

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS Y COMPORTAMIENTO DE LA
SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO POR PARTÍCULAS DE PET
EN MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND

Tesis que presenta
Blanca Fernanda Arce Vázquez
como requisito parcial para obtener el grado de
Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

Director de tesis
Dr. José Manuel Mendoza Rangel

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Agosto, 2021



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

FECHA: 2021/07/27

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS Y COMPORTAMIENTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO POR PARTÍCULAS DE PET EN MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND”**, que presenta la **ING. BLANCA FERNANDA ARCE VÁZQUEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**. Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**.

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente
“Alere Flammam Veritatis”

Dr. José Manuel Mendoza Rangel
Evaluador



Av. Universidad S/N Cd. Universitaria Apdo. Postal 17
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México, C.P. 66450
Tels. (81) 14424400 ext. 6724 y 4447, 83294000 ext. 7216, 7284
www.ingenieriacivil.uanl.mx

FECHA: 2021/07/28

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **“VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS Y COMPORTAMIENTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO POR PARTÍCULAS DE PET EN MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND”**, que presenta la **ING. BLANCA FERNANDA ARCE VÁZQUEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**. Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **(APROBADO)**. Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,



DR. CÉSAR ANTONIO JUÁREZ ALVARADO

Evaluador

"2021: Año de la Independencia"



CINVESTAV-Mérida

Departamento de
Física Aplicada

DR. GERARDO FAJARDO SAN MIGUEL

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

PRESENTE.-

Estimado Dr. Fajardo San Miguel,

Por medio de la presente, hago de su conocimiento que he finalizado la revisión del documento de TESIS, cuyo título es **"VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS Y COMPORTAMIENTO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO POR PARTÍCULAS DE PET EN MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND"**, que presenta la **ING. BLANCA FERNANDA ARCE VÁZQUEZ**, como requisito parcial para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS**, del programa **MAESTRÍA EN CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**.

Por lo anterior, me permito informar a Usted que el documento **CUENTA** con la calidad y nivel **CIENTÍFICO**, adecuados para su defensa, por lo que dictamino que este trabajo sea **APROBADO**

Asimismo, anexo a este documento el formato de evaluación correspondiente, donde hago saber mis comentarios y observaciones al respecto.

Sin otro particular por el momento, me despido y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración que considere pertinente.

Atentamente,

Dr. Pedro Castro Borges

“2021: Año de la Independencia”



CINVESTAV-Mérida

Departamento de
Física Aplicada

Evaluador

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



VALORIZACIÓN DE LOS EFECTOS Y COMPORTAMIENTO DE LA
SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL AGREGADO FINO POR PARTÍCULAS DE PET
EN MORTEROS BASE CEMENTO PORTLAND

Tesis que presenta
Blanca Fernanda Arce Vázquez
como requisito parcial para obtener el grado de
Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción

Director de tesis
Dr. José Manuel Mendoza Rangel

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México
Agosto, 2021

Resumen

En el presente estudio se reportan los efectos que la sustitución del 5, 10, 15, 20 y 30 % (volumen) del agregado fino (AF) por partículas de plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) menores a 4.75 *mm* tiene en propiedades en estado fresco, mecánicas y térmicas de morteros base cemento portland con y sin aditivo reductor de aire. Así mismo se evaluaron algunos indicadores de calidad de este tipo de materiales mediante el uso de técnicas como velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica y absorción capilar.

Los resultados obtenidos mostraron que conforme aumenta el porcentaje de sustitución del AF por partículas PET la fluidez y la densidad de los morteros tienden a disminuir y el contenido de aire aumenta. Con respecto a la resistencia a la compresión esta disminuye según incrementa la cantidad de partículas PET en los morteros, debido a la baja adherencia entre las partículas PET con el resto de la matriz, la resistencia a la compresión disminuyó de 40 MPa hasta 29 MPa debido a la sustitución del 30 % del volumen del AF. En relación con la conductividad térmica, la inclusión de partículas PET dentro de los morteros propicia que este parámetro disminuya conforme incrementa la cantidad de partículas PET, es decir, se obtienen morteros con propiedades aislantes.

Abstract

The present study reports the effects that the substitution of 5, 10, 15, 20 and 30% (volume) of the fine aggregate (AF) by plastic particles of polyethylene terephthalate (PET) smaller than 4.75 *mm* have in fresh, mechanical, and thermal properties of portland cement-based mortars with and without air-detraining admixture. Likewise, some quality indicators of this type of materials were evaluated using techniques such as ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, and capillary absorption.

The results obtained show that as the percentage of substitution of AF by PET particles increases, the flow and density of the mortars tend to decrease, and the air content increases. Regarding the compressive strength, this tend to decrease the amount of PET particles in the mortars increases, due to the low adherence between the PET particles with the rest of the matrix, the compressive strength decreased from 40 MPa to 29 MPa due to the replacement of 30% of the volume of the AF. In relation to thermal conductivity, the inclusion of PET particles within mortars made this parameter to decrease as the amount of PET particles increases and mortars with insulating properties are obtained.

Dedicatoria

Le dedico este trabajo a mi amada familia.
Papá, mamá, hermanas los amo siempre.

Agradecimientos

Agradezco infinitamente a mi papá Agustín Arce, a mi mamá Blanca Estela Vázquez y a mis hermanas Daniela y Esmeralda Arce, gracias por su amor y apoyo incondicional.

Un agradecimiento especial a mi tía Caty Mazatán y a mi prima Caty Arce y a mi amiga Mercy Serena, gracias por su todo su apoyo y por estar cuando más las necesitaba.
Gracias, gracias, gracias.

Agradezco sinceramente a mi asesor el Dr. José Manuel Mendoza, por confiar en mí y guiarme con paciencia para la conclusión de este trabajo.

Un agradecimiento a la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la plantilla de académicos de la Maestría en Ciencias con Orientación en Materiales de Construcción de la Facultad de Ingeniería Civil, en especial al Dr. Ismael Flores, que estuvo presente cada semestre siempre con la mejor disponibilidad, al Dr. Alejandro Durán que además de su tiempo de docencia posibilitó el desarrollo experimental de este trabajo y al Dr. César Juárez por formar parte del comité evaluador de este proyecto.

Agradezco al Dr. Pedro Castro, por participar como parte del comité evaluador, pero sobre todo por animarme y estar ahí respaldándome y tomándome en cuenta desde empezamos a colaborar juntos hace seis años. Le agradezco mucho y no se me olvida.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca No. CVU 890692 que permitió mi formación académica y el desarrollo de este trabajo.

Finalmente agradezco a todo el personal del Instituto de Ingeniería Civil que, a pesar de las condiciones extraordinarias a las que nos vimos forzados a trabajar siempre fueron amables y me brindaron la ayuda necesaria para el desarrollo de este trabajo. Del laboratorio de materiales, Sr. Gumaro, Aurora, Meraly; del laboratorio de Tecnología del Concreto, Beto, Ing. Alejandro, del laboratorio de ecomateriales, Dr. Isaías, Daniel y a todos los que forman parte del dpto. de verificación de materiales, gracias.

Abreviaturas y símbolos utilizados

Tabla 1: Abreviaturas y símbolos.

Unidad	Lectura
%	Porcentaje
°C	Grado centígrado
μm	Micrómetro
Å	Armstrong
cm	Centímetro
cm/s	Centímetro sobre segundo
g	Gramo
g/cm^3	Gramo sobre centímetro cúbico
g/L	Gramo sobre litro
g/m^3	Gramo sobre metro cúbico
g/ml	Gramo sobre mililitro
g/mm^3	Gramo sobre milímetro cúbico
K	Kelvin
kg/m^3	Kilogramo sobre metro cúbico
kGy	Kilogray
$k\Omega \cdot cm$	Kilohm por centímetro
m/s	Metro sobre segundo
mm	Milímetro
$mm/s^{1/2}$	Milímetros sobre raíz cuadrada de segundo
m^2/s	Metro cuadrado sobre segundo
MPa	Megapascal
nm	Nanómetro
s	Segundo
$W/m \cdot K$	Watt sobre Kelvin por metro

Tabla 2: Abreviaturas y símbolos.

Símbolo	Significado	Unidad
ACI	American Concrete Institute	Adim
ASTM	American Society of Testing Materials	Adim
A	Área de la sección transversal	mm^2
a	Área expuesta del espécimen	mm^2
a/c	Relación agua cemento	Adim
CPO	Cemento Portland Ordinario	Adim
d	Densidad del agua	g/mm^3
d_s	Densidad en estado endurecido	kg/m^3
I	Tasa de absorción	$mm/s^{1/2}$
k	Difusividad térmica	mm^2/s
K	Conductividad térmica	$W/m \cdot K$
K	Coeficiente de permeabilidad	cm/s
L	Distancia entre dos puntos	m
L	Espesor de la muestra	mm
LOI	Loss on Ignition (Pérdida por ignición)	Adim
m_s	Masa del espécimen seco	g
m_t	Masa del espécimen después de un tiempo determinado	g
PET/PETE	Tereftalato de polietileno	Adim
T	Tiempo	s
V	Velocidad de pulso ultrasónico	m/s
v	Volumen de espécimen	mm^3
W_0	Peso inicial del espécimen (espécimen seco)	g
$\bar{x}$	Promedio	Adim

Índice general

Dedicatoria	7
Agradecimientos	9
Abreviaturas y símbolos utilizados	11
1. Introducción	19
2. Generalidades	21
2.1. Concretos y morteros base cemento portland	21
2.1.1. Propiedades del concreto y mortero en estado fresco	22
2.1.2. Propiedades del concreto y mortero en estado endurecido	24
2.2. Deterioro del concreto y mortero	26
2.2.1. Indicadores de calidad de concretos y morteros	27
2.3. Plásticos	31
2.3.1. Microplásticos	32
2.3.2. Tereftalato de polietileno	33
3. Antecedentes	37
3.1. Partículas PET en concreto o mortero	37
3.2. Propiedades en estado fresco	42
3.3. Propiedades mecánicas	44
3.4. Propiedades físicas	50
3.5. Indicadores de calidad	53
4. Hipótesis y objetivos	59
4.1. Hipótesis	59
4.2. Objetivos	59
4.2.1. Objetivo general	59
4.2.2. Objetivos específicos	59
5. Metodología experimental	61
5.1. Materiales	61
5.2. Dosificación de morteros	62

5.3. Especímenes	63
5.4. Técnicas para la caracterización de los morteros	64
5.5. Técnicas para la evaluación de indicadores de calidad	67
6. Resultados y discusión	71
6.1. Materiales	71
6.1.1. Caracterización del cemento portland ordinario	71
6.1.2. Caracterización del agregado fino y partículas PET	71
6.2. Caracterización de mezclas de morteros	73
6.2.1. Contenido de aire	74
6.2.2. Densidad en estado fresco	76
6.2.3. Fluidez	77
6.2.4. Densidad en estado endurecido	78
6.2.5. Resistencia a la compresión	79
6.2.6. Conductividad térmica	84
6.3. Evaluación de indicadores de calidad	87
6.3.1. Velocidad de pulso ultrasónico	87
6.3.2. Resistividad eléctrica	90
6.3.3. Absorción capilar	92
6.3.4. Inspección visual	94
7. Conclusiones	97
8. Recomendaciones	99
A. Resultados	101
A.1. Contenido de aire	101
A.2. Densidad en estado fresco	101
A.3. Densidad en estado endurecido	102
A.4. Resistencia a la compresión	102
A.5. Conductividad térmica	103
A.6. Velocidad de pulso ultrasónico	103
A.7. Resistividad eléctrica	104
A.8. Absorción capilar	105
A.9. Inspección visual	105
Bibliografía	107

Índice de figuras

1.1. Distribución mundial de residuos sólidos municipales [99].	19
2.1. Factores que influyen en la trabajabilidad y fluidez [2].	23
2.2. Propiedades mecánicas más evaluadas en concretos y morteros.	25
2.3. (i) Microplásticos primarios: Pellets de polipropileno. (ii) Microplásticos secundarios: Partículas de tereftalato de polietileno (subproducto del reciclaje de botellas).	32
2.4. Estructura química del tereftalato de polietileno (PET).	33
2.5. Ejemplos de recipientes de PET [37].	33
2.6. Símbolo de reciclaje del PET.	35
3.1. Partículas PET utilizadas por diferentes autores. De izquierda a derecha [52,66,67,69,71].	38
3.2. Valores de la resistencia a la compresión reportados por diversos autores.	46
3.3. Valores de la resistencia a la tensión reportados por diversos autores.	48
3.4. Módulo de elasticidad reportado por diversos autores.	49
3.5. Valores de la resistencia a la flexión reportados por diversos autores.	49
3.6. Valores de la velocidad de pulso reportados por diversos autores.	56
3.7. Valores del porcentaje de absorción de agua reportados por diversos autores.	58
5.1. Partículas PET subproducto del reciclaje de botellas.	62
5.2. Curado de especímenes de mortero.	63
5.3. Prácticas y procedimientos para la caracterización para las mezclas de mortero.	64
5.4. Ensayo de fluidez de mezclas de mortero.	65
5.5. Medición de conductividad térmica en espécimen de mortero.	66
5.6. Medición de velocidad de pulso en especímenes de mortero.	67
5.7. Medición de resistividad eléctrica en especímenes de mortero.	68
5.8. Esquema del ensayo de absorción capilar.	68
5.9. Pendientes para la determinación de la absorción inicial y secundaria.	69
6.1. Distribución granulométrica del agregado fino (AF) y partículas PET (PET). *L.I. Límite inferior. *L.S. Límite superior.	72
6.2. Partículas PET utilizadas en la investigación.	72
6.3. Análisis FTIR de partículas PET.	73
6.4. Contenido de aire de mezclas de mortero con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	74

6.5. Densidad en estado fresco de mezclas de mortero con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	76
6.6. Fluidez de mezclas de mortero con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire). *Clasificación de morteros según su fluidez [6].	77
6.7. Densidad en estado endurecido de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	79
6.8. Resistencia a la compresión a los 28 días de edad de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	80
6.9. Desarrollo de resistencia a compresión de morteros sin aditivo (7, 28, 56 y 160 días). . .	80
6.10. Desarrollo de resistencia a compresión de morteros con aditivo (7, 28, 56 y 160 días). .	81
6.11. Variación de la resistencia a la compresión (28 días) en función del porcentaje de sustitución reportada por diversos autores y en el presente estudio.	82
6.12. Distribución granulométrica de las partículas PET utilizadas por diversos autores y en el presente estudio. *L.I. Límite inferior. *L.S. Límite superior.	83
6.13. Conductividad térmica de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	85
6.14. Valores de conductividad térmica reportados por Akçaözöglü et al. [74] y los registrados en el presente estudio (se gráfica la conductividad térmica de los morteros sin aditivo en condición “seco”).	86
6.15. Variación de la conductividad térmica en función de la densidad de los morteros. . . .	86
6.16. Velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de edad de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	87
6.17. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico (28 días) en función del porcentaje de sustitución reportada por diversos autores y en el presente estudio.	88
6.18. Variación de la velocidad de pulso ultrasónico de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire) en función del tiempo (7, 14, 28 y 133 días).	89
6.19. Variación de la resistividad eléctrica de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire) en función del tiempo (7, 14, 28 y 140 días).	90
6.20. . Tasa de absorción de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire). .	92
6.21. Absorción inicial de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire). .	93
6.22. Absorción secundaria de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).	93
6.23. Inspección visual de especímenes de mortero con y sin aditivo (1/3).	95
A.1. Inspección visual de especímenes de mortero con y sin aditivo (2/3).	105
A.2. Inspección visual de especímenes de mortero con y sin aditivo (3/3).	106

Índice de tablas

1.	Abreviaturas y símbolos.	11
2.	Abreviaturas y símbolos.	12
2.1.	Clasificación del concreto y mortero según su densidad [8,9].	22
2.2.	Clasificación de la consistencia de los mortero según su fluidez [6].	23
2.3.	Clasificación de la trabajabilidad del concreto según su revenimiento [23].	23
2.4.	Características del aire atrapado y aire incluido en matrices de cemento portland [2].	24
2.5.	Clasificación de matrices según resistencia a la compresión [5].	25
2.6.	Agentes físicos de deterioro del concreto y mortero [2,17].	26
2.7.	Agentes químicos de deterioro del concreto y mortero [2,19].	27
2.8.	Agentes biológicos de deterioro del concreto y mortero [2].	27
2.9.	Criterios de evaluación según velocidad de pulso [20].	28
2.10.	Clasificación de poros presentes en concretos o morteros [17].	29
2.11.	Criterios de evaluación según porosidad total [17].	30
2.12.	Criterios de evaluación de una matriz base cemento portland según resistividad eléctrica [26].	30
2.13.	Clasificación de termoplásticos [29,30].	32
3.1.	Tamaño de partículas PET, porcentajes y tipos de sustitución estudiados por diversos autores.	40
3.2.	Tamaño de partículas PET, porcentajes y tipos de sustitución estudiados por diversos autores.	41
3.3.	Propiedades en estado fresco evaluadas por diversos autores.	43
3.4.	Propiedades mecánicas evaluadas por diversos autores.	45
3.5.	Propiedades físicas evaluadas por diversos autores (1/2).	50
3.6.	Propiedades físicas evaluadas por diversos autores (2/2).	51
3.7.	Indicadores de durabilidad reportados por diversos autores (1/2).	53
3.8.	Indicadores de durabilidad reportados por diversos autores (2/2).	53
5.1.	Registro de incremento de masa [92].	69
6.1.	Características del cemento.	71
6.2.	Características del agregado fino y las partículas PET.	73
A.1.	Valores del contenido de aire de las mezclas de mortero con y sin aditivo.	101

A.2. Valores de la densidad en estado fresco de las mezclas de mortero con y sin aditivo. . .	101
A.3. Valores de la densidad en estado endurecido de morteros con y sin aditivo.	102
A.4. Valores de la resistencia a la compresión de morteros con partículas PET sin aditivo. .	102
A.5. Valores de la resistencia a la compresión de morteros con partículas PET con aditivo. .	102
A.6. Valores de conductividad de morteros con y sin aditivo (condición “seco”, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). .	103
A.7. Valores de conductividad de morteros con y sin aditivo (condición “saturado”, $23 \pm 2^\circ\text{C}$). 103	
A.8. Valores de la velocidad de pulso ultrasónico de morteros con partículas PET sin aditivo.	103
A.9. Valores de la velocidad de pulso ultrasónico de morteros con partículas PET con aditivo.	104
A.10. Valores de la resistividad eléctrica de morteros con partículas PET sin aditivo.	104
A.11. Valores de la resistividad eléctrica de morteros con partículas PET con aditivo.	104
A.12. Valores de la absorción inicial ($R > 0.98$) y absorción secundaria ($R < 0.98$) de morteros con y sin aditivo.	105

Capítulo 1

Introducción

El estudio, la incorporación y uso de materiales alternativos que contribuyan a una reducción del impacto ambiental es una práctica cada vez más adoptada por la industria de la construcción (Ej. Ceniza volante, residuos vegetales, residuos cerámicos, ceniza de bagazo de caña, escoria granulada de alto horno, etc [98]), práctica derivada de la actual crisis ambiental a la que se enfrenta el planeta.

Por otro lado, el exceso de materiales plásticos que el ser humano consume es tal que, los desechos generados por estos representan un riesgo contundente al ecosistema (véase Fig. 1.1). Los residuos plásticos son el 12 % del total de los residuos sólidos municipales generados en el mundo y en México, un estudio realizado en el año 2011 estimó que los residuos plásticos representaban el 13.2 % del total de los residuos sólidos generados en la ciudad de México [100].

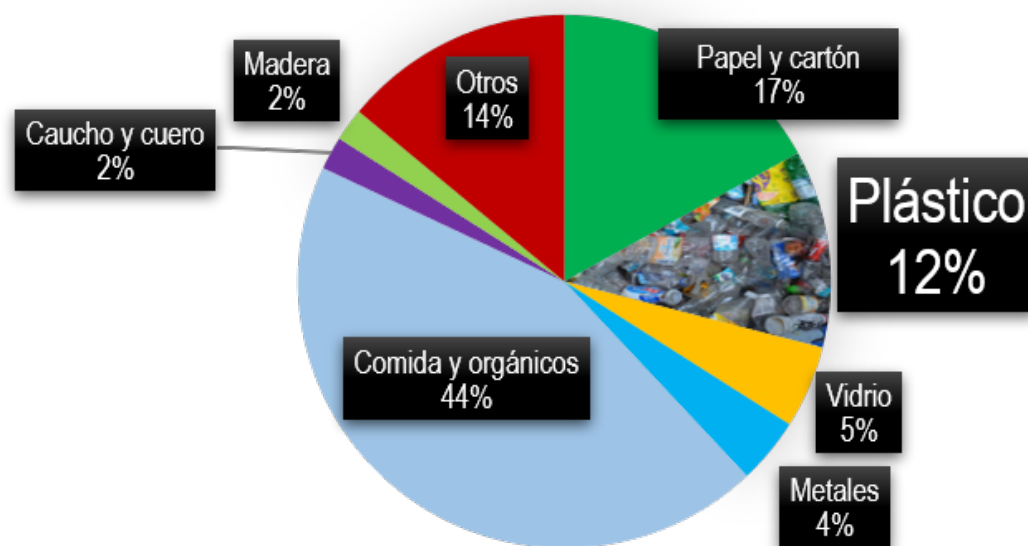


Figura 1.1: Distribución mundial de residuos sólidos municipales [99].

Además del “sobresock”, su gravedad radica en el prolongado tiempo de degradación¹ y el alto volumen de ocupación.

Como una de las soluciones, diversos investigadores han propuesto la incorporación de diversos tipos de plásticos en una matriz cementante [46–48]. Sin embargo, antes de que esta pueda considerarse una práctica viable, y, considerando las propiedades específicas y características de durabilidad de matrices convencionales base cemento portland (concreto o mortero), la inclusión de plástico reciclado en este tipo de matrices debe ser altamente estudiada.

Hasta ahora, la mayoría de los estudios se enfocan en el análisis de las propiedades físicas y mecánicas de concreto o mortero con residuos PET a edades tempranas, en donde identifican la posibilidad de fabricar un material ligero, con buenas propiedades mecánicas que además se convierta en una alternativa más para el manejo de este tipo de residuos, sin embargo, aún se requieren estudios que exploren la viabilidad de esta práctica en cuestiones de la calidad del material, optimización de materiales, comportamiento a edades tardías, entre otros.

El trabajo que se describe en este documento plantea el uso partículas menores a 4.75 *mm* de plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) como sustituto parcial del agregado fino en morteros base cemento portland. Estas partículas que encajan en la definición de “microplásticos” son un residuo sólido subproducto del reciclaje de botellas del mismo material, es decir, son residuos que se generan durante el proceso del reciclaje de este material y que por su tamaño difícilmente se les puede considerar para otro posible uso.

La presente investigación se enfoca en el estudio de las propiedades en estado fresco y endurecido y en la determinación y análisis de indicadores de calidad de morteros que incorporan diferentes porcentajes de partículas PET (5, 10, 15, 20 y 30 % de sustitución del volumen del agregado fino por partículas PET).

¹Se estima que a menos que hayan sido reciclados o incinerados, todos los plásticos que se han fabricado hasta ahora todavía existan de una u otra manera [39].

Capítulo 2

Generalidades

Con el objetivo de brindar al lector una mejor comprensión sobre lo realizado en la presente investigación, en este capítulo se describen de manera breve conceptos y terminologías básicas relacionadas con el trabajo.

2.1. Concretos y morteros base cemento portland

Por definición los cementos son materiales aglutinantes capaces de unir o juntar partículas sólidas en un todo compacto [1].

El cemento portland es un polvo fino compuesto principalmente por óxido de calcio (CaO), óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O_3) [1]. Es un cemento hidráulico dado que, cuando se mezcla con agua forma una pasta que endurece debido a las reacciones químicas que se generan entre el agua y los compuestos que conforman al cemento ($C-S-H$, $Ca(OH)_2$, AFt y AFm) [2]. En la actualidad existen una amplia variedad de tipos de cemento portland los cuales tienen diferentes composiciones químicas que permiten satisfacer los requerimientos para aplicaciones determinadas. Los diferentes tipos de cemento portland pueden ser consultados en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 [3] y en la especificación ASTM C150 [4].

Comúnmente el cemento portland es utilizado para la fabricación de mortero y concreto, que se utilizan como materiales de construcción por su bajo costo, versatilidad, alta resistencia mecánica y durabilidad (con respecto a otros materiales de construcción), características que los hacen los materiales más usados en la industria de la construcción¹.

Mortero

En el sector de los materiales de construcción un mortero es una matriz formada principalmente por tres componentes: cemento, agregados finos ($< 4.75\text{ mm}$) y agua. Cuando el cemento y el agua se mezclan forman una pasta que envuelve a los agregados finos para

¹Se espera que para el 2050 la demanda de cemento incremente a 18 billones de toneladas [5].

formar un solo compuesto, cuando este endurece da paso a la formación de un material sólido con cierta resistencia mecánica [6].

Concreto

El concreto es una matriz conformada por cemento, agregados finos ($< 4.75 \text{ mm}$), agregados gruesos ($> 4.75 \text{ mm}$) y agua. En ocasiones, al igual que el mortero, una matriz de concreto puede ser adicionada con materiales cementantes suplementarios, fibras, “fillers” o aditivos químicos con la finalidad de modificar o mejorar sus propiedades [2].

2.1.1. Propiedades del concreto y mortero en estado fresco

Se considera que el concreto o mortero se encuentran en estado fresco cuando recién mezclados mantienen una trabajabilidad suficiente para que puedan colocarse y consolidarse [7]. Cuando un concreto o mortero se encuentran en estado fresco son diversas las propiedades que pueden ser evaluadas, estas propiedades son de suma importancia porque clasifican al material según el comportamiento que presente y son indicadores de la calidad de este. A continuación, se describen las más importantes.

Densidad

Se le conoce como densidad o peso unitario a la masa por unidad de volumen de concreto o mortero. Esta propiedad está principalmente influenciada por el tipo de agregado, el contenido de aire, entre otros factores [6].

El peso unitario del concreto y mortero convencional se considera está alrededor de 2300 kg/m^3 y 2000 kg/m^3 respectivamente, sin embargo, pueden ser clasificados como más o menos ligeros según su densidad (véase Tabla 2.1).

Tabla 2.1: Clasificación del concreto y mortero según su densidad [8,9].

