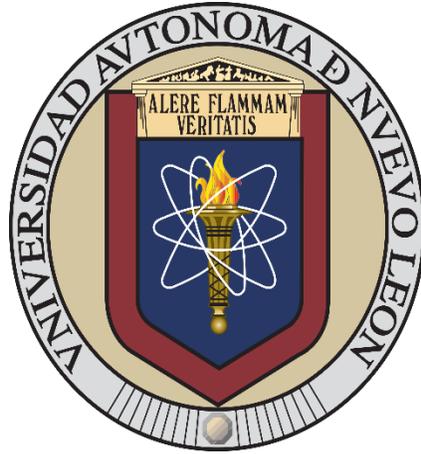


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ADICIÓN DE FIBRAS ORGÁNICAS
EN CONCRETOS REFRACTARIOS”

WENDY LIZBETH GAYTÁN GUARDIOLA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



“ESTUDIO COMPARATIVO DE LA ADICIÓN DE FIBRAS ORGÁNICAS
EN CONCRETOS REFRACTARIOS”

WENDY LIZBETH GAYTÁN GUARDIOLA

TESIS

EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, N. L.

JUNIO 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Estudio comparativo de la adición de fibras orgánicas en concretos refractarios”, realizada por la estudiante Wendy Lizbeth Gaytán Guardiola, con número de matrícula 1622132, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dra. Ana María Guzmán Hernández
Director

Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Revisor

Dr. Rodrigo Puente Ornelas
Revisor

Dra. Laura Imelda García Ortiz
Revisor

Vo.Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 55 75 46

Acta Núm. 4292

Ciudad Universitaria, a 15 de Noviembre de 2023.

DEDICATORIAS

Principalmente a mi propósito de vida y de superación, quien me ha dado la motivación suficiente para luchar contra cualquier adversidad, incluso en las peores tormentas donde apareciera nunca terminar... mi hermanita Sofia.

A mis padres, por todo el apoyo otorgado, a mi madre por ser mi compañera en mis noches de desvelo y a mi padre por sus consejos y procurar que nada me faltara en este tiempo. Asi como a mi compañero de vida, quien me ha apoyado para seguir desarrollandome en mi vida profesional, alentandome a arriesgarme en tomar nuevos caminos y desafios, pero sobre todo por confiar en mi, cuando existieron momentos en donde ni yo misma lo hice, por todo su amor y comprensión.

Agradezco infinitamente a la Dra. Ana María Arato Tovar, por mostrarme este increíble mundo de la investigación, pese a que no fuera una estudiante brillante, confió ciegamente en mi para ingresar en este posgrado.

Especialmente a la Dra. Ana María Guzmán Hernández, mi asesora, por darme la oportunidad de trabajar con ella, por tenerme paciencia y comprensión cuando lo he necesitado, por proporcionarme todas las herramientas para poder concluir con mi trabajo de investigación, compartir sus conocimientos y experiencias, sin duda alguna, esto no hubiera sido posible sin su apoyo en este arduo camino.

Al Lic. Manuel Santa Cruz, estaré eternamente agradecida por haberme dado la oportunidad de laborar para esta Máxima Casa de Estudios UANL, pese a mi nula experiencia, confió en mis capacidades y las ganas de salir adelante para poder solventar mis estudios desde el bachillerato técnico.

AGRADECIMIENTOS

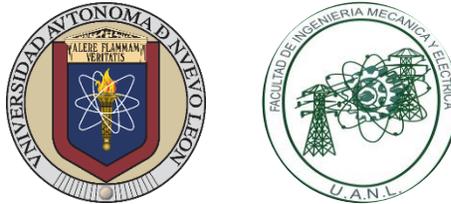
Dar gracias a la Subdirección de Posgrado correspondiente a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de nuestra Máxima Casa de Estudios la Universidad Autónoma de Nuevo León, por permitirme ser parte de esta Institución Educativa de gran prestigio y trayectoria, así como de otorgarme el privilegio de ser parte de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Materiales.



Agradezco a la empresa WM Refractories, S. de R.L. en especial al Ing. Juan José Pérez, por proporcionar los materiales necesarios que se requirió para llevar a cabo esta investigación.



A todos mis maestros asignados durante estos años de carrera, por brindarme sus conocimientos y apoyo incondicional para resolver cualquier problema que se me ha llegado a presentar en mi vida académica y profesional.



Por último, pero no menos importante, se agradece al CONAHCYT, por el sustento económico de manutención durante mi trayecto académico como estudiante de maestría, para poder enfocarme plenamente en mi investigación.



" La mayor parte de los fracasos nos viene por querer adelantar la hora de los éxitos. "
- Amado Nervo.

Resumen

En los últimos años se ha visto un incremento en el tema de los residuos sólidos, dicha proyección implica un gran desafío para el desarrollo e implementación de nuevas opciones de reciclaje y reutilización de estos materiales. Actualmente el sector de los plásticos conforman el 10 % de los residuos sólidos a nivel mundial, no obstante, también se ha obtenido un gran avance tecnológico y científico, así como un cambio industrial en todas las áreas, por lo cual el hombre se ha implementado soluciones con el uso de nuevos materiales, o bien, como se detalla en esta investigación, la implementación de materiales reciclados como el PET, ya que puede emplearse para la fabricación de fibras para concretos refractarios.

Los concretos refractarios se describen como materiales de gran impacto e importancia debido a sus características como resistencia a altas temperaturas, sus propiedades aislantes o su resistencia mecánica, sin embargo, en lo referente a concretos refractarios convencionales es necesario el estudio de adiciones que favorezcan la eliminación de vapor de agua durante el proceso de secado.

El objetivo de este trabajo se centra en la adición de fibras orgánicas en un concreto refractario convencional de alta alúmina, para evaluar su influencia durante el proceso de secado. Por lo anterior, se realizó el análisis comparativo de fibras orgánicas: Polietileno, Polipropileno y Tereftalato de Polietileno reciclado, buscando la mejor opción la cual favorezca en la eliminación de vapor de agua durante el proceso de secado.

Índice

Capítulo 1. Introducción	13
1.1 Planteamiento del Problema	14
1.2 Hipótesis	14
1.3 Objetivo General.....	14
1.4 Objetivos Específicos	14
1.5 Justificación	15
Capítulo 2. Marco Teórico.....	16
2.1 Concretos Refractarios.....	16
2.2 Concretos Convencionales.....	28
2.3 Concretos Reforzados	30
2.4 Tipos de Fibras.....	32
2.4.1 Fibras de PET Recicladas.....	32
2.4.2 Fibras de PP.....	32
2.4.3 Fibras de PE	33
2.4.3 Fibras Metálicas	33
Capítulo 3. Antecedentes.....	35
Capítulo 4. Metodología Experimental.....	38
4.1 Adquisición y Caracterización de materias primas.....	38
4.2 Caracterización del concreto refractario	38
4.2.1 Difracción de rayos X	39
4.2.2 Análisis granulométrico	39
4.3 Preparación de concretos refractarios (patrón sin adición y muestras con adiciones de 1% y 3% de fibras).....	40
4.4 Secado de los concretos refractarios a 110° C durante 1 hora.....	42
4.5 Quemado de concretos refractarios a 815° C durante 1 hora.....	42
4.6 Quemado de concretos refractarios a 1,050° C durante 1 hora.....	42
4.7 Caracterización de los Concretos Refractarios patrón y con adiciones de fibras	43
4.7.1 Propiedades físicas	43
4.7.1.1 Análisis de Porosidad, Absorción de Agua y Densidad Aparente	43
4.7.2 Propiedades mecánicas	46
4.7.2.1 Ensayo de Compresión	46

4.7.2.2 Ensayo de Flexión	47
4.8 Microscopía Óptica	49
4.9 Caracterización microestructural por Microscopía Electrónica de Barrido.....	50
4.10 Caracterización por Difracción de Rayos X	51
Capítulo 5. Resultados y Discusión	52
Capítulo 6. Conclusiones.....	73
Capítulo 7. Recomendaciones.....	74
Capítulo 8. Referencias	75
Capítulo 9. Anexos.....	80

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de Fases de Aluminatos de Calcio.....	19
Figura 2. Partículas con relación A/C	21
Figura 3. Equipos Industriales que se utilizan para moler o triturar la materia prima	25
Figura 4. Explosión de concreto	30
Figura 5. Fibras de estopa de coco	31
Figura 6. Fibras de PET Recicladas	32
Figura 7. Fibras de polipropileno	33
Figura 8. Fibras de polietileno.....	33
Figura 9. Fibras de acero	33
Figura 10. Diseño recomendado para conjunto de prueba trituración, incluido el bloque..	46
Figura 11. Diseño alternativo de cilindros de rodamiento para ensayo módulo de ruptura	46

Índice de Imágenes

Imagen 10. Equipo para análisis granulométrico	39
Imagen 11. Medición de peso de las muestras después de ser analizada	39
Imagen 12. Ejemplo de una batidora mecánica de cinco cuartos	40
Imagen 13. Método de bola en mano para preparación de concretos.....	40
Imagen 14. Preparación de muestra base de concreto de alta alúmina usando el método de bola en mano.....	41
Imagen 15. Molde de grupode cinco cubos para refractarios moldeables.....	41
Imagen 16. Primer patrón de muestras preparadas sometidas al horno para su secado	42
Imagen 17. Muestras sometidas al horno para quemarlas a temperaturas 815 y 1,050°C ..	42
Imagen 18. Medición de peso de cada una de las muestras.....	43
Imagen 19. Proceso de vacio que se llevo acabo para determinar porosidad, absorción y densidad.....	44
Imagen 20. Muestra suspendida	44

Imagen 21. Muestra ensayada a compresión	46
Imagen 22. Preparación de muestras para ser ensayadas a flexión	47
Imagen 23. Muestras en proceso de secado.....	47
Imagen 24. Muestra ensayada a flexión	48
Imagen 25. Muestra de PET 1% después de haber sido sometida al ensayo de flexión	48
Imagen 26. Preparación de muestras con resina.....	48
Imagen 27. Observación de muestras en microscopio óptico	49
Imagen 28. Recubrimiento de muestras	49
Imagen 29. Colocación de muestras con cinta de cobre para SEM.....	50
Imagen 30. Observación de muestras en SEM	50
Imagen 31. Hipótesis	51
Imagen 32. Equipo de Difracción de Rayos X	51
Imagen 33. Diagrama Ternario Análisis de Granulometría Concreto de Alta Alúmina	63
Imagen 34. Micrografía Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura en seco	64
Imagen 35. Difractograma Concreto Refractario Alta Alúmina a temperatura en seco.....	65
Imagen 36. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PET reciclado a temperatura en seco.....	65
Imagen 37. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PET reciclado a temperatura en seco.....	66
Imagen 38. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 3% de PET reciclado a temperatura en seco.....	66
Imagen 39. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 3% de PET reciclado a temperatura en seco.....	67
Imagen 40. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PP a temperatura en seco	68
Imagen 41. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PP a temperatura en seco	68
Imagen 42. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PE a temperatura en seco	69
Imagen 43. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PE a temperatura en seco.....	70
Imagen 44. Difractograma de la Muestra de Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura 110°C	71

Imagen 45. Difractograma de la Muestra de Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura 815°C	71
Imagen 46. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina.....	72
Imagen 47. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina.....	72

Índice de Tablas

Tabla 1. Materiales Refractarios más comunes	16
Tabla 2. Clasificación materiales refractarios de acuerdo a su comportamiento químico ..	17
Tabla 3. Clasificación de Concretos en función del Contenido de CaO	18
Tabla 4. Componentes de los Concretos Refractarios	21
Tabla 5. Cargas estándar del Modulo de Ruptura.....	47
Tabla 6. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.	53
Tabla 7. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	55
Tabla 8. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	58
Tabla 9. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	60
Tabla 10. Análisis granulométrico del concreto	62

Índice de Gráficas

Gráfica 1. Resultados Globales del Ensayo de Porosidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	53
Gráfica 2. Resultados Globales del Ensayo de Absorción de Agua en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	55

Gráfica 3. Resultados Globales del Ensayo de Densidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	58
Gráfica 4. Resultados Globales del Ensayo de Resistencia a la Compresión en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	59
Gráfica 5. Resultados Globales del Ensayo de Resistencia a la Flexión en todas las muestras preparadas con una temperatura de 110°C	60
Gráfica 6. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestras Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.....	80
Gráfica 7. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	80
Gráfica 8. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	81
Gráfica 9. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestra con fibra de PP 1% con una temperatura de 110°C	81
Gráfica 10. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestra con fibra de PE 1% con una temperatura de 110°C	82
Gráfica 11. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestra Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.....	83
Gráfica 12. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	83
Gráfica 13. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	84
Gráfica 14. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestra con fibra de PP 1% con una temperatura de 110°C	84
Gráfica 15. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestra con fibra de PE 1% con una temperatura de 110°C	85
Gráfica 16. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestra Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.....	86
Gráfica 17. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	86
Gráfica 18. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	86
Gráfica 19. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestra con fibra de PP 1% con una temperatura de 110°C	87

Gráfica 20. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestra con fibra de PE 1% con una temperatura de 110°C	88
Gráfica 21. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestra Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.....	89
Gráfica 22. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	89
Gráfica 23. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	90
Gráfica 24. Comparación de Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PET 1% y 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C	90
Gráfica 25. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PE 1% con una temperatura de 110°C.....	91
Gráfica 26. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PE 3% con una temperatura de 110°C.....	91
Gráfica 27. Comparación de Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PE 1% y 3% con una temperatura de 110°C	92
Gráfica 28. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PP 1% con una temperatura de 110°C.....	92
Gráfica 29. Análisis de Granulometría del Concreto de Alta Alúmina.....	62

Capítulo 1

Introducción

Los refractarios son materiales que se caracterizan por su buena resistencia a altas temperaturas y ambientes agresivos del medio en el que se encuentran trabajando, dentro de estos materiales se pueden encontrar materiales conformados (ladrillos) y materiales no conformados (moldeables o concretos), los cuales se han venido desarrollando tecnológicamente en los últimos años debido a la facilidad de instalación en zonas complejas.

Una problemática que se presenta en el desarrollo de los concretos refractarios es durante la etapa de secado, la cual debe llevarse de a cabo de forma controlada, ya que la eliminación de vapor de agua a gran velocidad puede provocar agrietamientos o incluso la explosión del material, con el objetivo de favorecer la eliminación del vapor de agua se han agregado fibras orgánicas las cuales al quemarse dejan porosidad a través de la cual se facilita la salida de este vapor de agua.

Las fibras que se utilizan como reforzamiento para los concretos en general, se pueden catalogar según diferentes criterios, hoy en día se consideran principalmente dos variantes que se clasifican como: orgánicas y sintéticas.

Una de las primeras fibras en ser utilizadas fue de Polipropileno, mostrando mejoras inmediatas en las propiedades de concretos refractarias, al igual que el Polietileno, a fin de mostrar la versatilidad que tuvieron estas fibras, se espera que con las fibras de PET (Tereftalato de Polietileno) recicladas aumente la mejora en sus propiedades.

Como se mencionó anteriormente, el uso de fibras de polipropileno es común en el desarrollo de concretos, sin embargo, en lo que se refiere a fibras de PET recicladas, no existen muchas investigaciones en Concretos Refractarios, la mayoría se refieren a Concretos Portland para la industria de la construcción.

La novedad de esta investigación con respecto a estudios similares en concreto que utiliza fibras de PET recicladas es, principalmente, que el PET se ha utilizado de dos maneras diferentes, no encontradas en autores anteriores: fibras circulares añadidas en la mezcla de concreto y tiras largas para el refuerzo de estructuras.²⁶ En estudios anteriores, el PET de desecho o reciclado, nunca se ha utilizado en estas formas, sino solo como tiras cortas o filamentos en la mezcla de concreto, así como fomentar y concientizar la reutilización de materiales.

1.1 Planteamiento del Problema

Los concretos u hormigones refractarios convencionales presentan la necesidad de adaptar un proceso de secado del revestimiento posteriormente a ser sometido al horno, por lo cual implica un gran inconveniente por el tiempo requerido para el secado de los concretos. Dicho proceso tiene como función eliminar el agua residual, previo a que el revestimiento logre alcanzar su temperatura de servicio. Es elemental y de no llevarlo a cabo satisfactoriamente el revestimiento puede “explotar” y, por lo tanto, llegar a provocar la destrucción no solo del mismo, sino, por ende, de toda la unidad revestida.

Se espera que con la adición de las fibras de PET al concreto refractario se favorezca el proceso de secado. Diversas investigaciones sobre las fibras orgánicas (Polietileno, Polipropileno y de Tereftalato de Polietileno reciclado) sugieren que pueden ser utilizadas en nuestros materiales refractarios, favoreciendo además tanto propiedades físicas como mecánicas.

1.2 Hipótesis

La incorporación de las fibras de PET recicladas en concretos refractarios, favorecerá la eliminación de vapor de agua en el proceso de secado y contribuirá en sus propiedades de trabajabilidad.

1.3 Objetivo General

Realizar un análisis comparativo de uso de fibras orgánicas que favorezcan la eliminación de vapor de agua durante el proceso de secado de concretos refractarios convencionales.

1.4 Objetivos Específicos

- ✓ Evaluar el concreto refractario de 99.9% de alúmina mediante la distribución granulométrica y difracción de rayos X.
- ✓ Determinar el porcentaje de adición de fibras orgánicas, sintéticas (polietileno-PE y polipropileno-PP) y recicladas (Tereftalato de Polietileno-PET) de acuerdo con lo reportado por el proveedor.
- ✓ Evaluar el efecto de las fibras orgánicas y recicladas en concretos refractarios, mediante la determinación de propiedades físicas y mecánicas como densidad, porosidad y resistencia en compresión y flexión.
- ✓ Determinar la microestructura de los concretos adicionales con fibras.

1.5 Justificación

En la actualidad, muchos ingenieros e investigadores están trabajando en proyectos importantes sobre la extensión de la vida de los materiales, en encontrar el material adecuado para las condiciones con más conflicto en cuanto a su estabilidad para mantenerse con las propiedades iniciales sin verse afectadas por agentes exteriores.

Los concretos refractarios es un conjunto de mezclas formadas principalmente por materias primas, aditivos y aglutinantes. En el mercado se pueden encontrar diferentes tipos de hormigones con algunas pequeñas pero notables diferencias entre ellos.¹⁴

Cuando hablamos de hormigones reforzados, comúnmente los materiales que se utilizan son fibras metálicas, obteniendo algunos beneficios en su resistencia mecánica. Sin embargo, de acuerdo con varias investigaciones, las fibras de PET aportan propiedades muy interesantes si se utilizan como aditivos, tales como: Son químicamente inertes, no se corroen, aporta una fácil trayectoria al paso del hormigón, son más ligeras a comparación que los metales y lo más importante, permiten un mejor control del agrietamiento por contracción plástica, lo cual nos dan el resto de las ventajas que mencione en la introducción de este documento.

Se han utilizado fibras no solamente de Tereftalato de Polietileno (PET), sino de otros materiales como Polipropileno (PP), Polietileno (PE), así como de acero inoxidable para adicionarlos a concretos Portland, teniendo una respuesta positiva, sin embargo, la elección de las fibras de PET en materiales refractarios, además de obtener las características y mejoras anteriormente mencionadas aporta en el uso de materiales reciclados.³²

Capítulo 2 Marco Teórico

Los concretos aluminosos también conocidos como concretos refractarios son materiales con propiedades hidráulicas, los cuales se obtienen con tratamientos térmicos a altas temperaturas de mezclas de materiales aluminosos y calcáreos, molidos finamente y cuya composición final es de aluminatos de calcio. Su principal uso en la industria cerámica se refiere a la fabricación de morteros o concretos refractarios.¹

Los refractarios están sometidos a diferentes tipos de esfuerzos, de tensión, térmicos, así como corrosión por sólidos, líquidos y gases, abrasión mecánica, por lo que, en general deben poder soportar altas temperaturas sin corroerse o debilitarse por el medio en el que están inmersos.

Los materiales refractarios son diseñados de forma que sus propiedades sean adecuadas para las diferentes condiciones de servicio, sobretodo en hornos industriales utilizados en las industrias cementera, siderúrgica, del petróleo, del vidrio, química y metalúrgica ²

2.1 Concretos Refractarios

Los concretos u hormigones refractarios son materiales compuestos utilizados en la construcción de estructuras que deben resistir altas temperaturas y ambientes agresivos. En la Tabla 1 podemos ver que están compuestos principalmente por materiales refractarios como alúmina, sílice, magnesita, cromita, entre otros, y un aglomerante que puede ser arcilla, cemento, fosfato, entre otros.³

Tabla 1. Materiales Refractarios más comunes.⁴

Oxido	Alumina Tabular	Alumina Fundida Blanca	Alumina Fundida Cafe	Bauxita	Mullita	Espinel	Cianita	Flint Clay	Sílice	Zircon
<i>SiO₂</i>	00.10	00.10	00.70	05.60	25.70	00.10	40.70	50.40	99.50	33.60
<i>Al₂O₃</i>	99.60	99.36	96.36	87.50	70.00	78.00	57.40	44.40	00.20	00.50
<i>Fe₂O₃</i>	00.03	00.03	00.10	01.60	01.00	00.15	00.80	01.00	00.03	00.02
<i>TiO₂</i>	00.07	00.01	02.70	03.60	03.00	-	00.70	02.50	-	00.10
<i>CaO</i>	00.05	00.07	00.10	00.10	00.02	00.24	00.03	00.20	00.02	00.03
<i>MgO</i>	00.01	00.00	00.10	00.20	00.04	22.50	00.01	00.30	00.02	00.02
<i>Na₂ + K₂O</i>	00.14	00.43	00.20	00.40	00.07	00.09	00.40	01.20	00.01	-
<i>ZrO₂</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	65.60
<i>Otros</i>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

2.1.1 Clasificación de Materiales Refractarios

El área de los concretos han sufrido diferentes cambios en los últimos años, principalmente en la sustitución de piezas conformadas, en diversas aplicaciones industriales, entre otras.

También son conocidos como materiales refractarios no conformados, básicamente se entiende que son un conjunto de mezclas conformadas por materias primas, aditivos y agentes ligantes. Su conformación consiste de cuatro componentes: arcillas, aditivos, áridos y cemento aluminoso.⁵

La clasificación de los materiales refractarios se basa en la composición y tipo de óxidos, de tal forma que se constituyen como ácidos, básicos, neutros y especiales² (ver Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación de los materiales refractarios de acuerdo a su comportamiento químico.

Ácidos	Básicos	Neutros	Especiales
Incluyen las arcillas de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla. La sílice pura a veces se utiliza para contener metal fundido. Los refractarios de arcilla por lo general son relativamente débiles, pero poco costosos. Por arriba del 50% en su composición de Al_2O_3 se consideran alta alúmina.	Se basan en MgO (magnesia o periclasa). El MgO puro tiene un punto de fusión alto, buena refractariedad, buena resistencia al ataque por los entornos que menudo se encuentran en los procesos de fabricación de acero. Son más costosos que los refractarios ácidos.	Normalmente incluyen la cromita, pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.	Estos materiales incluyen la zirconia (ZrO_2), el circón ($ZrO_2.SiO_2$) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros, así como el carbono, en muchas aplicaciones refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible.

En base a su proceso de manufactura se dividen en:

- 1) Refractarios prefabricados, prensados con formas predefinidas, que pueden ser quemados antes de ser instalados o quemados en servicio.
- 2) Refractarios no conformados, que no cuentan con una forma incluyendo concretos, morteros, por mencionar algunos. Estos refractarios, también llamados monolíticos, son instalados mediante diversos métodos de aplicación como vaciado, proyección o apisonados.⁶

En la Tabla 3 se presenta la clasificación de los concretos refractarios de acuerdo a su contenidos de calca (CaO), mientras que la Norma ASTM C-401 hace referencia a su porosidad.¹³

Tabla 3. Clasificación de Concretos en función del Contenido de CaO.⁴

Denominación	Cantidad de CaO	Cantidad Típica de Cemento (%)
Convencional	>2.5	>8.0
Bajo Cemento	1.0 a 2.5	5 a 8
Ultrabajo Cemento	0.2 a 1.0	1 a 5
Cero Cemento	<0.2	<1.0

Clasificación con relación a su peso, de acuerdo con la Norma ASTM C-401:

- Densos (<22% de porosidad).
- Semi-aislantes (40-50% de porosidad).
- Aislantes ligeros (>60% de porosidad).

Se pueden elaborar en forma de ladrillos, polvos, entre algunas otras, así como lograr obtener masas granulares o plásticas que logre su forma deseada, muy frecuentemente en una estructura monolítica. No obstante, gracias a la implementación de la fibra y su desarrollo tecnológico en años recientes, los refractarios son usados en diversas aplicaciones.²

2.1.2 Cemento Aluminoso

El cemento aluminoso es un tipo de cemento hidráulico que se produce desde la fusión de bauxita y piedra caliza en el horno rotatorio a temperaturas superiores a los 1,500°C. Este proceso de fusión produce clinker, que se muele finamente para producir el cemento aluminoso.⁷

A diferencia del cemento Portland convencional, que se produce a partir de la combinación de caliza, arcilla y óxido de hierro en un horno rotatorio, el cemento aluminoso se obtiene a partir de calizas y una fuente de alúmina como bauxitas, está formado de aluminatos de calcio, los cuales le dan al cemento aluminoso una fraguado rápido y alta resistencia a temperaturas elevadas.

El cemento aluminoso se utiliza principalmente en la fabricación de concreto refractario, que es un tipo de concreto utilizado en aplicaciones de alta temperatura, como en la industria siderúrgica, la elaboración de vidrio, la producción de cemento, la producción de cerámica y otros procesos de alta temperatura. El concreto refractario se compone de materiales refractarios que pueden soportar altas temperaturas sin sufrir deformaciones o pérdida de resistencia.⁸

Además, el cemento aluminoso se puede utilizar en la fabricación de morteros refractarios, ladrillos y materiales de revestimiento. También se utiliza en la producción de materiales resistentes a los ácidos y en la estabilización de suelos.

Es importante tener en cuenta que el cemento aluminoso no es adecuado para su uso en concreto estructural, ya que no tiene la misma resistencia a la compresión que el cemento Portland convencional. Además, el cemento aluminoso tiene una alta reactividad y puede causar problemas de expansión y fisuración si se usa incorrectamente.

2.1.2.1 Fases de los aluminatos de calcio

En el diagrama de fases presentado en la Figura 1 se presentan las diferentes fases que se forman a partir de la reacción de alúminas y calizas a alta temperatura, que conforman los diferentes tipos de cementos aluminosos o refractarios.

