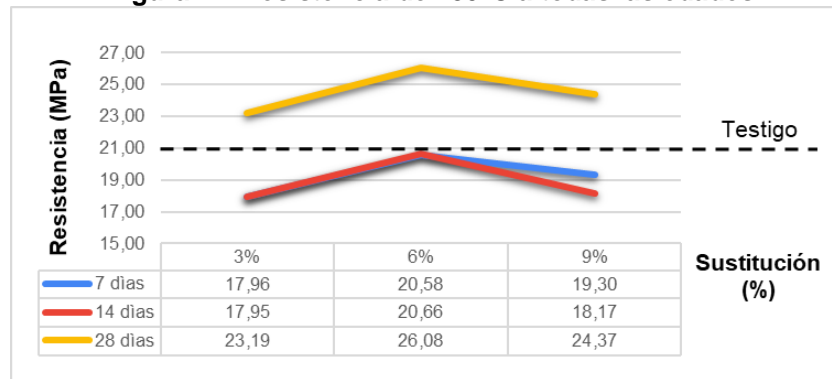
## ANEXO B

En el siguiente anexo se presentan los casos de la evolución de la resistencia a la compresión de las temperaturas de 150°C y 230°C. estas gráficas están distribuidas a través de las edades a las que se ensayó (7, 14 y 28 días).

- **150°C**

En la siguiente Figura (44) se muestra para la temperatura de 150°C a edades de 7, 14 y 28 días.

**Figura 44. Resistencia de 150°C a todas las edades**

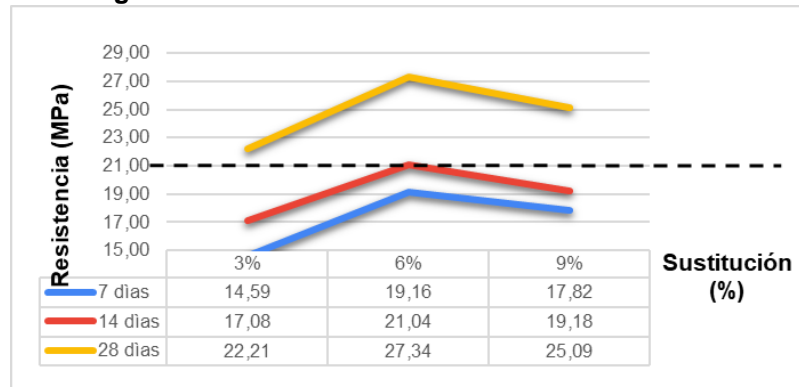


Fuente: Propia

- **230°C**

En la siguiente Figura (45) se muestra para la temperatura de 230°C a edades de 7, 14 y 28 días.

**Figura 45. Resistencia de 230°C a todas las edades**



Fuente: Propia