Tipo de matriz	Clasificación	Densidad (kg/m^3)
Concreto	Ligero	< 2000
	Convencional/Normal	$2000 - 2800$
	Pesado/Denso	> 2800
Mortero	Ligero	< 1300
	Convencional/Normal	> 1300

Trabajabilidad

Según la ASTM C125 se define trabajabilidad a la propiedad del concreto fresco que afecta la manejabilidad con la que este puede ser mezclado, colocado, consolidado y terminado [7] sin que presente segregación. La trabajabilidad es importante debido a su influencia con relación a la facilidad y correcta colocación del material, la cual está directamente ligada con la calidad del elemento que se construya.

Otro término relacionado a esta propiedad es la fluidez, la cual se define como la habilidad para fluir o movilidad relativa del material estado fresco [2]. Según su porcentaje de fluidez (mortero) o revenimiento (concreto) se puede calificar la consistencia del material y tener una idea de su trabajabilidad (véanse Tablas 2.2 y 2.3):

Tabla 2.2: Clasificación de la consistencia de los mortero según su fluidez [6].

Fluidez (%)	Fluidez (mm)	Consistencia del mortero
80 – 100	< 140	Dura (seca)
100 – 120	140 – 200	Media (plástica)
120 – 150	< 200	Fluida (húmeda)

Tabla 2.3: Clasificación de la trabajabilidad del concreto según su revenimiento [23].

Revenimiento (mm)	Trabajabilidad del concreto
25	Muy baja
25 – 50	Baja
50 – 100	Media
> 100	Alta

La trabajabilidad y la fluidez se pueden ver afectadas o influenciadas por diversos factores (véase Fig. 2.1), de manera muy particular, la distribución uniforme de la granulometría de los agregados y la incorporación de aire mejoran la trabajabilidad y fluidez.

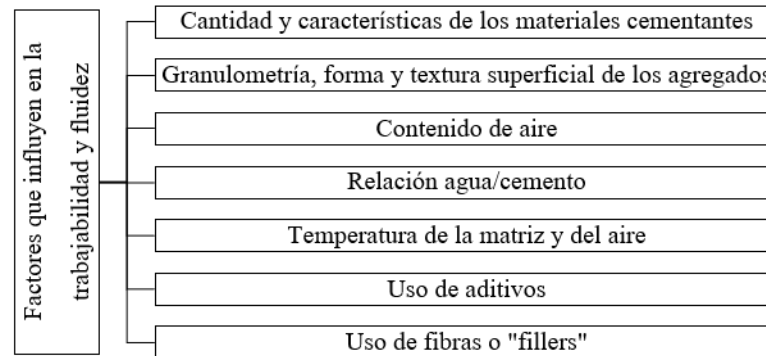


Figura 2.1: Factores que influyen en la trabajabilidad y fluidez [2].

Contenido de aire

Durante el proceso de mezclado, manejo y colocación del concreto o mortero un cierto contenido de aire queda atrapado (aire atrapado) dentro en forma de burbujas (variables

en cantidad, forma y tamaño) [6]. En ocasiones ciertos aditivos pueden ser utilizados para incluir una mayor cantidad de aire (aire incluido) dentro de la matriz si es requerido.

El aire atrapado y el aire incluido generan vacíos en la estructura interna del concreto o mortero, sin embargo, las características de los vacíos son diferentes dependiendo su origen y, por lo tanto, afectan de manera distinta a la matriz (véase Tabla 2.4).

Tabla 2.4: Características del aire atrapado y aire incluido en matrices de cemento portland [2].

Tipo de aire	Diámetro de vacíos	Características de los vacíos	Causas típicas	Principales efectos en la matriz
Aire atrapado	$\geq 1000 \mu m$ (Aprox.)	Vacíos de diversos tamaños y distribuidos aleatoriamente dentro de la matriz. En ocasiones interconectados entre ellos (red de poros).	Matrices con poco cemento. Mala distribución de la granulometría del agregado. Mezclado a altas velocidades o prolongado.	Incremento de la porosidad de la matriz. Probable reducción de la resistencia mecánica.
Aire incluido	Entre 10 y 100 μm	Vacíos homogéneamente dispersos y distribuidos dentro de la matriz. Los vacíos no se conectan.	Cemento con inclusor de aire. Aditivos inclusores de aire.	Disminuye la probabilidad de sangrado. Aumento significativo de la resistencia al deterioro por ciclos de hielo-deshielo. Mejoría considerable a la resistencia a los sulfatos.

De acuerdo con la ASTM C125 el contenido de aire es el volumen total de vacíos de aire (atrapado o incluido) en una pasta, mortero o concreto, el cual se expresa como porcentaje del volumen total de la matriz [7]. Un alto porcentaje de contenido de aire supone un material poroso y con baja durabilidad, sin embargo, el ACI recomienda hasta un 7.5 % de contenido de aire para concretos que serán expuestas a ciclos severos de hielo-deshielo, en el caso de matrices sin aire incluido y sin exposición a ciclos de este tipo recomienda porcentajes menores a 3 % [10, 11].

2.1.2. Propiedades del concreto y mortero en estado endurecido

Se considera que el concreto o mortero se encuentra en estado endurecido cuando una vez fraguado ha desarrollado una resistencia adecuada para cumplir un objetivo definido o resistir una cierta carga sin presentar fallas [7].

Propiedades mecánicas

La determinación de las propiedades mecánicas hace referencia al comportamiento del material cuando se encuentra bajo diferentes tipos de esfuerzos y en el caso del concreto y mortero este comportamiento depende en gran medida de factores que tienen que ver con la calidad de los materiales y de su dosificación, los cuales, en teoría, habrán de cumplir con los requerimientos de diseño preestablecido.

En la práctica de la ingeniería, además de la calidad de los materiales y de la dosificación del concreto o mortero (relación agua/cemento), se considera que las propiedades mecánicas de una matriz se ven fuertemente influenciadas por el tipo y tiempo de curado, la temperatura y el grado de compactación [6].

Debido a los estados de esfuerzo típicos a los que se someten estructuras de concreto y mortero, la evaluación de ciertas propiedades mecánicas (véase Fig. 2.2) es de suma importancia para la determinar la resistencia mecánica bajo diferentes tipos cargas.

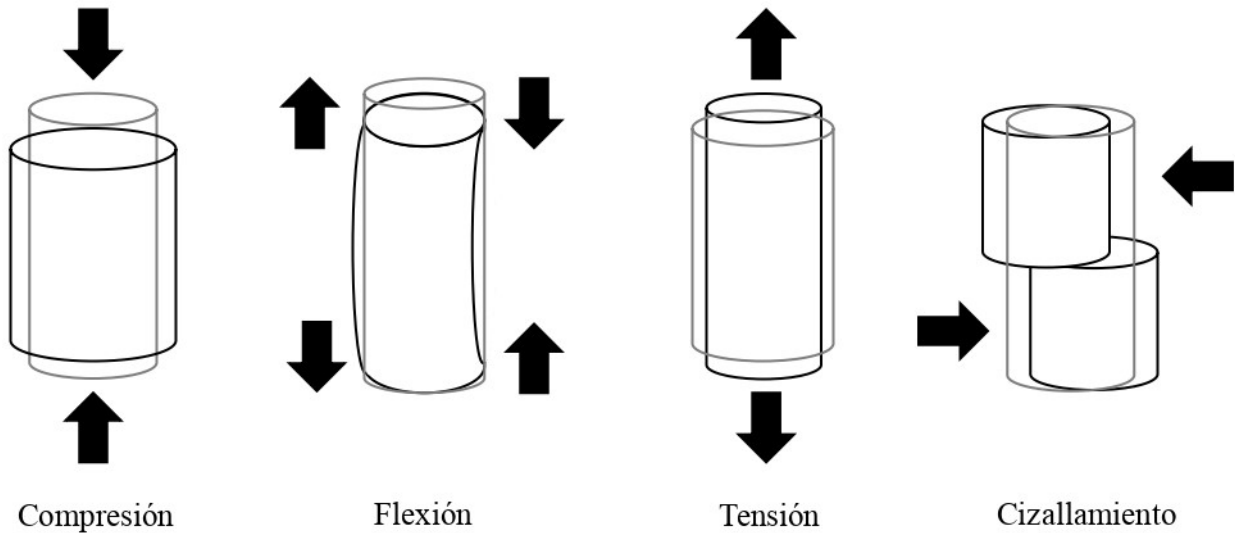


Figura 2.2: Propiedades mecánicas más evaluadas en concretos y morteros.

Si bien, son varias las propiedades mecánicas que se evalúan, la resistencia a la compresión se considera la propiedad mecánica más importante de este tipo de matrices² [6].

Tomando en cuenta la resistencia a la compresión que desarrollen las matrices a los 28 días de edad éstas pueden ser clasificadas como se presenta a continuación (véase Tabla 2.5).

Tabla 2.5: Clasificación de matrices según resistencia a la compresión [5].

Resistencia a la compresión (MPa)	Tipo de matriz
< 20	Matriz de baja resistencia
20 – 40	Matriz de resistencia moderada
> 40	Matriz de alta resistencia

Propiedades térmicas

Las propiedades térmicas de un material son asociadas a la respuesta de este cuando se le suministra o se expone al calor y son indicadores de la capacidad del material para

²De manera típica, se considera que los valores de la resistencia a esfuerzos de flexión y tensión son alrededor de 10 y 15 % respectivamente de la resistencia a la compresión [5]).

almacenar, transferir, conducir o liberar calor [12].

En el caso de los materiales de construcción la conductividad térmica es la propiedad más importante, esta propiedad está relacionada con la conducción de calor [12] y proporciona el valor del flujo que se transmite a través de un área unitaria de un material bajo un gradiente de temperatura unitario [5].

En el concreto y mortero la conductividad térmica es influenciada por las características mineralógicas de los agregados utilizados, la densidad, el contenido de humedad, la porosidad y la temperatura de la matriz [5].

En la literatura la mayoría de los estudios indican que la densidad de la matriz es la propiedad que tiene mayor relación con la conductividad térmica del concreto [97].

2.2. Deterioro del concreto y mortero

De manera general la durabilidad de los materiales de construcción es de relevancia debido a implicaciones socioeconómicas y a la íntima relación entre la durabilidad de los materiales y la conservación de recursos naturales. El concreto y mortero a pesar de tener una resistencia mecánica considerable y una apariencia de material denso y pétreo son materiales propensos al deterioro debido a la interacción que tienen con el medio, si bien, son varios los agentes que provocan el deterioro del concreto o mortero, la naturaleza porosa de este tipo de matrices dispone factible el ingreso de líquidos y gases.

Dependiendo de la acción que ejercen, los agentes causantes del deterioro del concreto y concreto se pueden clasificar en agentes físicos, químicos y biológicos [18] (véanse Tablas 2.8 ,2.7 y 2.6).

Tabla 2.6: Agentes físicos de deterioro del concreto y mortero [2, 17].

Agentes	Descripción
Abrasión/ Erosión	La erosión y abrasión sufrida por el concreto o mortero dependerá del agente abrasivo al que se vea expuesta su superficie (Ejemplo. Tráfico, agua, etc.).
Ciclos de hielo-deshielo	Cuando el agua de los poros internos de la matriz se congela aumenta su volumen alrededor de 9%, la presión que ejerce producirá esfuerzo de tensión, los cuales si son mayores a la resistencia de la matriz se manifestaran como fisuras y desmoronamiento.
Recristalización de sales	Las sales crean productos expansivos dentro de la matriz que producen un efecto similar al del ciclo de hielo-deshielo, además de manifestarse como ligeros agrietamientos se presenta eflorescencia sobre la superficie.
Deslavado/ Lixiviación	Consiste en la descalcificación del concreto o mortero por efecto de un lavado continuo con aguas puras o carbónicas. Esta descalcificación lleva a la disgregación de la pasta, al desmoronamiento del conjunto y a la formación de eflorescencias superficiales.

Tabla 2.7: Agentes químicos de deterioro del concreto y mortero [2, 19].

Agentes	Descripción
Agua de mar	El agua de mar contiene sulfatos, iones magnesio, cloruro de sodio y otros componentes. Los iones cloruro reducen la agresividad de los sulfatos y el magnesio precipita como hidróxido, permitiendo la saturación de los poros y así la impermeabilización de la matriz. Sin embargo, el agua de mar produce deslavado, recubrimientos y la formación de la sal expansiva de Friedel.
Ácidos	Debido a la naturaleza alcalina de las matrices base cemento Portland, los ácidos reaccionan con los hidróxidos (cálcico, sódico y potásico) para formar sales y agua, propiciando una disminución del pH de la matriz. Se destacan los gases de carácter ácido presentes en ambientes urbanos e industriales como el CO_2 y los óxidos de azufre y nitrógeno.
Sales amoniacales y magnésicas	Las sales de magnesio o amoniacales reaccionan con el $Ca(OH)_2$ dando como producto sales cálcicas solubles, provocando la descalcificación del concreto o mortero.
Reacción álcali-agregado	Consiste en la reacción de los álcalis del cemento Portland con algunos agregados (tipos áridos) que contienen sílice pobremente cristalizada o amorfa, lo que da paso a la formación de silicatos (geles) expansivos que provocan el agrietamiento y desmoronamiento de la matriz.
Sulfatos	La reacción básica consiste en la formación de etringita a partir de la reacción de los iones sulfatos con los aluminatos del cemento. Este compuesto es muy expansivo por lo que produce la disgregación de toda la masa con pérdidas de resistencia muy notables.

Tabla 2.8: Agentes biológicos de deterioro del concreto y mortero [2].

Agentes	Descripción
Bacterias Microorganismos	El ataque por agentes biológicos se presenta cuando el concreto o mortero es expuesto a bacterias, proteínas, hongos u otro tipo de microorganismos en un entorno comúnmente húmedo.

De manera natural, muy probablemente cualquier matriz de concreto o mortero estará expuesta a uno o varios tipos de agentes de deterioro a lo largo de su puesta en servicio, sin embargo, el grado de agresividad del agente hacia el material depende en gran medida de factores relacionados con su calidad y proceso constructivo.

2.2.1. Indicadores de calidad de concretos y morteros

Intrínsecamente, la durabilidad³ de matrices de concreto y mortero se interpreta como un parámetro que se relaciona con un cierto periodo de tiempo, sin embargo, existen

³Entiéndase por durabilidad de una matriz base cemento portland como la capacidad del material para resistir acciones químicas, físicas, biológicas y de índole ambiental durante un tiempo determinado, mientras conserva su forma, propiedades y condiciones de servicio originales [15, 16].

indicadores que tienen que ver con la evaluación del material y cuya interpretación permite se pueda tener un estimado de su calidad y por ende durabilidad.

Es importante recalcar que comúnmente la evaluación de un solo indicador de calidad no es suficiente para la calificación del material, por lo tanto, una conclusión adecuada que estime su calidad estará basada en la evaluación y análisis de un conjunto de indicadores.

En esta sección se describen algunos de los principales indicadores para estimar la calidad de un concreto o mortero.

Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico hace referencia al tiempo en que una onda ultrasónica tarda en recorrer una distancia determinada. Cuando se evalúa la velocidad de pulso ultrasónico de un concreto un pulso ultrasónico transita a través de la matriz desde un punto A (emisor) hasta un punto B (receptor). Los valores de la velocidad de pulso ultrasónico de un concreto o mortero permiten se pueda hacer una evaluación sobre la homogeneidad de la matriz y la detección de fallas internas (Ej. Agrietamientos, vacíos, etc.) [17].

El cálculo de la velocidad de pulso (V) se expresa en la Ecuación 2.2.1, en donde L es la distancia entre los puntos de entrada y salida de la onda y T es el tiempo que la onda tarda en recorrer esa distancia [89].

$$V = \frac{L}{T} \quad (2.2.1)$$

La norma mexicana NMX-C-275-ONNCCE-2019 establece criterios de evaluación para calificar a la matriz según la velocidad de pulso registrada, estos criterios presentan en la Tabla 2.9.

Tabla 2.9: Criterios de evaluación según velocidad de pulso [20].

Velocidad de pulso (m/s)	Calidad de la matriz
< 2000	Deficiente
2001 – 3000	Normal
3001 – 4000	Alta
> 4000	Durable

Resistencia a la penetración de agua

El diámetro de una molécula de agua es menor a 3 Å [22], esto hace que una molécula de agua tenga la capacidad de penetrar con facilidad casi cualquier superficie porosa.

Debido a la naturaleza porosa del concreto y mortero se considera el agua el agente de deterioro con mayor incidencia en la durabilidad de este tipo de material, dado que actúa como vehículo para la transportación de diferentes tipos de iones dañinos (Cl^- , SO_4 , etc). a través de la estructura interna, por lo tanto, la capacidad de un concreto o mortero para evitar o disminuir la penetración de agua se considera uno de los principales factores relacionados a la durabilidad y calidad de este tipo de materiales. Dentro de los

principales indicadores que hacen referencia o se relacionan al comportamiento de este tipo de matrices frente al posible ingreso de agua se encuentran, el coeficiente de permeabilidad, la porosidad, la absorción capilar y la resistividad eléctrica.

Coeficiente de permeabilidad. La permeabilidad es la propiedad de un material para permitir el paso de un fluido a través de su estructura interna [5] y se expresa como un coeficiente de permeabilidad (K), el cual se determina según la Ecuación de Darcy [23] (Ecuación 2.2.2):

$$\frac{dq}{dt} = K \frac{\Delta h A}{L} \quad (2.2.2)$$

En donde $\frac{dq}{dt}$ es la velocidad de flujo de agua, Δh es el gradiente de presión, A es el área de la sección transversal de la muestra y L su espesor.

La permeabilidad de agua de un concreto o mortero es uno de los indicadores de mayor relevancia para la calificación de la calidad y estimación de la durabilidad del material. El registro de una baja permeabilidad se interpreta como una matriz de mayor calidad.

Porosidad. Los poros son intersticios o espacios que existen entre materiales sólidos que provocan una discontinuidad del material sólido. En un concreto o mortero denomina porosidad a la relación entre el volumen total de vacíos en la matriz y el volumen total de la misma [24]. La capacidad del material para restringir el ingreso de agua a través de su estructura interna está fuertemente ligada al porcentaje de porosidad, sin embargo, la injerencia que los poros tengan en la durabilidad del concreto o mortero depende en gran medida del tipo y tamaño de los poros (véase Tabla 2.10).

Tabla 2.10: Clasificación de poros presentes en concretos o morteros [17].

Tipo de poros	Tamaño	Descripción
Poros de gel	$< 15 - 25 \text{ \AA}$	Los poros intercambian agua con el ambiente solo cuando tiene una humedad $< 20 \%$. Son los poros correspondientes a espacios intersticiales del gel de cemento. Tienen poca injerencia con la permeabilidad de la matriz.
Poros capilares	$2 \text{ nm} - 1 \text{ }\mu\text{m}$	Cuando este tipo de poros están interconectados (y abiertos al exterior, son la razón principal de la permeabilidad de la matriz.
Poros de aire	$> 0.05 \text{ mm}$	Se generan debido al encapsulamiento de aire en la masa de matriz. No suelen estar interconectados. Si bien afectan la resistencia mecánica de la matriz, en ocasiones pueden trabajar en favor de la durabilidad de esta (Ejemplo. Ciclos de hielo-deshielo).

Como se observa en la Tabla 2.10, no todos los poros implican un efecto negativo, sin embargo, una baja porosidad se asocia con a un concreto o mortero de mayor calidad. En la Tabla 2.11 se presenta un criterio para la evaluación de una matriz según su porcentaje de porosidad total.

Tabla 2.11: Criterios de evaluación según porosidad total [17].

Porosidad total (%)	Características de la matriz
≤ 10	Buena calidad y compacidad
10 – 15	Calidad moderada
> 15	Baja durabilidad

Cabe destacar que se ha sugerido que la distribución de los poros es un mejor criterio para la evaluación de la matriz [5], pero el criterio que se está presentando (Tabla 2.11) es solamente un parámetro para caracterizar la calidad del material y tendrá que ser comparado con otros indicadores para una conclusión definitiva sobre su calidad.

Absorción capilar. La absorción capilar hace referencia a la capacidad de un material para atraer y retener líquidos en su red de poros capilares. En un concreto o mortero una baja absorción capilar es sinónimo de una matriz de buena calidad.

Resistividad eléctrica. La resistividad eléctrica hace referencia a la propiedad de un material para oponerse al paso de corriente eléctrica, una alta resistividad eléctrica es indicador de un material poco conductor y viceversa. En el caso del concreto y mortero, la resistividad eléctrica es un indicador de la calidad del material, dado que está en función de variables como la relación agua/cemento, la porosidad de la matriz, entre otras, y depende del grado de saturación de los poros de la matriz, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa [17].

Si bien no existe un consenso del valor ideal de la resistividad eléctrica de un concreto o mortero, existen criterios de evaluación que relacionan este valor con la probabilidad de que se presente corrosión en el acero embebido⁴ y la porosidad del concreto o mortero. En la Tabla 2.12 se presenta el criterio de evaluación basado en los valores de resistividad eléctrica de la norma mexicana NMX-C-514-ONNCCE-2018.

Tabla 2.12: Criterios de evaluación de una matriz base cemento portland según resistividad eléctrica [26].

Resistividad eléctrica ($K\Omega \cdot cm$)	Probabilidad de corrosión	Porosidad de la matriz
$> 100 - 200$	Despreciable	Matriz densa. Porosidad interconectada es extremadamente baja.
50 – 100	Baja	Porosidad interconectada baja.
10 – 50	Alta	Porosidad interconectada de consideración.
< 10	Muy alta	Porosidad interconectada excesiva.

Tomando en cuenta esta consideración se puede decir que si la resistividad eléctrica del material es $> 100 K\Omega \cdot cm$ presenta una calidad aceptable, sin embargo, como se mencionó

⁴En el caso de concreto o mortero con acero embebido, una matriz con resistividad eléctrica alta tiene poca probabilidad de presentar problemas de corrosión en el acero [5].

al inicio de esta sección, este indicador no puede considerarse como único para definir la calidad del material.

Otros indicadores de calidad del concreto y mortero

Entre otros indicadores de la calidad de un concreto y mortero se encuentra la resistencia a ataques químicos. Una matriz base cemento portland tiene un pH altamente alcalino, por lo tanto, es sumamente susceptible a la degradación debido al contacto con medios ácidos. La resistencia de un concreto o mortero a ataques ácidos (ácido sulfúrico, nítrico, clorhídrico, etc.) es un indicador de calidad.

Un indicador de calidad que toma relevancia cuando se trata de concreto o mortero con acero embebido es la resistencia a la penetración del ion cloruro (Cl^-) y está fuertemente relacionada con la permeabilidad de la matriz (el agua actúa como agente de transporte de iones cloruro). La razón principal para la evaluación de la migración o penetración de este tipo de iones dentro de una matriz base cemento portland tiene que ver con el fenómeno de la corrosión del acero dado que una vez que cierta concentración de iones cloruros han llegan a donde se encuentra el acero propician su despasivación⁵ y aceleran el proceso de corrosión [27].

2.3. Plásticos

Los plásticos son materiales conformados por cadenas de polímeros orgánicos con un elevado peso molecular, la mayoría son derivados del petróleo y tienen la capacidad de ser materiales moldeables cuando se someten a un aumento sustancial de temperatura y de solidificarse en las temperaturas de uso (regularmente temperatura ambiente) [28]. Una de las clasificaciones más sencillas es la que divide a los plásticos en termoplásticos y termoestables.

Los termoplásticos son materiales que una vez solidificados tienen la capacidad de fundirse cuando se les aplica calor para después volver a solidificarse. Este tipo de plásticos puede ser reciclado mediante la aplicación de calor. Según su estructura pueden ser amorfos o semicristalinos [29] (véase Tabla 2.13).

Los plásticos termoestables, también conocidos como termo-rígidos, los plásticos termoestables tienen una alta estabilidad dimensional, son resistentes a altas temperaturas, tiene muy buena resistencia química y son excelentes aislantes térmicos y eléctricos. Su principal característica es la solidificación permanente, es decir, su estructura no cambia cuando se les aplica calor [30]. En caso de exponerse a temperaturas sumamente elevadas este tipo de plásticos se carbonizan. Los plásticos termoestables no son reciclables. Ej. Fenol-formaldehído (baquelita), epóxidos.

⁵La despasivación es la pérdida parcial o completa de la capa pasiva (capa protectora) del acero embebido en concreto o mortero. Sin la presencia de la capa protectora el acero queda expuesto de manera directa a los agentes de corrosión presentes en el interior de la matriz [27].

Tabla 2.13: Clasificación de termoplásticos [29, 30].

Termoplásticos	Definición	Ejemplos
Amorfos	Los termoplásticos amorfos tienen un amplio rango de ablandamiento, poca resistencia química y baja resistencia al desgaste y fatiga.	Policloruro de vinilo (PVC), poliestireno (PS), policarbonato (PC).
Semicristalinos	Los semicristalinos tienen un punto de fusión definido, alta resistencia química y buena resistencia al desgaste y fatiga.	Polietileno (PE) de alta y baja densidad, polipropileno (PP), poliamidas (nylon), tereftalato de polietileno (PET).

2.3.1. Microplásticos

Los microplásticos son partículas de cualquier clase (fragmentos, filmes, fibras, etc.) de plástico menores a 5 mm y se clasifican en microplásticos primarios y microplásticos secundarios [31] (véase Fig. 2.3).

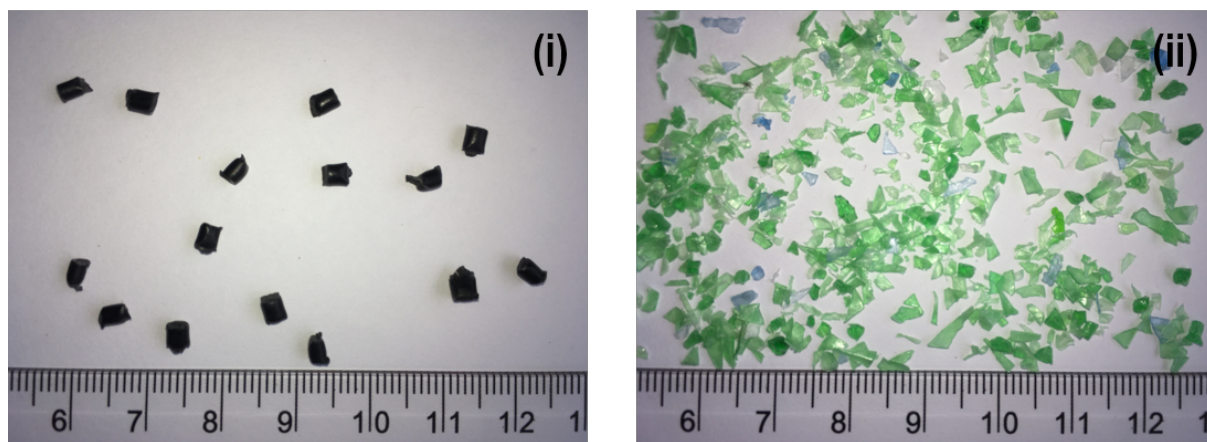


Figura 2.3: (i) Microplásticos primarios: Pellets de polipropileno. (ii) Microplásticos secundarios: Partículas de tereftalato de polietileno (subproducto del reciclaje de botellas).