Estas fases de aluminatos de calcio se presentan a continuación:

- **C₃A**: no aparece en ningún caso de los cementos aluminosos
- **C₁₂A₇**: primera fase que aparece por reacción en estado sólido, debido a su baja energía de formación; cristaliza fácilmente a partir de fundidos. Reacciona inmediatamente con el agua dando lugar a falso fraguado. Por lo anterior, se debe evitar su presencia o minimizar su contenido.
- **CA**: fase principal y responsable de las propiedades de fraguado hidráulico y está presente en todos los cementos de aluminatos de calcio.
- **CA₂**: se hidrata más lentamente sólo en presencia de CA y C₁₂A₇ su hidratación se acelera.
- **CA₆**: no se presenta en los cementos aluminosos.⁴

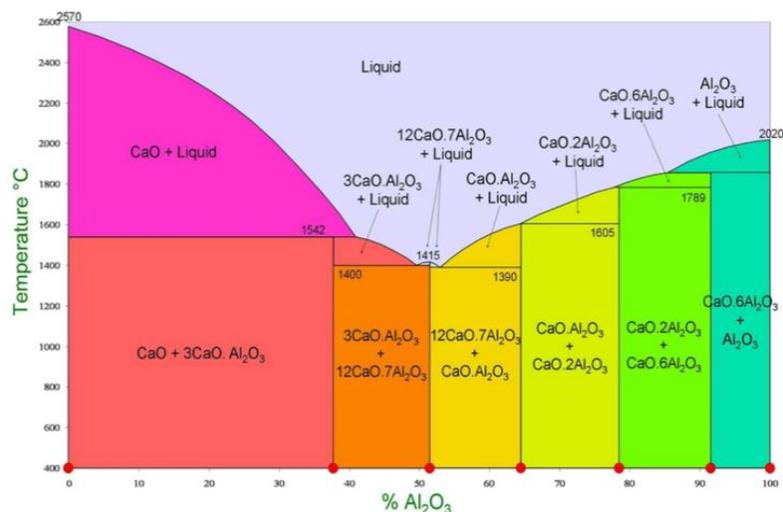


Figura 1. Diagrama de Fases de Aluminatos de Calcio.

2.1.2.2 Propiedades

Resistencia al ataque químico

Los cementos de alta alúmina son resistentes al ataque de sulfatos debido a la ausencia de $Ca(OH)_2$ y a la influencia del gel de alúmina (relativamente inerte) formado durante la hidratación, aunque la resistencia química disminuye drásticamente después de la conversión.

Los álcalis presentes como impureza de los agregados disuelven rápidamente el gel de alúmina.

Tienen alta resistencia al CO_2 disuelto en el agua de mezclado.

A pesar de que pueden permanecer sin alteración en presencia de agua de mar, este tipo de agua no debe utilizarse para el mezclado ya que se afectará el fraguado y endurecimiento de las pastas por la posible formación de cloroaluminatos, por lo que el cloruro de calcio no debe ser utilizado con los CAC .⁴

Resistencia a la corrosión

La composición química del cemento aluminoso difiere esencialmente de la de los otros cementos, por este motivo, numerosos agentes agresivos para los cementos corrientes tienen acción débil o nula para los cementos aluminosos.

El constituyente esencial es el CA que durante el endurecimiento da origen a compuestos aluminosos hidratados y gel de alúmina los cuales son químicamente más inertes frente a numerosos reactivos que los constituyentes de los cementos Portland.⁴

Relación Agua/Cemento

La relación agua/cemento es una medida que indica la cantidad de agua utilizada en la mezcla de concreto en relación con la cantidad de cemento. En el caso de los cementos aluminosos, la relación agua/cemento puede cambiar de acuerdo a varios criterios, uno de ellos es el tipo de cemento aluminoso que se va a utilizar, las propiedades deseadas del concreto y las condiciones específicas de la aplicación. Sin embargo, en general, los cementos aluminosos suelen requerir una relación de porcentaje agua/cemento más baja en comparación con los cementos Portland convencionales.

El bajo porcentaje de relación agua/cemento en los cementos aluminosos se debe a su alta reactividad y fraguado rápido. Un exceso de agua en la mezcla puede provocar una rápida pérdida de trabajabilidad y dificultades en el manejo y colocación del concreto como se muestra en la Figura 2, la permeabilidad, su porosidad en los agregados y absorción son factores que influirán en las propiedades como su adherencia entre el agregado y la pasta de cemento hidratada, en la resistencia del concreto, así como su estabilidad química y

resistencia a la abrasión.¹⁸ En cambio con una baja relación agua/cemento puede ayudar a maximizar las propiedades de durabilidad y resistencia del concreto aluminoso.

Las relaciones agua/cemento para los cementos aluminosos suelen estar en el rango de 0.3 a 0.45, lo que significa que se utiliza una cantidad de agua relativamente baja en correlación con la cantidad de cemento.¹⁰ Sin embargo, es importante tener en cuenta que estas cifras pueden variar según las especificaciones del fabricante y las recomendaciones técnicas específicas.

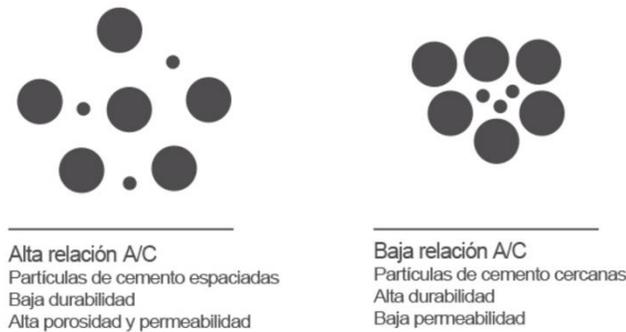


Figura 2. Partículas con diferentes relaciones A/C.

2.1.3 Componentes de los Concretos Refractarios

Los concretos se fabrican añadiendo los componentes en un mezclador, de acuerdo a la dosificación específica para cada tipo de concreto, se agrega un aglutinante y se procede a iniciar con el proceso de homogeneizado.

El objetivo de mezclar las fracciones con una distribución granulométrica adecuada, es favorecer una menor porosidad después del proceso de prensado. A mayor compactación, menor volumen de huecos y, por ende, menor porosidad, lo cual será más sencillo de eliminar en el siguiente proceso de sinterizado, en el que determinará la porosidad final del espécimen.

En conclusión, los concretos refractarios son un conjunto de agregados, agentes ligantes, componentes de matriz y aditivos y, dependiendo de su aplicación la composición es variable (ver Tabla 4).¹¹

Tabla 4. Componentes de los Concretos Refractarios.

1. Agregados	40-80%
2. Modificadores	4-30%
3. Agentes Ligantes	2-50%
4. Aditivos	<1%

2.1.3.1 Agregados

Se conforman por un conjunto de partículas, naturales o artificiales, cuya distribución de tamaños de partícula pueden variar desde algunas micras hasta varios milímetros.

Los concretos se han diseñado a base de cierta cantidad de agregados (gruesos, intermedios y finos) y cierto tamaño de matriz que representa entre el 25 a 45 % de la mezcla dependiendo del producto.

Los agregados utilizados para la fabricación de concretos refractarios son materiales calcinados como mullitas, alúminas, bauxitas y cianitas, entre otros.⁴

En los cementos aluminosos, los agregados suelen ser de alta alúmina, es decir, materiales que contienen una alta proporción de alúmina. Algunos de los agregados comunes utilizados en los cementos aluminosos son:

1. **Bauxita:** es una roca sedimentaria compuesta principalmente de óxido de aluminio y hierro, utilizada a menudo como agregado en los cementos aluminosos debido a su alta resistencia a la corrosión.
2. **Mullita:** es un mineral que se produce a partir de la fusión de la alúmina y la sílice. La mullita se utiliza a menudo como agregado en los cementos aluminosos, ya que presenta alta resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas.
3. **Alúmina:** es un compuesto químico conformado por óxido de aluminio (Al_2O_3). Es uno de los más abundantes en la corteza terrestre y se localiza en forma de mineral de bauxita. La alúmina es un material cerámico de color blanco y se caracteriza por su alta dureza y resistencia al calor, la corrosión y la electricidad.

Los agregados de alta alúmina se utilizan en los cementos aluminosos para mejorar su resistencia a las altas temperaturas y a la corrosión.¹² Los cementos aluminosos con agregados de alta alúmina se utilizan a menudo en aplicaciones que requieren una alta resistencia al calor, como hornos industriales, incineradores y revestimientos de chimeneas.

2.1.3.2 Modificadores

Los modificadores en los cementos aluminosos son sustancias que se añaden al cemento para alterar sus propiedades físicas y químicas, y enriquecer su rentabilidad en tareas específicas. Algunos de los modificadores comunes que se utilizan en los cementos aluminosos son:

- **Sílice coloidal:** se utiliza como un modificador para mejorar la fluidez del cemento aluminoso y la capacidad de llenado en las aplicaciones de reparación y revestimiento. También se ha demostrado que la sílice coloidal mejora la resistencia a la corrosión y reduce la porosidad del cemento aluminoso.

- **Fosfato de aluminio:** se utiliza como modificador para mejorar la resistencia al fuego del cemento aluminoso, ya que ayuda a la formación de compuestos refractarios en el cemento aluminoso.
- **Fibras:** se utilizan como modificador para mejorar las propiedades físicas y mecánicas como la resistencia a la tracción y a la flexión del cemento aluminoso. Las fibras de acero, fibra de carbono y fibras de vidrio se utilizan comúnmente como modificadores.

La elección de modificadores dependerá de las características específicas del cemento aluminoso y de las aplicaciones previstas. Es de suma importancia seguir adecuadamente las instrucciones que señale el fabricante y tomar las medidas de seguridad necesarias y adecuadas al manipular estos materiales.¹³

2.1.3.3 Agentes Ligantes

Los cementos aluminosos utilizan como ligantes principalmente los aluminatos de calcio y los aluminatos de silicio-calcio. Estos compuestos se forman a partir de la reacción de la alúmina y el óxido de calcio o sílice, respectivamente, a altas temperaturas.

Los aluminatos de calcio son los principales componentes de los cementos aluminosos y se forman a partir de la reacción de la alúmina y el óxido de calcio a temperaturas superiores a los 1,200°C. Los aluminatos de calcio pueden tener diferentes fórmulas químicas, dependiendo de la proporción de alúmina y óxido de calcio en la mezcla. Los aluminatos de calcio son los responsables de la alta resistencia a niveles de alta temperatura y a la corrosión de los cementos aluminosos.

Los aluminatos de silicio-calcio se forman a partir de la reacción de la alúmina, el óxido de calcio y sílice a altas temperaturas. Estos compuestos pueden tener diferentes proporciones de alúmina, óxido de calcio y sílice en su composición, lo que les confiere diferentes propiedades. Los aluminatos de silicio-calcio se utilizan en la fabricación de algunos tipos de cementos aluminosos para mejorar su resistencia a la corrosión.⁷ En general, los cementos aluminosos tienen una alta resistencia a niveles altos de temperatura y a la corrosión química, lo que los hace útiles en aplicaciones que requieren una alta resistencia a estos factores.¹¹

2.1.3.4 Aditivos

Los aditivos se adicionan con el objetivo de modificar propiedades tanto en estado fresco como en estado endurecido como:

- ✓ Aumentar el desempeño de una mezcla de concreto ante diversos requerimientos solicitados para cumplir con las tareas y especificaciones del solicitante.

- ✓ Garantizar la calidad del concreto y la certeza del rendimiento de dicho material en condiciones ambientales extremas que se puedan llegar a presentar durante las etapas de mezclado, colocación y curado.

Los aditivos en los concretos refractarios se utilizan para mejorar sus propiedades físicas y químicas, y pueden clasificarse en varias categorías según su función específica.² Algunas de las categorías comunes de aditivos en los concretos refractarios son:

Tipo de Aditivo	Descripción
Aceleradores de fraguado	Se utilizan para acelerar el proceso de fraguado del concreto refractario, lo que permite que el material se endurezca más rápidamente. Los aceleradores comunes incluyen sulfato de calcio y cloruro de calcio.
Retardadores de fraguado	Se utilizan para retardar el proceso de fraguado del concreto refractario, lo que puede ser útil en aplicaciones en las que se requiere más tiempo para trabajar con el material antes de que se endurezca. Los retardantes comunes incluyen ácido cítrico y lignosulfonatos.
Aditivos de fluidez	Se utilizan para mejorar la fluidez del concreto refractario y la capacidad de llenado en las aplicaciones de reparación y revestimiento. Los aditivos de fluidez comunes incluyen policarboxilatos y melaminas.
Aditivos de expansión	Se utilizan para aumentar la capacidad del concreto refractario de expandirse y contraerse en respuesta a los cambios de temperatura, lo que puede mejorar la durabilidad y su resistencia a la corrosión en ciertas aplicaciones. Los aditivos de expansión comunes incluyen sulfato de calcio anhidro y yeso.
Aditivos de densificación	Se utilizan para mejorar la densidad y la resistencia del concreto refractario. Los aditivos de densificación comunes incluyen sílice activa y metacaolín.

La elección de aditivos dependerá de las características específicas del concreto refractario y de las aplicaciones previstas. Es de gran importancia seguir las indicaciones del fabricante y tomar a pie de la letra las medidas de seguridad pertinentes al manipular estos materiales¹⁴.

2.1.4 Obtención de Materias Primas

El cemento aluminoso principalmente se produce a partir de bauxitas o alúmina y materiales calcáreos o carbonatos de calcio, debido a que las bauxitas son de origen natural puede contener impurezas de óxidos de titanio (TiO_2), hierro (Fe_2O_3) y silicio (SiO_2).

Las materias primas son de origen natural o provenientes de minas, en donde las impurezas solubles pueden propiciar la disminución de las propiedades refractarias del producto a manufacturar.¹⁵

2.1.5 Trituración y moleinda de Materias Primas

El proceso de trituración de minerales tiene como objetivo reducir el tamaño de los minerales. Este proceso transfora los minerales en polvo y partículas de tamaño homogéneo

y mas pequeñas. La reducción del tamaño de los minerales es una etapa importante y constante en cualquier proceso de tratamiento de minerales. Dicha reducción dependerá de las aplicaciones que se deseen trabajar, es decir, de acuerdo con las necesidades que se requieran será el tamaño de partícula de este material.¹⁶

La molienda o pulverización, es un proceso de reducción del tamaño de partícula de sólidos, en equipos denominados comúnmente de molienda. La trituración significa a la división de grosera del tamaño de sólidos. En la Figura 3 se pueden observar algunos equipos mas utilizados para la molienda y triturado de materias primas.



Figura 3. Equipos Industriales utilizados para moler o triturar la materia prima. a) Trituradora de Impactos, b) Trituradora de Mandíbulas, c) Trituradora de Cono y c) Molino de Bolas.

2.1.6 Proceso de fabricación

Los cementos de aluminato de calcio se fabrican a través de diferentes métodos, siendo los dos más comunes el proceso de fusión y el proceso de reacción ácido-base.

- 1) Fusión de bauxitas y piedras calizas en el horno.
- 2) Sinterización de piedras calizas y alúminas de alta pureza en un horno rotatorio, en este caso se produce un grado mucho más puro de cemento de alta alúmina.

A continuación, se describen brevemente ambos métodos:

1) Proceso de fusión:

En este método, se mezcla alúmina (Al_2O_3) y cal (CaO) en proporciones adecuadas y se somete a altas temperaturas en un horno eléctrico o un horno de arco eléctrico. La temperatura de fusión suele ser casi a $1,600^{\circ}C$. Durante el proceso de fusión, los componentes se funden y reaccionan para formar los aluminatos de calcio deseados, como el aluminato tricálcico (C_3A) y el aluminato monocálcico (C_2A)(CaO). El material fundido se enfría y se muele para obtener el cemento de aluminato de calcio en polvo.¹⁸

2) Proceso de sinterización:

En este proceso, se utilizan piedras calizas y alúminas de alta pureza como materias primas. Las piedras calizas se componen principalmente de carbonato de calcio ($CaCO_3$), mientras que las alúminas de alta pureza son ricas en óxido de aluminio (Al_2O_3).

El proceso de sinterización implica calentar las piedras calizas y alúminas en un horno a altas temperaturas, generalmente alrededor de $1,450^{\circ}C$. A esta temperatura elevada, el carbonato de calcio se desarrolla en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2), mientras que el óxido de aluminio se mantiene estable.

Posteriormente, se mezclan las alúminas de alta pureza y el óxido de calcio generado en la etapa anterior en proporciones adecuadas. Esta mezcla se somete a altas temperaturas nuevamente, generalmente alrededor de $1,600-1,650^{\circ}C$, en un horno de sinterización.

Durante la sinterización, los materiales se calientan lo suficiente como para que ocurra una reacción química entre el óxido de calcio y el óxido de aluminio, formando así los aluminatos de calcio deseados, en particular el aluminato tricálcico (C_3A).¹⁷

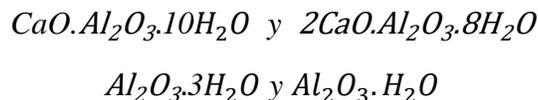
La sinterización de piedras calizas y alúminas de alta pureza es un proceso crucial para obtener cementos de aluminato de calcio con las propiedades deseadas, como alta resistencia, rápido fraguado y otras características específicas que los hacen útiles en aplicaciones especiales.

2.1.7 Hidratación de los concretos refractarios

Los hidratos de aluminatos de calcio, cuando están en forma de gel provocan que el concreto tenga baja porosidad y permeabilidad, por lo que es más susceptible a la explosión por la presión de vapor que se genera durante el calentamiento del mismo.⁴

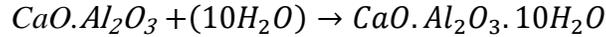
Dependiendo del tipo de cemento y la cantidad utilizada en la mezcla será la cantidad de agua necesaria para alcanzar la consistencia, fluidez y tiempo de fraguado deseados. La matriz del refractario, que constituye la parte más fina del material, contiene ingredientes reactivos como cemento, alúminas calcinadas y sílice, que participan en reacciones para consolidar su composición mineralógica.⁷

Este sistema implica las reacciones entre los aluminatos de calcio presentes en la mezcla y el agua añadida, dando lugar a la formación de hidratos de aluminatos de calcio y alúminas hidratadas:



En la industria del concreto, es común el uso de aditivos químicos (como retardantes o alerantes de fraguado), los cuales mejoran el comportamiento reológico del concreto.

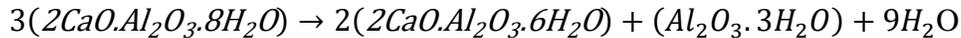
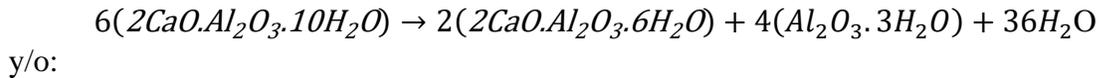
Algunas de las reacciones más comunes durante el proceso de hidratación de los cementos aluminosos son las siguientes, por debajo de 20°C se forma CAH_{10} posteriormente ésta se transforma en C_2AH_8 y AH_3 entre 25 y 30°C: ⁴



2.1.8 Proceso de secado de refractarios

Los concretos refractarios requieren un proceso de secado para estabilizar los productos de hidratación, lo cual se logra exponiendo el concreto a una temperatura de secado de 110°C. ^{4,7}

Las siguientes reacciones se presentan durante el secado:



2.1.9 Curado y Secado de Concretos Refractarios

La matriz es el lugar donde se genera la mayor porosidad debido a la deshidratación causada por la descomposición de los hidratos de aluminatos de calcio y la liberación de agua química, dicha liberación resulta de la conversión de hidratos altos ($CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$) en hidratos bajos ($2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 8H_2O$), $2(2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O)$.

La velocidad de conversión de los hidratos depende de la cantidad de agua añadida, pH del agua y de las propiedades físicas del cemento. ^{2,4,7}

2.2 Concretos Convencionales

Son un tipo especial de concretos utilizados en aplicaciones de alta temperatura, donde se requiere resistencia al calor y a la abrasión. A diferencia del concreto portland, el concreto convencional está fabricado con cementos aluminosos y está diseñado para soportar temperaturas extremadamente altas sin perder sus propiedades físicas y estructurales.^{18,19}

El concreto convencional es uno de los materiales de construcción más comunes y económicos, y se ha utilizado durante décadas para la construcción de edificios, puentes, carreteras y otras estructuras. La mezcla de cemento, agregados y agua es proporcionalmente ajustada para lograr una consistencia adecuada y garantizar que la mezcla se mantenga estable y cohesiva. Además, en algunos casos, se le añaden aditivos especiales para incrementar sus propiedades tales como: resistencia, durabilidad, resistencia a la corrosión, entre otras propiedades. El concreto convencional puede ser producido en diferentes resistencias, dependiendo de las necesidades de la obra y las especificaciones del proyecto. Por ejemplo, se pueden fabricar concretos convencionales de baja, media y alta resistencia, así como concreto premezclado y concreto autocompactante.¹⁸

- **Composición:** El concreto convencional está compuesto principalmente por agregados refractarios y una matriz aglomerante que puede incluir cemento refractario, arcilla refractaria, alúmina u otros materiales similares. Los agregados refractarios pueden ser sílice, alúmina, magnesita, cromita, entre otros.
- **Resistencia al calor:** El concreto convencional puede soportar temperaturas extremas que van desde los 1,000°C hasta los 1,800°C, dependiendo de la composición y calidad del material. Mantiene su resistencia estructural y sus propiedades físicas incluso a altas temperaturas.
- **Resistencia a la abrasión:** Además de su resistencia al calor, el concreto convencional también exhibe una buena resistencia a la abrasión. Esto es importante en aplicaciones donde hay movimiento de materiales abrasivos a alta temperatura, como en hornos industriales o revestimientos de chimeneas.
- **Aplicaciones:** El concreto convencional se utiliza en una amplia gama de aplicaciones industriales, como revestimientos de hornos, chimeneas, calderas, reactores químicos, fundiciones y otros equipos sometidos a altas temperaturas. También se utiliza en la industria metalúrgica, cerámica y vidriera, donde se requiere resistencia al calor y al desgaste.
- **Instalación:** El concreto convencional se aplica mediante métodos de colocación y conformado similares a los utilizados en el concreto convencional, como vertido, proyección, moldeo o parcheo. Sin embargo, debido a su resistencia al calor, es

necesario seguir procedimientos específicos de curado y secado para garantizar un endurecimiento adecuado.

El concreto convencional de alúmina es un tipo de concreto refractario que contiene como adición de alúmina (Al_2O_3), un material que proporciona resistencia a temperaturas altas, alta resistencia química y al desgaste.

Se utiliza comúnmente en aplicaciones que requieren una alta resistencia a la abrasión y desgaste, como en la industria minera, la elaboración de cemento, la manufactura de acero, la producción de vidrio y otras aplicaciones industriales. También se puede utilizar en la construcción de chimeneas, hornos, estufas y otras estructuras que están expuestas a altas temperaturas y sustancias químicas.²⁰

Es importante tener en cuenta que el concreto convencional de alúmina es menos resistente a la compresión que el concreto convencional sin adición de alúmina. Sin embargo, su capacidad para resistir niveles de temperatura alta y la corrosión química lo hace adecuado para aplicaciones específicas.¹⁸

2.3 Concretos Reforzados

En la actualidad, se demandan varios productos refractarios que incorporan distintos aditivos según la aplicación específica. Los aditivos, como reductores de agua y plastificantes, desempeñan un papel fundamental en la modificación de las propiedades y en la cantidad de agua necesaria para proporcionar una buena trabajabilidad.^{20,21}



Figura 4. Explosión de concreto.

La adición de fibras orgánicas con el objetivo de mejorar el proceso de secado del concreto refractario, reduciendo la probabilidad de agrietamiento; esto se logra al disminuir la presión de vapor gracias a la porosidad que se genera en el concreto refractario al quemar las fibras orgánicas.

La adición de fibras, como fibras metálicas, de vidrio, carbón y nylon, ha sido una práctica en los últimos 60 años para acelerar el proceso de secado de concretos convencionales y prevenir la formación de grietas. Estas fibras permiten un calentamiento más rápido durante el secado, lo que permite poner en uso el concreto sin dañar la estructura del material al evitar la acumulación de presión de vapor de agua, como se ilustra en la Imagen 4.^{20,22}

Las fibras de polipropileno han sido ampliamente utilizadas en concretos y concretos refractarios desde la década de los 70's. Su incorporación ha mejorado significativamente la resistencia mecánica en el estado fresco del concreto. Se ha informado que el uso de estas fibras es un enfoque alternativo efectivo para reducir los riesgos de explosión y daño estructural durante el proceso de secado.^{21,23}

Existen distintas clases de hormigones, de acuerdo con su densidad y componentes, cada una de ellas cuentan una aplicación detallada y un empleo concreto. Los hormigones reforzados provienen de la obra civil, usualmente utilizando fibras metálicas en forma de agujas pequeñas de metal, estas se utilizan mezcladas con hormigones refractarios para mejorar ciertas propiedades, especialmente la resistencia a esfuerzos súbitos.

Alguna de las ventajas notables de utilizar estas fibras en hormigones refractarios es el aumento a la resistencia mecánica en consecuencia al aumentar la resistencia a la compresión en frío. Se ha confirmado que con un 2% se duplica la resistencia mecánica y se triplica con un 4%. Sin embargo, para lograr esto, es necesario llegar a unos 1,000 °C aproximadamente.

A partir de una cierta temperatura, la resistencia de las fibras disminuye debido a la oxidación. Sin embargo, estas fibras contribuyen a aumentar la resistencia al desconchado, ya que ayudan a prevenir la propagación de fisuras y grietas. Así mismo, se ha verificado experimentalmente que las fibras aumentan la resistencia al choque térmico.^{20,24}

La incorporación de fibras sintéticas en el concreto ofrece ventajas notables, como un aumento en la tenacidad y la resistencia al impacto en el estado endurecido. Además, en el estado fresco, ayuda a controlar la contracción plástica. Estas fibras también desempeñan un papel importante en la prevención de fisuras a lo largo de la vida útil de la estructura y mejoran la resistencia a la fatiga.^{25, 26}



Figura 5. Fibras de estopa de coco.

Las fibras vegetales (Figura 5) han sido utilizadas en materiales estructurales similares al concreto, como adobe, tapia pisada y morteros de cal, ya que aportan resistencia a la tensión y aumentan la integridad de los elementos.