Los microplásticos primarios son aquellos que son fabricados con dimensiones menores a 5 mm para ser utilizados de manera específica en la elaboración de un artículo o directamente empleados en otro tipo de productos.

Los microplásticos secundarios son producto de la degradación de plásticos de mayor tamaño (> 5 mm), es decir, son partículas de desechos plásticos que han alcanzado un tamaño menor a 5 mm debido a procesos naturales de degradación o de procesamiento.

Debido al tamaño reducido de los microplásticos estos terminan dispersos fácilmente en el ambiente propiciando impactos negativos en el ecosistema y en los seres vivos que lo habitan [32].

2.3.2. Tereftalato de polietileno

El tereftalato de polietileno (PET o PETE) es un termoplástico que pertenece a la familia de los poliésteres, es un polímero sintético semicristalino compuesto por monómeros de etilenglicol y ácido tereftálico [33] (véase Fig. 2.4).

En estado natural el PET es un material flexible, sin embargo, dependiendo de los parámetros de requerimiento y procesamiento puede ser un material rígido o semirrígido. El PET es un material durable con buena estabilidad química y dimensional, posee buena resistencia mecánica (alta resistencia a la fractura), tenacidad, resistencia térmica (150 – 175 °C), alta resistencia química y baja permeabilidad a los gases, destacando el oxígeno y el dióxido de carbono [34–36].

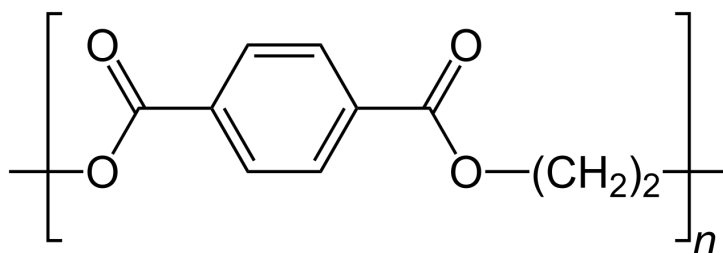


Figura 2.4: Estructura química del tereftalato de polietileno (PET).

Aplicaciones del tereftalato de polietileno

Debido a sus propiedades versátiles y bajo costo el PET es uno de los plásticos de mayor producción mundial, su campo de aplicación es sumamente amplio. El PET es utilizado en diversas industrias: farmacéutica, construcción, electrónica, automotriz, textil, etc., pero sobre todo en la industria alimentaria para el envasado y envoltura de alimentos y bebidas (véase Fig. 2.5). Una de las aplicaciones más comunes es la utilización de este material para el envasado de agua o bebidas carbonatadas.



Figura 2.5: Ejemplos de recipientes de PET [37].

Manejo de residuos de tereftalato de polietileno

Actualmente las principales prácticas para el manejo de casi cualquier residuo sólido incluyen el confinamiento en rellenos sanitarios o la incineración, el manejo de residuos PET no es la excepción.

Los rellenos sanitarios o vertederos son espacios destinados para el confinamiento de residuos en donde puedan quedar almacenados de manera segura o descomponerse de manera natural. A nivel mundial esta práctica se considera un método fácil y económico para la eliminación de residuos, no obstante, es una práctica que repercute de manera negativa en el ambiente [38]. Con respecto al descarte de residuos plásticos como el PET en rellenos sanitarios surgen diversas problemáticas que tienen que ver con su acumulación exponencial debido a el largo proceso de descomposición natural de los plásticos⁶ y al basto volumen de ocupación.

La incineración es un proceso de combustión para la eliminación de residuos. En el caso particular de los residuos plásticos, si se realiza apropiadamente la incineración de estos resulta en la generación de energía térmica, sin embargo, también da como resultado la generación de gases de efecto invernadero y en ocasiones contaminantes altamente tóxicos [40], en el caso específico del PET su pirólisis resulta en la producción de gases altamente contaminantes como el dióxido de carbono o acetaldehído [41], este último clasificado como cancerígeno [42]. Además, estudios recientes han reportado que la incineración de plásticos no resulta en su completa eliminación y las cenizas remanentes continúan siendo una fuente potencial de microplásticos [43].

El confinamiento en rellenos sanitarios y la incineración de residuos plásticos incluyendo los residuos de PET representan una latente contaminación del agua, suelo y aire, sin embargo, otra práctica viable para el manejo de este tipo de residuos es el reciclaje.

Reciclaje de tereftalato de polietileno

Cuando se habla sobre reciclaje de materiales se refiere a un proceso en donde el material descartado pasa por una serie de tratamientos para que pueda volver a ser utilizado, no necesariamente de la misma manera como fue empleado originalmente. En el caso de los plásticos, algunos tienen la capacidad de ser reciclables mediante diferentes tratamientos.

El PET es un termoplástico fácilmente reciclable el cual se identifica universalmente con el número uno rodeado del triángulo Möbius (véase Fig. 2.6). El PET puede ser reciclado química o mecánicamente.

⁶Se estima que a menos que hayan sido reciclados o incinerados, todos los plásticos que se han fabricado hasta ahora todavía existan de una u otra manera [39].



Figura 2.6: Símbolo de reciclaje del PET.

El reciclaje químico del PET consiste en la despolimerización del polímero mediante procesos de glucólisis, hidrólisis, metanolisis o aminólisis, para este tipo de procesos se utilizan solventes como agua, alcohol, ácidos, etc. [44]. Los productos del reciclaje químico del PET son materias primas orgánicas que pueden ser utilizadas para producir PET u otro tipo de materiales. La gran desventaja del reciclaje químico del PET es su alto costo y la producción de gases de efecto invernadero durante el proceso [45].

Por otro lado, el reciclaje mecánico, es más accesible. Consiste en la clasificación, trituración, eliminación de contaminantes (polvos, otros tipos de materiales, etc.) mediante flotación, lavado y secado para terminar con un proceso de separación (por tamaño), fundición, extrusión y peletizado [36]. Una de las desventajas que presenta el reciclaje mecánico del PET tiene que ver con la pureza final del material, la cual, se asocia con su calidad y por lo tanto se restringe su uso para ciertas aplicaciones [44]. Otra desventaja son los subproductos de esta práctica, durante el triturado del PET se generan partículas menores a 4 *mm* (microplásticos) las cuales en la mayoría de las ocasiones son descartadas por no cumplir con los requerimientos mínimos de calidad para ser procesadas.

Estudios afirman que la cantidad de residuos plásticos es tal, que el sistema de reciclaje actual por sí solo no puede ser la única opción para el manejo de este tipo de residuos⁷, por lo tanto, además de las prácticas para el reciclaje del plástico PET anteriormente descritas, cada día se buscan nuevas formas para tratar, reutilizar o deshacerse de este material con el menor impacto ambiental posible.

⁷Estudios estiman que solo el 10% de más de nueve billones de toneladas de plástico que han sido producido desde 1950 ha sido reciclado [101].

Capítulo 3

Antecedentes

La incorporación de residuos plásticos en concreto o mortero ha sido visualizada por diferentes investigadores, dando paso a una serie de estudios científicos que contemplan la modificación o el mejoramiento de las propiedades del material de construcción mediante la incorporación de dichos residuos, además de una solución viable para el manejo de este tipo de desechos [46–48, 75, 96].

Más puntualmente, son diversos los estudios que se han realizado sobre la inclusión de residuos de plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) en concreto y mortero, en donde, se incorporan en forma de partículas o como fibras de refuerzo. En el caso del presente trabajo, se propone la sustitución del agregado fino por partículas PET provenientes del reciclaje de botellas. En este capítulo, se presentan y describen de manera breve estudios que preceden al tema de investigación desarrollado en este trabajo.

Para una mejor comprensión del lector y comparativa de los resultados obtenidos entre diversos autores, la presentación de los antecedentes se divide en secciones en donde se describe de manera específica los estudios que se han realizados y los resultados obtenidos:

- Partículas PET en concreto y mortero¹
- Propiedades en estado fresco
- Propiedades mecánicas
- Propiedades físicas
- Indicadores de calidad

3.1. Partículas PET en concreto o mortero

En la literatura se reporta el uso de plástico tipo PET en pastas, morteros o concretos, además, las características (tamaño, forma, etc.) del PET son una variable entre

¹En el caso de esta sección se presenta el tipo de partículas PET utilizadas en los diversos estudios, su procedencia, tratamientos, características, etc.

los diversos estudios, por ejemplo, en la Fig. 3.1 se presentan algunas de las partículas utilizadas por diversos autores: a) partículas procedentes de un proceso de triturado de botellas de PET [52], b) partículas resultado de un proceso de fundición de plástico PET con agregado fino [66], c) partículas producto de la fundición de PET y escoria granulada de alto horno [67], d) pellets de PET [69], e) partículas PET consecuencia de la fundición de plástico PET y consecuente trituración [71].

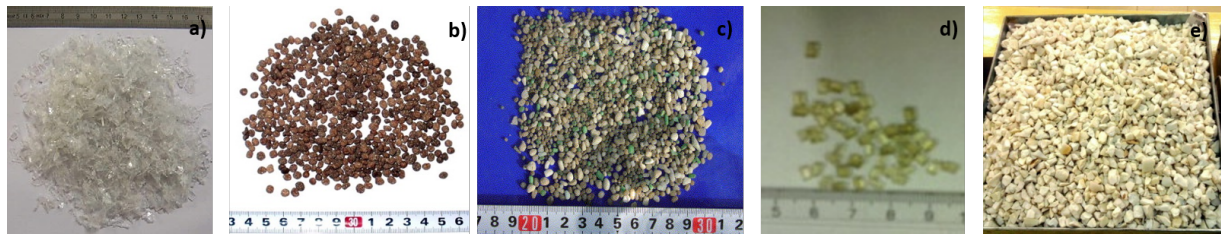


Figura 3.1: Partículas PET utilizadas por diferentes autores. De izquierda a derecha [52,66,67,69,71].

A continuación, se presenta un resumen de la procedencia, tratamientos, tamaños y porcentajes de plástico tipo PET que ha sido incluido en este tipo matrices para su estudio².

Procedencia y tratamientos de partículas PET

La mayoría de los estudios realizados que se encuentran en la literatura proponen la incorporación de partículas PET provenientes de botellas trituradas sin ningún tratamiento previo (excepción del lavado con agua) como sustituto parcial del agregado fino por unidad de volumen [49–60] o por unidad de masa [61–64] en concreto o mortero base cemento portland.

En la literatura también se encuentran investigaciones que propusieron tratamientos al plástico PET antes de ser utilizado. En el año 2005, Choi et al. [66] estudiaron una alternativa para la fabricación de un agregado ligero con residuos de botellas de PET y escoria granulada de alto horno, en donde ambos eran mezclados mientras se alcanzaban temperaturas de 250 ± 10 °C, el producto final fue un agregado redondo y liso de PET recubierto con escoria granulada de alto horno, el cual después se utilizó como sustituto del agregado fino por unidad de volumen en concreto. Más tarde, en 2009, Choi et al. [67] utilizaron el mismo proceso para fabricar agregados, pero en esta ocasión utilizando residuos de botellas PET y arena de río (≤ 0.15 mm), se obtuvieron agregados redondos y con textura suave, los cuales se utilizaron para sustituir el agregado fino por unidad de masa en concreto y mortero.

En 2009, Yesilata et al. [65], presentaron un sistema en donde plástico PET proveniente de botellas es triturado o cortado y colocado de manera manual y uniformemente distribuido sobre la superficie de concreto recién colado en forma de (i) partículas irregulares,

²Más adelante se presentan y describen los resultados derivados de la incorporación de las diferentes partículas de plásticos PET de los estudios que se presentan en esta sección.

(ii) cuadros y (iii) tiras, el sistema que utilizaron resultó en la mejora de las propiedades térmicas aislantes del material. Más tarde en 2013 y 2014, Silva et al. [68] y Saikia & De Brito [69] respectivamente investigaron la inclusión de partículas PET resultantes del proceso de trituración de botellas y la incorporación de pellets de PET (producto de un proceso térmico aplicado a las partículas trituradas) como sustituto parcial de los agregados naturales del concreto. En este estudio se observó que el concreto con pellets de PET tenía mejores propiedades mecánicas que el concreto con partículas PET resultado de la trituración.

También en 2013, Safi et al. [70] elaboraron un agregado de geometría cilíndrica hueca a base de plástico PET fundido proveniente del “rechazado” de bolsas, el cual se usó para sustituir parcialmente el agregado fino, según reportaron los autores la geometría del agregado plástico permitió una mejor adhesión con la pasta de cemento.

En 2016, Islam et al. [71] fabricaron un agregado producto de la fundición de partículas PET provenientes de botellas. La manufactura consistió en un proceso simple de fundición (280-320 °C) solidificación y trituración, el cual dió como resultado un agregado grueso con textura lisa. En este estudio se utilizó este agregado como sustituto parcial del agregado grueso en mezclas de concreto.

En el año 2018, Thorneycroft et al. [72] investigaron la sustitución parcial del agregado fino por partículas PET (provenientes de botellas trituradas) en mezclas de concreto. Se utilizaron partículas de PET sin tratar y tratadas químicamente: (i) partículas PET tratadas con $NaOH$ e $NaClO$ y (ii) partículas PET tratadas con $NaOH$, $NaClO$ y lavadas. En el estudio, la incorporación de partículas PET tratadas con $NaOH$ e $NaClO$ propiciaron que el desempeño del concreto fuera el más bajo, y aunque el concreto con partículas PET tratadas con $NaOH$, $NaClO$ y lavadas tuvo un mejor desempeño no presentó diferencias con el concreto donde se incorporaron partículas PET sin tratar. En el mismo año, Schaefer et al. [73] estudiaron la incorporación de partículas PET (provenientes de plástico de reciclaje) como sustituto del cemento en pastas. Para esto pulverizaron las partículas PET y las expusieron a dos diferentes dosis de radiación gamma: (i) 10 kGy y (ii) 100 kGy .

Tamaños de partículas PET y porcentajes de sustitución

Dentro de los estudios realizados, no existe una constante en el tamaño de partículas PET, ni en los porcentajes de sustitución o adición en pastas, mortero o concreto. Para tener un panorama más general de lo que hasta ahora se ha realizado, en las Tablas 3.1 y 3.2 se presenta un compilado en donde se especifican los tamaños de partículas PET, los tipos y porcentajes de sustitución que han estudiado diversos autores.

Tabla 3.1: Tamaño de partículas PET, porcentajes y tipos de sustitución estudiados por diversos autores.

Referencia	Tamaño de partículas	Porcentaje y tipo de sustitución	Matriz
Choi et al. [66]	Módulo de finura 4.11	Agregado fino, 25, 50 y 75 % (vol.)	Concreto
Marzouk et al. [49]	Tipo A, $\leq 5 \text{ mm}$	Agregado fino, 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 y 100 % (vol.).	Mortero
	Tipo B, $\leq 2 \text{ mm}$		
	Tipo C, $\leq 1 \text{ mm}$		
Choi et al. [67]	$\leq 4.74 \text{ mm}$	Agregado fino, 25, 50 y 75 % (masa)	Mortero Concreto
Albano et al. [50]	Tipo A, $\bar{x} = 2.60 \text{ mm}$	Agregado fino, 10 y 20 % (vol.)	Concreto
	Tipo B, $\bar{x} = 11.40 \text{ mm}$		
	Tipo C, 50/50 Tipo A y B		
Remadnia et al. [51]	$\leq 4 \text{ mm}$	Agregado fino, 35 % (vol.)	Mortero
Akçaözöğlü et al. [60]	$\leq 4 \text{ mm}$	(i) Agregado fino, 100 %	Mortero
		(ii) Adición PET/AF = 0.5 (masa)	
Hannawi et al. [52]	$\leq 6.30 \text{ mm}$	Agregado fino, 3, 10, 20 y 50 % (vol.)	Mortero
Frigione [61]	$\leq 2.36 \text{ mm}$	Agregado fino, 5 % (masa)	Concreto
Ávila Córdoba et al. [53]	$\leq 3 \text{ mm}$	Agregado fino, 1, 2.5 y 5 % (vol.)	Concreto
Silva et al. [68]	Tipo A, 2 - 11.20 <i>mm</i>	(i) Agregado fino y grueso, 7.5 % (vol.)	Concreto
	Tipo B, 1 - 4 <i>mm</i>	Tipo A	
	Tipo C, 1 - 4 <i>mm</i> (pellets)	(ii) Agregado fino, 7.5 y 15 % (vol.) Tipo B y C	
Rahmani et al. [54]	$\leq 4.75 \text{ mm}$	Agregado fino, 5, 10 y 15 % (vol.)	Concreto
Safi et al. [70]	$\leq 5 \text{ mm}$	Agregado fino, 10, 20, 30 y 50 % (masa)	Mortero
Akçaözöğlü et al. [74]	$\leq 4 \text{ mm}$	Agregado fino y grueso, 30, 40, 50 y 60 % (vol.)	Concreto

Tabla 3.2: Tamaño de partículas PET, porcentajes y tipos de sustitución estudiados por diversos autores.

Referencia	Tamaño de partículas	Porcentaje de sustitución	Matriz
Saikia & De Brito [69]	Tipo A, 2 - 11.20 mm	(i) Agregado fino y grueso, 5, 10 y 15 % (vol.). Tipo A	Concreto
	Tipo B, 1 - 4 mm	(ii) Agregado fino, 5, 10 y 15 % (vol.)	
	Tipo C, 1 - 4 mm (pellets)	Tipo B y C	
Akçaözoglu & Ulu [55]	≤ 4 mm	Agregado fino, 20, 40, 60, 80 y 100 % (vol.)	Mortero
Araghi et al. [56]	≤ 4.75 mm	Agregado fino, 5, 10 y 15 % (no específica vol. o masa)	Concreto
Islam et al. [71]	≤ 20 mm	Agregado grueso, 20, 30, 40, 50 % (vol.)	Concreto
Nikbin et al. [57]	≤ 4.75 mm	Agregado fino, 5, 10 y 15 % (vol.)	Concreto
Azharpour et al. [63]	≤ 4.90 mm	Agregado fino, 5, 10, 15, 20, 25 y 30 % (masa)	Concreto
Rahimi et al. [58]	≤ 7 mm	Agregado fino, 5, 10 y 15 % (vol.)	Concreto
Sadrmomtazi et al. [62]	≤ 4.75 mm	Agregado fino, 5, 10, 15 % (masa)	Concreto
Mohammed et al. [59]	Tipo A, 12 mm	Agregado fino, 5, 10, 15 % (vol.)	Concreto
	Tipo B, 6 mm		
	Tipo C, 3 mm		
	Tipo D, 4.75 - 9.50 mm		
Schaefer et al. [73]	$\bar{x} = 170$ μ m	Cemento, 15 % (masa)	Pasta
Thorneycroft et al. [72]	Tipo A, ≤ 4 mm	Agregado fino, 10 % (vol.)	Concreto
	Tipo B, 0.5 - 2 mm		
	Tipo C, 2 - 4 mm		
Saxena et al. [64]	Tipo A, ≤ 4.75 mm	(i) Agregado fino, 5, 10, 15 y 20 % (masa). Tipo A	Concreto
	Tipo B, 4.75 - 20 mm	(ii) Agregado grueso, 5, 10, 15 y 20 % (masa). Tipo B	

Como se observa en las Tablas 3.1 y 3.2, la gran mayoría de los autores reportan el uso de partículas PET de un tamaño menor a 4.75 mm [49, 51, 53–57, 59–63, 67, 70, 72–74]. Esto se puede deber a la identificación de un residuo sólido procedente del reciclaje de botellas de PET y a la no justificación de un gasto energético mayor para la transformación de residuos de PET para su uso en mortero o concreto.

Entre otros autores que reportaron el uso de partículas PET de tamaños diferentes se encuentran Silva et al. [68] y Saikia & De Brito [69], quienes elaboraron mezclas de concreto con partículas PET de diferentes tamaños: (i) $2\text{--}11.20\text{ mm}$, (ii) $1\text{--}4\text{ mm}$ y (iii) $1\text{--}4\text{ mm}$ (pellets), dentro de los diversos parámetros evaluados es posible concluir que el concreto con menor desempeño (propiedades mecánicas) fue el que incluía partículas PET de $2\text{--}11.20\text{ mm}$. Coincidiendo con otros autores que también reportaron un menor desempeño del concreto cuando utilizaron partículas PET $\leq 4.75\text{ mm}$ [50, 59, 64].

Thorneycroft et al. [72] evaluaron la incorporación de tres diferentes tamaños de partículas PET en mezclas de concreto: (i) $\leq 4\text{ mm}$ (granulometría distribuida), (ii) $0.5\text{--}2\text{ mm}$ y (iii) $2\text{--}4\text{ mm}$. El mayor rendimiento (propiedades mecánicas) se obtuvo cuando incorporaron partículas PET $\leq 4\text{ mm}$ con una granulometría uniformemente distribuida, este resultado concuerda con estudios realizados por Marzouk et al. [49].

Con respecto a los porcentajes de sustitución, Marzouk et al. [49] evaluaron morteros con diferentes porcentajes de partículas PET: 2, 5, 10, 15, 20, 30, 50, 70 y 100 % (vol.) y concluyeron que el porcentaje de sustitución no debe ser mayor a 50 %. Estudios posteriores demostraron que porcentajes de sustitución más conservadores (5, 10 y 15 %) son mayormente viables cuando se les compara con su respectiva referencia [50, 52–57, 64, 72]. Cabe destacar que en los diferentes estudios las propiedades y el desempeño de morteros y concretos con partículas PET fueron evaluados bajo diversos parámetros, los cuales se exponen más adelante.

3.2. Propiedades en estado fresco

Como se mencionó anteriormente, el estado del arte del estudio de concreto o mortero con partículas PET se conforma de una amplia serie de estudios. En la Tabla 3.3, se presenta un compendio de los trabajos reportados en la literatura en donde se evaluaron las propiedades en estado fresco.

Tabla 3.3: Propiedades en estado fresco evaluadas por diversos autores.

Referencia	Densidad en estado fresco	Trabajabilidad o fluidez	Contenido de aire
Choi et al. [66]		x	
Choi et al. [67]		x	x
Albano et al. [50]		x	
Akçaözoglu et al. [60]	x		
Hannawi et al. [52]	x		
Frigione [61]		x	
Silva et al. [68]	x	x	
Rahmani et al. [54]	x	x	
Safi et al. [70]		x	
Akçaözoglu et al. [74]	x		
Saikia & De Brito [69]	x	x	
Akçaözoglu et al. [55]	x		
Islam et al. [71]		x	
Azharpour et al. [63]	x		
Sadrmontazi et al. [62]		x	x

Densidad en estado fresco

Los estudios en donde se reporta la densidad de la matriz en estado fresco coinciden de manera absoluta en la disminución de la densidad de la matriz conforme incrementa el porcentaje de sustitución de los agregados naturales por partículas PET. Esto debido a la baja densidad de las partículas PET comparada con la densidad del resto de los componentes del mortero o concreto [52, 54, 55, 68, 69, 74].

Trabajabilidad/Fluidez

En los estudios realizados por Choi et al. en 2005 [66] y 2009 [67] se observó un aumento en la trabajabilidad de las mezclas de concreto conforme se incrementaba el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET, los autores describieron a las partículas PET utilizadas en estos estudios como esféricas y de textura suave. Este mismo comportamiento de incremento en la trabajabilidad fue reportado por Islam et al. [71] quienes utilizaron un agregado de PET redondo y con superficie lisa según la descripción de los autores.

Albano et al. [50] evaluaron la trabajabilidad en mezclas de concreto utilizando dos tamaños de partículas PET: (i) grandes (11.40 mm) y (ii) pequeñas (2.60 mm), manteniendo una relación agua/cemento constante, en ambos casos la fluidez de la mezcla disminuyó con respecto a la referencia, sin embargo, el concreto con partículas PET pequeñas presentó la menor fluidez.

Frigione [61] sustituyó el agregado fino por unidad de masa de partículas PET ≤ 2.36

mm y con una relación agua/cemento constante reportó valores de trabajabilidad muy similares a la mezcla referencia.

En el caso de la incorporación de partículas PET provenientes de botellas trituradas y mezclas con relación agua/cemento constante, se presentó un consenso entre los diferentes estudios que utilizaron partículas PET $\leq 4.75\text{ mm}$, donde se observa que debido a la naturaleza angulosa y rugosa de las partículas existe una disminución de la capacidad de fluidez/trabajabilidad de las mezclas conforme se incrementa el porcentaje de sustitución de los agregados naturales por partículas PET [50, 54, 62] atribuible a la fricción que se crea entre la matriz cementante y las partículas PET.

Contenido de aire

Son pocos los estudios que se han realizado sobre el contenido de aire en mezclas de concreto o mortero con partículas PET. De los estudios que han reportado este dato, Choi et al. [67] quienes sustituyeron el agregado fino por partículas elaboradas a base de plástico PET y arena de río con una morfología redonda y superficie lisa, registraron una ligera tendencia a la disminución del contenido de aire en las mezclas conforme incrementaba el porcentaje de sustitución del agregado fino.

En otro estudio realizado por Sadrmomtazi et al. [62] se reportó un incremento en el contenido de aire de mezclas de concreto donde se sustituía el agregado fino por partículas PET trituradas (partículas angulares y rugosas). Entre mayor el porcentaje de partículas PET mayor contenido de aire en las mezclas.

3.3. Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de mortero o concreto con partículas PET han sido ampliamente reportadas por diversos autores. En la Tabla 3.4, se presenta una recopilación de la literatura en donde se detalla la edad y las propiedades mecánicas evaluadas en los diversos estudios.

Tabla 3.4: Propiedades mecánicas evaluadas por diversos autores.