2.4 Tipos de Fibras

2.4.1 Fibras de PET

Las propiedades de los hormigones presentarán variaciones de acuerdo al tipo de fibra que se llegue a utilizar. Comúnmente la más utilizada en la industria son las fibras metálicas, debido a ciertas desventajas que se presentan en su proceso.

Las fibras de Tereftalato de Polietileno (PET), imagen 6, adicionadas al concreto mejora sus propiedades físico-mecánicas. Además de las medidas y precauciones tradicionales para limitar las grietas de contracción no deseadas, tales como mantener húmedas las superficies del del concreto en las primeras horas de maduración y mediante el uso de aditivos específicos, se ha utilizado el uso de fibras de refuerzo para detener y/o limitar la aparición o propagación de fisuras, grietas, etc. El concreto reforzado con fibra, presenta un mejor desempeño que el concreto ordinario gracias al "efecto de costura" que las fibras tienen en las grietas, con los consiguientes beneficios en términos de tenacidad, ductilidad, tenacidad, abrasión y fatiga.^{26,27,28}



Figura 6. Fibras de PET Recicladas.

Dosis bajas de adiciones de fibras proporcionan un incremento en la resistencia a la compresión y flexión atribuido a la resistencia residual que se presenta después de que se haya producido el agrietamiento.^{26,29} Al incrementar el porcentaje de fibras (más del 2%) o su contenido por volumen, la respuesta estructural cambia y muestra el endurecimiento en la curva de carga-deformación. Las fibras sintéticas muestran el mayor éxito en aplicaciones prácticas y pruebas de laboratorios, ya que muestran que tienen cualidades que otras fibras no tienen, como:

- ✓ Densidad más ligera.
- ✓ No se corroen.
- ✓ Inertes químicamente.
- ✓ Mejor control de la contracción plástica.

2.4.2 Fibras de PP

Las fibras de Polipropileno (PP) se empezaron a utilizar en el concreto reforzado en los años sesenta. Estas fibras son hechas de un polímero sintético de hidrocarburo mediante un proceso de extrusión, imagen 7.

El polipropileno (PP) es altamente resistente a diversos solventes químicos, álcalis y ácidos. Su estructura polimérica se caracteriza por un mecanismo de polimerización en cadena de

adición, es un polímero vinílico cuya cadena principal está compuesta únicamente por átomos de carbono.

Las fibras de polipropileno tienen como objetivo prevenir la fisuración en el concreto endurecido, reducir el ancho de las fisuras si aparecen y garantizar el correcto funcionamiento de la estructura incluso en presencia de fisuras.^{30,31,32}

Ventajas del concreto con fibras de polipropileno:

- ✓ Aporta ductilidad al concreto, lo que mejora su capacidad de soportar cargas.
- ✓ Ofrece un control efectivo de las fisuras, gracias a la capacidad de anclaje de las fibras de polipropileno y la fisuración controlada.
- ✓ Posee una alta resistencia a la compresión.



Figura 7. Fibras de polipropileno.

2.4.3 Fibras de PE

La adición de una cantidad adecuada de fibras de polietileno (PE) al concreto ha demostrado mejorar la resistencia en flexión de manera beneficiosa.^{33,34}

Algunas ventajas de estas fibras son las siguientes:

- ✓ Incrementar la resistencia al impacto.
- ✓ Mejorar la resistencia a la compresión y tracción.
- ✓ Bajo nivel de hidratación.
- ✓ Reduce las fisuras que surgen por la retracción.



Figura 8. Fibras de polietileno.

2.4.4 Fibras Metálicas

Las fibras metálicas consisten en agujas metálicas diminutas que se incorporan en concretos refractarios para mejorar propiedades, como la resistencia a esfuerzos súbitos. Esto es fundamental para resistir ciclos rápidos, choques térmicos, impactos mecánicos y vibraciones que pueden provocar grietas y fisuras en el material. Existen diferentes tipos de fibras metálicas, las principales son:



Figura 9. Fibras de acero.

1. **Corte de alambre:** Proceso para dividir un alambre en segmentos más cortos.
2. **Cizallado de chapas de acero:** Acción de cortar láminas de acero con una herramienta de corte.
3. **Cepillado de chapas de acero:** Técnica para alisar o limpiar superficies de láminas de acero.
4. **Baño de metal:** Sumergir un objeto en un baño de metal líquido para recubrirlo o protegerlo.

Existen diversas fibras con características distintas según su método de obtención, pero la más comúnmente utilizada es la obtenida mediante el corte de alambre.³⁵

Algunas de sus ventajas destacables son las siguientes:

- ✓ Las fibras adhieren fisuras en el concreto, controlan su formación y proporcionan un comportamiento dúctil en lugar de frágil.
- ✓ Mejoran significativamente la resistencia a la tracción, flexión y corte del concreto.
- ✓ Ofrecen una resistencia adicional al redistribuir el momento plástico en situaciones de solicitaciones localizadas.

Capítulo 3

Antecedentes

Díaz Pérez y Humani Aponte³⁴, realizaron la determinación de resistencia en flexión en la adición de fibras polietileno y polipropileno, encontrando resultados favorables en concretos adicionados con proporciones de 600 a 800 g/m³.

Gallegos Carcausto y Zevallos Morales³⁶, realizaron una investigación con fibras Recicladas de PET en Concreto para Bloques encontrando que la incorporación de fibras tiene un impacto en sus propiedades físicas y mecánicas. Los resultados de ensayos indican que esta adición tiene un efecto positivo en la resistencia y la absorción del concreto, pero puede afectar negativamente su trabajabilidad en estado fresco cuando se agrega un 1% de PET en relación al peso del agregado grueso. En particular, se observó un aumento en la resistencia a la compresión de bloques de concreto con un 1% de PET en comparación con bloques sin PET, lo que sugiere que este porcentaje de PET puede ser una adición adecuada para bloques de albañilería utilizados en construcciones de tabiquería y muros portantes.

Pablo Luis³³, realizó el estudio de la influencia de las fibras de polietileno en la durabilidad de pavimento de concreto, en donde encontró que las fibras de polietileno reciclado tienen un impacto positivo en las propiedades mecánicas del concreto. Se realizaron pruebas con diferentes proporciones de fibras obtenidas de botellas plásticas recicladas, desde 0.50 Kg hasta 2.00 Kg por metro cúbico de concreto, lo que resultó en un aumento del módulo de ruptura (M_r) en un 114% en comparación con el concreto estándar. Se determinó que la dosis óptima de fibras es de 1.50 Kg/m³, ya que proporciona una mayor capacidad de flexión en comparación con el concreto sin fibras. Además, se realizó una evaluación económica para comparar los costos en la aplicación de estas fibras.

Caballero³⁵, efectuó un estudio “Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras metálicas”, donde menciona la adición de fibras metálicas al concreto aumenta significativamente su resistencia a la flexión, mientras que la resistencia a compresión se mantiene relativamente constante. Esto tiene un impacto importante en la ingeniería estructural, ya que permite reducir la cantidad de acero tradicional necesario en estructuras sometidas a altos esfuerzos. Se ha recomendado el uso de concreto autocompactable y la sustitución parcial de la armadura transversal por fibras metálicas en situaciones de vaciado de concreto. El uso de fibras metálicas en el concreto se ha incrementado en los últimos años, abarcando aplicaciones tanto en concretos de resistencia normal como alta, en diversas estructuras como puentes, columnas y losas.

Icar y Foti²⁸, realizaron una investigación sobre la “Utilización de fibras recicladas de botellas de pet para el refuerzo de hormigón”, donde efectuaron una serie de ensayos sobre

hormigón armado con fibras circulares de PET y tiras largas. Los resultados importantes son: Un comportamiento más dúctil del hormigón y una alta adherencia hormigón-PET. Como consecuencia, las tiras de PET podrían considerarse como un refuerzo de hormigón en sustitución del acero. Se necesitan estudios más detallados; sin embargo, los resultados de las pruebas realizadas hasta ahora dan esperanza en su futuro uso rentable.

Pereira de Oliveira²⁸ realizó un estudio y concluyó que en morteros reforzados con hasta un 1.5 % de fibras de PET (tereftalato de polietileno reciclado), se observó un aumento en la resistencia a la flexión.

Foti³⁸, realizó un “Análisis preliminar de hormigón armado con residuos de botellas PET fibras”, donde los resultados de las pruebas señalaron añadir una cantidad muy pequeña de fibras de botellas de PET recicladas y trituradas llega a tener influencia en el comportamiento posterior a la fisuración de elementos de hormigón simple. Tanto las fibras laminares como las de forma "O" aportan una mejora significativa en la tenacidad de las muestras de concreto. Esta mejora es especialmente notable en el caso de las fibras de forma "O", y parece que su configuración especial contribuye a unir el concreto a ambos lados de una sección fisurada, lo que aumenta la tenacidad del material.

Ochi, Okubo y Fukui⁵⁰, realizaron un trabajo sobre el “Desarrollo de fibra PET reciclada y su aplicación como fibra de refuerzo de hormigón”, donde el tema de mayor preocupación en el desarrollo de la fibra de PET siempre ha sido la resistencia a los álcalis; sin embargo, después de un análisis cuidadoso encontraron que no había problema cuando se usaba en concreto normal. Para expandir el uso de fibra PET, se deberá tomar en cuenta el costo. En esta etapa, el precio de mercado es comparable al de la fibra de acero, cuando se están comprando los mismos volúmenes. En la actualidad, la fibra de PET se utiliza en Japón para pulverizar y revestir túneles, incluidos los túneles de autopistas, y se espera que aumente su uso en el futuro. Las aplicaciones futuras incluyen no solo soporte general para túneles, sino también estructuras subterráneas que se encuentran en entornos hostiles, como cerca de la costa o bajo el mar. Además, se puede considerar su uso como pavimento en caminos angostos, sinuosos y empinados.

Marzouk⁴⁷, estudió los efectos de los residuos de PET en la densidad y la resistencia a la compresión del hormigón. El estudio confirma que las botellas de plástico trituradas son efectivas como sustitutos de arena en compuestos de hormigón cementoso. Sin embargo, se observó que la densidad y la resistencia a la compresión del hormigón disminuyeron cuando los agregados de PET excedieron el 50% en volumen de la arena utilizada. La densidad y la resistencia a la compresión del hormigón estaban entre 1000 y 2000 kg/m³ y 5-60 MPa, respectivamente.

Estudios previos, han demostrado que es posible utilizar residuos plásticos en hormigones o morteros como ligante en sustitución del cemento. La mayoría de los estudios realizados para la despolimerización de PET han discutido el papel de varios tipos de glicoles y acetatos metálicos para ser utilizados como catalizadores en el proceso.

En la investigación de Moraño y Guillen⁵¹ abordó "El Enfibrado de los Materiales de Construcción". Concluyeron que todas las fibras mejoran las propiedades mecánicas de los materiales a los que se agregan, especialmente la resistencia a la tracción, lo que a su vez beneficia características como elasticidad, absorción de energía y ductilidad.

Choi ⁴⁵ investigó los efectos del agregado de botellas de PET de desecho en las propiedades del hormigón. El plástico de desecho podría reducir el peso entre un 2% y un 6% del peso normal del hormigón. Sin embargo, la resistencia a la compresión se redujo hasta en un 33% en comparación con la del hormigón normal. De manera similar, los resultados de Batayneh mostró el deterioro de la resistencia a la compresión con un incremento en la proporción de contenido plástico. Para la proporción plástica del 20% de arena, la resistencia a la compresión se redujo hasta en un 70% con respecto a la del hormigón normal.

Capítulo 4

Metodología Experimental

El texto describe la metodología experimental utilizada para caracterizar los materiales necesarios, diseñar y fabricar los especímenes, y finalmente, llevar a cabo la caracterización de cada una de las fibras utilizadas con el propósito de compararlas.

4.1 Adquisición y Caracterización de materias primas.

La primera etapa se concentró en conseguir y caracterizar los materiales que se van a utilizar en la experimentación, mediante propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Materias primas:

- Fibras de Tereftalato de Polietileno Reciclado.
- Fibras de Polietileno.
- Fibras de Polipropileno.
- Concreto Refractario.
- Agua.

Equipo:

- Mezcladora.
- Báscula.
- Moldes.
- Horno eléctrico.
- Pulidora.
- Equipo para determinar la Porosidad, Absorción y Densidad.
- Máquina para el análisis de Resistencia a la Compresión.
- Máquina para el análisis de Flexión.
- Microscopio óptico.
- Microscopio Electrónico de Barrido.
- Difractor de Rayos X.
- Horno de Resistencias. (Para quemado de los Concretos Refractarios).

4.2 Caracterización del concreto refractario

La caracterización de la materia prima, que en este caso es el concreto refractario de alta alúmina. Esto se logró mediante técnicas como la Difracción de Rayos X, el Análisis granulométrico y la Microscopía Electrónica de Barrido.

4.2.1 Difracción de rayos X

La Difracción de Rayos X en polvos es una técnica que implica el paso de un haz de rayos X a través de los cristales de una muestra. Cuando estos rayos inciden en diferentes direcciones debido a la simetría de los átomos en la estructura cristalina, se produce un patrón de intensidades que permite interpretar la disposición de los átomos en el cristal, utilizando la ley de Bragg. En este estudio, se utilizaron los parámetros detallados en el capítulo 4.6.5 para caracterizar la muestra mediante Difracción de Rayos X.

4.2.2 Análisis granulométrico

Para llevar a cabo este análisis del concreto refractario de alta alúmina, donde se determinó cuantitativamente la distribución de tamaños de partículas, se requirió colocar la muestra en un agitador (Rot-tap) y pesar la muestra retenida en cada una de las mallas o tamices. Dicho análisis se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM D422-63 (Std test Method for Particle-Size Analysis of Soils).



Imagen 10. Equipo para análisis granulométrico.

Aparatos que se utilizaron:

- Agitador (Rot-tap)
- Balanza.

Para la preparación de muestras se utilizaron 200 gramos de concreto refractario de alta alúmina, que fue el concreto seleccionado para este proyecto.

Se utilizaron los tamices con número: 20, 30, 40, 70, 100, 140 y 230. Una vez que se pasó la muestra por el equipo de análisis granulométrico, se pesó el producto de cada uno de los tamices o mallas.

Después de recolectar todos los pesos de cada una de los tamices, con base a la norma se realizaron las graficas correspondientes que se muestran en el aparato de resultados.



Imagen 11. Medición de peso de las muestras después de ser analizadas.

4.3 Preparación de concretos refractarios (patrón sin adición y muestras con adiciones de 1% y 3% de fibras).

La preparación de probetas estándar y con adiciones se realizó de acuerdo a la norma ASTM C860 (Std test Method for determining the consistency of refractory castable using the ball-in-hand test) y la norma ASTM C862 (Std Practice for preparing refractory concrete specimens by casting).

Norma ASTM C860. Este método de prueba cubre los procedimientos para determinar la consistencia de un molde usando la prueba de bola en mano. La cantidad de agua utilizada en un calcinable tiene una influencia significativa en su rendimiento. En esta etapa se utilizará un mezclador moldeable (batidora mecánica de 5/4), guantes y un reloj.



Imagen 12. Ejemplo de una batidora mecánica de cinco cuartos.

Este método de prueba se usa principalmente para determinar si un refractario recién mezclado tiene la consistencia adecuada, es decir la cantidad de humedad suficiente para presentar buena trabajabilidad y poder ser vaciado o colado.



Imagen 13. Método de bola en mano para preparación de concretos.



Imagen 14. Preparación de muestra base de concreto de alta alúmina usando el método de bola en mano.

Norma ASTM C862. Este método se usa para estandarizar la mezcla, las condiciones del molde, la colocación y el curado de especímenes de concreto refractario que se usarán para pruebas y evaluaciones bajo otros métodos de prueba.

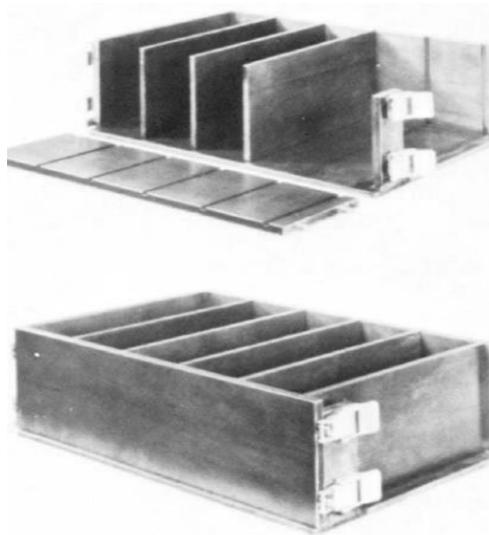


Imagen 15. Molde de grupode cinco cubos para refractarios moldeables.

En esta etapa se utilizó nuevamente un mezclador (batidora mecánica de 5/4), balanzas, moldes, calibrador, lubricante para los moldes, barra de enrasado, termómetro, temporizador, paletas, horno guantes, cucharón, mesa de vibración, divisores de muestras, caja de mezcla, etc. Basicamente esta etapa cubre el mezclado, vaciado y curado de especímenes de concreto refractario monolítico para su uso en ensayos posteriores.

4.4 Secado de los concretos refractarios a 110° C durante 1 hora.

En la tercera etapa se efectuó el proceso de secado de los concretos refractarios a una temperatura de 110°C durante 1 hora con una velocidad de calentamiento de 10°C/min.

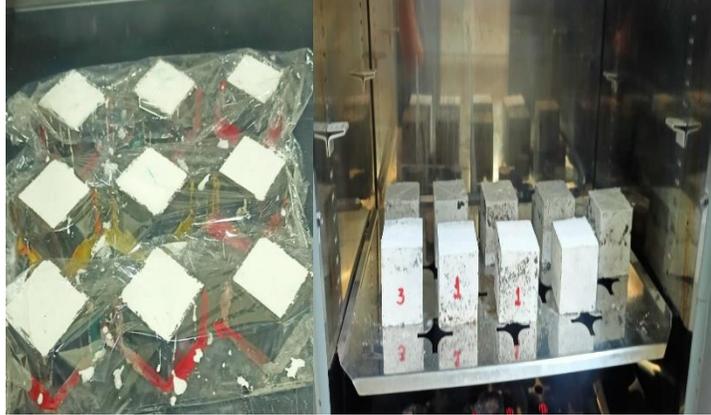


Imagen 16. Primer patrón de muestras preparadas sometidas al horno para su secado.

4.5 Quemado de concretos refractarios a 815° C durante 1 hora.

En la cuarta etapa se efectuó el proceso de quemado de los concretos refractarios a una temperatura de 815°C durante 1 hora, con una velocidad de calentamiento de 5°C/min.

4.6 Quemado de concretos refractarios a 1,050° C durante 1 hora.

En la quinta etapa se efectuó el proceso de quemado de los concretos refractarios a una temperatura de 1,050°C durante 1 hora y una velocidad de calentamiento de 5°C/min.



Imagen 17. Muestras sometidas al horno para quemarlas a las temperaturas 815 y 1,050°C.

4.7 Caracterización de los Concretos Refractarios patrón y con adiciones de fibras.

En esta última etapa se realizó el proceso de caracterización de los concretos refractarios para obtener propiedades físicas, mecánicas y su caracterización microestructural mediante Microscopía Electrónica de Barrido.

4.7.1 Propiedades físicas.

4.7.1.1 Análisis de Porosidad, Absorción de agua y Densidad aparente.

Para llevar a cabo este ensayo, donde se obtuvo la porosidad, absorción y densidad, se necesitó medir y pesar las muestras previo a ser sometidas al proceso de secado, y posteriormente de este proceso se realizó de nuevo las mediciones, esto con el fin de determinar el cambio volumétrico y los diferentes pesos que se obtuvieron después de cada ensayo.

Para determinar la porosidad en los especímenes de los diferentes refractarios se llevó a cabo de acuerdo a la norma ASTM C830 (Std test Method for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure).

Norma ASTM C830. La porosidad aparente, la absorción de agua, la gravedad específica aparente y la densidad aparente son propiedades clave en la evaluación de productos refractarios. Estas propiedades son fundamentales para comparar y seleccionar productos refractarios de alta calidad en diversas aplicaciones industriales. Se emplean métodos de prueba para medir estas propiedades, y son particularmente útiles en la evaluación de productos hidratables.

1. Se determinó el Peso en Seco de cada una de las muestras.



Imagen 18. Medición de peso de cada una de las muestras.

2. Saturación. Se colocó las muestras de ensayo en un recipiente de vacío a presión adecuado que se cerró, aseguró y bombeó a una presión absoluta de no más de 1.9 in Hg (6.4 kPa). Se mantuvo esta presión durante 30 min. Se dejó que el agua entrar en el recipiente sosteniendo el vacío durante 5 min. Luego se cerró la línea de vacío y presurice el recipiente por una bomba de presión. Se mantuvo esta presión a 30 psi (207 kPa) o más durante 60 min. Luego liberé la presión; para dejar los especímenes saturados listos para pesar.



Imagen 19. Proceso de vacío que se llevo acabo para determinar porosidad, absorción y densidad.

3. Se determinó el Peso Suspendido de cada espécimen de ensayo en gramos con una precisión de 0.1 gramos después de la saturación y mientras se suspende en líquido.

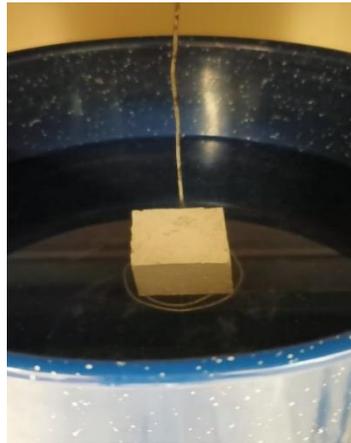


Imagen 20. Muestra suspendida.

4. Se realizó la determinación del Peso Saturado de las muestras. Tras obtener el Peso Suspendido, cada muestra se secó ligeramente con un algodón suave humedecido para eliminar las gotas de líquido en la superficie. Luego, se pesó el Peso Saturado en gramos con una precisión de 0.1 gramos al pesar en el aire.

5. El Volumen Exterior de las muestras se determinó restando el Peso Suspendido al Peso Saturado, ambos en gramos, para obtener el volumen en centímetros cúbicos, siguiendo la expresión indicada:

$$V, \text{cm}^3 = W - S$$

6. Se calculó el Volumen de Poros Abiertos y el Volumen de Porciones Impermeables en las muestras de prueba en centímetros cúbicos. Este cálculo se realizó siguiendo el procedimiento detallado en el estudio:

$$\text{Volumen en Poros Abiertos, cm}^3 = W - D$$

$$\text{Volumen de Porciones Impermeables, cm}^3 = D - S$$

7. Se calculó la Porosidad Aparente, que representa el porcentaje de relación entre el volumen de poros abiertos en la muestra de ensayo y su volumen exterior. El cálculo se llevó a cabo siguiendo el método especificado en el estudio:

$$P, \% = \left[\frac{(W - D)}{V} \right] \times 100$$

8. Se determinó la Absorción de Agua, que indica el porcentaje de la relación entre el peso del agua absorbida y el peso de la muestra de ensayo. El cálculo de la absorción de agua se realizó siguiendo el método indicado en el estudio:

$$A_w, \% = \left[\frac{(W - D)}{D} \right] \times 100$$

9. Se calculó la Gravedad Específica Aparente, T—La gravedad específica aparente de la muestra de ensayo es el cociente de su peso seco dividido por su volumen de porciones impermeables. Dado que el resultado expresa un tipo de valor de gravedad específica, se da que el valor obtenido para T, ya ha sido dividido por la supuesta densidad del agua, lo que hace que el resultado no tenga unidades. Se calculó T de la siguiente manera:

$$T = D / D - S$$

10. Se calculó la Densidad Aparente, que se expresa en gramos por centímetro cúbico y se obtiene dividiendo el peso seco de la muestra de ensayo por su volumen exterior. El cálculo se realizó siguiendo el procedimiento detallado en el estudio, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$B, \frac{g}{\text{cm}^3} = \frac{D}{V}$$

4.7.2 Propiedades mecánicas.

4.7.2.1 Ensayo de Compresión.

Para llevar a cabo este ensayo, donde se obtuvo la resistencia a la compresión, la cual se determinó de acuerdo a la norma ASTM C133 (Std test Method for cold crushing strength and Modulus of Rupture of refractories).

Norma ASTM C133. Se llevaron a cabo métodos de prueba para determinar la resistencia a la flexión a temperatura ambiente utilizando la técnica de flexión de 3 puntos, conocida como módulo de ruptura en frío, así como la resistencia a la compresión, o ambas propiedades, en productos refractarios. Para realizar estas pruebas, se empleó una máquina de prueba de compresión mecánica o hidráulica estándar.

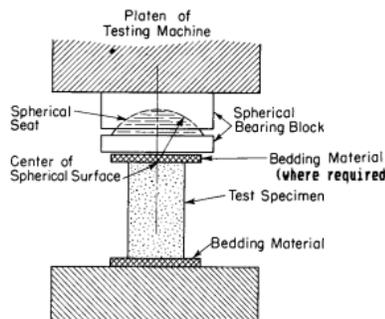


Figura 10. Diseño recomendado para el conjunto de prueba de trituración, incluido el bloque.

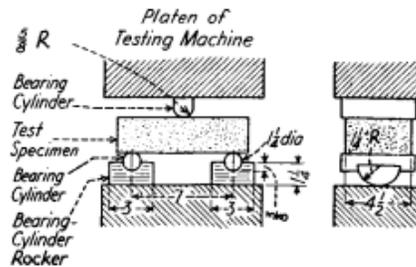


Figura 11. Diseño alternativo de cilindros de rodamiento para ensayo de módulo de ruptura.

Estos métodos de prueba se utilizan para determinar la resistencia al aplastamiento en frío y el módulo de ruptura en formas refractarias, ya sean secas o cocidas, de cualquier tipo. Para realizar este ensayo, se utilizaron las muestras Base, PET Reciclado 1% y 3%, PP 1% y PE 1% en seco, 815°C y 1,050°C, de acuerdo a la norma ASTM133.



Imagen 21. Muestra ensayada a compresión.

Una vez que se realizó el ensayo en cada una de los especímenes, con los resultados obtenidos se realizaron graficas donde se comparó la resistencia a la compresión de cada una de ellas.

4.7.2.2 Ensayo de Flexión.

Al igual que en el Ensayo de Compresión, se utilizó la norma ASTM C133 (Std test Method for cold crushing strength and Modulus of Rupture of refractories).