Referencia	Resistencia a la compresión	Resistencia a la tensión	Módulo de elasticidad	Resistencia a la flexión
Choi et al. [66]	3 y 28 días	28 días	28 días	
Marzouk et al. [49]	28 días	28 días		
Choi et al. [67]	3, 7 y 28 días			
Albano et al. [50]	7, 14, 28 y 60 días	28 días	28 días	7, 14, 28 y 60 días
Remadnia et al. [51]	28 días			28 días
Akçaözoglu et al. [60]	1, 3, 7, 28, 90 y 180 días			1, 3, 7, 28, 90 y 180 días
Hannawi et al. [52]	28 días			28 días
Frigione [61]	28 y 365 días	28 días	28 días	
Ávila Córdoba et al. [53]	7 y 28 días			
Silva et al. [68]	28 días			
Rahmani et al. [54]	28 días	28 días	28 días	49 días
Safi et al. [70]	1, 7, 14 y 28 días			1, 7, 14 y 28 días
Akçaözoglu et al. [74]	7, 28 y 90 días			
Saikia & De Brito [69]	7, 28 y 90 días	28 días	28 días	28 días
Akçaözoglu & Ulu [55]	28 días			28 días
Araghi et al. [56]	15, 30 y 60 días			
Islam et al. [71]	28 días			
Azhdarpour et al. [63]	3, 14 y 28 días	3, 14 y 28 días	3, 14 y 28 días	3, 14 y 28 días
Sadrumontazi et al. [62]	7, 28, 60 y 90 días	28 días	28 días	7, 28, 60 y 90 días
Schaefer et al. [73]	28 días			
Thorneycroft et al. [72]	14 días	14 días		
Saxena et al. [64]	7, 28 y 90 días			

Resistencia a la compresión

Entre los diversos estudios que reportan las propiedades mecánicas de concreto o mortero con partículas PET, la constante tiende a ser la evaluación de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días (véase Tabla 3.4), sin embargo, debido a variables como la relación agua/cemento de las matrices, uso de materiales cementantes suplementarios, tratamiento de las partículas PET, porcentajes y tipos de sustitución, morfología de las partículas PET, entre otras, en los diversos estudios no se percibe una tendencia marcada del comportamiento de este tipo de matrices con base a sus propiedades mecánicas. Como un esfuerzo para el análisis y la visualización de la resistencia a la compresión a la edad de 28 días (excepción Thorneycroft et al. [72], 14 días) que diversos autores han reportado, en la Fig. 3.2 se presenta la comparativa de los valores obtenidos según el porcentaje de sustitución del agregado fino (vol. o masa) por partículas PET $< 6\text{ mm}$ granulométricamente distribuidas, provenientes del triturado de envases de botellas y sin ningún tratamiento (características que coinciden con el trabajo realizado en este estudio).

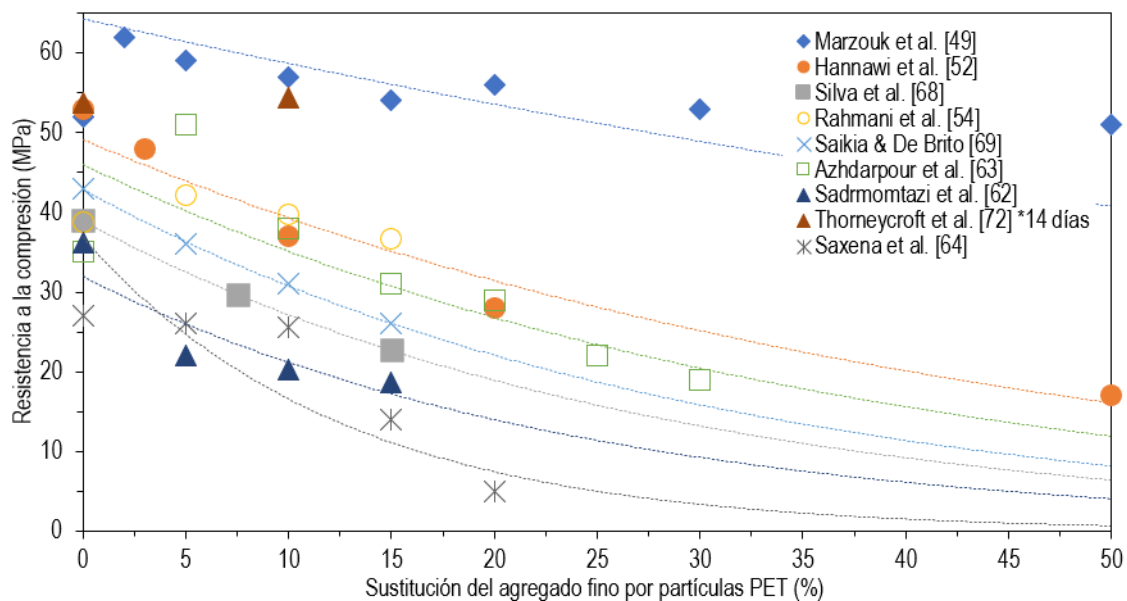


Figura 3.2: Valores de la resistencia a la compresión reportados por diversos autores.

Como se observa en la Fig. 3.2, los diferentes autores reportaron una disminución de la resistencia a la compresión conforme incrementa el porcentaje de sustitución [52, 62, 68, 69]. De estos, Hannawi et al. [52] utilizaron un agregado máximo de 6.30 mm , Saikia & De Brito [69] y Silva et al. [68] modificaron las relaciones agua/cemento para obtener como constante la trabajabilidad de las mezclas, dando como resultado que por cada incremento al porcentaje sustituido también incrementara la relación a/c. Sadrmomtazi et al. [62] sustituyeron por unidad de masa el agregado fino y se utilizó superplastificante en diferentes proporciones (diferentes trabajabilidades entre mezclas).

En la Fig. 3.2, también se aprecia como otros autores reportaron un ligero incremento

o una homologación de la resistencia a la compresión (respecto a referencia) en matrices donde la sustitución del agregado fino no fue mayor de 10-15 % [49, 54, 63, 64, 72]. Todos estos trabajos tienen en común que las partículas PET son $< 4.75 \text{ mm}$ su granulometría es distribuida, así mismo, las relaciones a/c y agregado/cemento fueron constantes sin importar el porcentaje de sustitución. Aun así, en general la tendencia de los estudios reportados es la disminución de la resistencia a la compresión conforme se incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET.

Entre otros autores que evalúan esta propiedad, Choi et al. [66, 67], quienes fabricaron agregados con partículas PET reportaron una disminución de la resistencia a la compresión atribuida a la poca adhesión entre la matriz cementante y las partículas PET redondas y con textura suave. Albano et al. [50], emplearon partículas PET de un mismo tamaño (i) 11.40 mm y (ii) 2.60 mm, Frigione [61] partículas PET $\leq 2.36 \text{ mm}$ y Ávila Córdoba et al. [53] partículas PET $\leq 3 \text{ mm}$, todos registraron una tendencia a la baja de la resistencia a la compresión conforme incrementaba la cantidad de partículas PET incorporadas.

Resistencia a la tensión

En la literatura también se reporta la resistencia a esfuerzos de tensión de concreto y mortero con partículas PET.

Choi et al. [66], registraron una disminución de 16 y 38 % de la resistencia a esfuerzos de tensión en concretos donde se sustituyó (vol.) el 25 % y 75 % (correspondientemente) del agregado fino por partículas fabricadas a base de plástico PET y escoria granulada de alto horno. Al igual que la disminución de la resistencia a la compresión de estas matrices, los autores le atribuyen esta disminución a la poca adhesión entre la matriz cementante y las partículas PET redondas y con textura suave.

Albano et al. [50] reportaron una disminución de la resistencia a tensión en concretos con partículas PET en donde se estudió el efecto que tienen dos diferentes tamaños de partículas: (i) 11.40 mm y (ii) 2.60 mm. Cuando se realizó una sustitución del 10 % del agregado fino por partículas PET de 11.40 mm, la resistencia a tensión disminuyó 11 % y cuando se utilizaron partículas PET de 2.60 mm disminuyó 7 %. Frigione [61] registró una baja máxima de 2.4 % en la resistencia a tensión de concretos con una sustitución del 5 % del agregado fino (unidad de masa) por partículas PET $\leq 2.36 \text{ mm}$.

En la Fig. 3.3 se presenta un análisis de los valores de la resistencia a la tensión (28 días) que reportaron autores que evaluaron morteros y concretos con diferentes porcentajes de sustitución del agregado fino por partículas PET $< 6 \text{ mm}$ con una granulometría distribuida (características similares a las de las partículas PET del presente estudio).

Como se aprecia en la Fig. 3.3, la tendencia general de las diferentes investigaciones es la disminución de la resistencia a esfuerzos de tensión conforme aumenta el porcentaje de sustitución. Sin embargo, la mayoría de los autores [49, 54, 63, 72] reportaron valores equiparables a sus respectivas referencias (0 % de partículas PET) cuando la cantidad de agregado fino sustituido por partículas PET no fue mayor al 15 %.

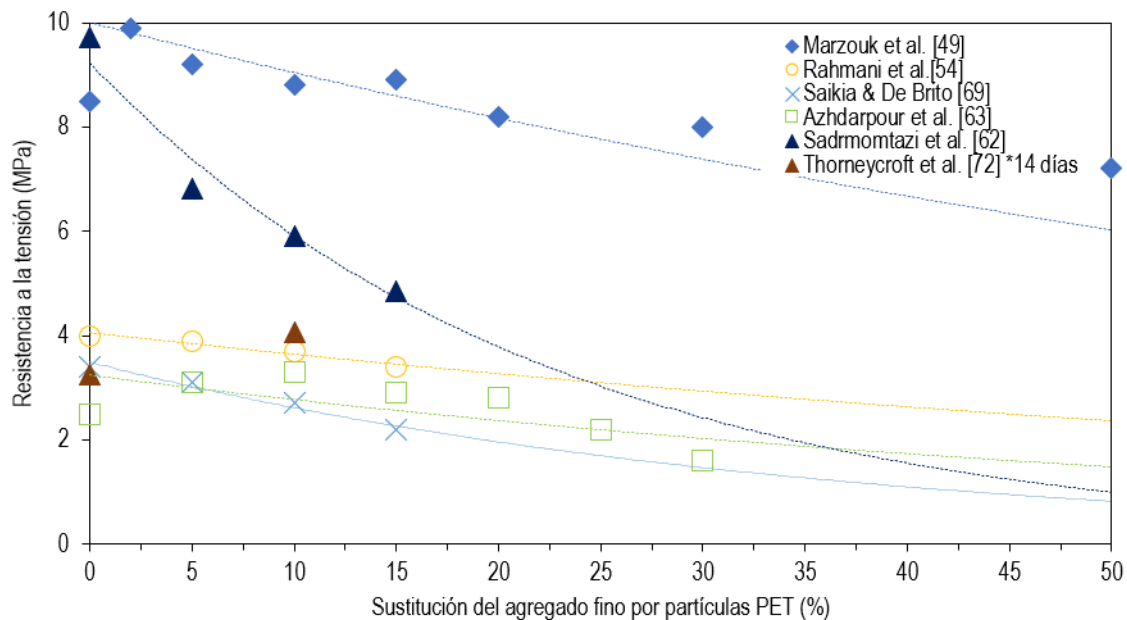


Figura 3.3: Valores de la resistencia a la tensión reportados por diversos autores.

De los autores que reportaron una disminución de la resistencia a la tensión en concretos en donde se sustituyó más del 5 % del agregado fino por partículas PET, Saikia & De Brito [69] evaluaron concretos con una misma trabajabilidad que lograron variando la relación a/c (entre mayor el porcentaje de partículas PET, relación a/c más alta) y Sadrmomtazi et al. [62] utilizaron aditivo superplastificante en las mezclas, el contenido de aditivo cambió dependiendo del porcentaje de partículas PET y la trabajabilidad entre las matrices no fue constante.

Módulo de elasticidad

Con respecto al módulo de elasticidad, todos los autores que han reportado este parámetro han registrado una disminución de este valor conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET [50, 54, 61–63, 69]. En la Fig. 3.4 se presentan de manera visual los valores reportados en investigaciones en donde se sustituyó el agregado fino (masa o vol.) por partículas PET < 6 mm producto del triturado de envases de botellas (características de partículas PET semejantes a las del presente estudio) donde se puede apreciar claramente una tendencia a la disminución del módulo de elasticidad conforme incrementa el porcentaje de sustitución.

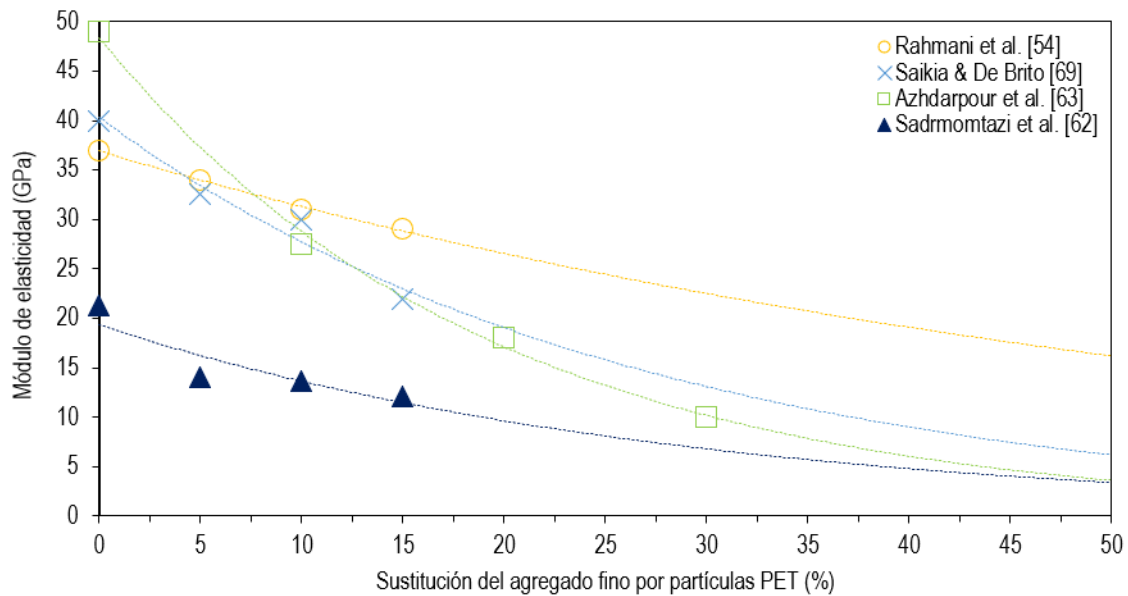


Figura 3.4: Módulo de elasticidad reportado por diversos autores.

Resistencia a la flexión

En la Fig. 3.5 se presenta una compilación de los resultados obtenidos por autores que evaluaron la resistencia a esfuerzos de flexión de morteros y concreto con partículas PET $< 6\text{ mm}$, con una granulometría distribuida y sin ningún tratamiento además del triturado (características parecidas a la de las partículas PET utilizadas en el presente trabajo).

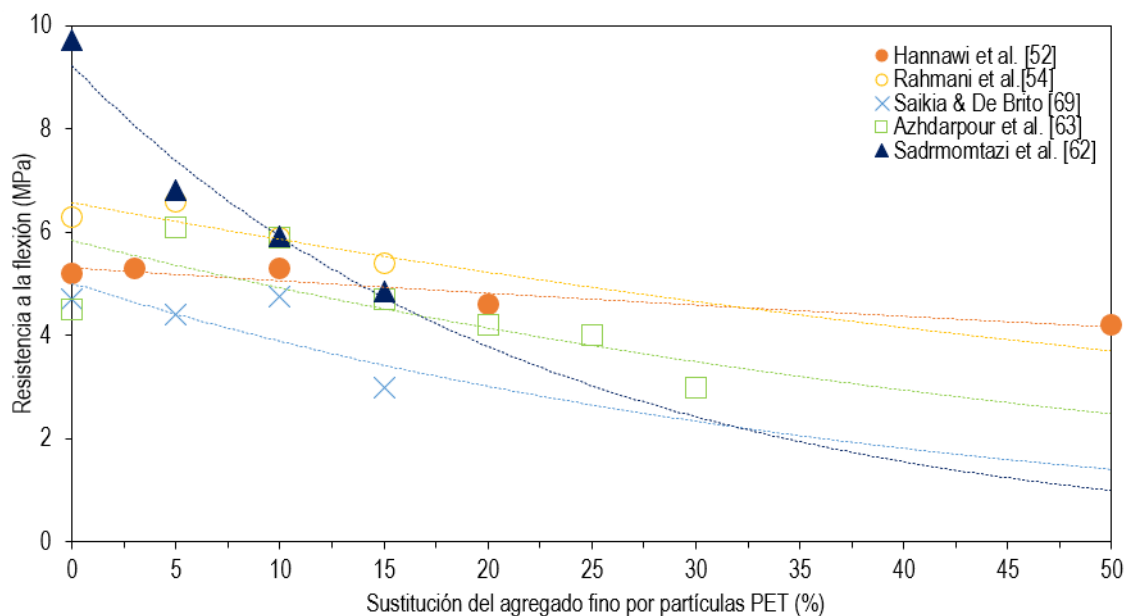


Figura 3.5: Valores de la resistencia a la flexión reportados por diversos autores.

De manera general, en la Fig. 3.5 se puede distinguir la tendencia a la baja de la resistencia a esfuerzos de flexión cuando el porcentaje de partículas PET aumenta, sin embargo, autores reportaron que cuando la sustitución no es mayor al 10 %, la resistencia a esfuerzos de flexión de las matrices puede ser muy parecida o incluso superar mínimamente a la de la matriz referencia [52, 54, 63, 69].

Entre otros autores que reportan la resistencia a esfuerzos de flexión de concreto o mortero con partículas PET, Albano et al. [50] reportaron un incremento del 6 % de este valor cuando se sustituye el 10 % (vol.) del agregado fino por partículas PET de 2.60 mm, en sustituciones mayores y con partículas PET de 11.40 mm registraron un decremento de la resistencia del concreto. Akçaözoglu et al. [60] registraron valores homólogos a la resistencia a la flexión (28 días) del mortero referencia con una sustitución (unidad de masa) del 50 % del material cementante por partículas PET < 4 mm.

3.4. Propiedades físicas

En la literatura se ha reportado el estudio de otras propiedades y características físicas (además de las mecánicas) de concreto o mortero en donde se incorporan partículas PET. Entre estas propiedades se encuentran la densidad en estado endurecido, contracción por secado, la conductividad térmica, la resistencia al impacto y la resistencia al desgaste por abrasión.

En las Tablas 3.5 y 3.6, se presenta una recopilación de las propiedades físicas de este tipo de matrices que diversos autores han reportado.

Tabla 3.5: Propiedades físicas evaluadas por diversos autores (1/2).

Referencia	Densidad en estado endurecido	Contracción por secado	Conductividad térmica
Choi et al. [66]	x		
Marzouk et al. [49]	x	x	
Choi et al. [67]	x		
Yesilata et al. [65]			x
Akçaözoglu et al. [60]	x	x	
Hannawi et al. [52]	x		
Frigione [61]		x	
Akçaözoglu et al. [74]	x		x

Tabla 3.6: Propiedades físicas evaluadas por diversos autores (2/2).

Referencia	Densidad en estado endurecido	Contracción por secado	Resistencia al impacto	Resistencia a la abrasión
Silva et al. [68]		x		
Rahmani et al. [54]	x			
Safi et al. [70]	x			
Akçaözoğlu & Ulu [55]	x			
Islam et al. [71]	x			
Azharpour et al. [63]	x			
Sadrmomtazi et al. [62]	x	x		
Thorneycroft et al. [72]	x			
Saikia & De Brito [69]				x
Saxena et al. [64]			x	

Densidad en estado endurecido

Los autores que evaluaron esta propiedad coinciden de manera unánime con el efecto de disminución de la densidad en estado endurecido que la incorporación de partículas PET propicia cuando son incluidas en el concreto o mortero [49, 51, 52, 54, 55, 60, 62, 63, 66, 67, 70–72, 74]. Entre mayor la cantidad de partículas PET la densidad de la matriz es menor debido a la diferencia entre la densidad del agregado grueso, agregado fino o material cementante con la baja densidad de las partículas PET.

Saikia & De Brito [69] reportaron disminuciones de 2, 4 y 6 % en la densidad del concreto cuando se sustituyó (vol.) el 5, 10 y 15 % respectivamente del agregado fino por partículas PET de 1-4 mm.

Sadrmomtazi et al. [62] registraron densidades 11, 13 y 14 % menores a la densidad del concreto referencia cuando se sustituyó (unidad de masa) el 5, 10 y 15 % respectivamente del agregado fino por partículas PET ≤ 4.75 mm.

Contracción por secado

De los autores que reportaron este parámetro, Marzouk et al. [49] evaluaron la contracción de morteros con partículas PET ≤ 5 mm en condiciones de saturación completa, los resultados mostraron que morteros con una sustitución menor a 30 % (vol.) del agregado fino por partículas PET presentan un comportamiento similar al mortero sin partículas PET.

Frigione [61] reportó variaciones en la contracción por secado entre 2.3 y 2.8 % a los 365 días en concretos con una sustitución (unidad de masa) del 5 % del agregado fino por partículas PET ≤ 2.36 mm, en este estudio, la sustitución realizada propició un ligero

aumento de la contracción por secado, sin embargo, el autor especifica que esta variación es aceptable para un concreto estructural.

Silva et al. [68] implementaron tres diferentes tipos de curado (ambiente de intemperie, ambiente de laboratorio y cámara de humedad) durante 90 días para concretos con sustituciones (vol.) de 7.5 y 15 % del agregado fino por partículas PET de 1-4 mm. Los resultados mostraron que las partículas PET propiciaron una menor contracción por secado. En general las contracciones por secado más bajas se registraron en los concretos curados en la cámara de humedad.

Sadrmomtazi et al. [62] reportaron valores de cambio de longitud por contracción de secado a los 90 días de 0.18, 0.21, 0.25 y 0.31 % cuando se sustituyó (unidad de masa) el 0, 5, 10 y 15 % (respectivamente) del agregado fino por partículas PET ≤ 4.75 mm en mezclas de concreto. En este estudio, la adición de partículas PET a las mezclas aumentó la contracción por secado.

Conductividad térmica

Con respecto a las propiedades térmicas de concretos o morteros con partículas PET, Yesilata et al. [65] estudiaron el efecto en el aislamiento térmico que tiene la colocación de partículas PET sobre la superficie del concreto antes de endurecerse totalmente. Los resultados demostraron que con este tipo de sistema la transmitancia térmica puede ser reducida hasta un 18.16 %.

Akçaözoglu et al. [74] evaluaron la conductividad térmica de concreto en donde se sustituyeron (vol.) los agregados naturales por partículas PET < 4 mm, los resultados mostraron que la conductividad térmica puede reducirse 34, 39, 43 y 58 % cuando se sustituye el 30, 40, 50 y 60 % de los agregados por partículas PET respectivamente.

Resistencia al impacto

En el año 2018, Saxena et al. [64] evaluaron la resistencia al impacto de concreto en donde se sustituyó (unidad de masa) (i) el agregado fino y (ii) el agregado grueso por partículas PET (i) ≤ 4.75 mm y (ii) 4.75-20 mm respectivamente. Los resultados obtenidos mostraron que, la capacidad del concreto para resistir al impacto puede incrementar cinco veces si se realiza la sustitución del 20 % del agregado natural por partículas PET. Cuando el porcentaje de sustitución fue el mismo, no se observaron diferencias entre los concretos en donde se sustituyó el agregado fino y el agregado grueso.

Resistencia al desgaste por abrasión

Saikia & De Brito [69] estudiaron el comportamiento con respecto al desgaste por abrasión de especímenes de concreto con diferentes porcentajes de partículas PET (5, 10 y 15 %) de diversos tamaños: (i) 2-11.20 mm, (ii) 1-4 mm y (iii) 1-4 mm (pellets). Los autores concluyeron que la incorporación de plástico PET como agregado puede mejorar la resistencia a la abrasión del concreto. En el caso particular de este estudio, la resistencia a la abrasión del concreto incrementó conforme incrementaba el porcentaje de sustitución,

en el caso de los concretos con partículas PET de (i) 2-11.20 *mm* y (ii) 1-4 *mm*, el mejor comportamiento se observó cuando se sustituyó el 10 % del agregado fino.

3.5. Indicadores de calidad

En la literatura, algunos autores han reportado indicadores de calidad de concretos o morteros en los que se incorporan partículas PET. En las Tablas 3.7 y 3.8, se enlistan los aspectos relativos a la calidad de este tipo de matrices reportados por autor.

Tabla 3.7: Indicadores de durabilidad reportados por diversos autores (1/2).

Referencia	Resistencia a medios ácidos	Resistencia a altas temperaturas	Permeabilidad de gases	Resistividad eléctrica
Albano et al. [50]		x		
Hannawi et al. [52]			x	
Araghi et al. [56]	x			
Nikbin et al. [57]	x			
Rahimi et al. [58]	x			
Sadrmomtazi et al. [62]				x

Tabla 3.8: Indicadores de durabilidad reportados por diversos autores (2/2).

Referencia	Profundidad de carbonatación	Penetración del ión Cl^-	Velocidad de pulso ultrasónico	Permeabilidad de agua
Marzouk et al. [49]				x
Choi et al. [67]				x
Albano et al. [50]			x	x
Akçaözoglu & Ulu [55]			x	
Akçaözoglu et al. [60]	x			x
Hannawi et al. [52]				x
Silva et al. [68]	x	x		x
Safi et al. [70]			x	x
Araghi et al. [56]			x	
Nikbin et al. [57]			x	
Rahimi et al. [58]			x	
Sadrmomtazi et al. [62]			x	x

Resistencia a medios ácidos

Son pocos los estudios realizados con respecto a la resistencia de concretos o morteros con partículas PET en medios ácidos. Un estudio realizado por Araghi et al. [56] reportó que en concreto en donde se sustituyó 5, 10 y 15 % del agregado fino por partículas PET $\leq 4.75 \text{ mm}$ se registró una pérdida de masa de 10.26, 8.98 y 6.57 % respectivamente contra una pérdida de masa de 13.47 % del concreto referencia cuando fueron expuestos a una solución de ácido sulfúrico al 5 %. En el estudio se concluyó que, concretos con partículas PET tienen una mejor resistencia al ataque de ácido sulfúrico debido a la resistencia del plástico PET en ambientes ácidos. Otros autores que estudiaron el ataque de ácido sulfúrico en concretos con estas mismas características coinciden con lo descrito anteriormente [57, 58].

Resistencia a altas temperaturas

Para determinar el efecto de altas temperaturas en concreto con partículas PET, Albano et al. [50] expusieron especímenes de concreto a tres diferentes temperaturas (200, 400 y 600 °C) durante dos horas. Al finalizar la exposición se realizó una inspección visual y se evaluó la resistencia a la flexión de los concretos. Los especímenes expuestos a los 200 °C presentaron una resistencia similar a la del concreto referencia y visualmente no hubo variaciones significativas en la superficie. En los especímenes expuestos a 400 y 600 °C se evidenciaron variaciones en el color y deterioro de la superficie. De la evaluación de la resistencia a la flexión posterior a la exposición se concluyó que a altas temperaturas (400 y 600 °C), la reducción de la resistencia no solo se le atribuye a la degradación térmica de las partículas PET que dan paso a la formación de poros dentro de la matriz, sino también a la expansión de algunos de los componentes del cemento debido a la exposición a altas temperaturas.

Similar a lo descrito anteriormente, Saxena et al. [64] expusieron especímenes de concreto con partículas PET a 300 y 600 °C durante una hora. Al finalizar este periodo, evaluaron la resistencia a compresión residual de los concretos. En el estudio, después de ser expuestos a las altas temperaturas todos los concretos registraron una reducción de la resistencia, los resultados de la resistencia residual después de ser expuestos a 300 °C del concreto en donde se sustituyó el 5 % del agregado fino o agregado grueso por partículas PET y del concreto referencia tuvieron una baja variabilidad, sin embargo, al igual que el estudio descrito anteriormente realizado por Albano et al. [50] los autores concluyen que la exposición a altas temperaturas de concretos con partículas PET provoca la degradación térmica de las partículas y por consecuencia porosidades que afectan la resistencia mecánica.

Permeabilidad de gases

Hannawi et al. [52] analizaron la permeabilidad de gases aparente de morteros en donde se sustituyó el 3, 10, 20 y 50 % (vol.) del agregado fino por partículas PET $\leq 6.30 \text{ mm}$. Los resultados obtenidos mostraron un aumento del coeficiente de permeabilidad en los

morteros conforme incrementa el porcentaje de sustitución. Los autores atribuyen este incremento a baja cohesión entre los materiales cementantes y las partículas PET lo que propicia un mortero con una matriz porosa.

Resistividad eléctrica

Sadrmomtazi et al. [62] reportaron la resistividad eléctrica de concreto en donde se sustituyó el 5, 10 y 15 % (unidad de masa) del agregado fino por partículas PET. Los resultados mostraron que, a la edad de 90 días, no existía diferencia en la resistividad eléctrica de los concretos con partículas PET con la del concreto referencia.

Profundidad de carbonatación

Akçaözoglu et al. [60] reportaron la profundidad de carbonatación de mortero con (i) cemento portland y partículas PET < 4 mm, (ii) cemento portland, escoria granulada de alto horno y partículas PET < 4 mm, (iii) cemento portland, partículas PET < 4 mm y agregado fino, (iv) cemento portland, escoria granulada del alto horno, partículas PET < 4 mm y agregado fino. Los resultados obtenidos mostraron que los morteros con escoria granulada de alto horno presentaron una menor profundidad de carbonatación. En el caso de este estudio, todas las mezclas de mortero incluían partículas PET por lo que no es posible identificar apropiadamente el efecto de las partículas PET cuando son expuestos a CO_2 .

En 2013, Silva et al. [68] registraron un incremento en la profundidad de carbonatación de 37.5 y 97.7 % con respecto al concreto referencia cuando se sustituyó el 7.5 y 15 % (vol.) respectivamente del agregado fino por partículas PET de 1-4 mm provenientes del triturado de botellas del mismo material, los autores reportaron profundidades de carbonatación más bajas cuando se utilizaron pellets de PET de 1-4 mm. En el estudio, una de las constantes fue la trabajabilidad de los concretos, la cual se logró modificando la relación agua/cemento, al final la relación agua/cemento fue mayor para el concreto con partículas PET que en el concreto con pellets PET o en el concreto referencia. En este estudio, la inclusión de plástico PET en el concreto significó un incremento en la profundidad de carbonatación.

Penetración del ión cloruro

Silva et al. [68] evaluaron la penetración del ion cloruro a los 91 días en especímenes de concreto con partículas PET de tres diferentes tamaños: (i) 2 -11.20 mm, (ii) 1-4 mm y (iii) 1-4 mm (pellets), en todos los casos, se registraron coeficientes de difusión del ión cloruro mayores al del concreto referencia, comparando los concretos con partículas PET el mejor comportamiento lo presentó el concreto con pellets PET. En este estudio, la relación agua/cemento fue diferente para cada mezcla.

Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico de concreto o mortero con partículas PET es un parámetro que ha sido reportado por diversos autores, los cuales consensan en una disminución de la velocidad del pulso ultrasónico debido a la incorporación de partículas PET en la matriz [50, 54–58, 62, 63, 70, 74].

En la Fig.3.6 se presenta la velocidad de pulso ultrasónico de concreto a los 28 días reportada en estudios en donde se utilizaron partículas PET $< 6\text{ mm}$ con una granulometría distribuida y sin ningún tratamiento más que el triturado (características similares a las de las partículas PET utilizadas en la presente investigación) para sustituir diferentes porcentajes del agregado fino.

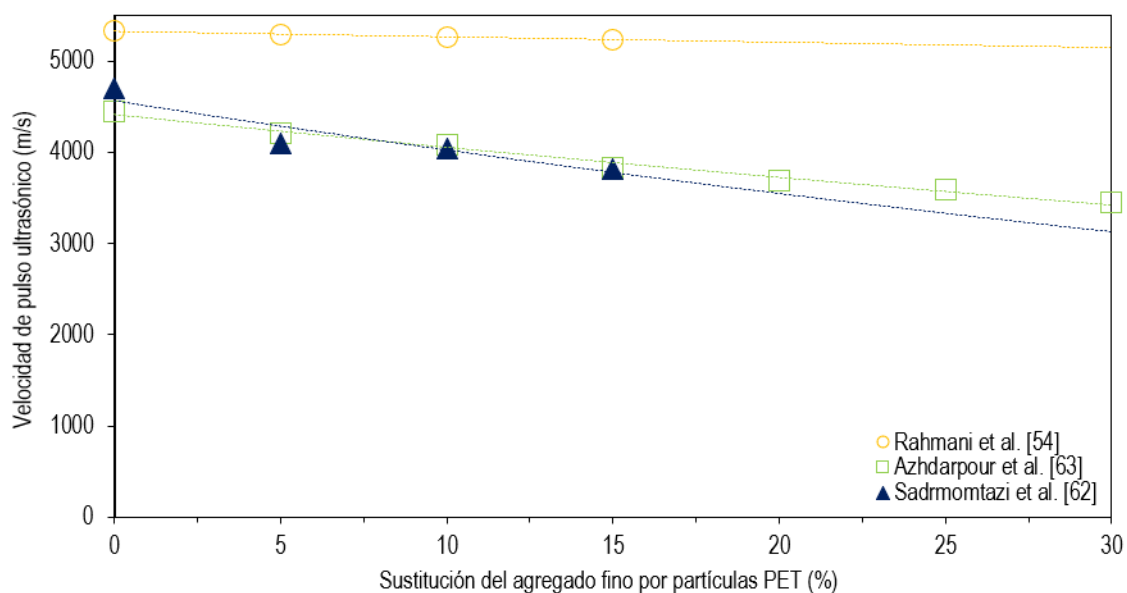


Figura 3.6: Valores de la velocidad de pulso reportados por diversos autores.

En la gráfica de la Fig.3.6 se aprecia la tendencia de la disminución de la velocidad de pulso ultrasónico de los concretos conforme incrementa el porcentaje de sustitución. Los valores más bajos se aprecian en los estudios realizados por Azhdarpour et al. [63] y Sadrmomtazi et al. [62] quienes realizaron la sustitución del agregado fino por unidad de masa, sin embargo, Rahmani et al. [54], reportó una variación menor cuando la sustitución fue realizada por unidad de volumen.

Permeabilidad de agua

Absorción capilar/Sortividad. Marzouk et al. [49] reportaron el coeficiente de sortividad de morteros con diferentes porcentajes de partículas PET $< 5\text{ mm}$. Los resultados mostraron que conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET el coeficiente de sortividad disminuye.

Choi et al. [67] evaluaron la absorción capilar de morteros con sustituciones de 25, 50 y 75 % del agregado fino por partículas PET $\leq 4.74 \text{ mm}$ fabricadas a base de un proceso de fundición entre partículas PET y arena de río. Con respecto al coeficiente del mortero referencia ($2.876 \text{ E-04 } (g/mm^2)/t^{0.5}$), los autores reportaron un coeficiente menor en el mortero en donde se sustituyó el 25 % ($1.83 \text{ E-04 } (g/mm^2)/t^{0.5}$), en los morteros donde la sustitución fue de 50 y 75 % el coeficiente de sortividad con respecto a la referencia aumentó 15 y 52 % correspondientemente.

Silva et al. [68] fabricaron especímenes de concreto empleando partículas PET de diferentes tamaños: (i) 2-11.20 mm , (ii) 1-4 mm y (iii) 1-4 mm (pellets) y evaluaron la absorción capilar. El concreto con menor desempeño fue el que tenía una sustitución de 7.5 % del agregado grueso por partículas PET de 2-11.20 mm , presentó un 29 % de incremento en la absorción capilar, seguido del concreto en donde se sustituyó el 15 % del agregado fino por partículas PET de 1-4 mm , el cual registró un incremento de 13.50 % con respecto al concreto referencia. El concreto en donde se sustituyó el 7.5 % del agregado fino por partículas PET de 1-4 mm presentó una reducción de 7 % de la absorción capilar. En el caso de los concreto con pellets PET (7.5 y 15 %) registraron una reducción de la absorción capilar de 17 y 19 % respectivamente.

Porcentaje de absorción de agua. Albano et al. [50] reportaron el porcentaje de absorción de agua de concreto con una sustitución de 10 y 20 % del agregado fino por partículas PET de tres diferentes tamaños: (i) Tipo A, $\bar{x} = 2.60 \text{ mm}$, (ii) Tipo B, $\bar{x} = 11.40 \text{ mm}$ y (iii) Tipo C, 50/50 (A y B). Los resultados obtenidos mostraron que el porcentaje de absorción de los concretos con 10 % de partículas PET es menor que el concreto en donde se sustituyó el 20 % debido a una menor porosidad. Los concretos en donde se utilizaron partículas PET de 11.40 mm registraron valores más altos de absorción de agua.

Akçaözöglü et al. [60] reportaron la absorción de agua de morteros con partículas PET $< 4 \text{ mm}$. En este estudio todos los morteros tenían un cierto porcentaje de partículas PET, de las cuatro mezclas elaboradas, el promedio de la absorción capilar reportada fue de 13.10 %, siendo 14.80 % el mayor porcentaje reportado y 11.9 % el menor. Los autores mencionaron que estos valores se encuentran dentro de los valores permitidos para concretos ligeros.

Hannawi et al. [52] registraron un incremento del porcentaje de absorción de agua y de la porosidad en los morteros conforme aumentaba la cantidad de sustitución del agregado fino por partículas PET $\leq 6.30 \text{ mm}$, sin embargo, estos valores fueron poco significantes (véase Fig. 3.7). Este mismo comportamiento fue reportado por Sadrnemtazi et al. [62], cuando se realizó la sustitución del agregado fino por partículas PET $\leq 4.75 \text{ mm}$ en concretos (véase Fig. ??). En este caso, Hannawi et al. [52] sustituyeron el agregado fino por unidad de volumen y Sadrnemtazi et al. [62] por unidad de masa.

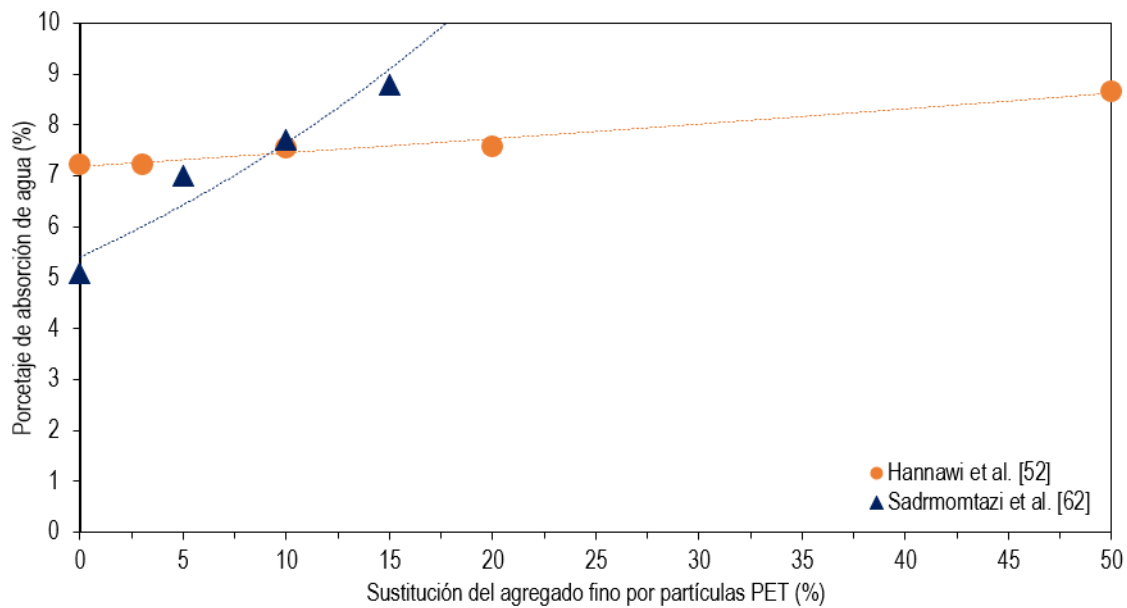


Figura 3.7: Valores del porcentaje de absorción de agua reportados por diversos autores.

En otro estudio realizado por Safi et al. [70] reportaron una disminución de 4% del porcentaje de absorción de agua casi homologa cuando se sustituyó el 10, 20, 30 y 50 % del agregado fino por partículas PET cilíndricas y huecas (fabricadas a base de un proceso de fundición) en morteros. Los autores relacionan este comportamiento al efecto de relleno de huecos en la matriz cementante con las partículas PET y al reemplazo de la arena que es un material más poroso que las partículas PET. En el estudio se reporta también la porosidad, la cual también disminuye respecto a la porosidad del mortero referencia, mostrando la misma tendencia que el porcentaje de absorción de agua.

Capítulo 4

Hipótesis y objetivos

Derivado de un análisis y segregación de información de los estudios hasta ahora realizados sobre matrices de concreto o mortero que incorporan plástico tipo tereftalato de polietileno (PET) se plantea la sustitución del 0, 5, 10, 15, 20 y 30 % del agregado fino (por unidad de volumen) por partículas PET menores a 4.75 *mm* en mortero base cemento portland. Además, se determinó el uso de un aditivo exclusor de aire. En base a lo planteado se supone la siguiente hipótesis y se establecieron los siguientes objetivos.

4.1. Hipótesis

La incorporación de partículas PET como sustituto del agregado fino en una matriz de mortero base cemento portland dará como resultado un material de construcción ligero, resistente, con mejores propiedades térmicas aislantes y parámetros de calidad semejantes a la de un mortero base cemento portland convencional.

4.2. Objetivos

4.2.1. Objetivo general

Analizar los cambios en las propiedades en estado fresco y estado endurecido en función de la sustitución del volumen de diferentes porcentajes del agregado fino por partículas PET y de la inclusión de un aditivo reductor de aire en morteros base cemento portland, así como el análisis del comportamiento de este tipo de morteros en función del tiempo.

4.2.2. Objetivos específicos

- Determinar las variaciones en las propiedades físicas y mecánicas entre morteros con diferentes porcentajes de partículas PET.
- Monitorear y analizar el comportamiento de morteros base cemento portland con partículas PET, mediante técnicas no destructivas.

- Estudiar la viabilidad del uso de un aditivo reductor de aire para reducir el contenido de aire de los morteros mediante la evaluación de sus propiedades físicas y mecánicas.

Capítulo 5

Metodología experimental

En este capítulo se describen los materiales utilizados, se especifica el proceso de elaboración de los especímenes y se detallan las técnicas y procedimientos seguidos para el desarrollo experimental de la presente investigación.

5.1. Materiales

Cemento portland ordinario

Para la fabricación de las diferentes mezclas de mortero se utilizó cemento portland ordinario (CPO), identificado según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-2004 [3] como un cemento CPO 40. Para su caracterización se determinó la densidad utilizando un picnómetro de helio y composición química mediante un análisis de fluorescencia de rayos X (FRX), así mismo se determinó el contenido de orgánicos mediante el método de pérdida por ignición.

Agregado fino

Para la elaboración de los morteros se utilizó arena caliza proveniente del área metropolitana de Monterrey en el Estado de Nuevo León, México.

Se optó por la utilización de un agregado fino con granulometría controlada, para lo cual, se compensó la granulometría original para que la distribución de tamaño de partículas se encontrara dentro de los límites que recomienda la ASTM C33 [76]. Del agregado fino, además de la distribución granulométrica se determinó el módulo de finura, peso unitario (suelto y compacto), gravedad específica y porcentaje absorción.

Partículas de tereftalato de polietileno

Las partículas de tereftalato de polietileno (PET) que se utilizaron como sustituto del agregado fino son subproducto del reciclaje de botellas del mismo material (véase Fig. 5.1), y son resultado de un proceso de trituración.

Estas partículas fueron recolectadas de una planta de reciclaje de material PET, localizada en la ciudad de Apodaca en el Estado de Nuevo León, México.



Figura 5.1: Partículas PET subproducto del reciclaje de botellas.

La caracterización de las partículas PET consistió en la determinación de su distribución granulométrica, densidad (masa específica relativa), peso unitario (suelto y compacto) y la confirmación de la naturaleza del material por medio de un análisis de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR).

Agua

Para prevenir la contaminación de las mezclas se utilizó agua destilada para la elaboración de los morteros.

Aditivo

Para la elaboración de las mezclas de mortero se utilizó un aditivo reductor de aire. Aditivo líquido base surfactantes no-iónicos, con una densidad de $1 \pm 0.01 \text{ g/ml}$ y un pH de 4 ± 1 .

5.2. Dosificación de morteros

Para cumplir con los objetivos de la investigación se diseñaron un total de 12 mezclas de mortero en las cuales se sustituyó el 0, 5, 10, 15, 20 y 30% del volumen del agregado fino por partículas PET. Para todas las mezclas se utilizaron 518 kg/m^3 de cemento, una relación agua/cemento (a/c) de 0.6 y una relación cemento-arena de 2.8, ambas relaciones se mantuvieron constantes en las diferentes mezclas. Además, en 6 de las mezclas se utilizó el aditivo reductor de aire (50 g/m^3).

5.3. Especímenes

Elaboración de mezclas de mortero

La elaboración de las mezclas de mortero se realizó siguiendo la práctica estándar ASTM C305 [81].

En el caso de los morteros con partículas PET, previo a la elaboración de las mezclas bajo la práctica anteriormente descrita se mezclaron el agregado fino y las partículas PET para después ser incorporadas de manera conjunta a la mezcla.

Geometría de los especímenes

Para cumplir con los requerimientos experimentales se fabricaron un total de 324 especímenes de mortero. De los cuales 36 fueron especímenes cilíndricos de 75 mm de diámetro y 150 mm de altura, 36 especímenes cilíndricos de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura y 252 especímenes cúbicos de 50 mm.

Fabricación de especímenes

Los especímenes cúbicos (50 mm) fueron fabricados siguiendo el método descrito en el estándar ASTM C109 [82] y los especímenes cilíndricos fueron elaborados obedeciendo a la práctica estándar ASTM C192 [83].

Después de ser desmoldados los especímenes de mortero fueron curados en tanques de agua saturada con hidróxido de calcio (3 g/L) [84] a una temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ por un periodo de 28 días (excluyendo los especímenes que fueron sometidos a pruebas a edades más tempranas), véase Fig. 5.2.

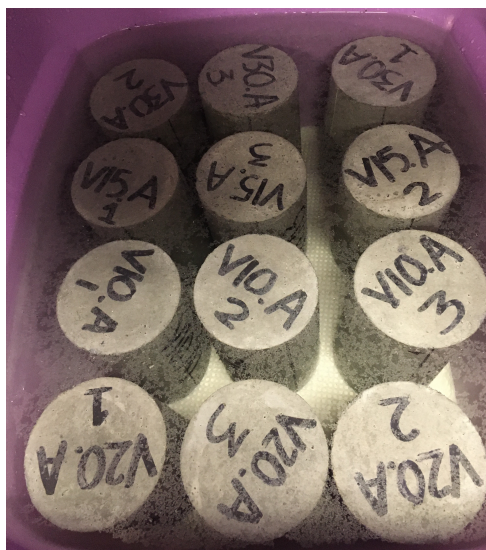


Figura 5.2: Curado de especímenes de mortero.

5.4. Técnicas para la caracterización de los morteros

En esta sección se describen de manera detallada la periodicidad, técnicas y procedimientos implementados para la caracterización de los morteros elaborados en la investigación (véase Fig. 5.3).

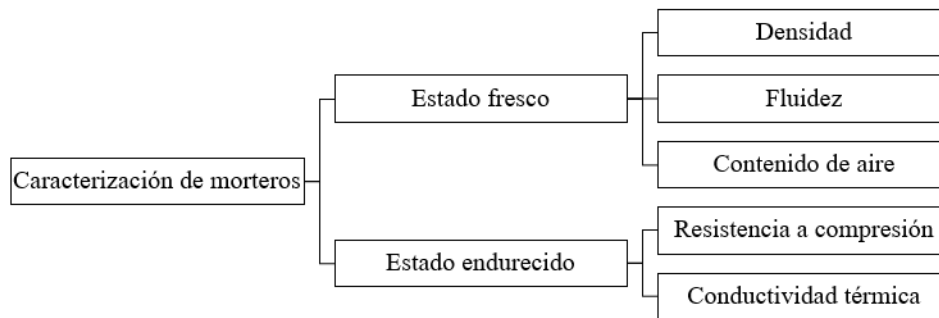


Figura 5.3: Prácticas y procedimientos para la caracterización para las mezclas de mortero.

Contenido de aire

La obtención del contenido de aire de las mezclas de mortero se realizó bajo el método estándar descrito en la ASTM C185 [87]. Se utilizó un recipiente cilíndrico de volumen conocido (400 ml), con un diámetro de 76 mm.

Para determinar el contenido de aire de los morteros, después de realizada la mezcla, el recipiente cilíndrico fue llenado en tres capas iguales, cada capa fue apisonada 20 veces y enseguida se aplicaron ligeros golpes (5 golpes) alrededor del recipiente con un mazo de goma con la finalidad de llenar apropiadamente el recipiente y eliminar vacíos en la mezcla de mortero. Después de compactar la última capa, el recipiente con mortero se enrazó cuidadosamente y se limpiaron los alrededores de manera que no quedaron restos de mezcla en el recipiente. Una vez terminado este proceso el recipiente con mortero fue pesado y registrado su valor.

Siguiendo lo descrito en el método de la ASTM C185 [87] para calcular el contenido de aire de los morteros se utilizó la Ecuación 5.4.1:

$$\text{Contenido de aire}(\%) = 100 - [1 - (m_a/m_c)] \quad (5.4.1)$$

En donde m_a es la masa por unidad de volumen determinada por este método¹ y m_c es la masa teórica por unidad de volumen calculada según la gravedad específica de los materiales.

Este procedimiento se repitió para determinar el contenido de aire de cada una de las diferentes mezclas de mortero.

¹ $m/400$, en donde m es la masa en gramos de los 400 ml de mortero.

Densidad

Se calculó la densidad de los morteros en estado fresco y en estado endurecido de las diferentes mezclas de mortero.

Para determinar la densidad de los morteros en estado fresco, a la par que se determinó el contenido de aire, una vez llenado y pesado el recipiente cilíndrico, se registró el peso y se calculó la densidad con la siguiente ecuación (Ecuación 5.4.2):

$$\text{Densidad en estado fresco} = \frac{m - m_r}{v} \quad (5.4.2)$$

En donde m es la masa del recipiente con mortero (kg), m_r es la masa del recipiente vacío (kg) y v es el volumen del recipiente (m^3).

La densidad en estado endurecido se determinó utilizando tres especímenes cúbicos (50 mm) por mezcla de mortero una vez que transcurrieron los 28 días de curado. El procedimiento consistió en (i) el registro de las dimensiones y masa inicial del espécimen, (ii) secado del espécimen en un horno a una temperatura de $60 \pm 5\text{ }^\circ\text{C}$ hasta peso constante, (iii) registro de la masa final y (iv) cálculo de la densidad con la Ecuación 5.4.3:

$$\text{Densidad en estado endurecido} = \frac{m_s}{v} \quad (5.4.3)$$

En donde m_s es el valor final de la masa del espécimen después del secado (kg) y v es el volumen del espécimen (m^3).

Fluidez

La fluidez de las mezclas de mortero se realizó siguiendo el protocolo descrito en el método de prueba estándar ASTM C1437 [86] (véase Fig. 5.4).



Figura 5.4: Ensayo de fluidez de mezclas de mortero.

Después de mezclados los componentes del mortero, se procedió a llenar el molde que se encontraba en el centro de la mesa de fluidez, este molde se llenó en dos capas de mortero, cada capa fue apisonada 20 veces, una vez llenado el molde se enrazó y limpiaron los restos de mortero que quedaron fuera del molde. Cuidadosamente se levantó el molde e inmediatamente se procedió a golpear la mesa de fluidez, de manera que, impactara 25

veces en 15 segundos. Una vez finalizado este proceso, se registró cuatro veces el diámetro de los morteros (a lo largo de las cuatro líneas marcadas en la mesa de fluidez).

La fluidez que se reportó es el promedio de los cuatro diámetros medidos.

Resistencia a la compresión

La determinación de la resistencia a la compresión de los especímenes se realizó según el método normalizado de la ASTM C109 [82]. Tres especímenes cúbicos (50 *mm*) por mezcla fueron ensayados a los 7, 28, 56 y 160 días de edad.

Después de transcurridos los 28 días de curado, los especímenes ensayados a los 56 y 160 días fueron retirados del contenedor de curado y colocados en la intemperie en un ambiente natural urbano hasta su respectivo día de ensayo.

Conductividad térmica

Basado en el método estándar de la ASTM D5334 [88] se determinó la conductividad térmica de las diferentes mezclas de mortero utilizando un equipo analizador de propiedades térmicas con un sensor de aguja de 2.4 *mm* de diámetro y 100 *mm* de longitud.

Para este fin se utilizaron tres cilindros de 75 *mm* de diámetro y 150 *mm* de altura por mezcla de mortero, los cuales, después de transcurridos los 28 días de curado fueron cuidadosamente perforados en la parte superior media de manera tal que el sensor entrara por completo y de manera justa (véase Fig. 5.5).