Para la preparación de las muestras que se ensayaron, se tomó la misma dosificación utilizada en los cubos de compresión.



Imagen 22. Preparación de muestras para ser ensayadas a flexión.

Después de realizar las muestras a ensayar, se pasaron a secar en el horno a 110°C.

Cada muestra se rompió en la mitad del tramo en flexión con una carga aplicada de acuerdo con las tasas de carga estándar dadas en Tabla 5.

Posteriormente, las muestras se cargaron a la velocidad estándar especificada en Tabla 5, no variarán más de 610% de lo establecido para el tipo de refractario que se trabajó.



Imagen 23. Muestras en proceso de secado.

Tabla 5. Cargas estándar del Modulo de Ruptura.

Refractory Type	Specimen Size, in. (mm)	Cross Section, in. (mm)	Span, in. (mm)	Stress Rate, lbf/in. ² /min (MPa/min)	Loading Rate, lbf/min (kN/min)	Strain Rate, ^A in./min (mm/min)
<i>Refractory Brick and Shapes</i>						
Density >100 lbf/ft ³ (>1.60 g/cm ³), or <45 % porosity, or both (Includes regular or high-strength castables and fired plastic or rammed refractories)	9 x 4.5 x 2.5 ^B (228 x 114 x 64)	4.5 x 2.5 (114 x 64)	7 (178)	1305 (9)	3496 (15.55)	0.05 (1.3)
	9 x 4.5 x 3 ^B	4.5 x 3	7	1305	5034	0.05
	(228 x 114 x 76)	(114 x 76)	(178)	(9)	(22.39)	(1.3)
	9 x 2 x 2 ^C	2 x 2	7	1305	994	0.05
	(228 x 51 x 51)	(51 x 51)	(178)	(9)	(4.42)	(1.3)
	6 x 1 x 1 (152 x 25 x 25)	1 x 1 (25 x 25)	5 (127)	1305 (9)	174 (0.774)	0.05 (1.3)
<i>Insulating Refractories</i>						
Density <100 lbf/ft ³ (<1.60 g/cm ³), or >45 % true porosity, or both (Includes dried, unfired plastic or rammed refractories)	9 x 4.5 x 2.5 ^B (228 x 114 x 64)	4.5 x 2.5 (114 x 64)	7 (178)	435 (3)	1165 (5.18)	0.05 (1.3)
	9 x 4.5 x 3 ^B	4.5 x 3	7	435	1678	0.05
	(228 x 114 x 76)	(114 x 76)	(178)	(3)	(7.46)	(1.3)
	9 x 2 x 2 ^C	2 x 2	7	435	331	0.05
	(228 x 51 x 51)	(51 x 51)	(178)	(3)	(1.47)	(1.3)

^A Where possible, loading at a constant stress rate is preferable to constant strain rate loading.

^B Preferred sizes for bricks and shapes. Required sizes for firebricks.

^C Preferred size for all castables.



Imagen 24. Muestra ensayada a flexión.

El ensayo de flexión, se llevó a cabo en el equipo ELE ADR AUTO, utilizando los siguientes parámetros:

- Referencia de la muestra: 363.
- Tipo de muestra: Viga (Flexión).
- Tasa de ritmo: 0.50.
- Modo de control: Automático.



Imagen 25. Muestra de PET 1% después de haber sido sometida al ensayo de flexión.

4.8 Microscopía Óptica.

Se realizó la petrografía de muestras representativas de cada probeta de concreto utilizando una resina epóxica para montaje en frío (imagen 26), posteriormente fueron pulidas utilizando una serie de lijas de carburo de silicio, 60, 120, 320, 400, 600, 800 y 1200 y finalmente fueron pulidas con paño y pasta de diamante de 1μ . Una vez que las muestras fueron pulidas a espejo se observaron en microscopio óptico a 5X y 10X (imagen 27)



Imagen 26. Preparación de muestras con resina.



Imagen 27. Observación de muestras en microscopio óptico.

4.9 Caracterización microestructural por Microscopía Electrónica de Barrido.

Con el propósito de analizar la distribución de fases y la disposición de las fibras, se llevó a cabo la caracterización microestructural mediante Microscopía Electrónica de Barrido. Se seleccionaron muestras secadas a 110°C que contenían diversas fibras orgánicas, así como el concreto refractario base, para su análisis y observación microscópica detallada. Dichas muestras se cubrieron con aluminio, se recubrieron con oro (Imagen 28) y posteriormente se colocaron en el portamuestras para se analizadas en el SEM (Imagen 29).



Imagen 28. Recubrimiento de muestras.



Imagen 29. Colocación de muestras con cinta de cobre para SEM.

Se analizaron los concretos refractarios adicionados con y sin fibras con temperatura en seco, para analizar la microestructura del material y observar microscópicamente si se detecta alguna diferencia en cuanto a la microestructura, porosidad, etc.

Se obtuvieron micrografías de los concretos refractarios tanto con la adición de fibras de PET reciclado, PP y PE como sin ellas, utilizando una temperatura de 110°C para el proceso. Estas micrografías permitieron observar y comparar la microestructura de los diferentes tipos de concretos.

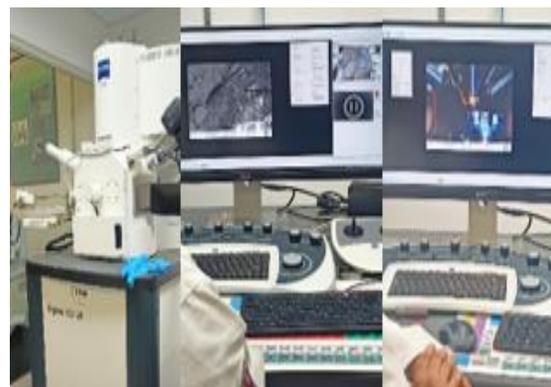


Imagen 30. Observación de muestras en SEM.

4.10 Caracterización por Difracción de Rayos X.

La difracción de Rayos X (DRX) se realizó mediante el método de polvos. En este proceso, la muestra de concreto se reduce a un polvo fino, el cual se compacta en forma de pastilla para su posterior análisis mediante la técnica de DRX. El análisis se llevó en un Difractómetro PANalytical, empleando los siguientes parámetros:

- Ángulo de inicio: 4.9893°
- Ángulo final: 100.0000°
- Tamaño de paso: 0.0131303
- Tiempo por paso: 8.925
- Tiempo neto por paso: 7.395
- Velocidad de escaneo: 0.375151
- Recuentos preestablecidos: 10000
- Número de pasos: 7236
- Tiempo total (h:m:s): 00:04:24



Imagen 31. Preparación de muestras para Difracción de Rayos X.

La preparación de la muestra para la obtención de un polvo fino se llevó a cabo en un mortero de Ágata (imagen 31).

Previamente del ingreso al difractómetro de las pastillas elaboradas con los polvos obtenidos durante la molienda, fue de suma importancia que estas pastillas fueran perfectamente compactadas, para así obtener mejores resultados sin dañar el equipo (imagen 32).

Después de que se colocaran cada una de las pastillas compactadas de las 3 muestras seleccionadas, se eligió el programa de acuerdo a los parámetros que se mencionaron al anteriormente. Finalmente se graficaron los resultados que se obtuvieron de la difracción de rayos X, para obtener información detallada sobre su composición mineralógica.



Imagen 32. Equipo de Difracción de Rayos X.

Capítulo 5

Resultados y Discusión de Resultados

A continuación se exponen los resultados obtenidos de la caracterización de los concretos refractarios, base y con adiciones de fibras orgánicas.

5.1 Propiedades físicas

5.1.1 Análisis de Porosidad

En la Gráfica 1 y Tabla 6 se muestran los resultados del análisis de porosidad del concreto refractario de alta alúmina adicionado con las diferentes fibras orgánicas expuestas anteriormente, donde podemos observar que la porosidad se ve afectada principalmente por la cantidad y tipo de fibra que se agregó en las mezclas correspondientes, cabe mencionar que dicha porosidad también se vió afectada por la exposición de diferentes temperaturas que estuvieron sometidas las muestras, debido a que mayor tiempo de residencia en el horno se quemaron de manera parcial o completa las fibras y por ende, facilita el proceso de la eliminación de moléculas de agua presente, y esto se ve directamente reflejado en la porosidad que dejan las fibras al quemarse.

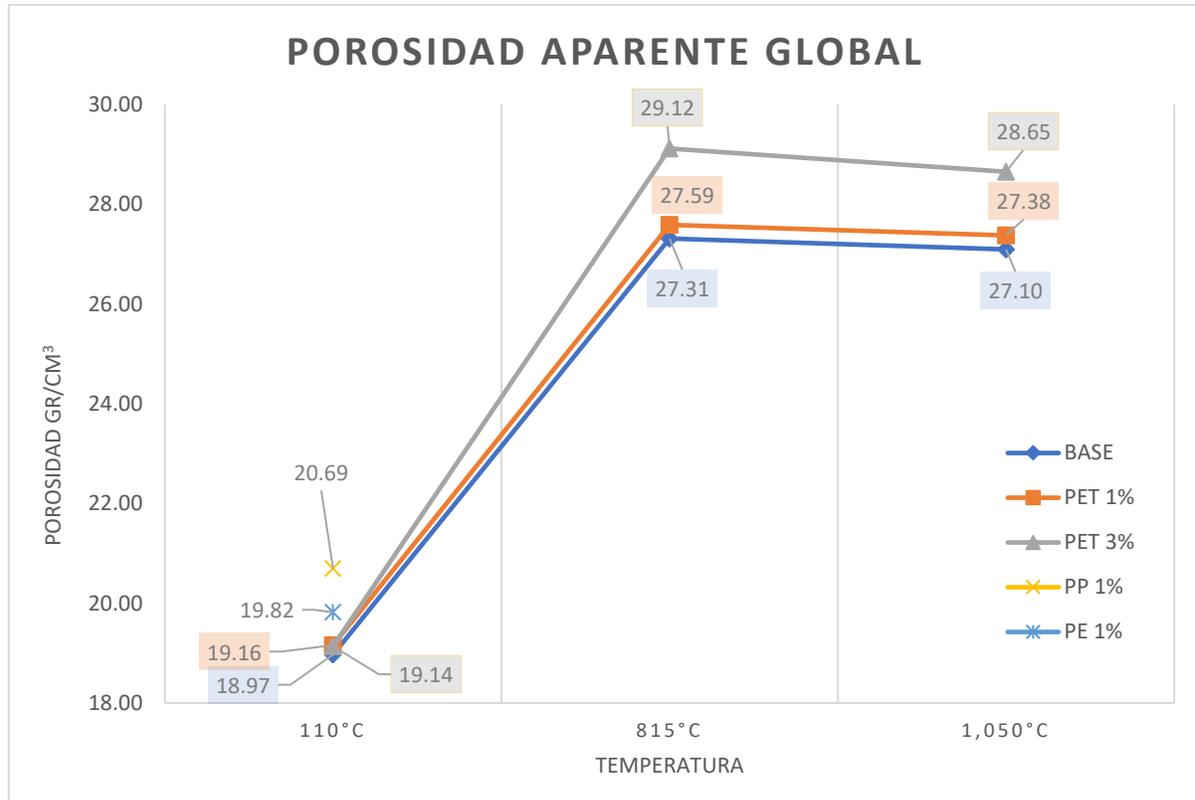
La porosidad en los concretos permite que el agua presente en la mezcla se evapore más fácilmente, facilitando así el proceso de secado. Los poros actúan como canales de escape para el agua, permitiendo que salga del material de manera más eficiente. Esto es especialmente importante durante el fraguado y el curado del concreto, cuando se busca eliminar la humedad para lograr una mayor resistencia y durabilidad.

Entonces, cuando hay una mayor porosidad en el concreto refractario, existen un mayor número de canales para la evaporación del agua. Esto facilita que el agua se mueva desde el interior del concreto hacia los poros y luego se evapore más fácilmente. Como resultado, ayudará a la eliminación de agua del concreto, como se puede observar en la Gráfica 1 y Tabla 6, donde la muestra que se adicionó al concreto refractario de alta alúmina con el 3% de fibra de PET reciclada, alcanzando su mayor porosidad cuando se sometió a una temperatura de 815°C.

Por el contrario en las muestras con adición de PP a 110°C, alcanzó una mayor porosidad con la adición del 1%, sin embargo, debido a la densidad de estas fibras no se logró trabajar adecuadamente con los criterios establecidos en la dosificación inicial que se manejó para todas las muestras.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que la porosidad excesiva también puede tener efectos negativos en la resistencia y durabilidad del concreto. Un exceso de porosidad puede hacer que el concreto sea menos resistente a la compresión y más permeable a las sustancias

fundidas, lo que puede comprometer su integridad estructural, esto se puede comprobar en el análisis de compresión.



Gráfica 1. Resultados Globales del Ensayo de Porosidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tabla 6. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tipo de Muestra	110 °C	815 °C	1,050 °C
Base	18.96972080	27.31230491	27.09743428
PET 1%	19.15930551	27.58674586	27.37803007
PET 3%	19.13778265	29.11696421	28.64856153
PP 1%	20.69462349		
PE 1%	19.81932443		

5.1.2 Análisis de Absorción

Se determinó la absorción de agua de las muestras de concreto refractario con y sin adición de fibras de PET (Tereftalato de Polietileno) recicladas, PP (Polipropileno) y PE (Polietileno), con el 1% y 3% respectivamente, de acuerdo a la norma ASTM C830 (Std test Method for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure), mencionada en el apartado de Metodología Experimental. La absorción de agua en los refractarios de alta alúmina se refiere a la cantidad de agua que puede ser absorbida por el material cuando se sumerge en ella o está expuesto a un ambiente húmedo, además de proporcionar información sobre su comportamiento en presencia de materiales fundidos. Esta propiedad se mide generalmente como porcentaje de peso de agua absorbida en relación con el peso seco del material.

En la Gráfica 2 y Tabla 7 se muestran los resultados del análisis de la absorción de agua del concreto refractario de alta alúmina adicionado con las diferentes fibras orgánicas expuestas anteriormente, donde podemos observar que la muestra de concreto refractario adicionada con el 1% de fibra de PP (polipropileno) presenta mayor cantidad de absorción de agua a una temperatura de 110°C, a comparación de nuestra muestra base.

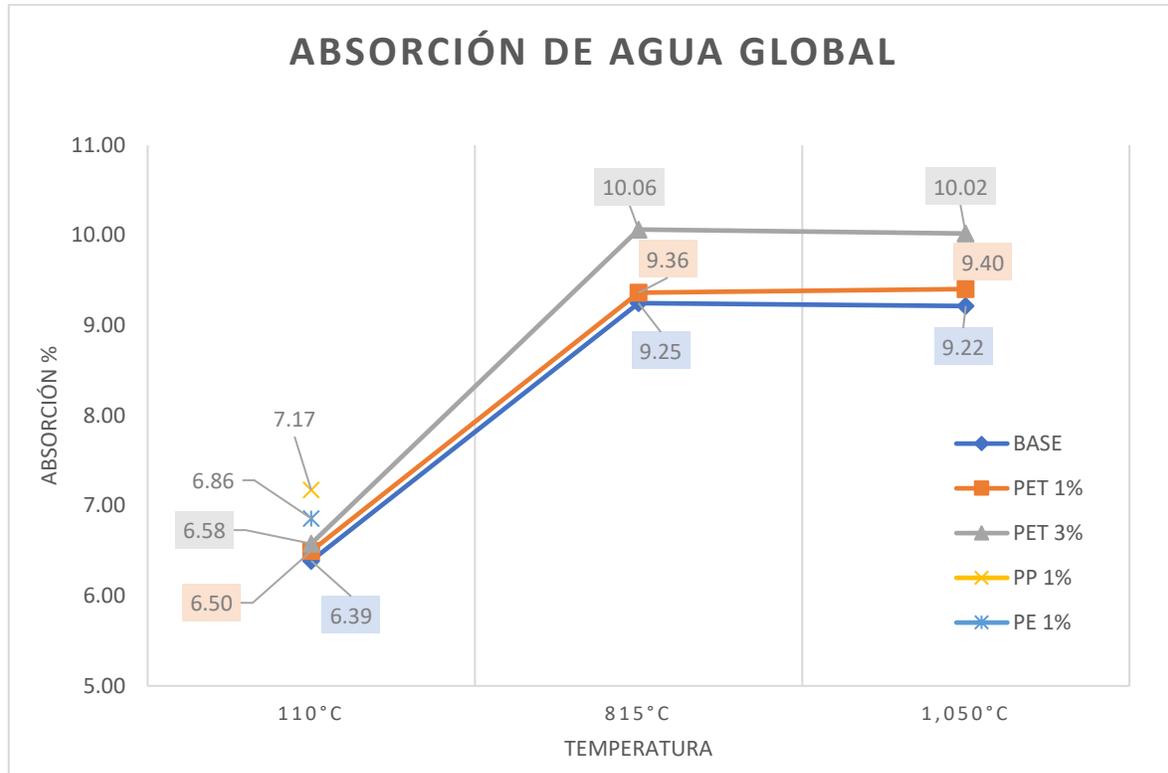
La absorción de agua en refractarios de alta alúmina puede ser perjudicial por varias razones:

- 1) **Reducción de resistencia:** La presencia de agua en los poros del material puede debilitar la estructura del refractario, lo que resulta en una disminución de su resistencia mecánica.
- 2) **Desprendimiento:** Cuando el agua es absorbida por los refractarios de alta alúmina y se somete a ciclos de calentamiento y enfriamiento, puede producirse una presión interna debido a la expansión y contracción del agua, lo que puede llevar a la formación de grietas y el desprendimiento del material.
- 3) **Cambios en las propiedades térmicas:** La presencia de agua en los poros del material puede alterar las propiedades térmicas del refractario, como su conductividad térmica y capacidad de retención de calor. Esto puede afectar negativamente su rendimiento en aplicaciones de alta temperatura.⁷

Las fibras tienen la capacidad de disminuir la absorción de agua en el concreto refractario al actuar como barreras físicas que restringen el flujo de agua a través de los poros del material. Al entrelazarse y formar una estructura tridimensional en la matriz del concreto, las fibras crean canales más estrechos que dificultan la penetración del agua, lo que contribuye a reducir la cantidad de agua que ingresa en el material.

Según los resultados presentados en la Gráfica 2 y la Tabla 7, se puede concluir que la inclusión de fibras en los concretos refractarios tiende a aumentar la absorción de agua. Este aumento se debe a la formación de canales en la porosidad generada por la presencia de las fibras en el concreto. Este incremento en la absorción de agua puede tener un impacto negativo en la resistencia y la durabilidad del material, especialmente en situaciones que

involucran cambios de temperatura. Estos hallazgos tienen implicaciones importantes para el rendimiento de los concretos refractarios en aplicaciones específicas.



Gráfica 2. Resultados Globales del Ensayo de Absorción de Agua en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tabla 7. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tipo de Muestra	110 °C	815 °C	1,050 °C
Base	6.388557807	9.247670699	9.215985439
PET 1%	6.496927129	9.362401867	9.404231773
PET 3%	6.578982759	10.06475537	10.01888228
PP 1%	7.173461609		
PE 1%	6.857841805		

Debido a la trabajabilidad de las fibras de PP 1% (polipropileno) y PE 1% (polietileno), su absorción de agua es mayor solo a una temperatura de 110°C.

En cambio, con la fibra de PET (tereftalato de polietileno) reciclada presentó una absorción de agua promedio y una trabajabilidad buena con el 1% y 3% de fibra adicionada al concreto a las diferentes temperaturas de 110°C, 815°C y 1,050°C, esto debido a que las muestras

adicionadas con fibras de PP y PE presentaron mayor porosidad, la porosidad es una propiedad deseada para la liberación de las moléculas de vapor de agua que pueda obtener nuestro concreto, sin embargo, el exceso de porosidad puede llegar a ser perjudicial sobre todo en el aspecto de la absorción de agua, por lo cual se toma como referencia nuestra muestra base de concreto para tomarla de parámetro en cuanto a la absorción de agua adecuada, esto, con el fin de tener como referencia sus propiedades mecánicas deseadas.

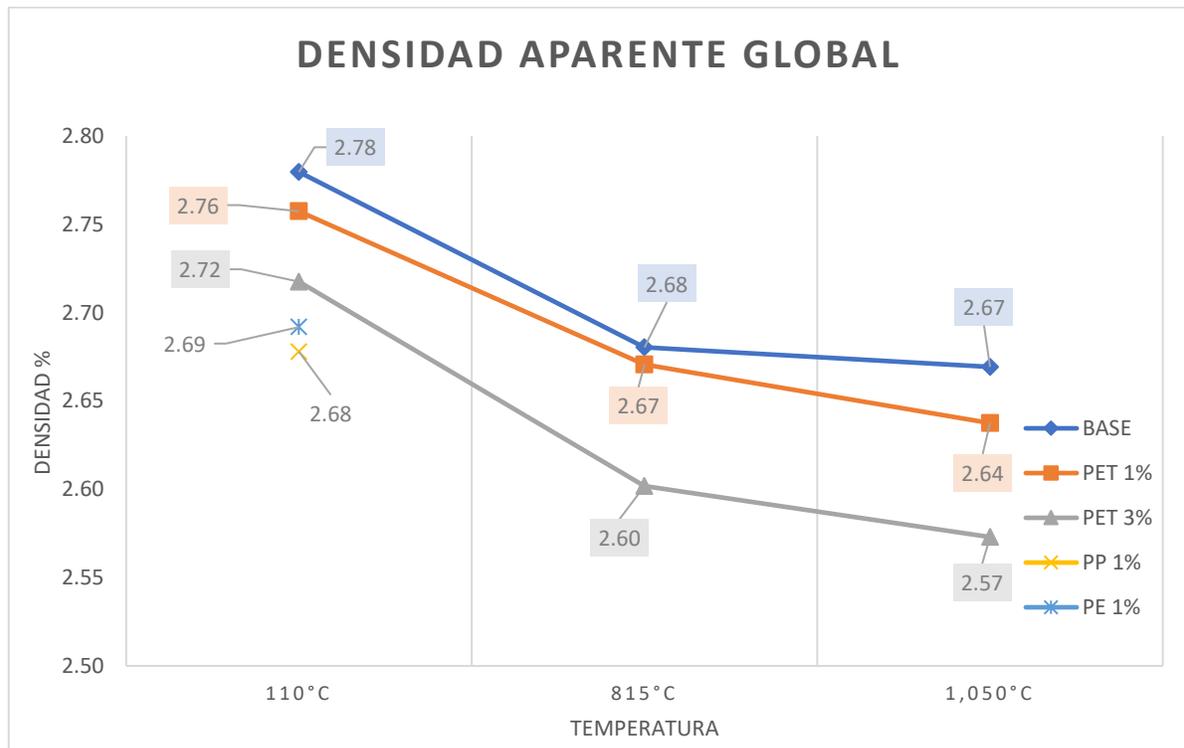
5.1.3 Análisis de Densidad

Se determinó la densidad de las muestras de concreto refractario con y sin adición de fibras de PET (Tereftalato de Polietileno) recicladas, PP (Polipropileno) y PE (Polietileno), con el 1% y 3% respectivamente, de acuerdo a la norma ASTM C830 (Std test Method for apparent porosity, liquid absorption, apparent specific gravity, and bulk density of refractory shapes by vacuum pressure), mencionada en la sección 4.7.1.1 dentro del capítulo de la Metodología Experimental.

Los concretos refractarios de alta alúmina tienen una densidad relativamente alta debido a su composición y estructura. La densidad es una propiedad sustancial de los materiales refractarios, ya que está relacionada con su resistencia mecánica y capacidad de retención de calor. La alta densidad en los refractarios de alta alúmina es deseable porque indica una mayor cantidad de material en un volumen determinado, lo que está relacionado con su resistencia mecánica. Además, una mayor densidad puede proporcionar una mejor capacidad de retención de calor y resistencia al choque térmico. Sin embargo, es importante tener en cuenta que una densidad más alta no siempre es mejor en todas las aplicaciones. En algunas situaciones, como en revestimientos o aislamientos de baja densidad, se pueden requerir refractarios con menor densidad para cumplir con los requisitos específicos de aislamiento térmico.

En la Gráfica 3 y Tabla 8 se señalan los resultados del análisis de la densidad del concreto refractario, donde podemos observar que el concreto base presenta mayor densidad respecto a los concretos adicionados, debido a que al momento de incorporar las fibras orgánicas disminuye su densidad al ser quemadas se crean porosidades dejando huecos y perdiendo volumen y densidad. Algunos tipos de fibras pueden tener una densidad mayor o menor que los otros componentes del concreto, lo que puede influir en la densidad total del material. Además, el porcentaje y la distribución de las fibras dentro de la matriz también pueden afectar la densidad final.

Cuando se agregan fibras al concreto refractario, ocupan espacio dentro de la matriz del material, lo que puede resultar en un aumento de la densidad aparente del concreto. Esto se debe a que las fibras se mezclan con los otros componentes, como los agregados refractarios y el material aglutinante, por lo cual llenan los vacíos existentes en la matriz. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el efecto de la adición de las fibras en la densidad del concreto refractario puede variar. En este caso en específico, las fibras adicionadas al concreto fueron quemadas a diferentes temperaturas, por lo cual, al momento de ser quemadas crearon porosidades y huecos que por ende nuestros concretos adicionados con fibras perdieron densidad, como se puede ver en la tendencia que representa en la Gráfica 3 y Tabla 8. En resumen, los materiales refractarios se clasifican en tres categorías según su densidad. Los refractarios con una densidad superior a 1.9 g/cm³ se consideran materiales refractarios densos, aquellos con una densidad entre 1.6 g/cm³ y 1.9 g/cm³ son materiales de densidad media, y los que tienen una densidad menor de 1.6 g/cm³ se denominan materiales refractarios ligeros. Esta clasificación es importante para comprender las propiedades y aplicaciones de los materiales refractarios.¹³



Gráfica 3. Resultados Globales del Ensayo de Densidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tabla 8. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tipo de Muestra	110 °C	815 °C	1,050 °C
Base	2.779630358	2.680302284	2.669290099
PET 1%	2.757386537	2.670678337	2.637465480
PET 3%	2.717549488	2.601793291	2.572971231
PP 1%	2.677940396		
PE 1%	2.691830322		

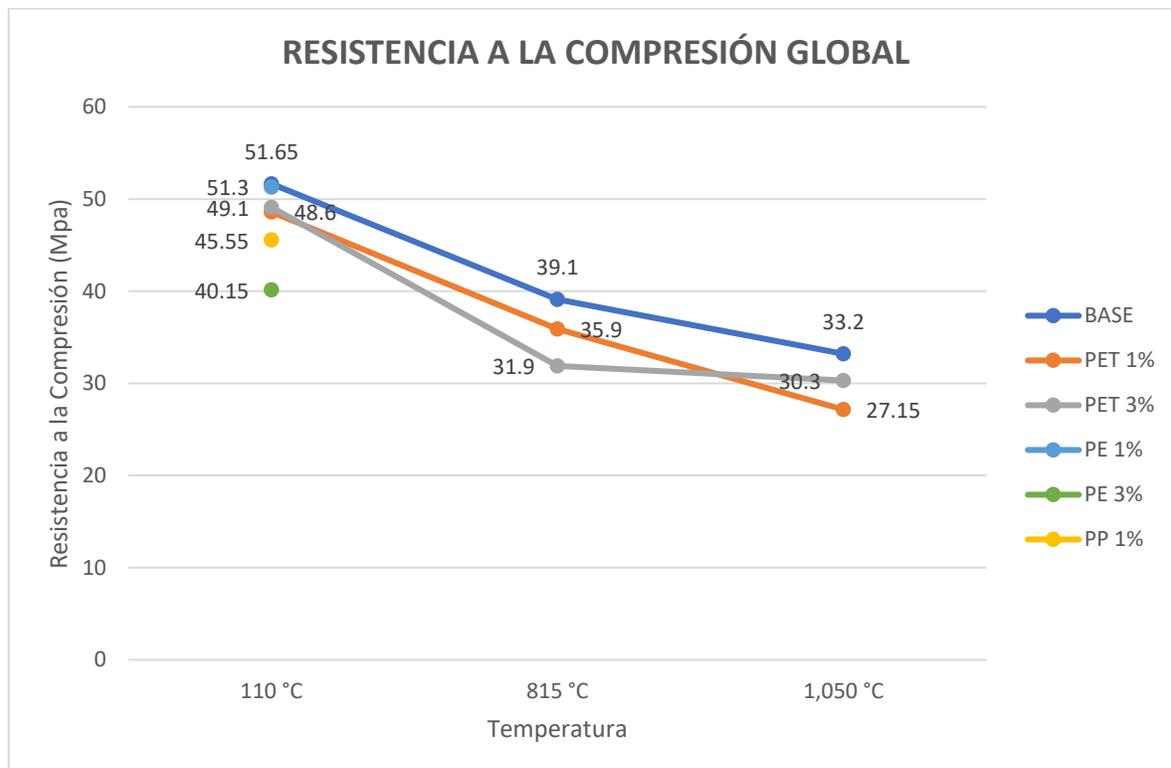
De acuerdo a los resultados obtenidos en la Gráfica 3 y Tabla 8, podemos concluir que adicionando el 1% de fibra de PET (tereftalato de polietileno) reciclada, obtendremos una densidad deseada, muy similar al concreto refractario base.

5.2 Propiedades mecánicas

5.2.1 Resistencia en Compresión

Los resultados mostraron que la adición de fibras de PET resultó en una reducción de la resistencia a la compresión del concreto, que osciló entre 0.5% y 8.5% en comparación con los especímenes sin fibras, y esta reducción fue más pronunciada a medida que se aumentaba la cantidad de fibras en la mezcla. Además, los especímenes con fibras más cortas exhibieron un mejor comportamiento en términos de resistencia. Las fibras deformadas contribuyeron a una resistencia residual mejorada debido a una mayor unión con la matriz de concreto. En última instancia, las mezclas de concreto que contenían fibras más cortas alcanzaron una carga máxima ligeramente menor en comparación con otras mezclas.

En la Gráfica 4 y la Tabla 9 se presentan los resultados del análisis de la resistencia a la compresión del concreto refractario al que se le añadieron diferentes fibras orgánicas. Los resultados indican que el concreto base sin fibras muestra una buena resistencia a la compresión a diferentes temperaturas de secado y quemado. Sin embargo, al agregar un 3% de fibra de PET reciclado y un 1% de fibra de PE, se observa que la resistencia se ve ligeramente afectada. Esto sugiere que la adición de fibras al concreto no siempre contribuye de manera significativa a la resistencia en compresión, y varios factores, como el tamaño y la longitud de las fibras, pueden influir en este efecto.



Gráfica 4. Resultados Globales del Ensayo de Resistencia a la Compresión en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Tabla 9. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en todas las muestras preparadas con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

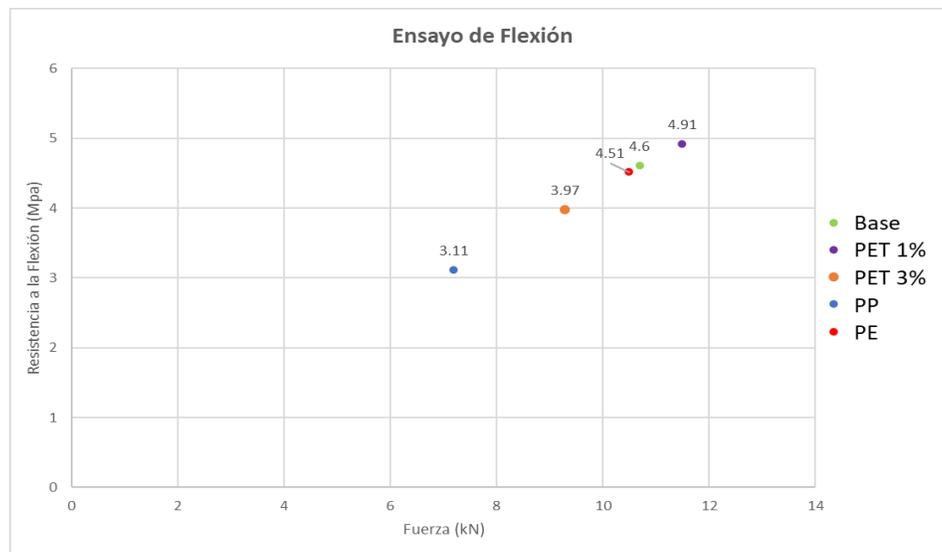
Tipo de Muestra	110 °C	815 °C	1,050 °C
Base	51.65	39.10	33.20
PET 1%	48.60	35.90	27.15
PET 3%	49.10	31.90	30.30
PP 1%	45.55		
PE 1%	51.30		
PE 3%	40.15		

5.2.2 Resistencia en Flexión

Se determinó el análisis de flexión de las muestras de concreto refractario con y sin adición de fibras de PET (Tereftalato de Polietileno) recicladas, PP (Polipropileno) y PE (Polietileno), con el 1% y 3% respectivamente, a la temperatura de 110°C. De acuerdo con algunas investigaciones la resistencia a la flexión del concreto adicionado con fibras se ve mejorada, incluso apoya a frenar la propagación de grietas.⁴⁹

En un estudio realizado por la Universidad de Malta en enero de 2016, se evaluó el rendimiento en edades tempranas y las características mecánicas del hormigón reforzado con fibras de PET reciclado. Se utilizaron dos perfiles de fibras (rectas y deformadas) con longitudes de 50 mm y 30 mm, además de tres volúmenes de adición (0.5%, 1% y 1.5%). Los resultados indicaron que la adición de fibras de PET reciclado condujo a una reducción de la resistencia a la compresión y a la flexión en el rango del 0.5% al 8.5% en comparación con el hormigón convencional. Las muestras con fibras más cortas tuvieron un mejor desempeño, especialmente en términos de resistencia residual y capacidad de carga. Esto sugiere que las fibras de PET reciclado pueden mejorar varias propiedades del hormigón, lo que las convierte en una alternativa interesante para su uso en aplicaciones de construcción civil o arquitectónica.

Los resultados correspondientes a la resistencia de flexión para cada una de las muestras que se observan en la Gráfica 5, donde la muestra de concreto refractario adicionada con el 1% de fibra de PET, obtuvo mayor resistencia a la flexión, esto debido a la cantidad de fibra adicionada, en comparación a la muestra de PET con 3%. Así mismo, el resto de las muestras adicionadas con las fibras de PE y PP, sus dimensiones y tamaños afectaron considerablemente en su resistencia mecánica, esto también se pudo observar en la Gráfica 4, donde se analizó la resistencia a la compresión.²⁷



Gráfica 5. Resultados Globales del Ensayo de Resistencia a la Flexión en todas las muestras preparadas con una temperatura de 110°C.

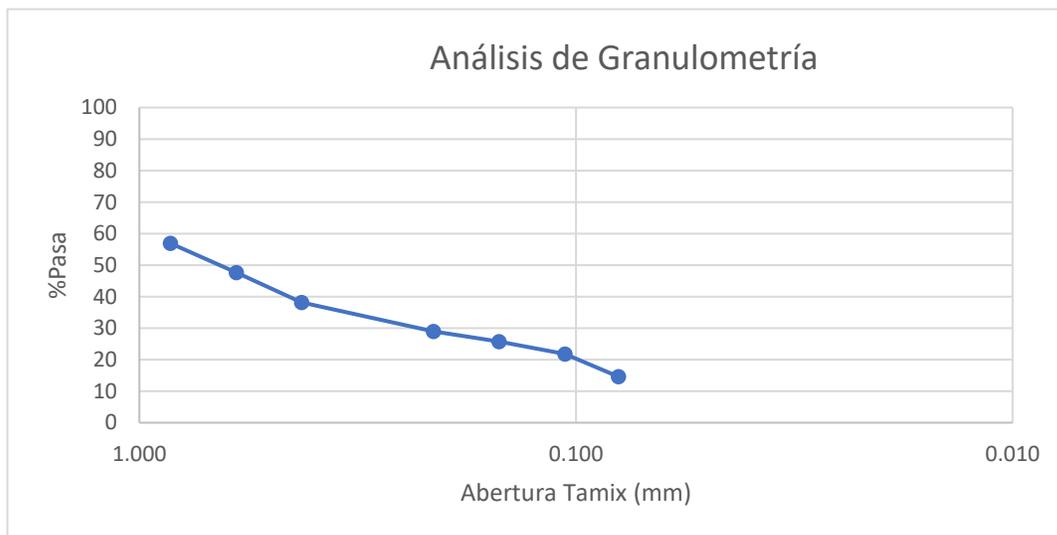
5.3 Análisis granulométrico

En la Tabla 10 se presentan los resultados obtenidos del análisis granulométrico de la muestra de concreto refractario con el porcentaje en peso que quedo retenido en cada malla.

Tabla 10. Análisis granulométrico del concreto.

N°	Tamiz mm	Peso Retenido	%Retenido		%Pasa
			Total %	Acumulado%	
20	0.850	86.86	43.0532800	43.05328000	56.9467162
30	0.600	18.79	09.3135070	52.36678682	47.6332094
40	0.425	19.02	09.4275090	61.79429611	38.2057001
70	0.212	18.64	09.2391570	71.03345348	28.9665428
100	0.150	06.46	03.2019830	74.23543613	25.7645601
140	0.106	07.99	03.9603470	78.19578310	21.8042131
230	0.080	14.48	07.1772000	85.37298260	14.6270136
-230	-0.080	29.51	14.6270100	99.99999623	0
Total		201.75	100		

En la Gráfica 29 se puede observar la distribución granulométrica del concreto de donde se estima que presenta una granulometría fina, debido a que no se observan granos gruesos, lo cual se puede corroborar con la representación en un diagrama ternario en donde se establecen los tamaños de partícula considerados como gruesos, intermedios y finos (imagen 33).



Gráfica 29. Análisis de Granulometría del Concreto de Alta Alúmina.

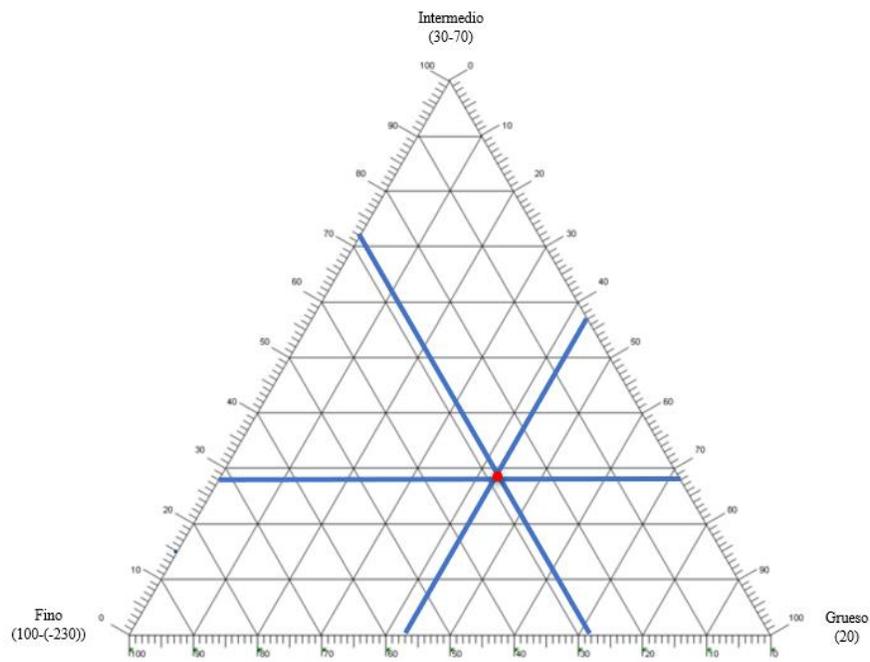


Imagen 33. Diagrama Ternario del Análisis de Granulometría del Concreto de Alta Alúmina.

5.4 Análisis microestructural por Microscopía Electrónica de Barrido

Se analizaron los concretos refractarios de alta alúmina con y sin adición de fibras de PET (Tereftalato de Polietileno) recicladas, PP (Polipropileno) y PE (Polietileno), con el 1% y 3% respectivamente, a las temperaturas 110°C, 815°C y 1,050°C. Esto con el fin de analizar la microestructura del material y observar microscópicamente con el fin de evaluar el cambio en la porosidad y el acomodo de dichas fibras orgánicas en las diferentes dosificaciones propuestas en este estudio.

En la Imagen 34 se presenta la microestructura del concreto refractario secado a 110°C, donde se puede observar que la matriz es heterogénea, así como la presencia de algunos agregados con una distribución homogénea de los mismos, con tamaños aproximados entre 20 y 400 micras.

Muestra Base en Seco

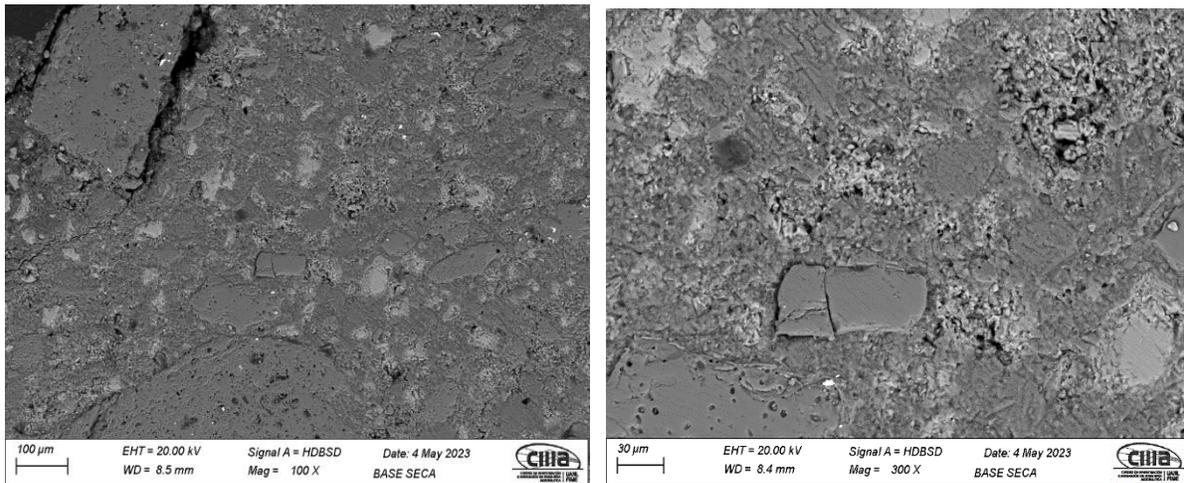
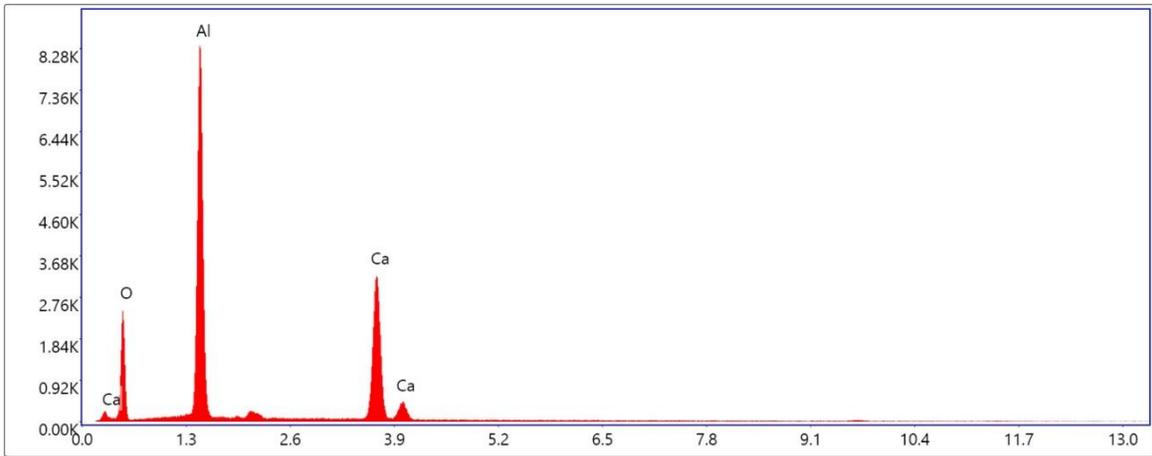


Imagen 34. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura en seco.

En la Imagen 35 se obtuvo el análisis químico por EDS, en el cual señala la presencia de Al y Ca como óxidos, los cuales corresponden a la alúmina que conforma agregados y matriz del concreto, así como al cemento que funciona como ligante en el concreto convencional.



Lsec: 20.0 228 Cnts 2.160 keV Det: Octane Elect Plus

Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	37.57	54.28	750.59	10.16	0.0671	1.0788	0.1656	1.0000
Al K	34.66	29.70	3452.31	4.59	0.2280	0.9623	0.6808	1.0041
Ca K	27.77	16.02	1826.63	2.25	0.2478	0.9300	0.9544	1.0049

Imagen 35. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura en seco.

Muestra PET Reciclado 1% en Seco

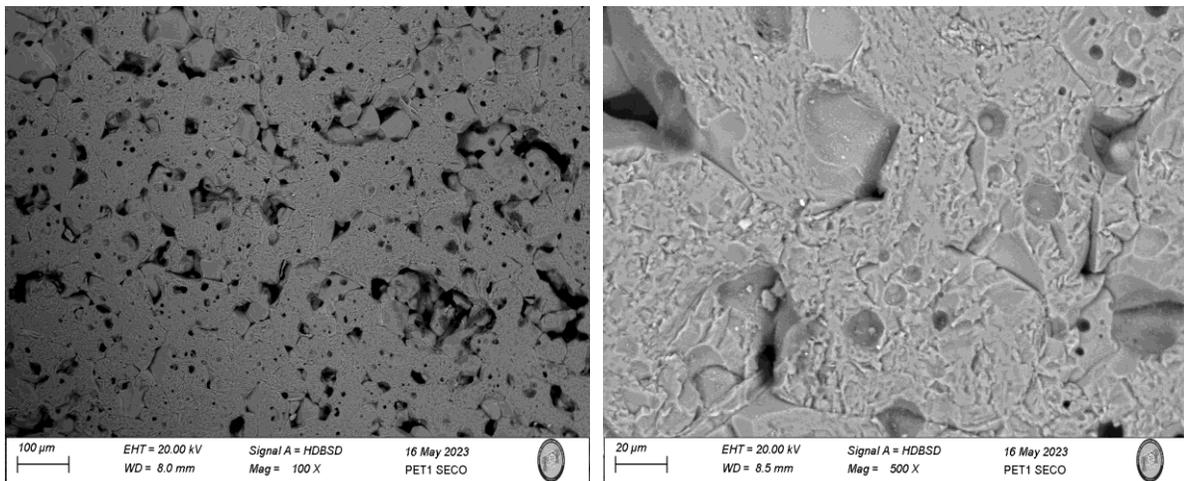
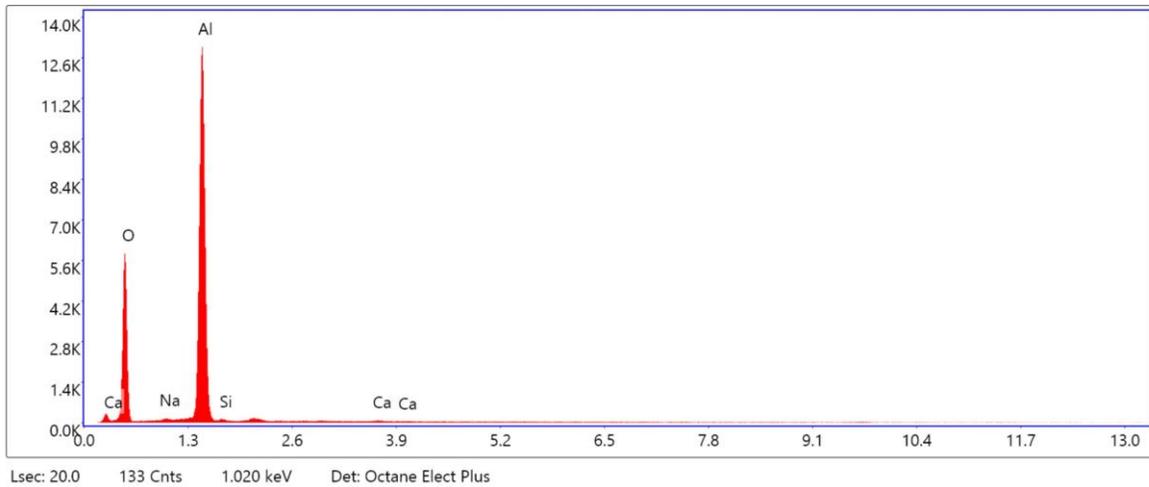


Imagen 36. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PET reciclado a temperatura en seco.

En la Imagen 36 se observa la micrografía del concreto refractario de alta alúmina adicionado con el 1% de fibra de PET en seco (temperatura 110°C), donde podemos ver la presencia de algunos agregados, pero lo más importante que podemos notar aquí es la presencia de porosidad, inclusive puede ser más notoria debido a sus cavidades en forma de huecos oscuros.



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	44.38	57.39	1867.69	7.66	0.1800	1.0629	0.3814	1.0000
NaK	0.63	0.57	31.38	18.53	0.0027	0.9661	0.4446	1.0124
AlK	53.92	41.34	5457.45	3.70	0.3869	0.9464	0.7576	1.0005
SiK	0.65	0.48	39.94	20.88	0.0028	0.9672	0.4457	1.0009
CaK	0.42	0.21	24.51	27.15	0.0036	0.9132	0.9258	1.0147

Imagen 37. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PET reciclado a temperatura en seco.

En la Imagen 37 podemos observar el difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con el 1% de fibra de PET reciclada a temperatura en seco (110°C), que nos proporcionó el EDS, donde el microanálisis elemental es de Al con 53.92% en peso, O con 44.38% en peso y Ca con 0.42% en peso. La matriz comprende principalmente compuestos como lo son Al₂O₃ y algunos óxidos que pueden presentarse.

Muestra PET Reciclado 3% en Seco

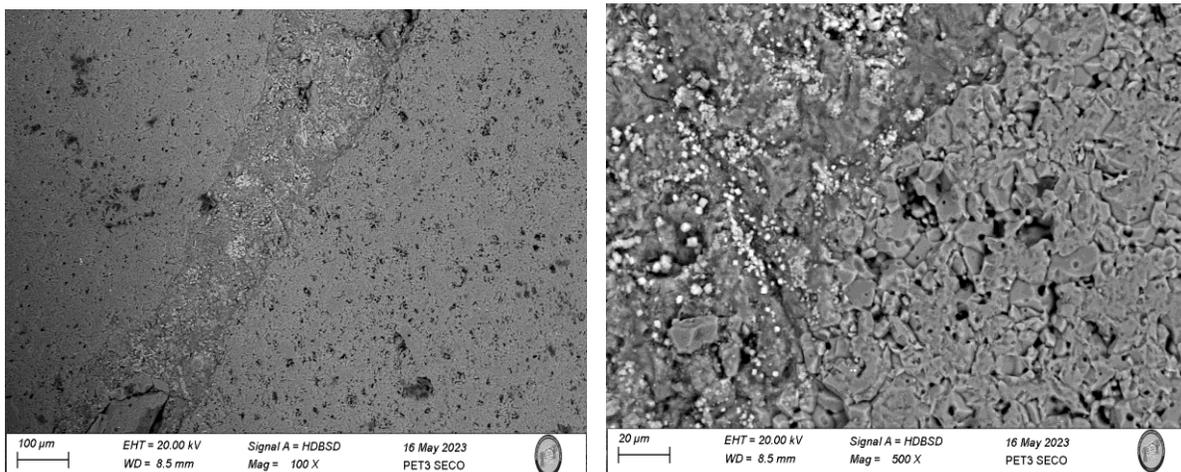
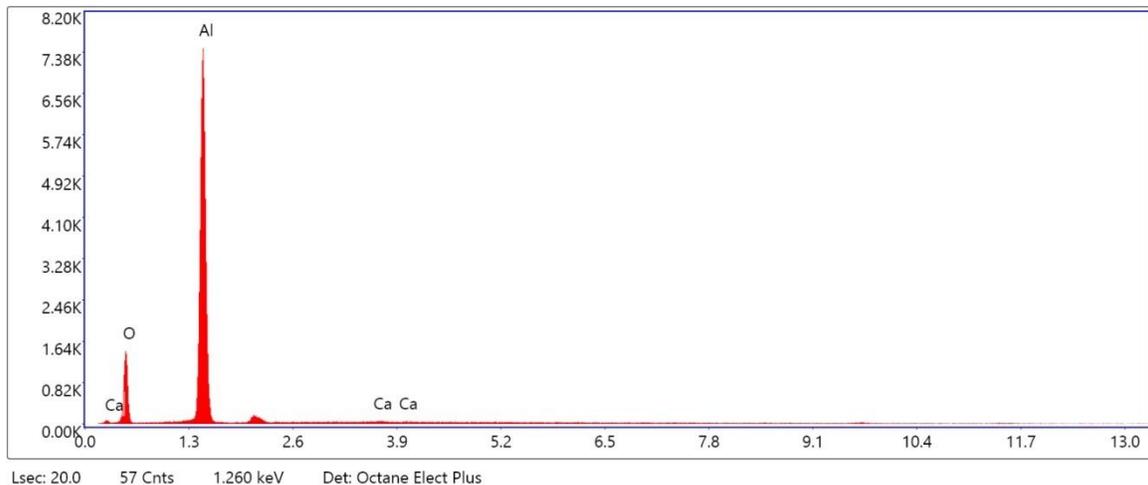


Imagen 38. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 3% de PET reciclado a temperatura en seco.