La medición de la conductividad térmica de las mezclas de mortero se realizó en dos diferentes condiciones: especímenes saturados y especímenes secos. Para la condición de “saturados” los especímenes fueron inmersos en agua destilada durante un periodo de siete días. Para alcanzar la condición de “secos” los especímenes fueron secados a una temperatura de 60 ± 5 °C hasta peso constante, antes de la medición se dejó enfriar a los especímenes a temperatura ambiente por 24 horas dentro de un desecador. Ambas mediciones fueron realizadas a una temperatura de 23 ± 2 °C.



Figura 5.5: Medición de conductividad térmica en espécimen de mortero.

5.5. Técnicas para la evaluación de indicadores de calidad

A continuación, se presentan las técnicas utilizadas para la medición de los indicadores de calidad de las diferentes mezclas de mortero.

Velocidad de pulso ultrasónico

El monitoreo de la velocidad de pulso de las diferentes mezclas de mortero se realizó para evaluar la uniformidad y su calidad a través del tiempo, para lo cual se siguió el método descrito en la ASTM C597 [89].

Se utilizó un equipo para pruebas de pulso ultrasónico y se fabricaron tres especímenes cilíndricos de 100 *mm* de diámetro y 200 *mm* de altura por mezcla de mortero, los cuales fueron curados 28 días para después ser expuestos en un ambiente natural urbano².

La velocidad de pulso ultrasónico se midió de manera directa a la edad de 7, 14, 28 y 134 días (véase Fig. 5.6).



Figura 5.6: Medición de velocidad de pulso en especímenes de mortero.

Resistividad eléctrica

Basado en el ensayo descrito en la ASTM C1876 [90] se determinó la resistividad eléctrica en especímenes cilíndricos de mortero de 100 *mm* de diámetro y 200 *mm* de altura (tres especímenes por mezcla) con el método de Wenner de cuatro electrodos utilizando un equipo Resipod Proceq con una distancia entre sondas de 38 *mm* (véase Fig. 5.7).

²Estos especímenes fueron también utilizados para el monitoreo de la resistividad eléctrica por lo que, después de terminado el periodo de curado (28 días) los especímenes fueron expuestos en un ambiente natural urbano e inmersos seis días después de realizada su medición en agua saturada con hidróxido de calcio.



Figura 5.7: Medición de resistividad eléctrica en especímenes de mortero.

La resistividad eléctrica de los especímenes se registró a la edad de 7, 14, 28 y 140 días. Después de los 28 días de curado los especímenes fueron expuestos en un ambiente natural urbano, previo a la medición de la resistividad eléctrica los especímenes fueron saturados por siete días en agua saturada con hidróxido de calcio y regresados al ambiente de exposición.

Absorción capilar

Después de transcurridos 28 días de curado tres especímenes cúbicos (50 mm) por mezcla de mortero fueron acondicionados para el cálculo de la tasa de absorción capilar.

Los especímenes fueron secados en un horno a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta una variación de masa menor al 0.2% en 24 horas de secado [91]. Cuando estas condiciones fueron alcanzadas se dejó enfriar a los especímenes a temperatura ambiente dentro de un desecador y se registraron sus dimensiones.

Siguiendo el método de prueba estándar de la ASTM C1585 [92] las caras laterales del espécimen fueron selladas con cinta de vinil (“duct tape”) y se registró el peso inicial de cada uno de los especímenes. Al finalizar, los especímenes se colocaron con la cara superior (de cuándo fueron fabricados) boca abajo en un contenedor con agua previamente dispuesto (véase Fig. 5.8).

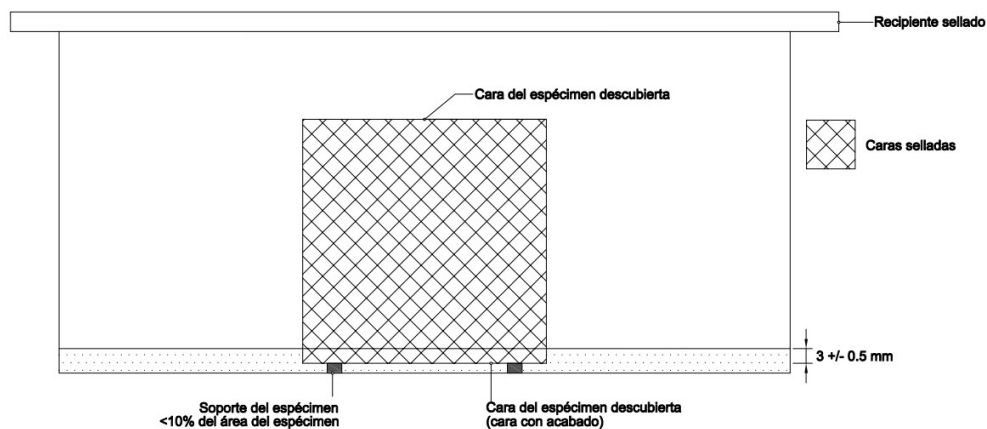


Figura 5.8: Esquema del ensayo de absorción capilar.

El incremento de masa debido a la absorción de agua se registró en lapsos divididos en un total de ocho días (véase Tabla 5.1).

Tabla 5.1: Registro de incremento de masa [92].

Minutos	0	1	5	10	20	30	60...													
Horas							1	2	3	4	5	6	24...							
Días													1	2	3	4	5	6	7	8

Una vez terminado el registro de datos, se calculó la tasa de absorción (I) con la Ecuación 5.5.1:

$$I = \frac{m_t}{(a)(d)} \quad (5.5.1)$$

En donde m_t (mm) es la variación de la masa del espécimen en un tiempo (s) determinado, a (mm^2) es el área expuesta del espécimen y d (g/mm^3) es la densidad del agua³.

Se calculó la tasa de absorción inicial y la tasa de absorción secundaria, para las cuales se graficaron los valores de la tasa de absorción (mm) y tiempo ($s^{1/2}$), según la prueba estándar ASTM C1585 [92] la tasa de absorción inicial se define como la pendiente de la recta que forman los puntos de 1 minuto a las 6 horas y la tasa de absorción secundaria es la pendiente de la recta que se forma usando los puntos de 1 a 7 días (véase Fig. 5.9), ambas pendientes se determinaron mediante el método de regresión por mínimos cuadrados, el mismo estándar establece que para que puedan determinarse estos parámetros (absorción inicial y secundaria) es necesario que el coeficiente de relación no sea menor a 0.98.

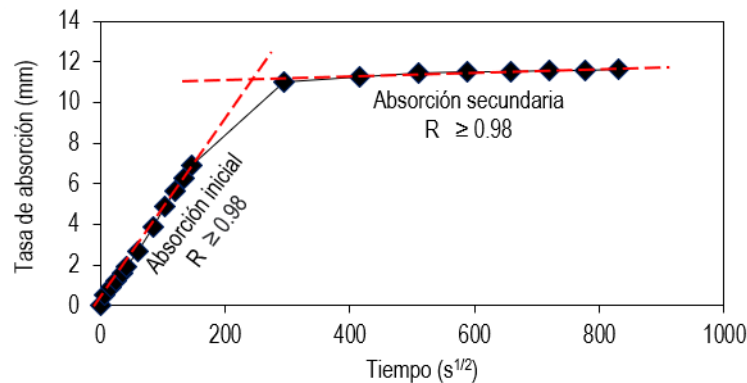


Figura 5.9: Pendientes para la determinación de la absorción inicial y secundaria.

³El método estándar de la ASTM C1585 [92] señala que para los propósitos del ensayo no se toma en cuenta la dependencia de la densidad del agua con la temperatura y se toma en cuenta un valor de $0.001 g/mm^3$.

Inspección visual

Con la finalidad de observar diferencias y detectar cambios en la superficie de los morteros se realizó el registro de evidencia fotográfica a la edad de 28 y 140 días en especímenes cúbicos de 50 *mm* (tres especímenes por mezcla de mortero).

Después de fabricados y pasados 28 días de curado los especímenes permanecieron en la intemperie en un ambiente natural urbano.

Capítulo 6

Resultados y discusión

En el presente capítulo se presentan y describen los resultados de la caracterización de los materiales utilizados y los resultados obtenidos de las pruebas y ensayos realizados a las diferentes mezclas de mortero en donde se sustituyeron diferentes porcentajes del volumen del agregado fino por partículas PET.

6.1. Materiales

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización del cemento, agregado fino y partículas PET utilizados en la presente investigación.

6.1.1. Caracterización del cemento portland ordinario

En la Tabla 6.1 se presentan los resultados de la caracterización del cemento portland utilizado, cemento clasificado como CPO 40 según la norma NMX-C-414-ONNCCE-2004 [3] .

Tabla 6.1: Características del cemento.

Composición química del cemento (%)								LOI (%)	Densidad (g/cm^3)
Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	SO_3	K_2O	CaO	MgO	Otros		
4.84	1.69	19.77	3.70	1.09	67.25	0.36	1.29	2.14	3.04

Como se puede observar en la Tabla 6.1, la composición química del cemento y los valores de la densidad y pérdida por ignición registrados son valores típicos de cementos portland [94, 95].

6.1.2. Caracterización del agregado fino y partículas PET

En la Fig. 6.1 se presenta la distribución granulométrica del agregado fino (AF) y las partículas PET utilizadas para la elaboración de los morteros. Como se mencionó

en el capítulo de “Metodología experimental”, la granulometría del agregado fino fue compensada para que se encontrara dentro de los límites recomendados por la ASTM C33 [76].

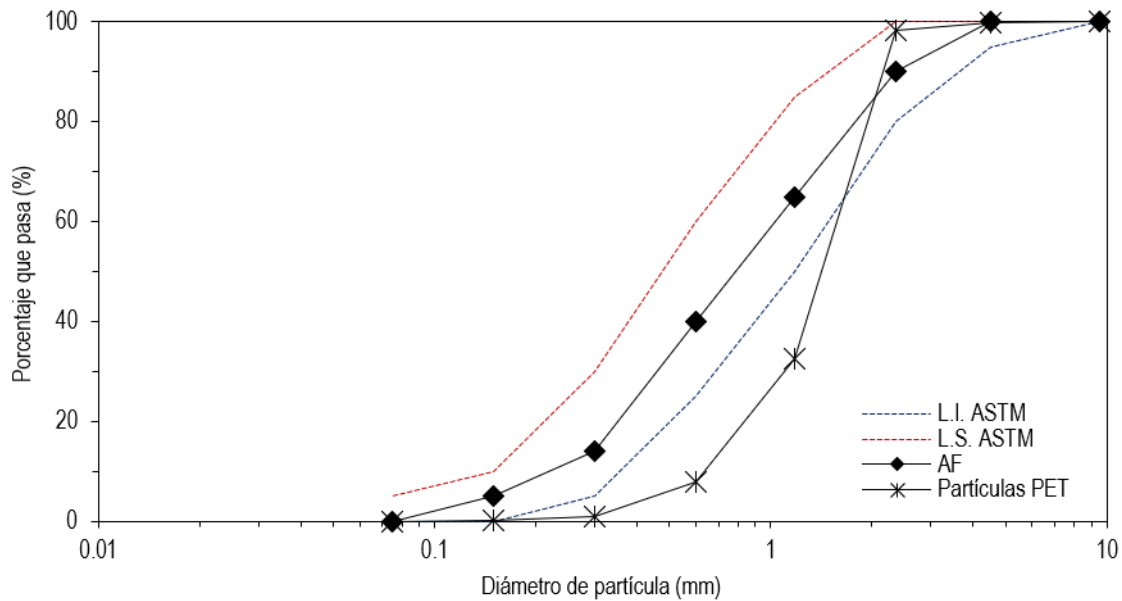


Figura 6.1: Distribución granulométrica del agregado fino (AF) y partículas PET (PET). *L.I. Límite inferior. *L.S. Límite superior.

Contrario a la distribución granulométrica del agregado fino, en la Fig.6.1 se puede observar que la distribución granulométrica de las partículas PET dista por mucho de encontrarse dentro de los límites recomendados, si bien, el tamaño máximo es de 4.75 mm, el 67% de las partículas PET fueron retenidas en el tamiz No. 16 (abertura de 1.18 mm), es decir, el 67% de las partículas PET tienen un tamaño $1.18\text{ mm} > 2.36\text{ mm}$ y son partículas irregulares con perfiles angulares y superficie rugosa (véase Fig. 6.2).

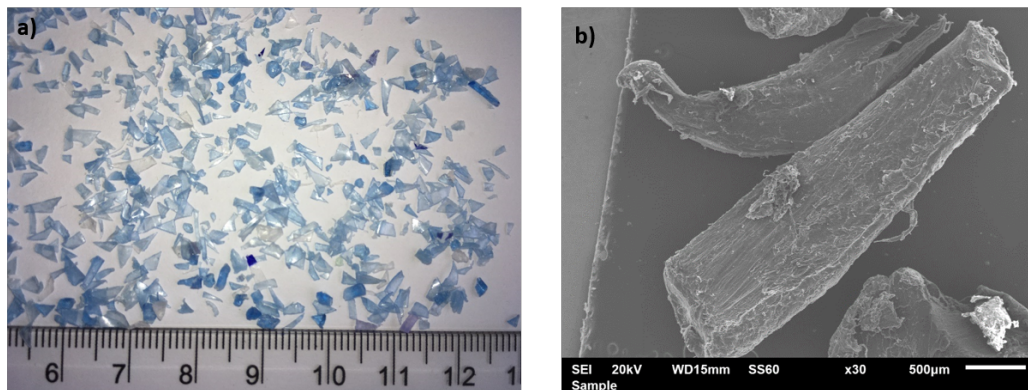


Figura 6.2: Partículas PET utilizadas en la investigación.

En la Tabla 6.2 se presentan las características físicas del agregado fino y las partículas PET. La gravedad específica de las partículas PET es 50% menor que la del agregado fino.

Tabla 6.2: Características del agregado fino y las partículas PET.

Características	Agregado fino	Partículas PET
Módulo de finura	2.91	-
Peso unitario (compacto) (kg/m^3)	1827.50	542
Peso unitario (suelto) (kg/m^3)	1527	450.33
Gravedad específica	2.79	1.38
Absorción (%)	1.9	-

El análisis de espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FTIR) realizado a las partículas PET procedentes de la planta de reciclaje se presenta en la Fig. 6.3. En el análisis se identifican las bandas de absorción típicas del tereftalato de polietileno (PET) correspondientes a sus principales grupos funcionales [77–80] con lo que se puede confirmar la naturaleza y condición inicial de las partículas.

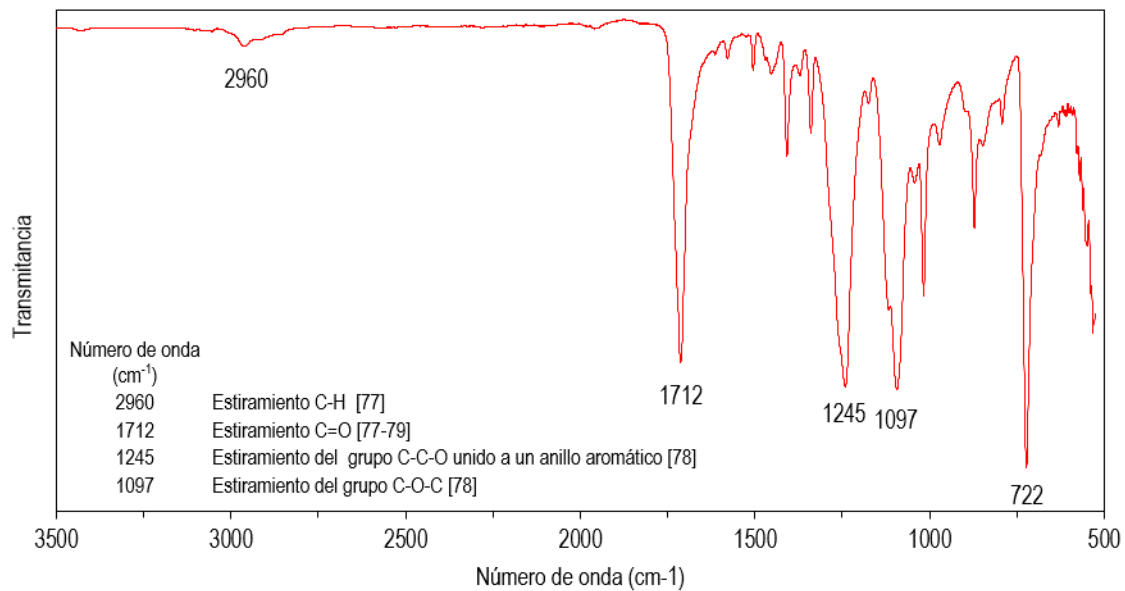


Figura 6.3: Análisis FTIR de partículas PET.

6.2. Caracterización de mezclas de morteros

A continuación, se presentan y describen los resultados de los ensayos realizados para la caracterización de los diferentes morteros: contenido de aire, densidad en estado fresco

y endurecido, fluidez, resistencia a la compresión y conductividad térmica.

6.2.1. Contenido de aire

En la Fig. 6.4 se presentan la gráfica de los resultados del contenido de aire de los morteros. Como se aprecia en la gráfica la sustitución del agregado fino por partículas PET propicia un incremento en el contenido de aire de los morteros, de 1.6% (mortero sin partículas PET) hasta 4% cuando se sustituye el 30% del agregado fino por partículas PET¹.

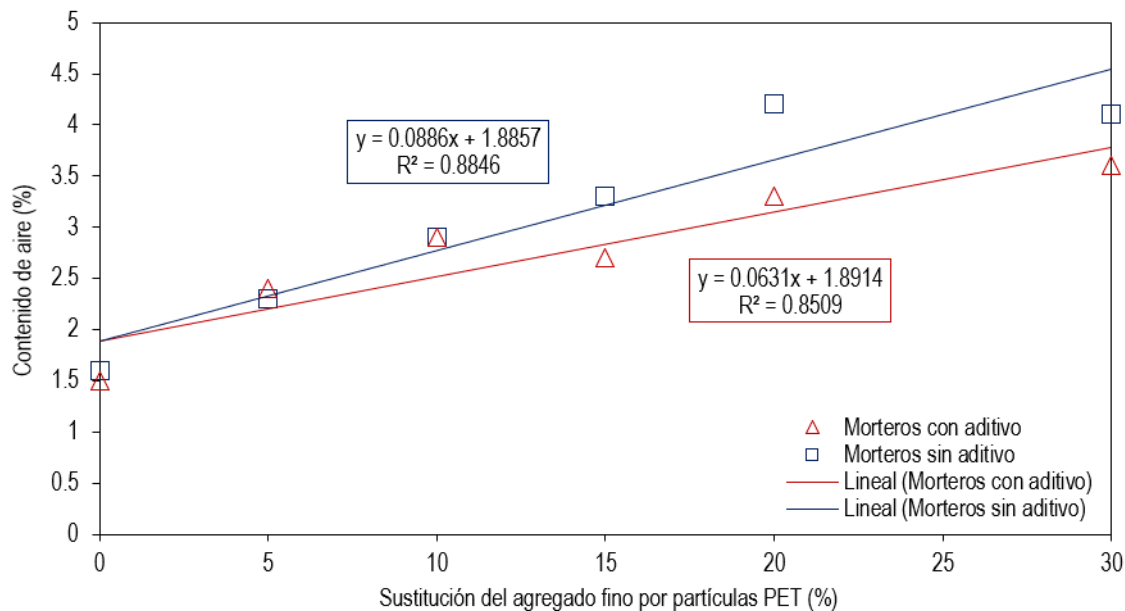


Figura 6.4: Contenido de aire de mezclas de mortero con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

Sadrmomtazi et al. [62] quienes reportaron el contenido de aire de este tipo de matrices reportaron un incremento de este parámetro conforme aumentaba la cantidad de partículas PET, por lo que con la finalidad de una reducción del volumen de aire en las mezclas se propuso el uso de un aditivo reductor de aire. Con la utilización de un aditivo reductor de aire se esperaba que el contenido de aire de los morteros disminuyera, sin embargo, En la Fig. 6.4 se aprecia que el aditivo reductor de aire no modificó el contenido de aire de los morteros sin partículas PET ni en los morteros en donde sustituyó el 5 y 10% del volumen del agregado fino. El uso de aditivo redujo el contenido de aire en los morteros en donde se sustituyó el 15% o más del agregado fino por partículas PET, estos morteros tienen la característica de que sin aditivo su contenido de aire es mayor al 3%, en este caso, el uso de 50 g/m^3 de aditivo reductor de aire propició que el contenido de aire de los morteros se mantuviera por debajo de 3.6% sin embargo, la disminución del contenido de aire en los

¹Morteros sin aditivo reductor de aire.

morteros debido al uso del aditivo fue mínima, 0.64, 0.96 y 0.5 puntos porcentuales cuando se sustituyó el 15, 20 y 30 % del agregado fino por partículas PET correspondientemente, estas disminuciones no fueron mayores al 1 % por lo que no se puede considerar que el aditivo reductor de aire mejoró las mezclas de mortero, esta mejora tampoco se refleja en los otros resultados (propiedades mecánicas, propiedades térmicas, indicadores de calidad) que se presentan más adelante, no implica una mejora en los resultados, por lo tanto, no se justifica el uso de 50 g/m^3 de aditivo reductor de aire para este tipo de morteros, cabe aclarar que la dosificación de este aditivo se basó en pruebas preliminares y en las recomendaciones del proveedor, los cuales recomiendan de $10 - 50 \text{ g/m}^3$. Para este estudio se utilizó la dosificación más alta recomendada y aun así no se presentaron resultados muy diferentes a los que se reportaron en morteros sin aditivo.

En el estudio realizado en esta investigación el contenido de aire de los morteros incrementa conforme aumenta el porcentaje del volumen del agregado fino sustituido por partículas PET, de acuerdo con Sadrmomtazi et al. [62] quienes utilizaron partículas PET de botellas trituradas con una distribución de tamaño casi dentro de los límites recomendados por la ASTM C33 [76] y reportaron también un incremento en el contenido de aire debido a las partículas PET, este comportamiento se debe a la geometría de las partículas, las cuales generan fricción con el resto de los componentes de la mezcla, que se interpreta como una menor cohesión entre materiales y por lo tanto porosidad interna de la matriz. En este estudio Sadrmomtazi et al. [62] no registraron variación en el contenido de aire de la mezcla en donde se remplazó el 5 % del volumen del agregado fino, esto con respecto a la mezcla referencia.

En el presente estudio la geometría de las partículas PET utilizadas fue similar a las usadas por Sadrmomtazi et al. [62], sin embargo, la distribución granulométrica de las partículas PET (véase Fig. 6.1) estaba alejada de los límites recomendados por la ASTM C33 [76] (67 % de las partículas PET tenían un tamaño $2.36 < 1.18 \text{ mm}$), por lo tanto, cuando se utilizan partículas PET con estas características el contenido de aire de los morteros no solo se ve influenciado por la forma o la cantidad sino también por la distribución de tamaño de las partículas PET, entre mejor sea la distribución granulométrica de las partículas PET mayor la compactación y por lo tanto menor contenido de aire. En el caso de los morteros fabricados en este estudio, son diversas las teorías para una explicación de porque el aditivo reductor de aire no tuvo el desempeño esperado, en primera se puede considerar que el contenido de aire que se registró en los morteros sin aditivo en donde se sustituyó el 20 y 30 % del volumen del agregado fino no fue mayor a 4.2 % un valor que dista poco del 3 % de aire que se considera como bajo de acuerdo a las especificaciones de diseño del ACI [2], y que, según las especificaciones del proveedor del aditivo este puede ser usado para disminuir el contenido de aire hasta por debajo del 3 %, es decir, el margen para la reducción de aire era poco. Otra teoría es que el aditivo reductor de aire es un aditivo base surfactantes no-iónicos que actúa rompiendo la tensión superficial que se crea entre la pasta y los agregados, en este caso y como lo han reportado otros autores las partículas PET, además de que no absorben agua a diferencia de un agregado natural no interactúan químicamente con la pasta de cemento [72] y, por lo tanto, se podría suponer que no tienen mayor injerencia en la reacción que ejerce el aditivo en el mortero. Otra

teoría es que en el caso del presente estudio la relación agua cemento fue alta (0.6) y se mantuvo constante, muy probablemente una sinergia del aditivo reductor de aire junto con un aditivo reductor de agua habría propiciado que el contenido de aire de los morteros con partículas PET estuviera por debajo de 3% sin comprometer su trabajabilidad.

Los valores del contenido de aire de los morteros se presentan en el apéndice A, sección A.1.

6.2.2. Densidad en estado fresco

Una de las características más atractivas de la inclusión de partículas PET dentro de un concreto o mortero es la reducción de la densidad del material, debido a la diferencia entre la gravedad específica entre las partículas PET y el resto de los componentes de la matriz (a excepción del agua). La variación de la densidad en estado fresco de los morteros con partículas PET se presenta en la Fig. 6.5.

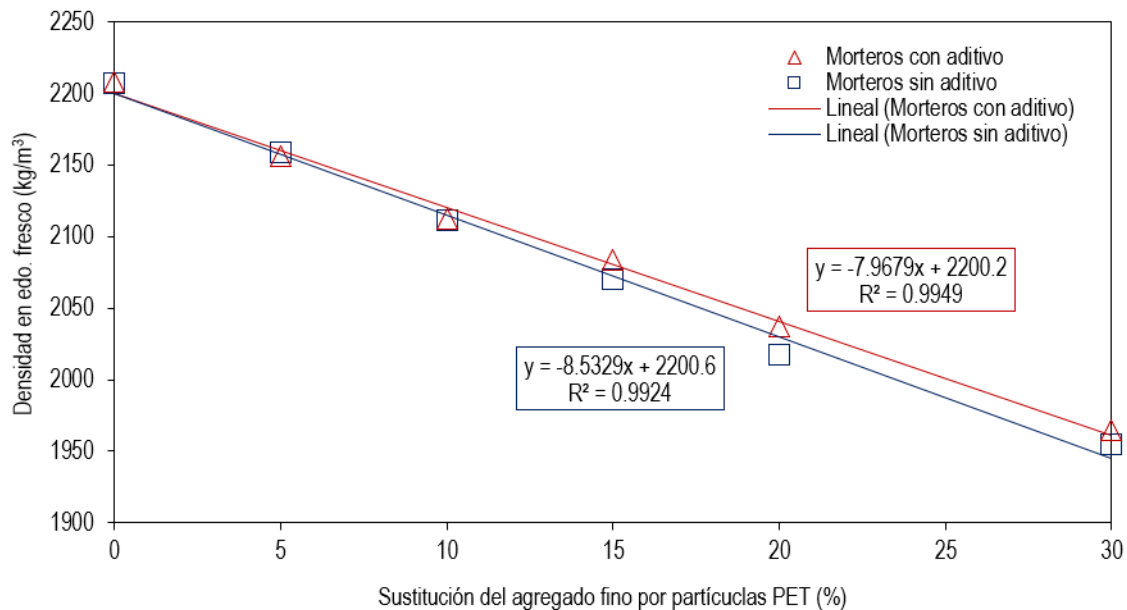


Figura 6.5: Densidad en estado fresco de mezclas de mortero con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

En gráfica de la Fig. 6.5 se puede observar que entre mayor el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET la densidad de los morteros tiende a disminuir, esta tendencia obedece a un comportamiento casi lineal, en donde por cada 5% del volumen del agregado fino sustituido por partículas PET la densidad de los morteros disminuye casi 2%. La densidad en estado fresco de los morteros varía de 2207 kg/m^3 (mortero sin partículas PET) hasta 1955 kg/m^3 cuando se sustituye el 30% del agregado fino por partículas PET².