En la Imagen 38 se describe la micrografía del concreto refractario de alta alúmina adicionado con el 3% de fibra de PET en seco (temperatura 110°C), se puede observar la presencia de mayor porosidad, en comparación de nuestra muestra base y la que adicionamos con el 1% de fibra de PET reciclada, inclusive la formación de un puente que pretende ser la presencia de donde estuvo una fibra, también podemos ver que bajo ese puente se centro alumina, se puede observar en la acumulación de puntos blancos apilados.



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	30.32	42.41	424.60	9.08	0.1048	1.0809	0.3197	1.0000
Al K	68.87	57.13	3012.17	3.10	0.5495	0.9629	0.8285	1.0003
Ca K	0.81	0.46	18.54	34.10	0.0069	0.9295	0.9062	1.0126

Imagen 39. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 3% de PET reciclado a temperatura en seco.

En la Imagen 39 podemos observar el difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con el 3% de fibra de PET reciclada a temperatura en seco (110°C), que nos proporcionó el EDS, donde el microanálisis elemental es de Al con 68.82% en peso, O con 30.32% en peso y Ca con 0.81% en peso. Donde podemos confirmar que dicho puente mencionado en la Imagen 5, efectivamente estamos hablando de la acumulación de alúmina.

Muestra Polipropileno 1% en Seco

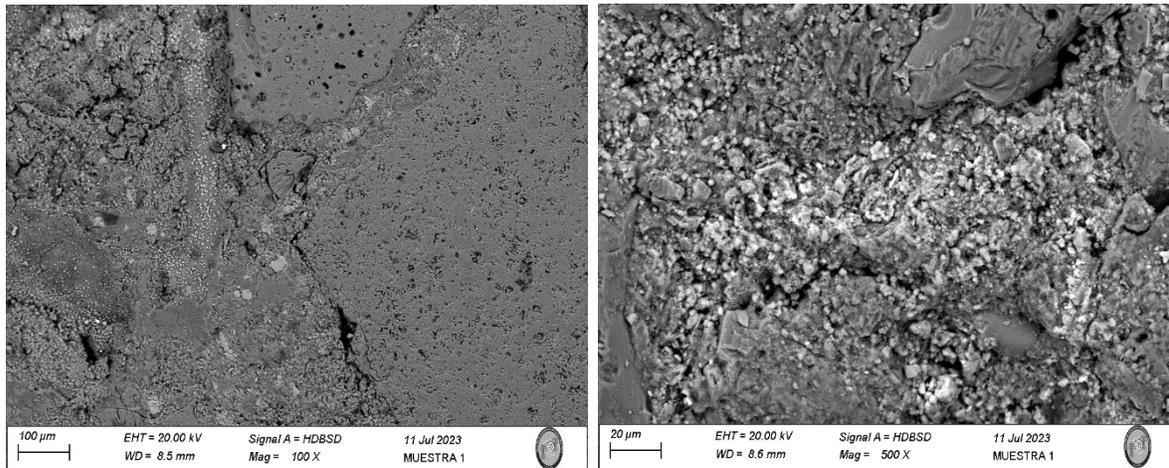
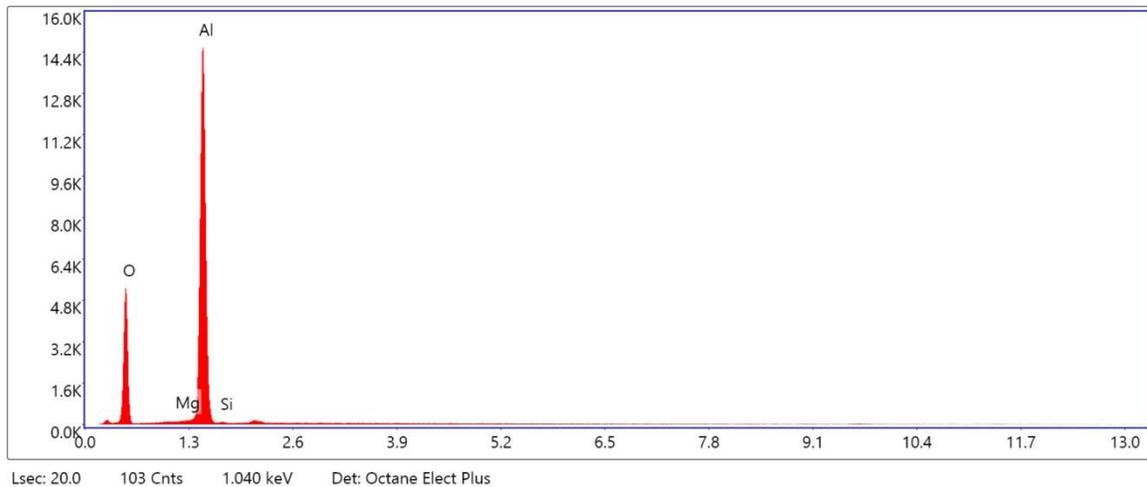


Imagen 40. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PP a temperatura en seco.

En la Imagen 40 se muestra la micrografía del concreto refractario de alta alúmina adicionado con el 1% de fibra de Polipropileno en seco (temperatura 110°C), donde podemos ver la presencia de mayor porosidad, muy similar a la muestra adicionada con el 3% de PET reciclado, ya que se puede notar la misma presencia de puntos blancos donde se estima ser la acumulación de alúmina.



Element	Weight %	Atomic %	Net Int.	Error %	Kratio	Z	A	F
O K	40.32	53.25	1646.79	7.81	0.1594	1.0678	0.3702	1.0000
MgK	0.49	0.43	44.75	12.31	0.0032	0.9873	0.6443	1.0273
AlK	58.71	45.97	6081.42	3.46	0.4353	0.9509	0.7794	1.0004
SiK	0.48	0.36	28.35	21.22	0.0020	0.9718	0.4329	1.0007

Imagen 41. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PP a temperatura en seco.

En la Imagen 41 podemos observar el difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con el 1% de fibra de Polipropileno a temperatura en seco (110°C), que nos proporcionó el EDS, donde el microanálisis elemental es de Al con 58.71% en peso y O con 40.32% en peso. Donde podemos confirmar que la saturación de puntos blancos que notamos en las micrografías de la Imagen 39, efectivamente estamos hablando de la acumulación de alúmina.

Muestra Polietileno 1% en Seco

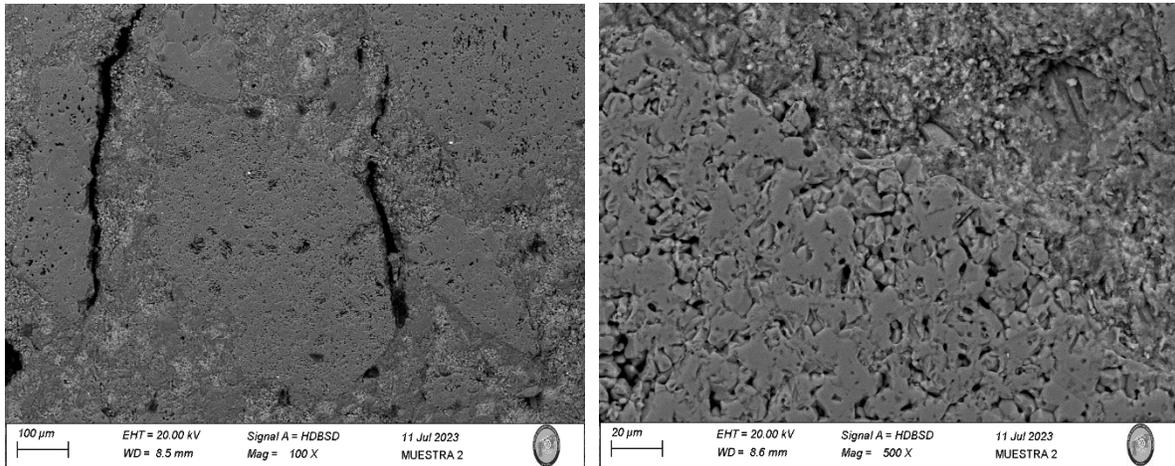


Imagen 42. Micrografía del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PE a temperatura en seco.

En la Imagen 42 se muestra la micrografía del concreto refractario de alta alúmina adicionado con el 1% de fibra de Polietileno en seco (temperatura 110°C), se observa considerablemente la presencia de porosidad en la muestra, mejor distribución en la homogenización de la mezcla, ya que en este caso no vemos acumulación de alúmina como en las muestras anteriores.

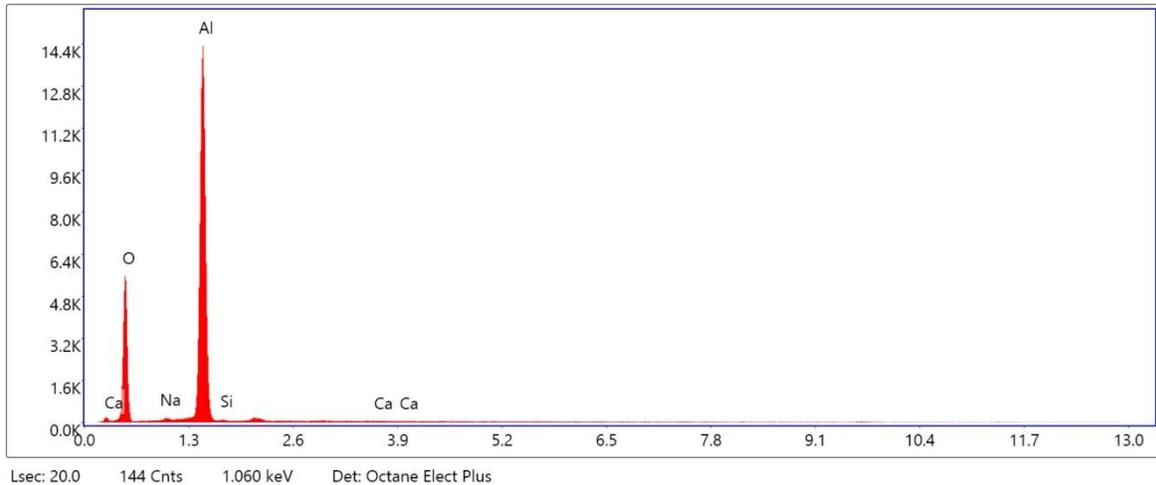


Imagen 43. Difractograma del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con 1% de PE a temperatura en seco.

En la Imagen 43 tenemos el difractograma perteneciente de la muestra del Concreto Refractario de Alta Alúmina adicionado con el 1% de fibra de Polietileno a temperatura en seco (110°C), que nos proporcionó el EDS, donde el microanálisis elemental es de Al con 57.13% en peso y O con 41.64% en peso. Donde podemos observar algunas impurezas que se presentaron al momento de realizar el pulido, así como la presencia efectiva del concreto de alta alúmina.

5.5 Análisis de Difracción de Rayos X

Se analizó el concreto refractario de alta alúmina por DRX para determinar las fases que se formaban debido al proceso de secado que fue aplicado al concreto a trabajar con fibras orgánicas adicionadas, así como para el análisis de la estructura cristalina, identificar las fases presentes y comprender la microestructura del material. Esto proporcionó información importante para la caracterización, el desarrollo y la optimización de los concretos refractarios su aplicación.

Se obtuvo los difractogramas de rayos X del concreto refractario de alta alúmina, para este análisis se consideró las muestras con el concreto base a las diferentes temperaturas que se trabajaron; 110°C, 815°C y 1,050°C. Donde:

- M1 es la muestra a una temperatura de: 110°C.
- M2 es la muestra a una temperatura de: 815°C.
- M3 es la muestra a una temperatura de: 1,050°C.

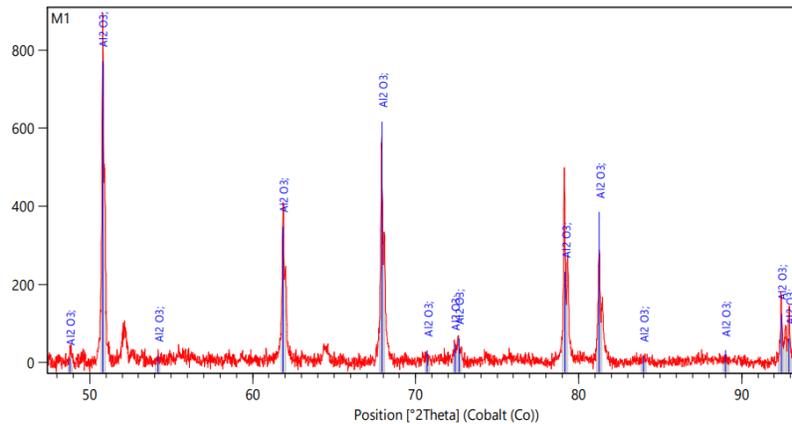


Imagen 44. Difractograma de la Muestra de Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura 110°C.

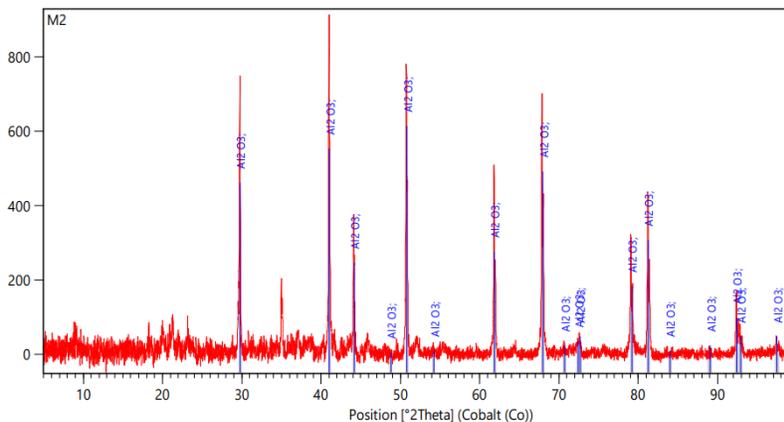


Imagen 45. Difractograma de la Muestra de Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura 815°C.

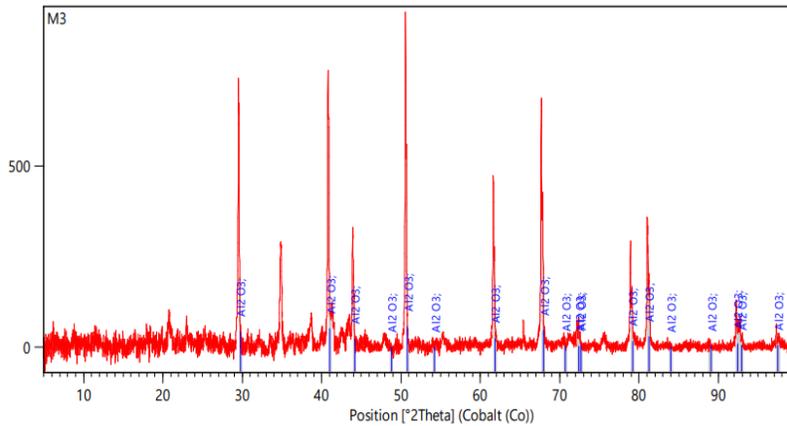


Imagen 46. Difractograma de la Muestra de Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperatura 1,050°C.

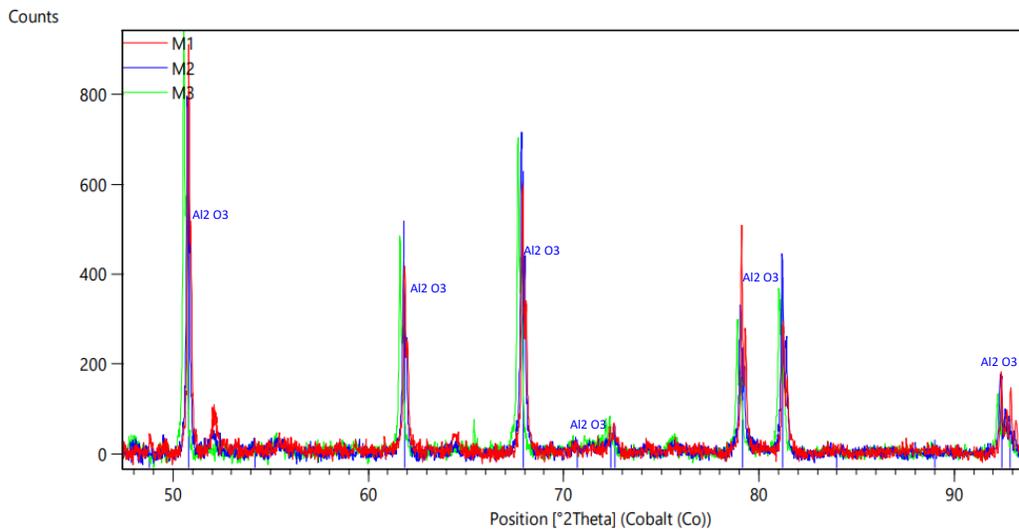


Imagen 47. Difractograma global de las 3 muestras de Concreto Refractario de Alta Alúmina a temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

Se puede observar la presencia de la fase de aluminato de calcio proveniente del cemento (ligante) en los ángulos 2θ y alúmina como corindón en los ángulos 2θ 35.15, 57.5, 43.35, 25.57 y 52.2 (en la tarjeta núm. 46-1212), ver Imagen 47.

Capítulo 6

Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos se concluye que:

- Los concretos adicionados con fibras de PET (Tereftalato de Polietileno) reciclado presentan un incremento en su porosidad con una adición del 3% y, a medida que la temperatura aumenta la porosidad también, con lo que puede considerarse que la adición de fibra favorece la evaporación del agua producto de las reacciones de hidratación, evitando así que dicha pérdida pueda provocar agrietamientos.
- En lo que refiere a la resistencia mecánica disminuye al aumentar el porcentaje al 3% de fibra, por el contrario, con el 1% de fibra de PET (Tereftalato de Polietileno) reciclada, mantiene sus propiedades mecánicas y en relación con el resto de las fibras, también pierden resistencia mecánica, esto en temperaturas de secado. Lo anterior es congruente con el incremento en la porosidad.
- El análisis por difracción de Rayos X señala que presencia de hidratos producto de la hidratación, las cuales son independientes del tipo y porcentaje de fibra adicionado, ya que ésta no reacciona con los componentes del concreto refractario.

Capítulo 7

Recomendaciones

Con base a los resultados que se obtuvieron en este estudio se recomienda que:

- Realizar una evaluación y análisis con la adición de fibras de PET recicladas en concretos refractarios con porcentaje del 1.5% de fibra para obtener una mayor porosidad sin perder resistencia mecánica.
- Evaluar los concretos refractarios adicionados con fibras orgánicas de dimensiones aproximadas a un 1cm de longitud.
- Realizar pruebas con concretos de diferente granulometría.
- Realizar pruebas de ataque químico con materiales con los que estará en contacto durante su tiempo de servicio.

Capítulo 8

Referencias

- 1) De Cózar, J. S., Materiales refractarios no conformados reforzados con fibras metálicas. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 25(2), 1986, 93-96.
- 2) García Ortiz, L. I., Estudio y obtención de un concreto refractario bajo cemento con alta resistencia térmica, 2013, Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León
- 3) Refractories manual, second edition. American Foudrymen's Society, Inc.
- 4) Mendoza-Bedolla, J. L., "Evolución tecnológica de concretos refractarios Parte I. Revista de la Soceram.
- 5) Schacht, C. (Ed.). (2004). Refractories handbook (Vol. 178). CRC Press.
- 6) Arenas, M. (2014). Química de materiales cerámicos – Notas del TEMA 10. www.academia.edu.
https://www.academia.edu/8973328/Qu%C3%ADmica_de_Materiales_Cer%C3%A1micos_Notas_del_TEMA_10
- 7) Rivas-Mercury, J. M., Aza Moya, A. H. D., Turrillas, X. M., & Pena, P. (2003). Hidratación de los cementos de aluminatos de calcio (Parte I).
- 8) Vizcaya Cepeda, C. P. (2013). Análisis de la degradación de refractarios en un reactor de reducción directa de mineral de hierro (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- 9) Buttler, F. G., Glasser, L., & Taylor, H. F. W. (1959b). Studies on 4CAOAL2.O3.13H2O and the related natural mineral hydrocalumite. Journal of the American Ceramic Society, 42(3), 121-126. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1959.tb14078.x>
- 10) Fallas, G. G., Madrigal, C. H., García, M. P., Valenciano, I. R., Vega, L. D. R., & Guzmán, G. S. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. Tecnología en marcha, 25(2), 80-86.
- 11) Refractories Handbook edited for Charles A. Schacht. Capítulo 10 Refractory Castables for Leonard Krietz. Plibrico Company, Chicago, Illinois, U.S.A.

- 12) Moreno Rivera, F. H. (2013). Análisis comparativo de la influencia del sistema ligante en las propiedades mecano-físicas en concretos refractarios aluminosos (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- 13) Montes Mejía, A. E. (2016). Efecto de la incorporación de porcelana de desecho sobre las propiedades de un concreto refractario (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- 14) Tellería, R. I. (2006). Hormigones refractarios. *Técnica industrial*, 263, 57.
- 15) García Alcocel, Eva María. Estudio del efecto de las condiciones de curado sobre la mineralogía y características resistentes en morteros de cemento aluminoso. 1997.
- 16) Gutiérrez de López, L. (2003). El concreto y otros materiales para la construcción. Departamento de Ingeniería Civil.
- 17) G. S. Rossikhina, N. N. Shcherbakova and M.P. Shchedrin. "Application of IR spectroscopy for studying structure formation in low-cement concretes". Translated from *Steklo i keramika*, No. 5, pp. 32-34, May, 2009. UDC 666.76:543.42
- 18) Neville, Adam M. *Tecnología del concreto*. Bookman Editora, 2013.
- 19) Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Bringas, M. S. (1992). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto.
- 20) Segura Terrones, L. A., Sigüenza Abanto, R. W., Solar Jara, M. Á., & Zamora Mondragón, J. E. (2022). Efecto del uso de vidrio reciclado en el diseño de concreto. *Revista Universidad y Sociedad*, 14(1), 179-192.
- 21) Batai Z., McIntyre M., Application of Fibrillated Polypropylene Fibers for Restraint of Plastic Shrinkage Cracking in Silica Fume Concrete, *ACI Materials Journal* July-August 2002.
- 22) Gopalaratnam V.S. Shah S.P. (1986) "Properties of steel fiber reinforced concrete subjected to impact load" *ACI Materials Journal*, January, February. pp.117-126. HERMIDA G., GARZÓN
- 23) Mindess, S., Vondran, G., "Properties of Concrete Reinforced with fibrillated polypropylene fibers under impact loading". *Cement and Concrete Research*, V. 8, pp. 109-115.
- 24) Tatnall P. (2002) "Shotcrete in Fires: Effects of fibers on explosive spalling" *Shotcrete ASA*, Fall p10-12.

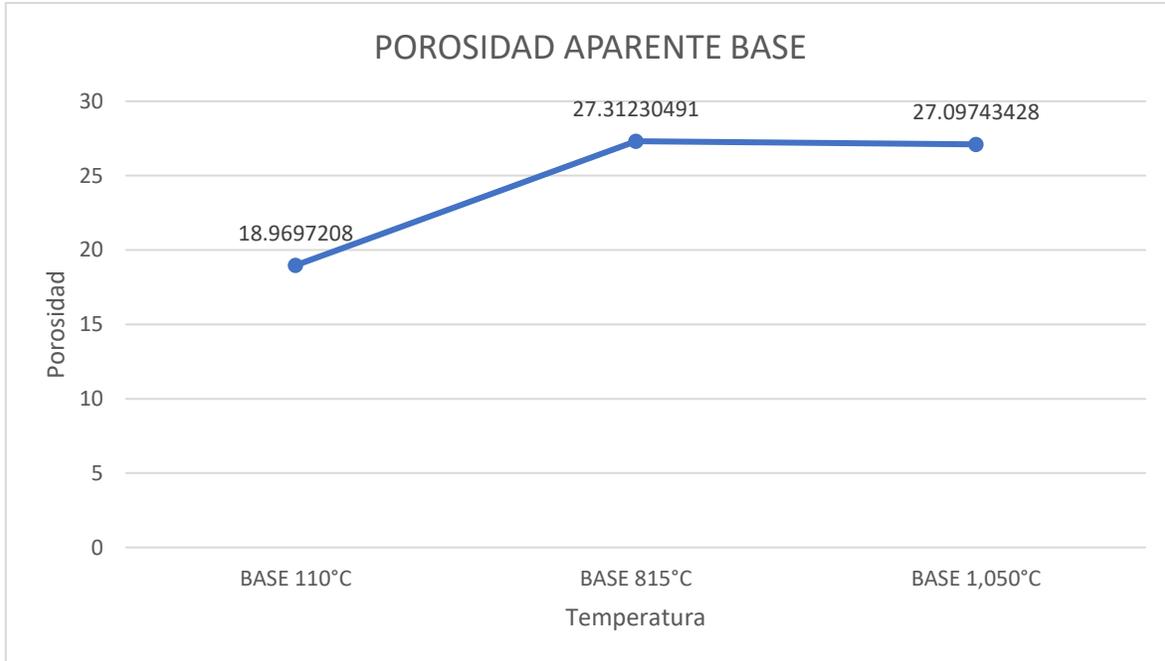
- 25) Ochi, T., Okubo, S., y Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448-455. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- 26) Foti, D. (2013). Use of recycled waste pet bottles fibers for the reinforcement of concrete. *Composite Structures*, 96, 396-404. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.019>
- 27) Borg, R., Baldacchino, O., & Ferrara, L. (2016). Early age performance and mechanical characteristics of recycled PET fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 108, 29-47.
- 28) Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1906-1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
- 29) Salomão, R., Cardoso, F.A., Innocentini M. y Pandolfelli, V. C. (2006). Effect of Polymeric Fibers on Refractory Castable Permeability. Recuperado 26 de julio de 2022, [\(PDF\) Effect of polymeric fibers on refractory castable permeability \(researchgate.net\)](#)
- 30) González, O. y Benavides W. (2021). Fibras de Polipropileno para reforzamiento de matrices cementicias: Una recopilación sobre fibras comercialmente disponibles. Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- 31) Villanueva, E. y Yaranga, H. (2015). Estudio de la influencia de fibras de polipropileno provenientes de plásticos reciclados en concretos de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ en el Distrito de Lircay, Provincia de Angaraes, Región Huancavelica.
- 32) Zamora Esparza, C. A. (2014). Influencia del uso de fibras de polipropileno fibromac en la resistencia a la compresión del concreto.
- 33) Luis, P., y David, J. (2018). Evaluación de la influencia de las fibras de polietileno en el diseño, construcción y durabilidad de pavimento de concreto en la ciudad de Cerro de Pasco-2017.
- 34) Diaz, R. y Huamani A. (2021) Determinación de resistencia por flexión para plantear reforzamiento del concreto en losas macizas con fibras polietileno y polipropileno, Lima.