²Morteros sin aditivo reductor de aire.

De los morteros con aditivo reductor de aire se puede apreciar como a partir de que se sustituyó el 15 % del agregado fino por partículas PET la densidad en estado fresco de los morteros incrementa de manera simbólica debido al efecto del aditivo que reduce el contenido de aire propiciando una mayor compacidad en los morteros; este ligero incremento de la densidad coincide con la reducción del contenido de aire que presentaron las mezclas de mortero.

La reducción lineal de los valores de la densidad en estado fresco de los morteros se debe directamente a la diferencia entre la gravedad específica de las partículas PET (1.38) y la gravedad específica del agregado fino (2.79), entre mayor el volumen de agregado fino sustituido por el mismo volumen de partículas PET menor la densidad del mortero.

Los valores de la densidad en estado fresco de los morteros se presentan en el apéndice A, sección A.2.

6.2.3. Fluidez

La fluidez es un parámetro importante que influye en manejabilidad con la que el mortero puede ser mezclado, colocado, consolidado y terminado. La fluidez de los morteros se presenta en la gráfica de la Fig. 6.6.

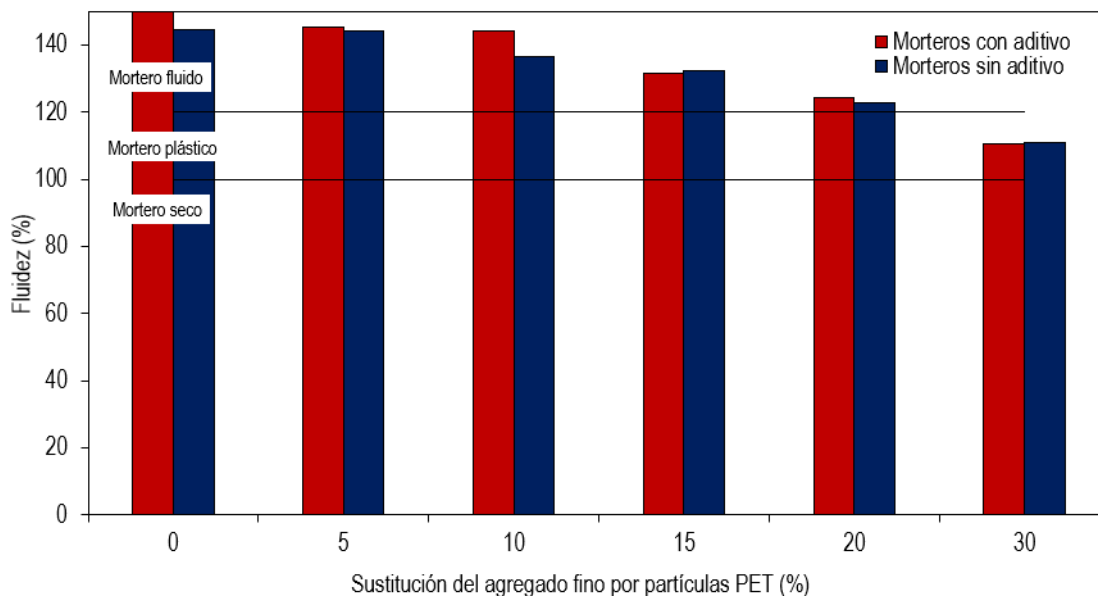


Figura 6.6: Fluidez de mezclas de mortero con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire). *Clasificación de morteros según su fluidez [6].

En la gráfica presentada en la Fig. 6.6 se puede apreciar que la fluidez tiende a disminuir conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET, autores que utilizaron partículas similares a las del presente estudio, con superficie rugosa y geometría irregular reportaron una reducción de la trabajabilidad conforme incrementaba el porcentaje de partículas PET debido a la fricción entre las partículas y el resto de los

componentes [50, 50, 54, 62], aun así, tomando en cuenta la clasificación de los morteros según su fluidez independientemente del uso de aditivo reductor de aire los morteros en donde se sustituyó el 5, 10, 15 y 20 % presentaron una consistencia fluida. Los morteros en donde se sustituyó el 30 % del agregado fino por partículas PET registraron una fluidez de 110 % considerada la fluidez de un mortero plástico.

Con respecto a los morteros con aditivo reductor de aire se puede observar que no hubo variaciones significativas con respecto a la fluidez de los morteros sin aditivo con la misma sustitución del agregado fino por partículas PET. Las razones por las que el aditivo reductor de aire no se desempeñó como se esperaba fueron expuestas anteriormente cuando se discutieron los valores de contenido de aire de los morteros.

De los autores que evaluaron la trabajabilidad de concreto o mortero con partículas PET se identifican dos diferentes resultados: un incremento en la trabajabilidad o una reducción de este parámetro debido a la incorporación de partículas PET.

En los estudios donde se reporta un incremento en la trabajabilidad del concreto conforme aumenta el porcentaje de partículas PET [66, 67, 71] se comparten las características de las partículas que se utilizaron, las cuales se describen con una geometría esférica y textura suave, características que según los autores permitió disminuyera la fricción entre las partículas PET y los componentes del concreto, lo que se reflejó en una mayor trabajabilidad.

El comportamiento de la fluidez de los morteros del presente estudio coincide con el análisis de los autores que reportan una disminución de la trabajabilidad del concreto o mortero, independientemente del uso de aditivo reductor de aire, entre mayor el volumen de agregado fino sustituido por partículas PET menor la fluidez de los morteros, debido a la geometría irregular con perfiles angulares y superficie rugosa de las partículas PET que generaron fricción con los componentes del mortero en estado fresco.

Los valores numéricos de la fluidez de las mezclas de mortero se presentan en el apéndice A, sección A.3.

6.2.4. Densidad en estado endurecido

En la Fig. 6.7 se presenta la densidad en estado endurecido de los morteros en función del porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET. En esta gráfica se puede observar una disminución de la densidad de los morteros conforme aumenta el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET. La densidad de los morteros disminuye 2.25 % por cada 5 % del volumen de agregado fino que se sustituye por partículas PET, variando así de 2176 kg/m^3 (mortero sin partículas PET) hasta 1878 kg/m^3 cuando se sustituyó el 30 % del agregado fino. Al igual que en lo registrado en los valores de la densidad en estado fresco de los morteros, en este caso, el uso de 50 g/m^3 de aditivo reductor de aire en los morteros tampoco influyó para que la densidad en estado endurecido de los morteros fuera diferente en morteros con igual sustitución.

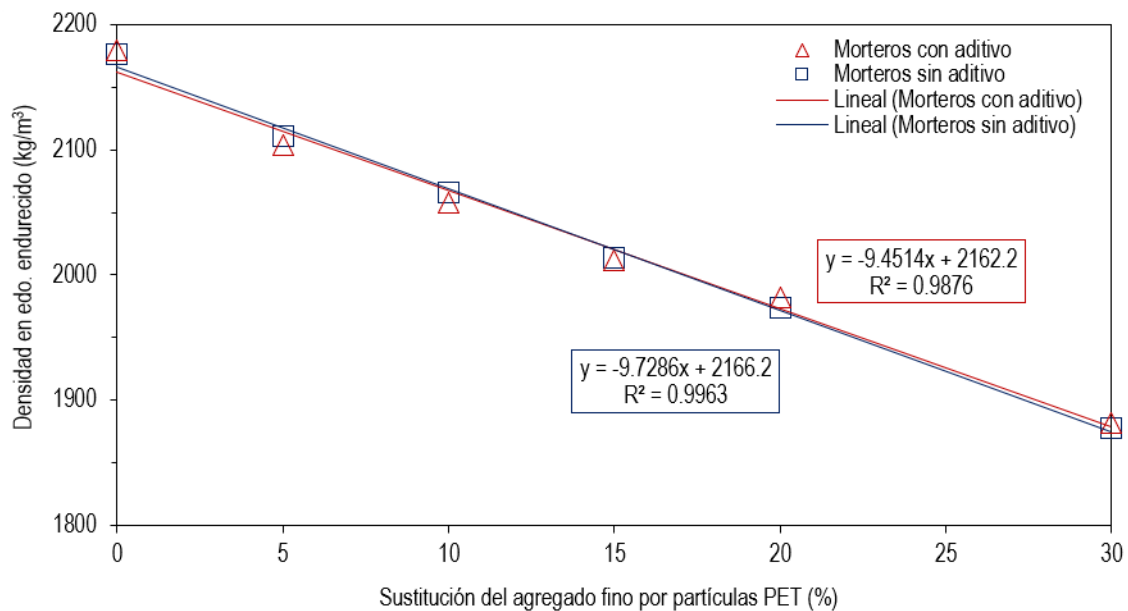


Figura 6.7: Densidad en estado endurecido de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

Como se esperaba en este estudio y de acuerdo con lo reportado por otros autores [75,96] la densidad de los morteros disminuyó debido a la diferencia entre el peso específico del agregado fino y las partículas PET, 2.79 y 1.39, respectivamente. Como afirman Saikia & De Brito [69] la sustitución de los agregados naturales por agregados de origen plástico generalmente reduce la densidad del concreto o mortero independientemente del tipo y tamaño de sustitución. En este estudio en donde la relación a/c, la relación agregado-cemento y el aditivo fueron constantes la disminución de la densidad de los morteros es directamente proporcional al porcentaje de volumen del agregado fino sustituido por partículas PET ($R^2 = 0.99$).

Los valores de la densidad en estado endurecido de los morteros se presentan en el apéndice A, sección A.3.

6.2.5. Resistencia a la compresión

En la gráfica de la Fig. 6.8 se presenta la variación de la resistencia a la compresión a los 28 días de los morteros en función del porcentaje de volumen de agregado fino sustituido, se puede apreciar que la resistencia a la compresión de los morteros disminuye conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET y que el uso de aditivo reductor de aire tuvo un efecto casi nulo en la resistencia desarrollada cuando se les compara con los morteros sin aditivo con la misma sustitución³.

³La resistencia a la compresión a los 28 días del mortero sin aditivo en donde se sustituyó el 20 % del agregado fino por partículas PET registra un valor distinto a la tendencia mostrada por el resto de los morteros, este comportamiento se atribuye a un error durante la ejecución del ensayo.

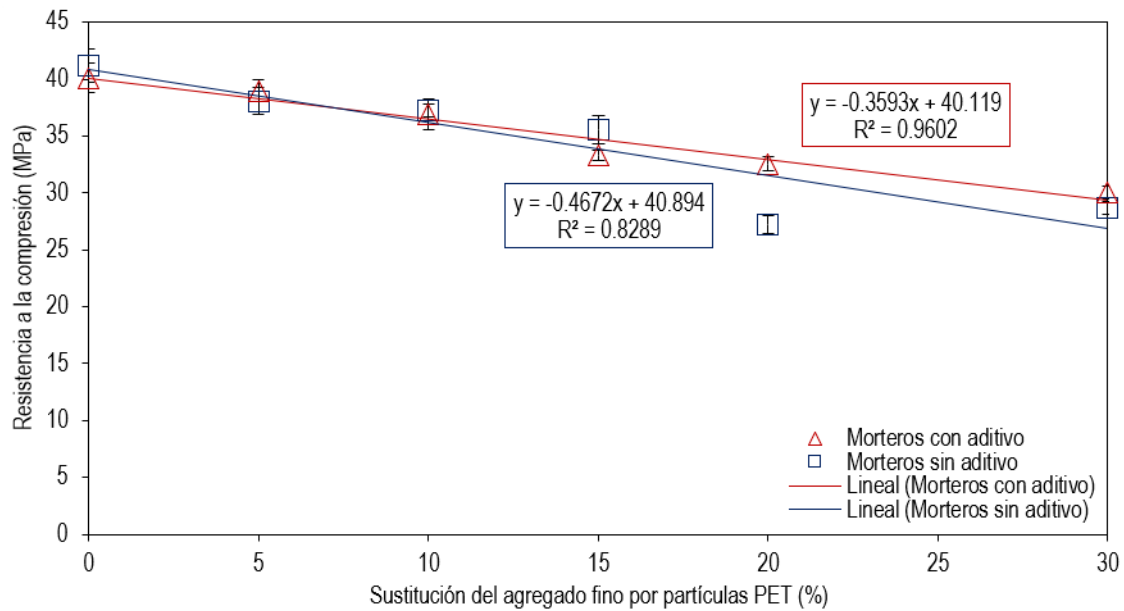


Figura 6.8: Resistencia a la compresión a los 28 días de edad de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

A los 28 días la resistencia a la compresión de los morteros varía de 41 *MPa* (mortero sin partículas PET) a 29 *MPa* cuando se sustituye el 30 % del agregado fino por partículas PET.

En las Fig. 6.9 y 6.10 se presenta el desarrollo de la resistencia a la compresión de los morteros con y sin aditivo reductor de aire a la edad de 7, 28, 56 y 160 días.

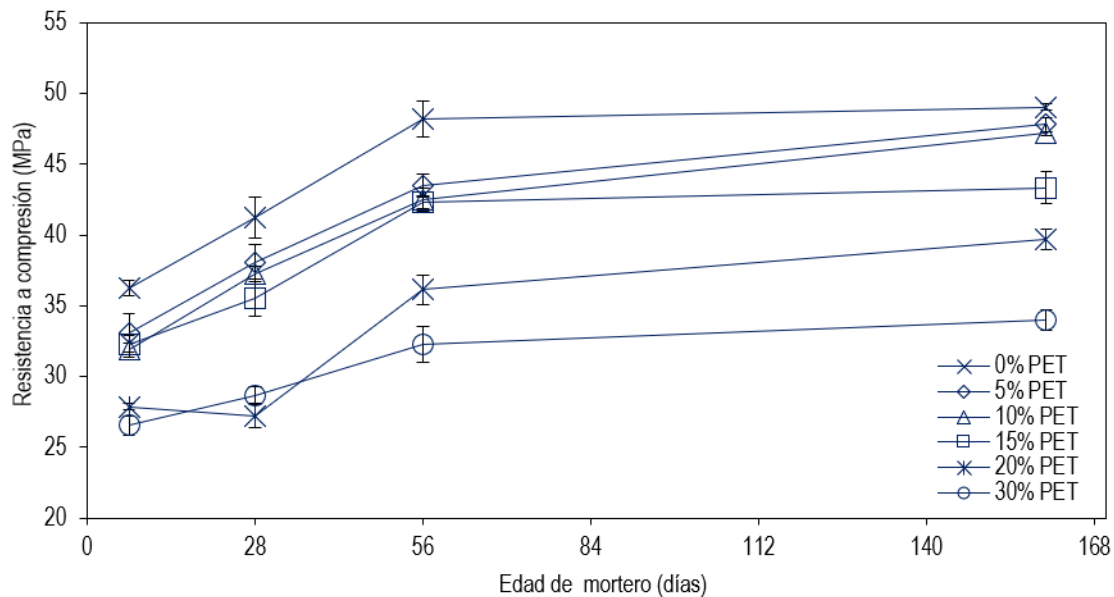


Figura 6.9: Desarrollo de resistencia a compresión de morteros sin aditivo (7, 28, 56 y 160 días).

Como se observa en la Fig. 6.9 la resistencia a la compresión de todos los morteros sin aditivo se desarrolló de manera incremental. Con respecto al mortero sin partículas PET (0 %) a los 28 días la resistencia a la compresión decreció 8, 10, 14, 34 y 30 % cuando se sustituyó el 5, 10, 15, 20 y 30 % del agregado fino por partículas PET respectivamente, se observaron tendencias similares en la disminución de la resistencia a la compresión a una edad temprana (7 días) y a edades tardías (56 y 160 días)⁴.

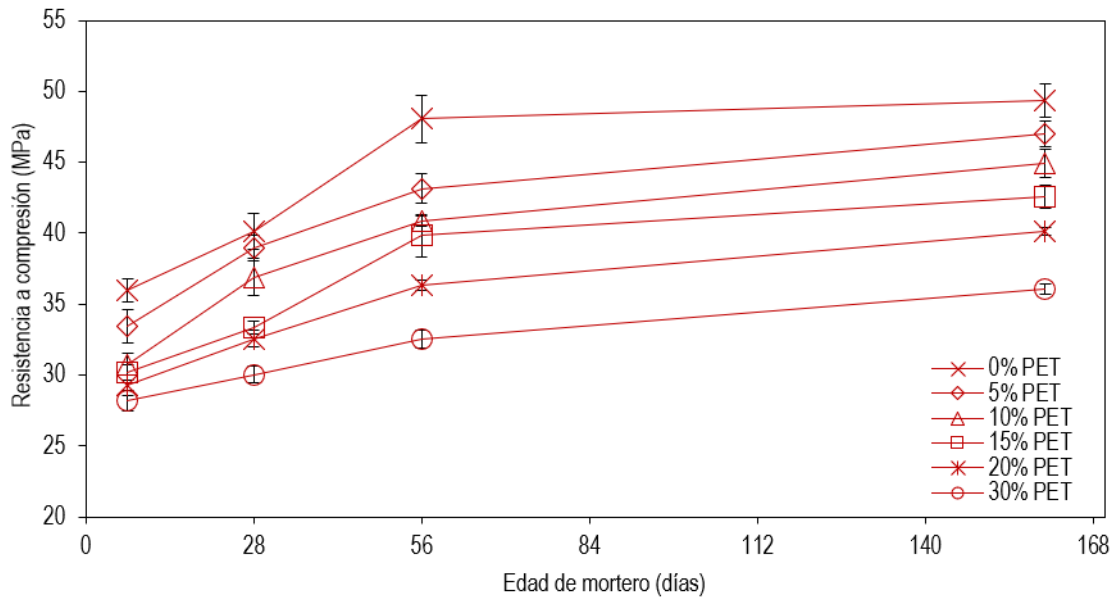


Figura 6.10: Desarrollo de resistencia a compresión de morteros con aditivo (7, 28, 56 y 160 días).

En la Fig. 6.10, en donde se presenta el desarrollo de la resistencia a la compresión de los morteros con aditivo reductor de aire se observa un comportamiento similar al mostrado por los morteros sin aditivo, la resistencia a la compresión de los morteros disminuye 3, 8, 17, 19 y 25 % cuando se sustituyó el 5, 10, 15, 20 y 30 % del agregado fino por partículas PET, lo que representa una reducción aproximada ($R^2 = 0.93$, véase Fig. 6.8) de 0.35 MPa por cada 1 % del volumen del agregado fino que se sustituye por partículas PET. A la edad de 160 días la resistencia a la compresión disminuye 5, 9, 14, 19 y 27 % cuando se sustituye el 5, 10, 15, 20 y 30 % respectivamente del volumen del agregado fino.

Hasta la edad de 160 días ninguno de los morteros registró una resistencia a la compresión menor a la del ensayo que lo antecedió.

Como se mencionó en el capítulo “Antecedentes” una de las principales pautas de estudio se ha centrado en la influencia de la incorporación de partículas PET en la resistencia a la compresión de mortero y concreto, la mayoría de los autores concluye que la incorporación de partículas PET en cualquiera de sus presentaciones mengua las propiedades mecánicas debido a una baja adhesión entre las partículas PET y el resto de los compo-

⁴El mortero sin aditivo donde se sustituyó el 20 % del agregado fino por partículas PET registra un decremento de 23, 25 y 19 % a la edad de 7, 56 y 160 días respectivamente.

nentes de la matriz [50, 52, 53, 61, 62, 66–69], sin embargo, entre los diferentes estudios no se observa una tendencia en la disminución de la resistencia en función del porcentaje de partículas PET incorporadas e incluso algunos estudios han reportado un ligero incremento o una homologación de la resistencia a la compresión respecto a su referencia cuando la sustitución del agregado fino no fue mayor de 10-15 % [49, 54, 63, 64, 72].

En la Fig. 6.11 se presenta el porcentaje de variación (positiva o negativa) de la resistencia a la compresión a los 28 días en función del porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET reportado por autores que utilizaron partículas PET < 6mm con una granulometría distribuida y la variación registrada en el presente estudio, estas variaciones son con respecto a la mezcla referencia (sin partículas PET) de cada estudio.

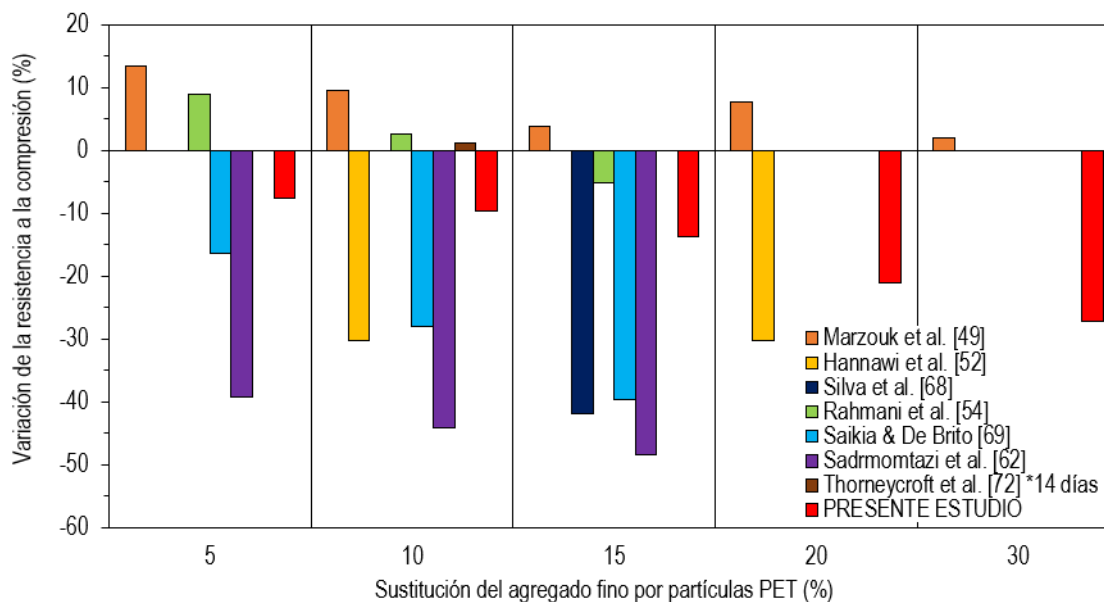


Figura 6.11: Variación de la resistencia a la compresión (28 días) en función del porcentaje de sustitución reportada por diversos autores y en el presente estudio.

Como se observa en la Fig. 6.11, Marzouk et al. [49] registraron un incremento en la resistencia a la compresión con respecto a la referencia incluso cuando se sustituyó el 30 % del volumen del agregado fino por partículas PET, en el caso de Marzouk et al. [49] las partículas PET utilizadas tenían un tamaño máximo de 5 mm y como se presenta en la Fig. 6.12 una granulometría uniformemente distribuida, los autores no atribuyeron esta mejora a algo diferente más que a la distribución de tamaño de las partículas PET, sin embargo, quedan en duda estos resultados dado que como se observa en la Fig. 6.11 ningún otro autor hasta ahora ha reportado resultados tan favorables como los de los señalados autores.

Entre otros autores que reportaron una variación positiva con respecto a su mezcla referencia se encuentran Rahmani et al. [54] quienes obtuvieron una variación positiva de 9 y 3 % cuando sustituyeron 5 y 10 % del volumen del agregado fino por partículas PET respectivamente, estas variaciones se registraron en cilindros de 150 mm de diámetro y 300

mm de altura en concreto con una a/c de 0.42, también Thorneycroft et al. [72] registraron una variación positiva de 1 % en la resistencia a la compresión cuando sustituyeron el 10 % del agregado fino por partículas PET, en este caso la granulometría de las partículas PET fue igualada a la granulometría del agregado fino que utilizaron. El mayor incremento de la resistencia a la compresión fue de 13.5 % cuando se sustituyó el 5 % del volumen del agregado fino por partículas PET, reportado por Marzouk et al. [49]. Los tres autores mencionados reportan haber empleado una relación a/c constante y a excepción de Thorneycroft et al. [72] ninguno de los autores menciona un arreglo en la granulometría de las partículas PET.

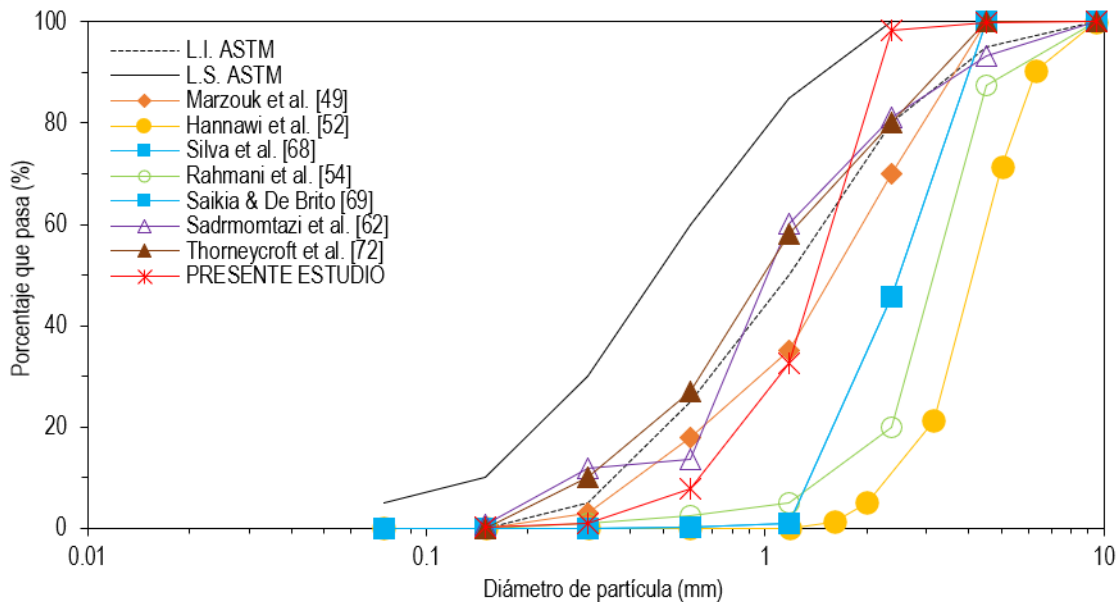


Figura 6.12: Distribución granulométrica de las partículas PET utilizadas por diversos autores y en el presente estudio. *L.I. Límite inferior. *L.S. Límite superior.