- 35) Caballero, K. (2017). Propiedades mecánicas del concreto reforzado con fibras metálicas. Revista Prisma Tecnológico-Universidad Tecnológica de Panamá-Facultad de Ingeniería Civil, 18-23.
- 36) Gallegos, J. y Zevallos, O. (2021). Fibras recicladas de tereftalato de polietileno en las propiedades físico-mecánicas del concreto para bloques de albañilería en el Sur del Perú, Perú.
- 37) Quintero Pérez, Y. A. S. I. R., y Castro Sánchez, H. D. (2020). Influencia de las Fibras Metálicas, naturales (bagazo de caña de azúcar), sintéticas y de vidrio en el mejoramiento de las propiedades mecánicas del concreto (Doctoral Dissertation).
- 38) Foti, D. (2011). Preliminary analysis of concrete reinforced with waste bottles PET fibers. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1906–1915. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.066>
- 39) Campoy, N., Chávez, O., Zamora, S., Pérez, M. y Rojas E. (2017). Rigid pavements performance by means of the Implementation of fibers. Engineering department, Autonomous University of Queretaro, Mexico.
- 40) Salomão, R., Zambon, A. M., y Pandolfelli, V. C. (2006). Polymeric Fiber Geometry Affects Refractory Castable Permeability. *American Ceramic Society Bulletin*. Recuperado 26 de julio de 2022, https://www.researchgate.net/publication/286991569_Polymeric_fiber_geometry_affects_refractory_castable_permeability
- 41) Handbook Refractories. Capitulo 1 Properties of refractories. Subrata Banerjee. Answer technology, Ic., Wheaton, Illinois, U.S.A.
- 42) Evolución Tecnológica de los concretos refractarios Parte 1. Sistema CaO.SiO₂.Al₂O₃. Jose Luis Mendoza Bedolla. INFOCERAM Vol. 14 No. 1 de 2003 de la Sociedad Mexicana de Cerámica Zona-Norte.
- 43) J. L. Mendoza and R.E. Moore, “Air Permeability of Refractory Concretes”, Refractories Division, Fall Meeting of the American Ceramic Society. Bedford Spring, PA. October 8, 1983.
- 44) C. H. Lui, “Effect of Dopants and Cement Content on the Creep Behavior of Refractory Concretes”, Master Thesis, University of Missouri-Rolla, 1987

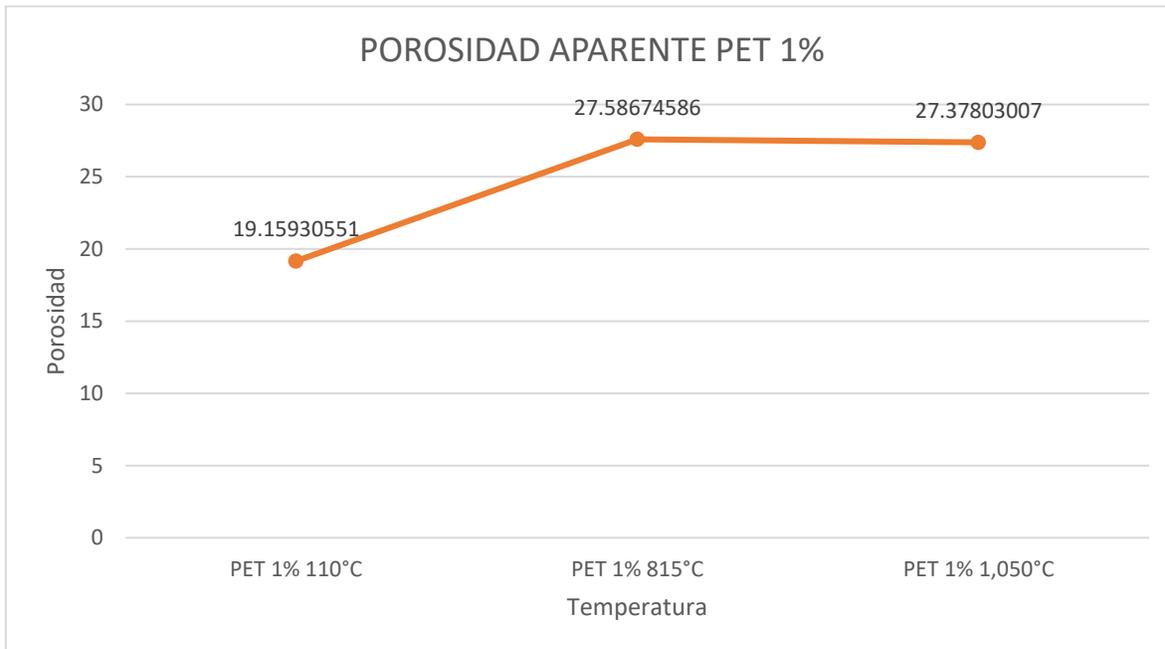
-
- 45) Choi YW, Moon DJ, Chung JS, Cho SK. Efectos del árido de botellas PET de desecho sobre las propiedades del hormigón. *Cemento Hormigón Res* 2005;35(4):776–81.
- 46) Yesilata B, Isiker Y, Turgut P. Mejora del aislamiento térmico en hormigones mediante la adición de residuos de PET y piezas de caucho. *Construir Construir Mater* 2009; 23 (5): 1878–82.
- 47) Marzouk OY, Dheilily RM, Queneudec M. Valorización de residuos plásticos posconsumo en compuestos de hormigón cementoso. *Waste Manage* 2007;27(2):310–8.
- 48) Vázquez-Martínez, L. (2016). Materiales porosos basados en mezclas de fibras y polvos cerámicos para aplicaciones refractarias.
- 49) Lugo-Mejía, J. E., & Torres-Pérez, Y. S. (2019). Caracterización del comportamiento mecánico del concreto simple con adición de fibras poliméricas recicladas PET.
- 50) Ochi, T., Okubo, S., y Fukui, K. (2007). Development of recycled PET fiber and its application as concrete-reinforcing fiber. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 448–455. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.02.002>
- 51) Moraño Rodríguez, A. J., & Guillén Viñas, J. L. (2010). Enfibrado de los materiales de construcción.

Capítulo 9 Anexos

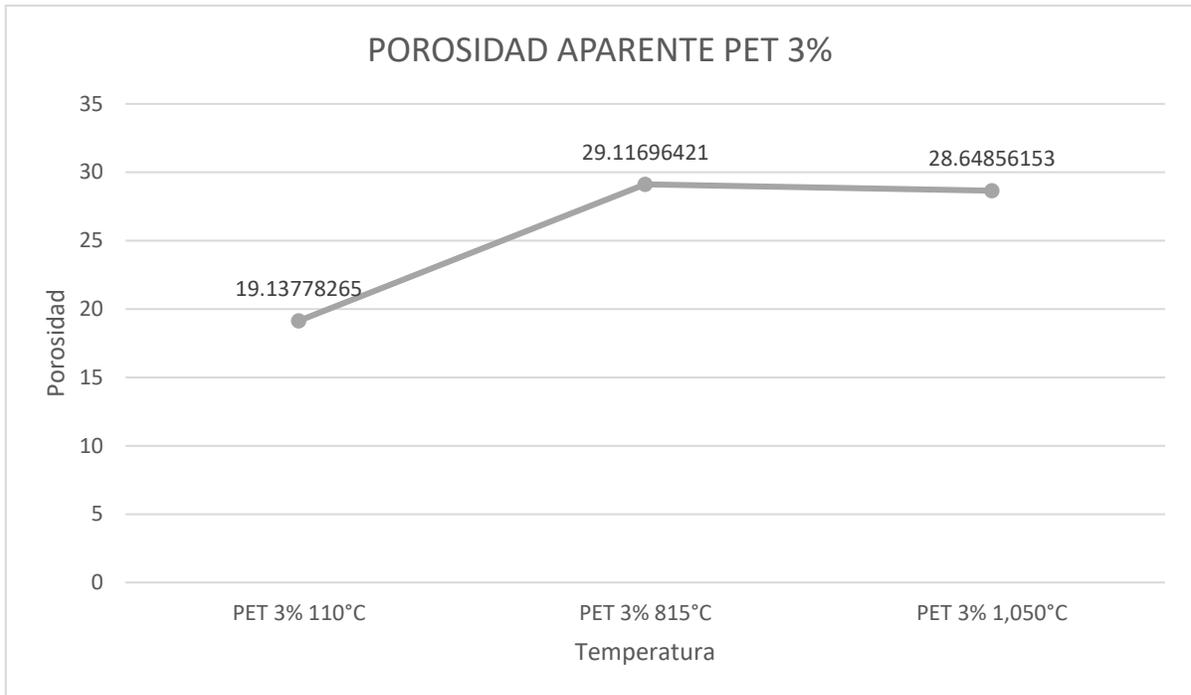
Ensayo de Porosidad



Gráfica 6. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestras Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



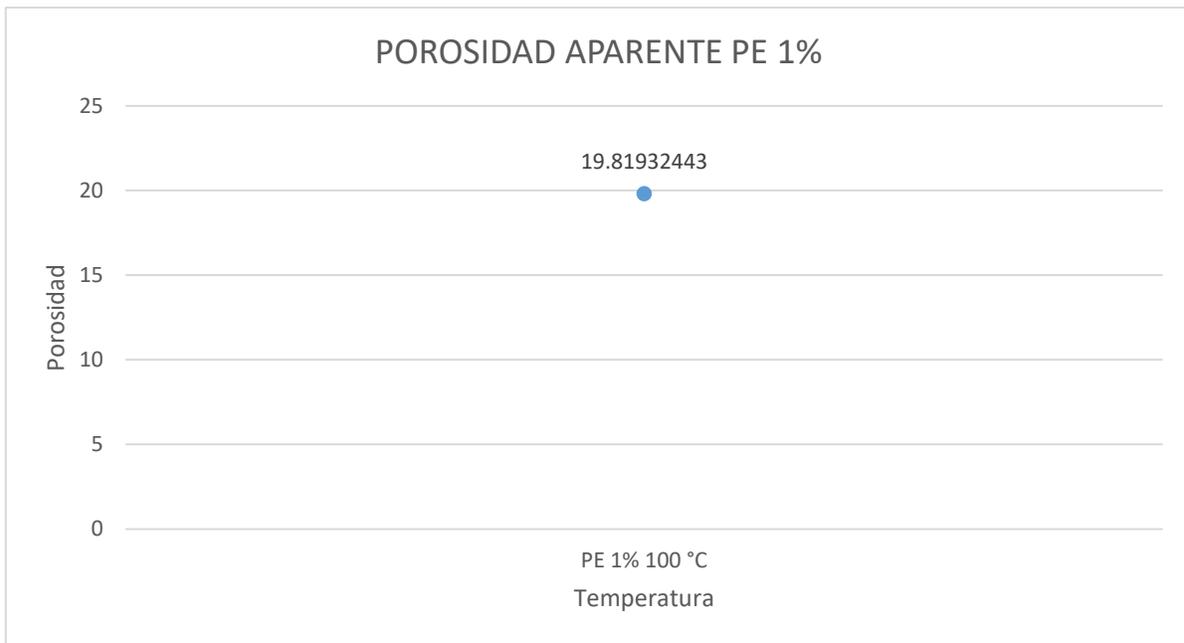
Gráfica 7. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



Gráfica 8. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

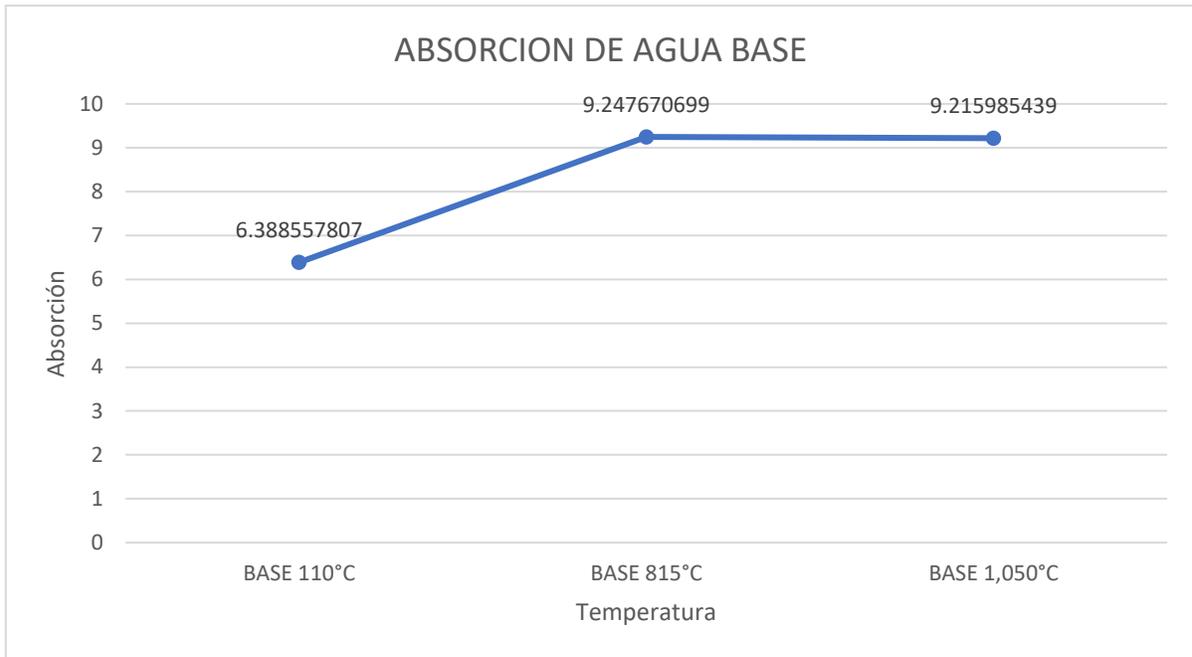


Gráfica 9. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestra con fibra de PP 1% con una temperatura de 110°C.

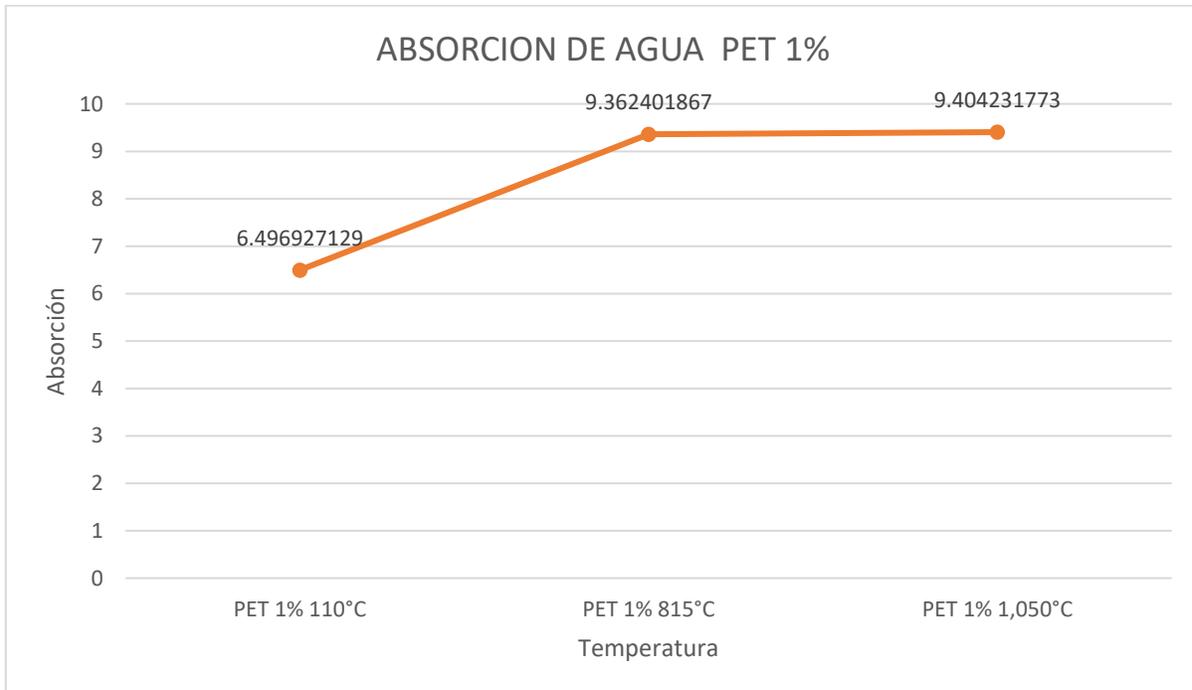


Gráfica 10. Resultados del Ensayo de Porosidad Aparente en muestra con fibra de PE 1% con una temperatura de 110°C.

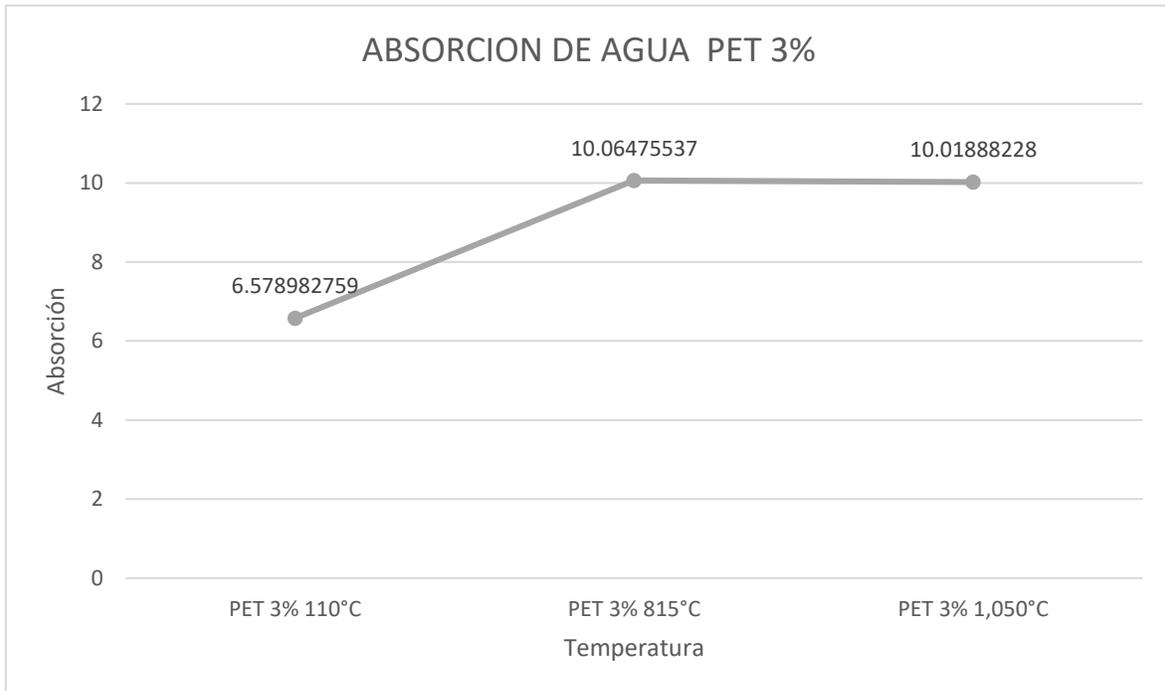
Ensayo de Absorción



Gráfica 11. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestra Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



Gráfica 12. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



Gráfica 13. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

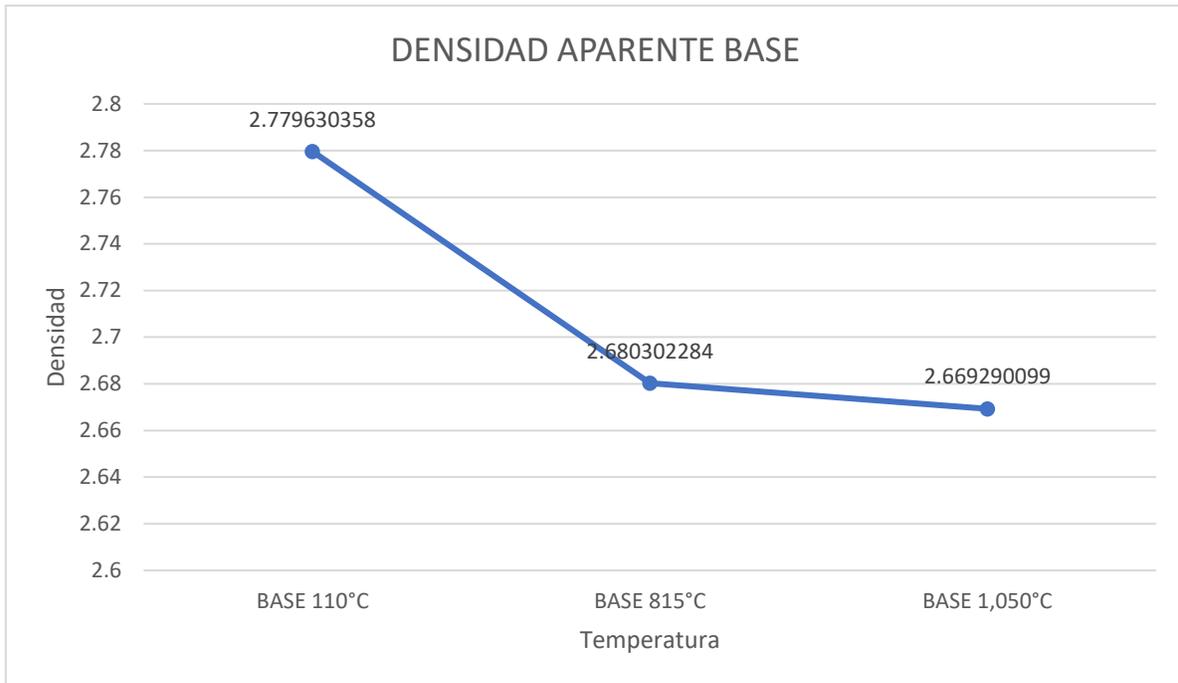


Gráfica 14. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestra con fibra de PP 1% con una temperatura de 110°C.

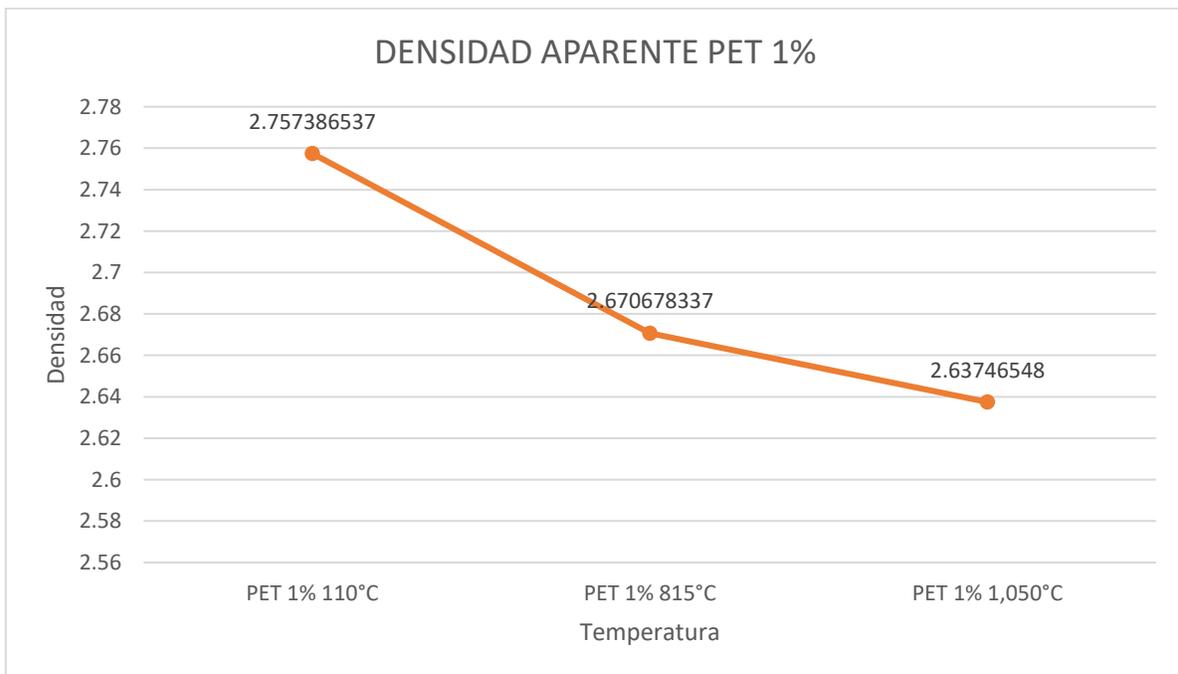


Gráfica 15. Resultados del Ensayo de Absorción de Agua en muestra con fibra de PE 1% con una temperatura de 110°C.

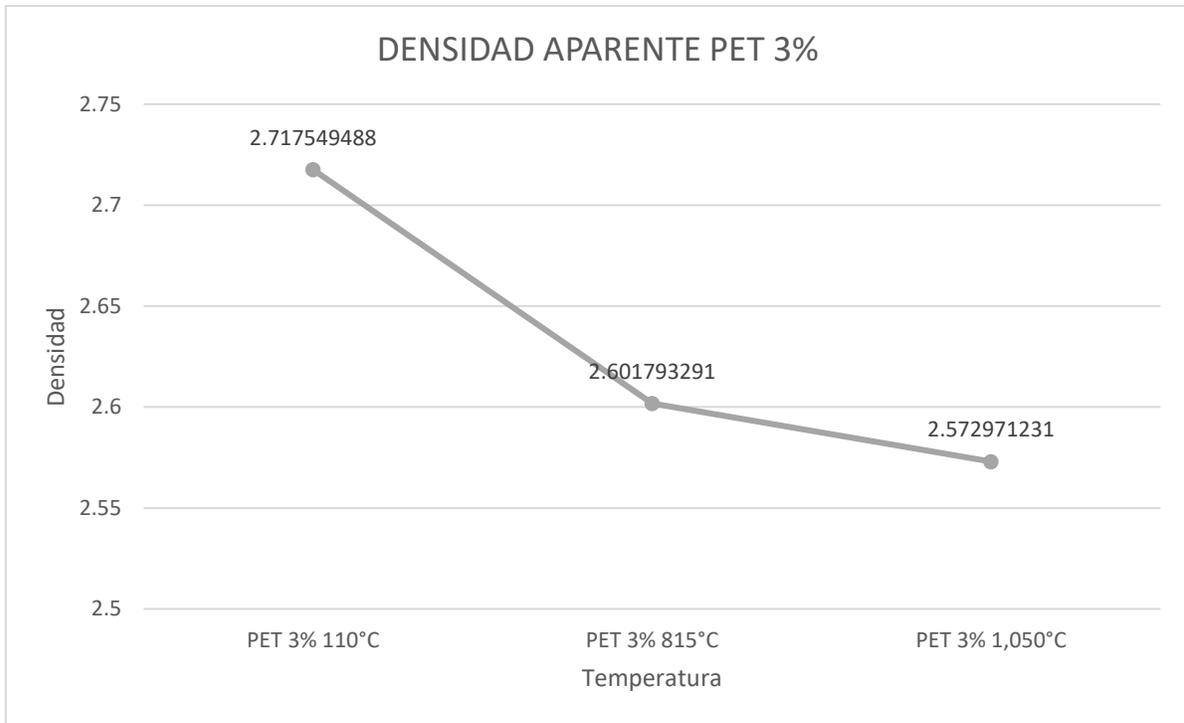
Ensayo de Densidad



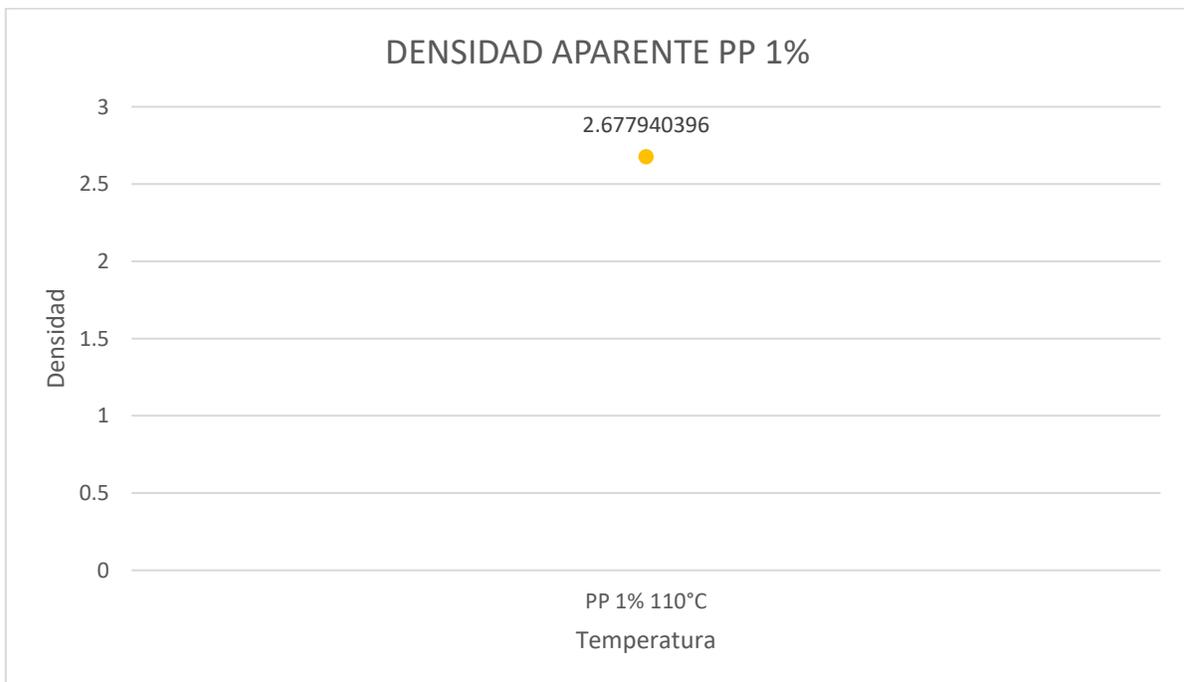
Gráfica 16. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestra Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



Gráfica 17. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



Gráfica 18. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.

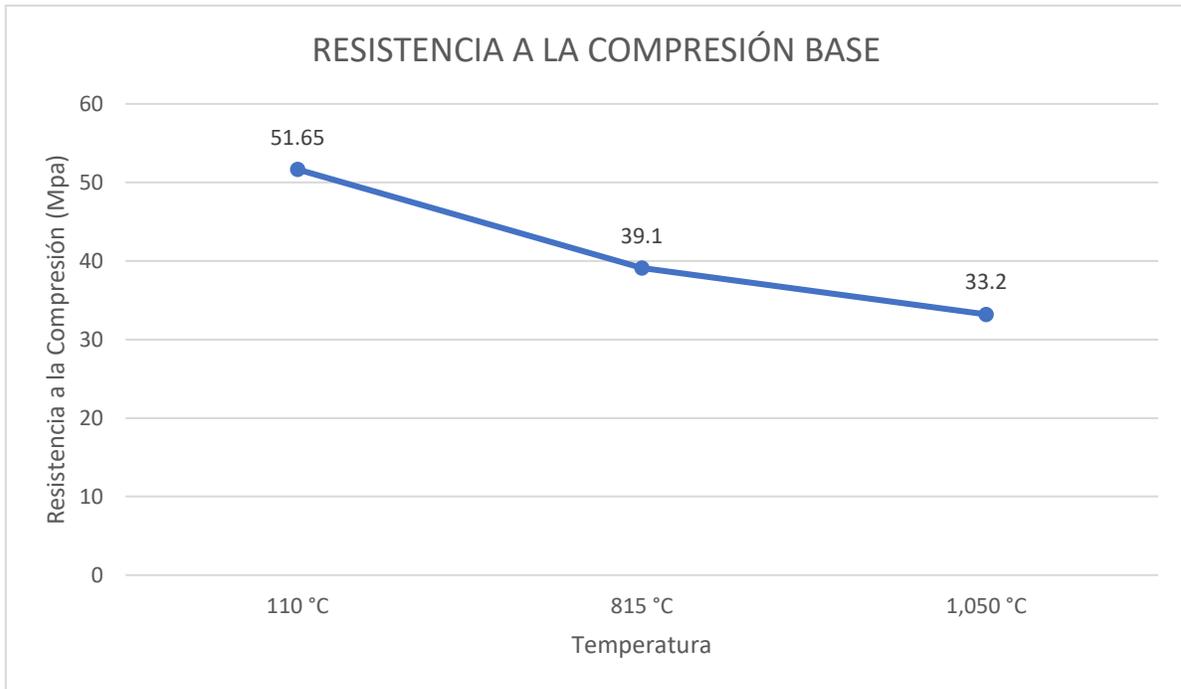


Gráfica 19. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestra con fibra de PP 1% con una temperatura de 110°C.

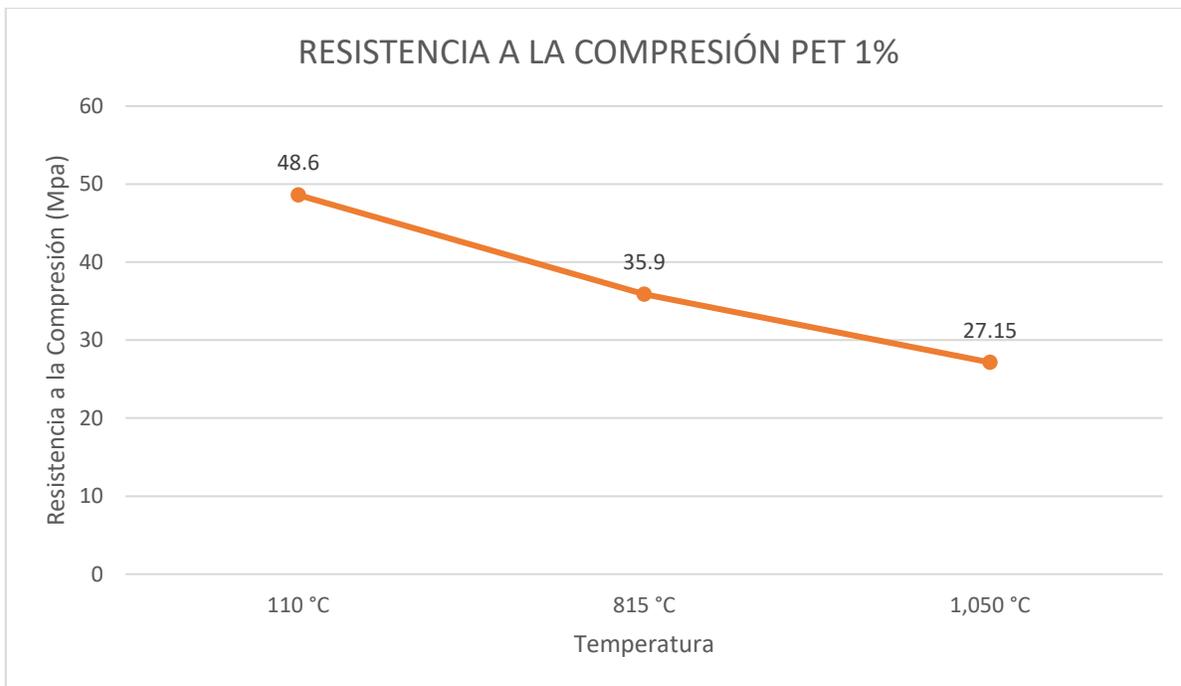


Gráfica 20. Resultados del Ensayo de Densidad Aparente en muestra con fibra de PE 1% con una temperatura de 110°C.

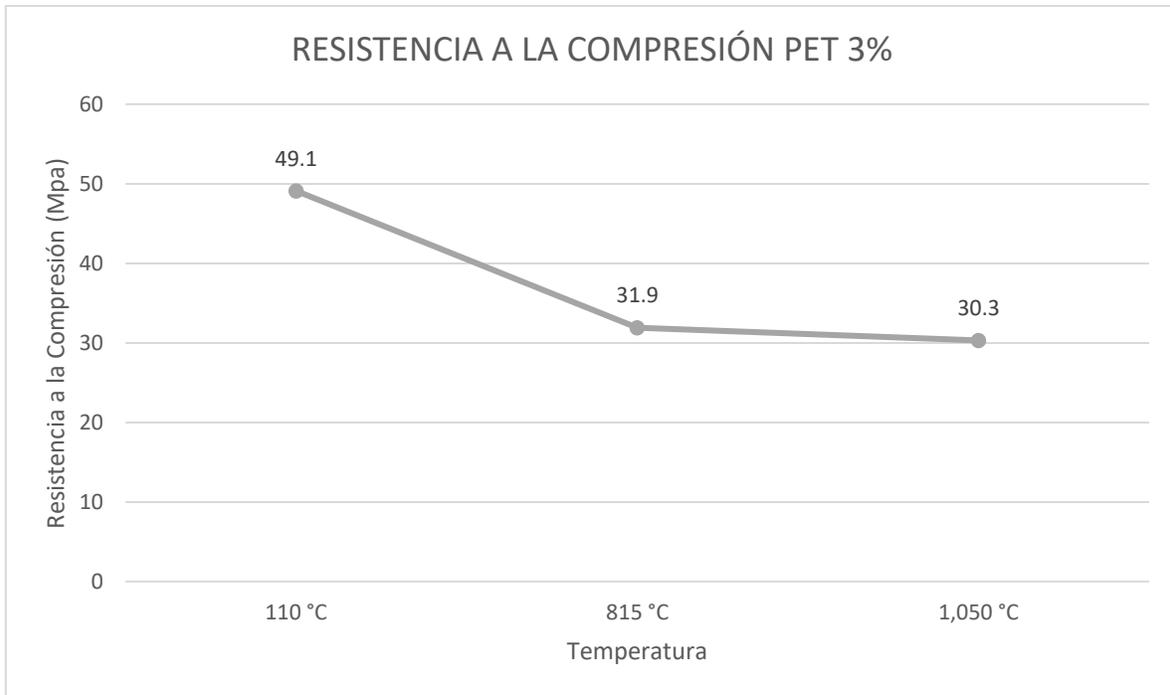
Ensayo de Compresión



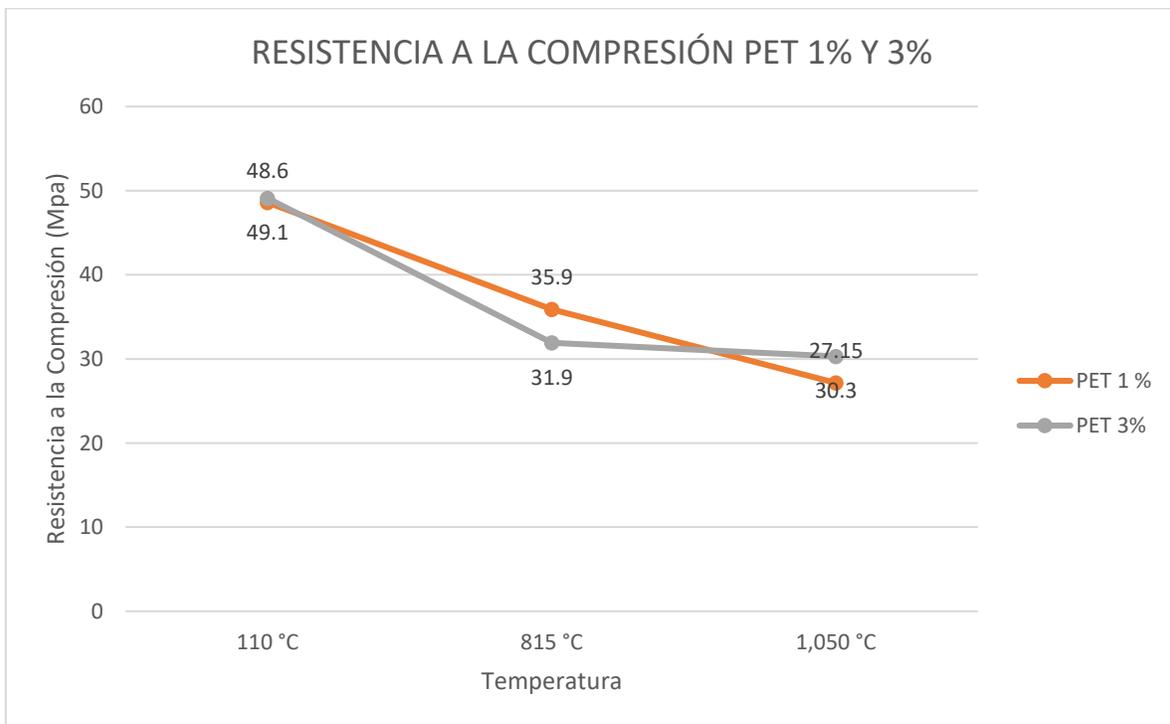
Gráfica 21. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestra Base con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



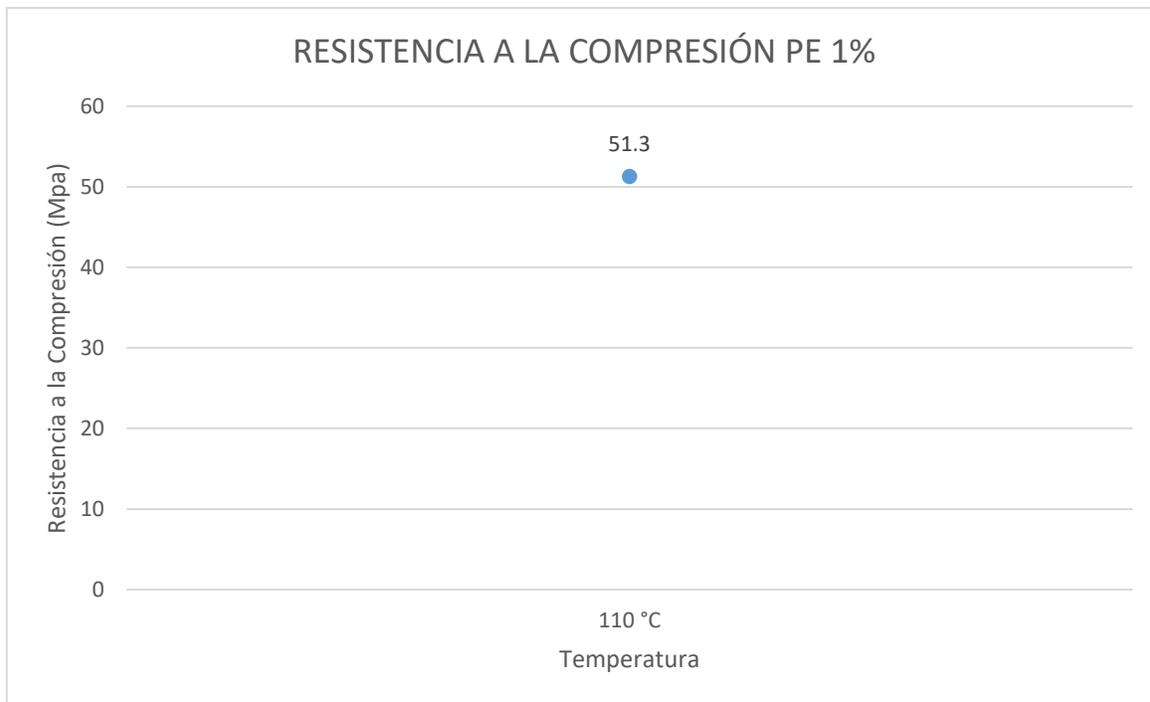
Gráfica 22. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PET 1% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



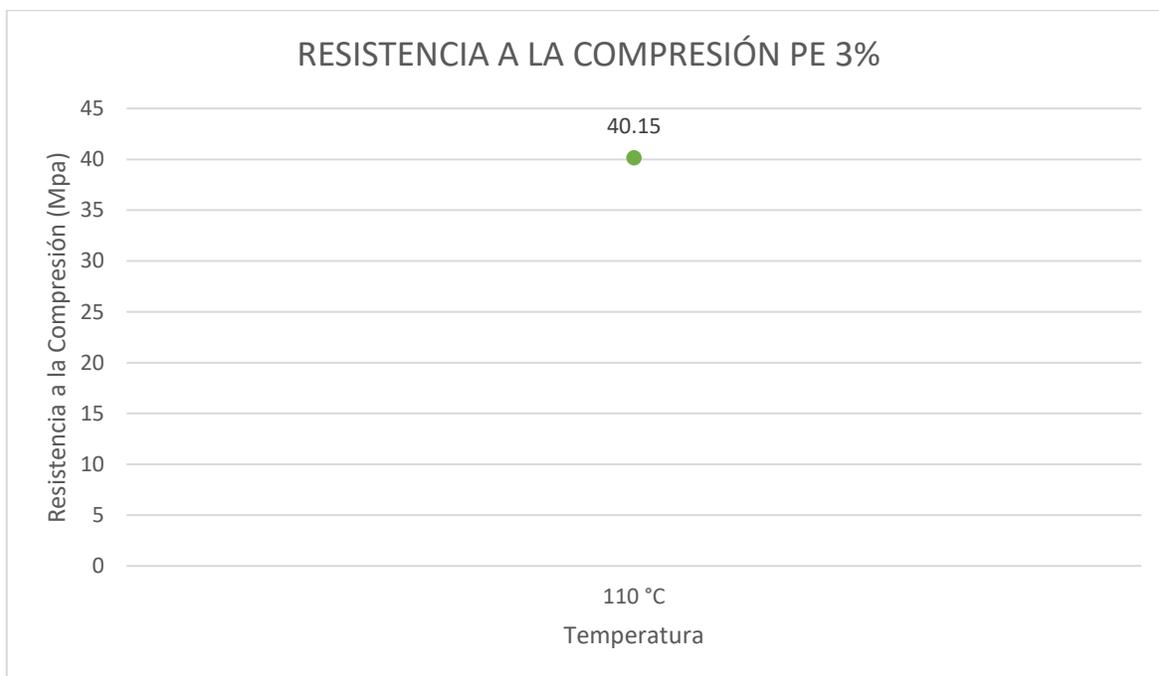
Gráfica 23. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PET 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



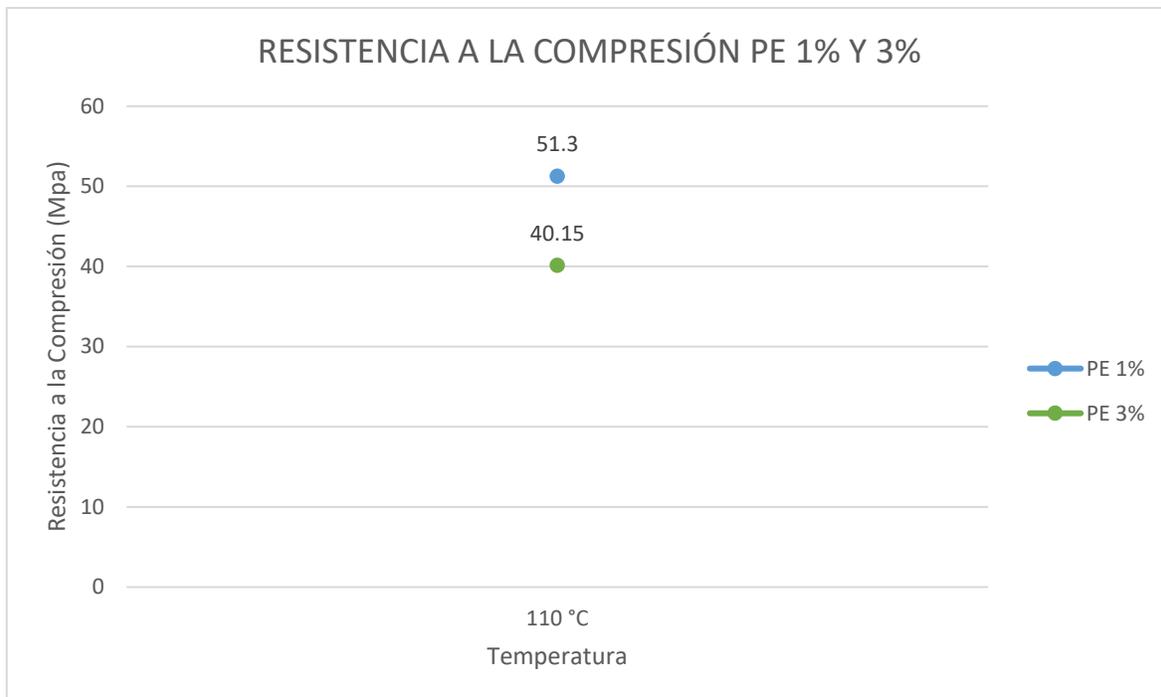
Gráfica 24. Comparación de Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PET 1% y 3% con las siguientes temperaturas: 110°C, 815°C y 1,050°C.



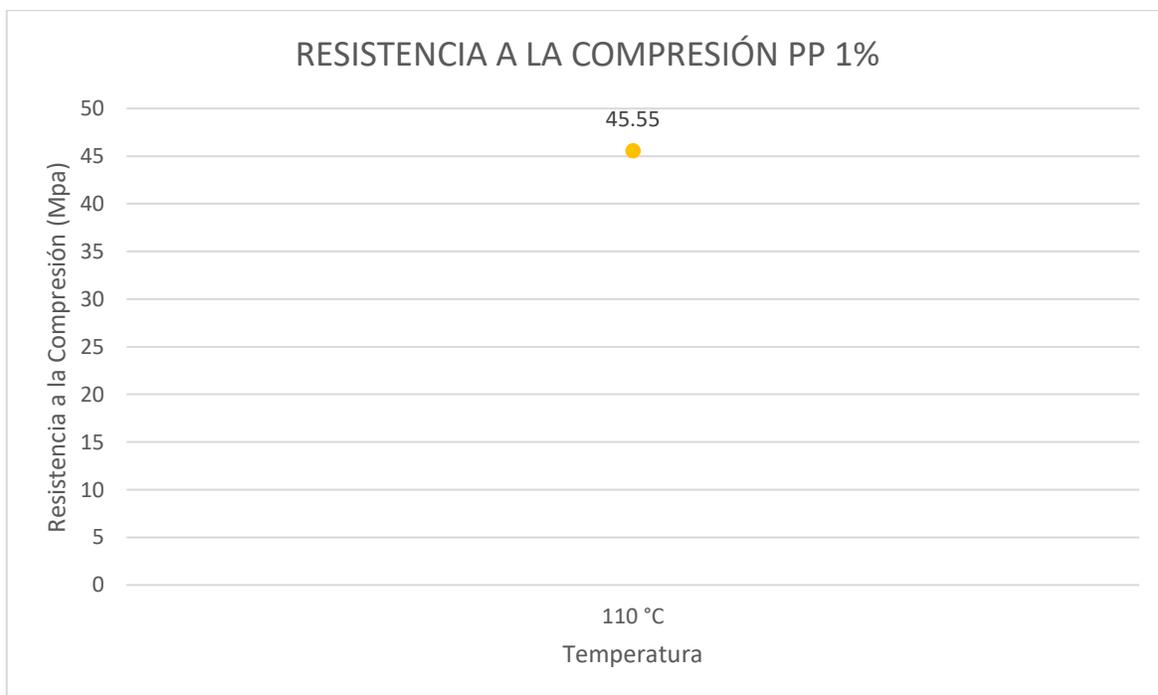
Gráfica 25. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PE 1% con una temperatura de 110°C.



Gráfica 26. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PE 3% con una temperatura de 110°C.



Gráfica 27. Comparación de Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PE 1% y 3% con una temperatura de 110°C.



Gráfica 28. Resultados del Ensayo de Resistencia a la Compresión en muestras con fibras de PP 1% con una temperatura de 110°C.