De entre los autores que registraron variaciones negativas en relación con la resistencia a la compresión de su respectiva referencia, en el presente estudio se obtuvieron las menores, -8, -10 y -14 % cuando se sustituyó el 5, 10 y 15 % del volumen del agregado fino por partículas PET. Como se observa en la Fig. 6.12, casi el 80 % de las partículas PET utilizadas por Hannawi et al. [52] tenían un tamaño superior a los 3 mm y en el caso de las partículas de Saikia & De Brito [69] y Silva et al. [68] estas no tenían una buena distribución granulométrica además de que en estos dos últimos estudios mencionados los autores modificaron las relaciones a/c para obtener como constante la trabajabilidad de las mezclas, entre mayor el porcentaje de sustitución mayor la relación a/c . En la Fig. 6.11 se observa que los valores más negativos los presentó el estudio realizado por Sadrmomtazi et al. [62], si bien, la distribución granulométrica de las partículas PET utilizadas estaba casi dentro de los límites recomendados por la ASTM C33 [76] (véase Fig. 6.12) la sustitución del agregado fino se realizó en función de la masa, lo que, debido a la diferencia de la densidad entre los materiales, significaba la incorporación de una gran

cantidad de partículas.

Con respecto a la influencia de la incorporación de partículas PET mediante la sustitución del agregado fino en concreto o mortero, el análisis de la comparación de los trabajos previamente realizados con el presente estudio, permite identificar que si bien, la resistencia a la compresión disminuye conforme aumenta la cantidad de partículas PET incorporadas que como lo han afirmado otros autores se debe a la baja adherencia de las partículas PET con el resto de la matriz [50, 52, 53, 61, 62, 66–69], es posible aminorar este efecto si las partículas PET tienen una granulometría distribuida para que, al igual que el efecto que propicia un agregado con una buena distribución de tamaño se genere una mayor compacidad de la matriz. En el presente estudio a las partículas PET no se les aplicó ningún tratamiento previo o segregación por tamaño, y se utilizaron directamente como provenían de la planta de reciclaje, según los resultados de la resistencia a la compresión reportados por otros autores [49, 72] una distribución más proporcional de los tamaños de las partículas PET hubiera propiciado menores variaciones con respecto a la resistencia a la compresión del mortero referencia (sin partículas PET), sin embargo, la idea es el uso de un residuo que se genera del proceso de reciclaje de botellas PET de una manera no convencional, incorporándolo a una matriz cementante, por lo tanto, podría no justificarse un mayor gasto energético para el arreglo de la granulometría de las partículas PET solo para disminuir los efectos que su incorporación propicia en la resistencia a la compresión de los morteros, no obstante, queda sobreentendido que es importante considerar la distribución de tamaño de las partículas PET antes de incorporarlas a concreto o mortero con la finalidad de aminorar los efectos que tiene en la disminución de la resistencia a la compresión.

En el apéndice A, sección A.4 se presentan los valores de la resistencia a compresión (7, 28, 56 y 160 días) de los morteros.

6.2.6. Conductividad térmica

En la Fig. 6.13 se presenta la variación de la conductividad térmica de los morteros en función del porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET. Como se puede observar, el uso de aditivo reductor de aire no implicó variaciones en la conductividad térmica de los morteros con igual sustitución, mismo comportamiento que se observó en la evaluación de otras propiedades como la fluidez, densidad y resistencia a la compresión de los morteros.

De manera general, se puede apreciar una tendencia en donde disminuyen los valores de la conductividad térmica conforme incrementa el volumen del agregado fino sustituido por partículas PET. En condiciones donde hay un 100 % de humedad (saturado) la conductividad térmica varía de $1.77 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (mortero sin partículas PET) a $1.07 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ cuando se sustituye el 30 % del agregado fino por partículas PET y en condiciones sin humedad (seco) varía de $1.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (mortero sin partículas PET) a $0.80 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ cuando se sustituye el 30 % del volumen de agregado fino.

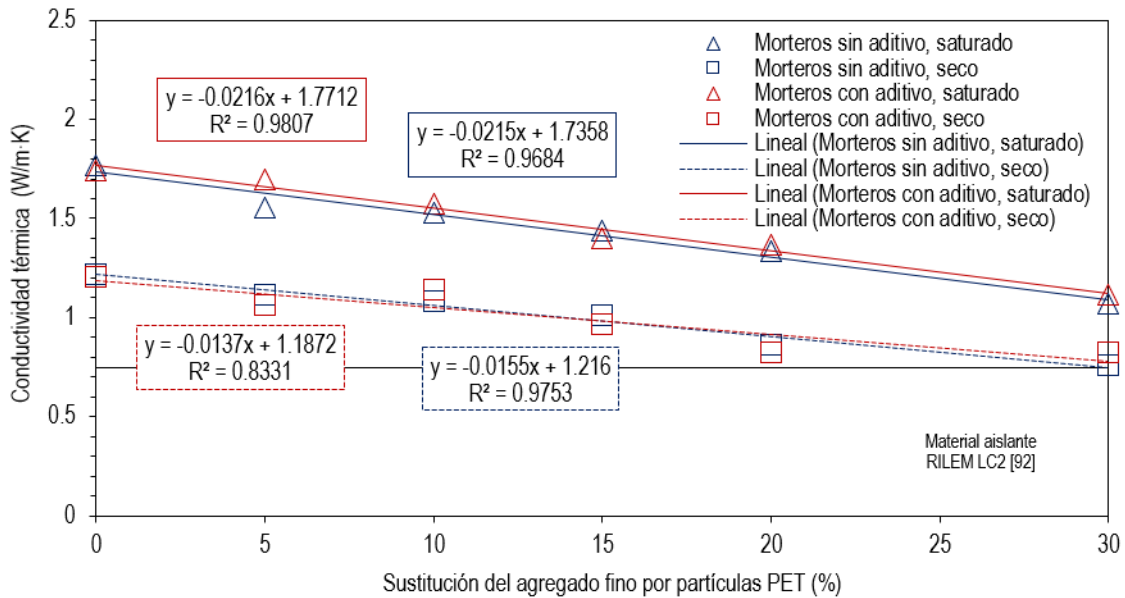


Figura 6.13: Conductividad térmica de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

Al igual que la tendencia observada en el presente estudio, Akçaözöglü et al. [74] también reportaron una reducción de los valores de la conductividad térmica conforme incrementaba la cantidad de partículas PET, en el estudio mencionado los valores de la conductividad térmica variaron de $0.94 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (concreto referencia sin partículas PET) a 0.61 , 0.57 , 0.53 y $0.39 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ cuando se sustituyó el 30, 40, 50 y 60 % de los agregados naturales por partículas PET $< 4 \text{ mm}$ (véase Fig. 6.14), los autores atribuyen la reducción de este parámetro a la diferencia entre el coeficiente de conductividad térmica de las partículas PET y la de los agregados naturales, 0.15 y $2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, respectivamente.

En el presente estudio ninguno de los morteros bajo ninguna de las dos condiciones (seco o saturado) registró una conductividad menor a $0.75 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ (límite máximo de la conductividad térmica para considerar a un material como aislante térmico [93]), sin embargo, los valores de conductividad térmica disminuyen con relación al mortero sin partículas PET e incluso se puede observar que el mortero en donde se sustituyó el 30 % de volumen del agregado fino por partículas PET se encuentra muy cercano al límite máximo para considerarse un material térmicamente aislante. Según la tendencia observada (véase Fig. 6.14), los morteros elaborados en el presente trabajo no presentaron los valores necesarios para considerarse materiales térmicamente aislantes, sin embargo, se puede concluir que la inclusión de partículas PET confiere al material propiedades térmicas aislantes que incrementan conforme aumenta la cantidad de partículas PET y que en estos morteros una sustitución mayor al 30 % del agregado por partículas PET daría como resultado un mortero con propiedades térmicas aislantes bajo los parámetros que se especifican en RILEM LC2 [93].

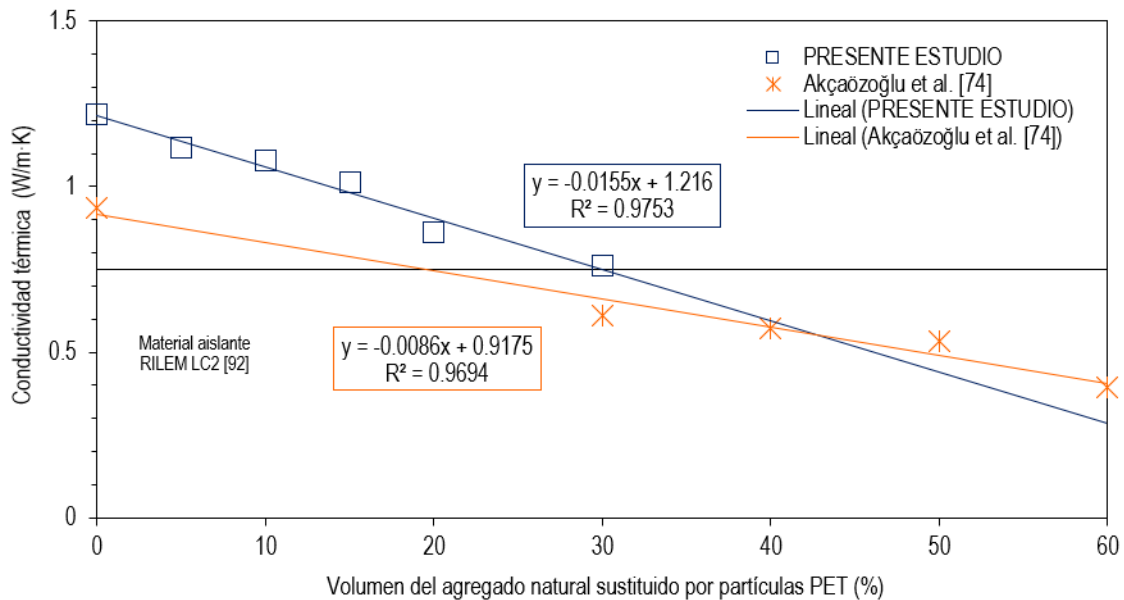


Figura 6.14: Valores de conductividad térmica reportados por Akçaözoglu et al. [74] y los registrados en el presente estudio (se gráfica la conductividad térmica de los morteros sin aditivo en condición “seco”).

Se ha mencionado en la literatura, existe una estrecha relación entre la densidad y los valores de la conductividad térmica del concreto o mortero [97], y en el presente estudio se encontró esta misma relación.

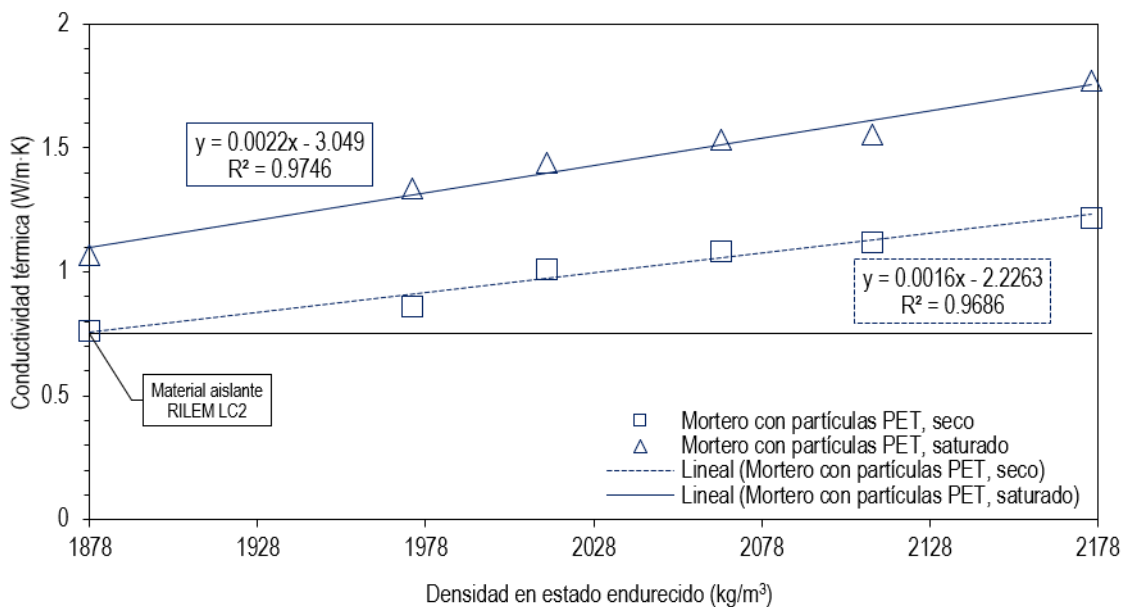


Figura 6.15: Variación de la conductividad térmica en función de la densidad de los morteros.

En la Fig. 6.15 se presenta la conductividad térmica de los morteros en función de

su densidad⁵. Como se puede observar, la conductividad térmica y la densidad de los morteros son valores directamente proporcionales ($R^2 = 0.97$), entre menor la densidad de los morteros menor la conductividad térmica. La reducción de la conductividad térmica de los morteros se debe a que las partículas PET retrasan la propagación de calor debido a su baja conductividad térmica con respecto a la del agregado fino.

Los valores de la conductividad térmica de los diferentes morteros se presentan en el apéndice A, sección A.5.

6.3. Evaluación de indicadores de calidad

A continuación, se presentan y discuten los resultados de las técnicas utilizadas para el monitoreo de la calidad de los morteros con partículas PET.

6.3.1. Velocidad de pulso ultrasónico

La velocidad de pulso ultrasónico (VPU) es un indicador de calidad del material que denota su homogeneidad y que además ayuda la detección de fallas internas.

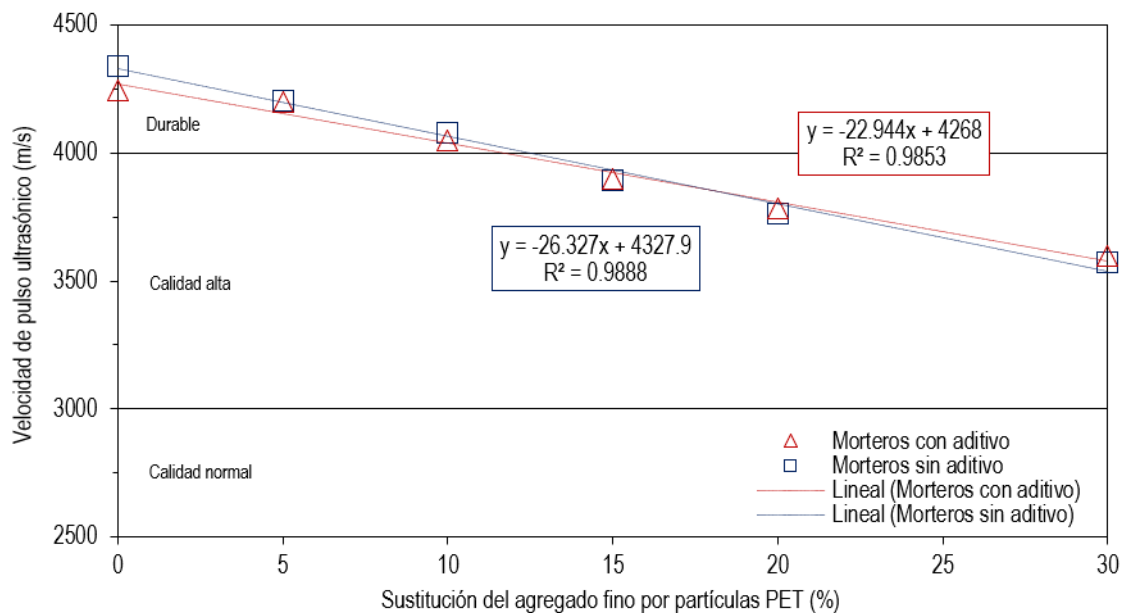


Figura 6.16: Velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días de edad de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

En la Fig. 6.16 se presenta la variación de VPU a los 28 días de los morteros en función del porcentaje de volumen sustituido del agregado fino por partículas PET, se puede observar que al igual en lo registrado en la evaluación de otros parámetros (densidad,

⁵Para la gráfica se tomó en cuenta la conductividad térmica y densidad de los morteros sin aditivo reductor de aire.

fluidez, propiedades mecánicas, etc.) tomando en cuenta los valores de VPU el uso de aditivo reductor de aire no significó un cambio con respecto a la calidad de los morteros con una misma sustitución, los valores de VPU registrados fueron los mismos en los morteros con y sin aditivo con un mismo porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET.

Si bien, el valor de VPU de concreto o mortero es de carácter cualitativo, en la gráfica de la Fig. 6.16 se aprecia que la velocidad de pulso ultrasónico disminuye de manera lineal conforme incrementa el porcentaje de agregado fino sustituido por PET, por cada 1 % del volumen del agregado fino que se sustituye por partículas PET la velocidad de pulso disminuye aproximadamente 26 m/s ($R^2 = 0.99$, véase Fig. 6.16), a la edad de 28 días la velocidad de pulso ultrasónico varía de 4342 m/s (mortero sin partículas PET) a 3574 m/s cuando se sustituye 30 % del agregado fino, de acuerdo a la clasificación que propone la norma mexicana NMX-C-275-ONNCCE-2019 [20] y los valores de la velocidad de pulso ultrasónico a la edad de 28 días la calidad de los morteros en donde se sustituyó el 5 y 10 % es considerada durable y la calidad de los morteros en donde se sustituyó el 15, 20 y 30 % es considerada alta, ninguno de los morteros reportó valores menores a los 2000 m/s para ser considerados morteros con una calidad deficiente, con esto se puede concluir que a edades tempranas la homogeneidad de los morteros es buena y que de manera interna la inclusión de partículas PET en los morteros no genera ningún efecto tipo panal.

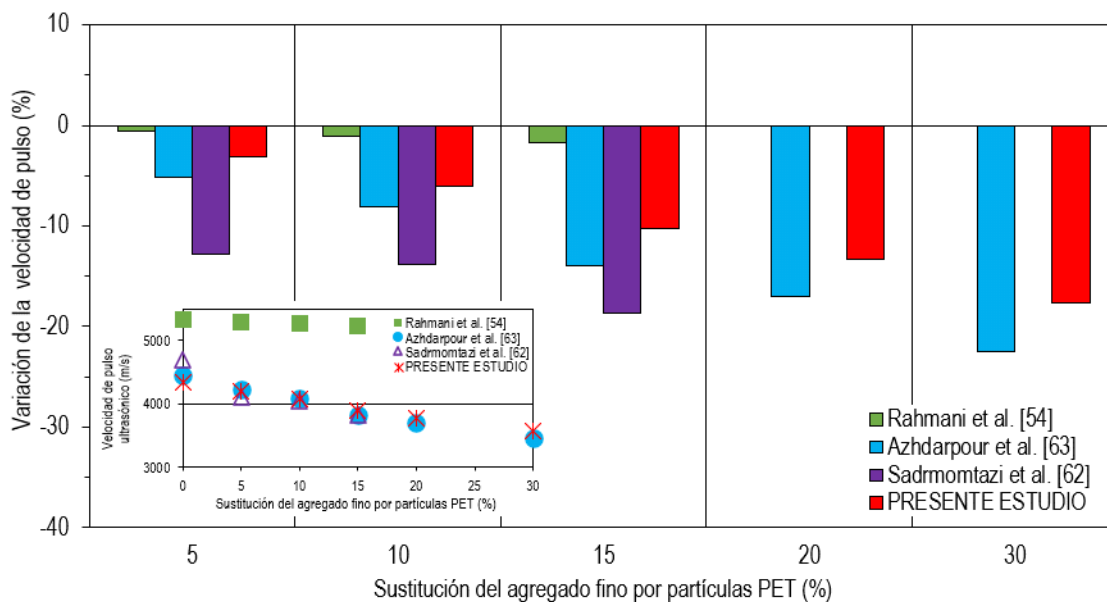


Figura 6.17: Variación de la velocidad de pulso ultrasónico (28 días) en función del porcentaje de sustitución reportada por diversos autores y en el presente estudio.

En la Fig. 6.17 se presenta el porcentaje de variación (positiva o negativa) de la velocidad de pulso ultrasónico a los 28 días en función del porcentaje de sustitución de agregado fino por partículas PET reportado por autores que utilizaron partículas PET $< 5 \text{ mm}$ y la

variación registrada en el presente estudio⁶, estas variaciones son con respecto a la mezcla referencia (sin partículas PET) de este estudio.

Como se observa en la Fig. 6.17, a los 28 días, todos los autores incluido el presente estudio, registraron variaciones negativas con relación a la velocidad de pulso ultrasónico de su respectiva referencia. Las variaciones más negativas fueron las reportadas por Azhdarpour et al. [63] y Sadrmomtazi et al. [62] muy probablemente debido a que la sustitución del agregado fino se realizó por unidad de masa, lo que provocó concretos porosos con alto contenido de aire, reflejado en velocidades de pulso ultrasónico más bajas y por lo tanto con una menor calidad.

Rahmani et al. [54] reportaron variaciones menores con respecto a su concreto referencia (-0.60, -1.13 y -1.70 % cuando se sustituyó el 5, 10 y 15 % del agregado fino), en este caso, la sustitución del agregado fino por partículas PET se realizó por unidad de volumen en una matriz de concreto, si bien, en el presente estudio también se realizó la sustitución del agregado fino por unidad de volumen, las variaciones más negativas registradas del presente trabajo se atribuyen a que la matriz estudiada fue un mortero y no un concreto y a que la relación a/c de Rahmani et al. [54] fue de 0.42 y la utilizada en el presente trabajo fue de 0.6. Ninguno de los autores anteriormente mencionados, ni en el presente trabajo se reportaron velocidades de pulso ultrasónico menores a 3000 m/s , por lo que, considerando la velocidad de pulso ultrasónico como un parámetro cualitativo para evaluar la calidad del material, se pueden obtener concretos y morteros con partículas PET de calidad alta, sin embargo, la inclusión de partículas PET en un mortero o concreto genera porosidad interna y por lo tanto propicia que la calidad del material disminuya.

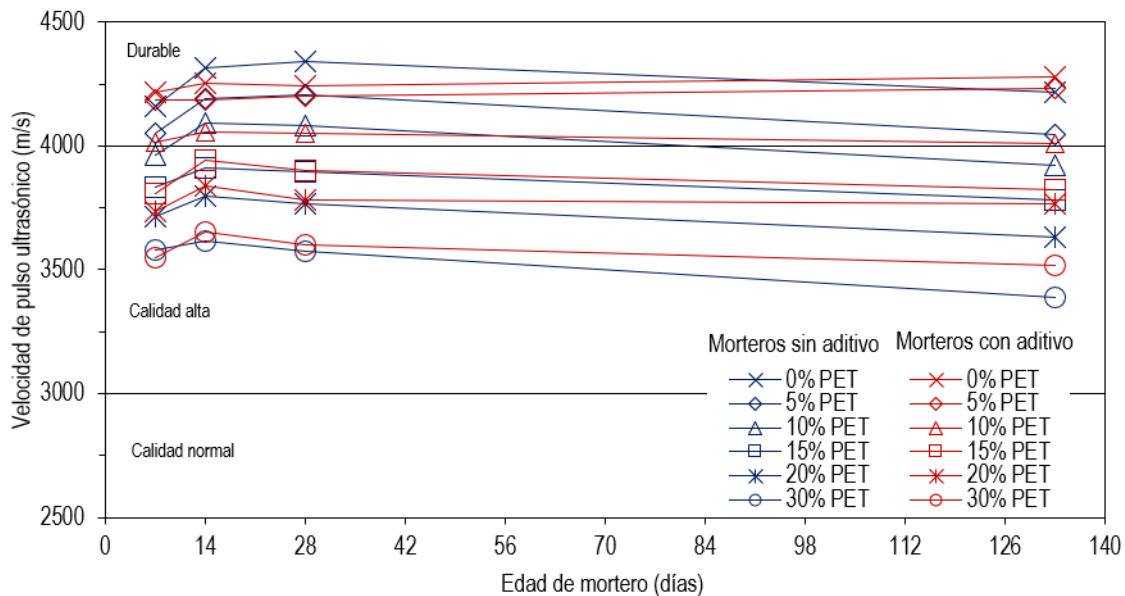


Figura 6.18: Variación de la velocidad de pulso ultrasónico de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire) en función del tiempo (7, 14, 28 y 133 días).

⁶Para la gráfica se tomó en cuenta la VPU de los morteros sin aditivo reductor de aire, dado que como se describió no hay diferencia con los resultados de VPU de los morteros con aditivo reductor de aire.

En la Fig. 6.18 se presentan los valores de la velocidad de pulso ultrasónico de los morteros con y sin aditivo en función de la edad de los morteros (7, 14, 28 y 133 días). Como se puede observar, a los 133 días los valores de la velocidad de pulso ultrasónico de los morteros muestran una ligera disminución cuando se les compara con los valores registrados por los morteros a los 28 día de edad, también, a los 133 días es posible notar una diferencia numérica de la velocidad de pulso ultrasónico entre morteros con y sin aditivo en donde se sustituyó el mismo volumen de agregado fino por partículas PET, los morteros con aditivo reductor de aire tienen cuantitativamente una velocidad de pulso ultrasónico ligeramente superior a la de los morteros sin aditivo, sin embargo, tomando en cuenta que la velocidad de pulso ultrasónico es un indicador de la homogeneidad y detección de fallas internas de la matriz, a los 133 días todos los morteros presentan una calidad alta o durable (véase Fig. 6.18), es decir, la calidad de los morteros con partículas PET no se ha visto afectada desde que se fabricaron.

Futuros estudios consideran la medición de la velocidad de pulso ultrasónico a edades posteriores para el monitoreo de la calidad de los morteros con partículas PET.

En el apéndice A, sección A.6 se presentan los valores de la velocidad de pulso ultrasónico de los morteros con partículas PET registrados en las diferentes edades.

6.3.2. Resistividad eléctrica

En la gráfica de la Fig. 6.19 se presenta la variación de los valores de la resistividad eléctrica de los morteros con partículas PET a los 7, 14, 28 y 140 días.

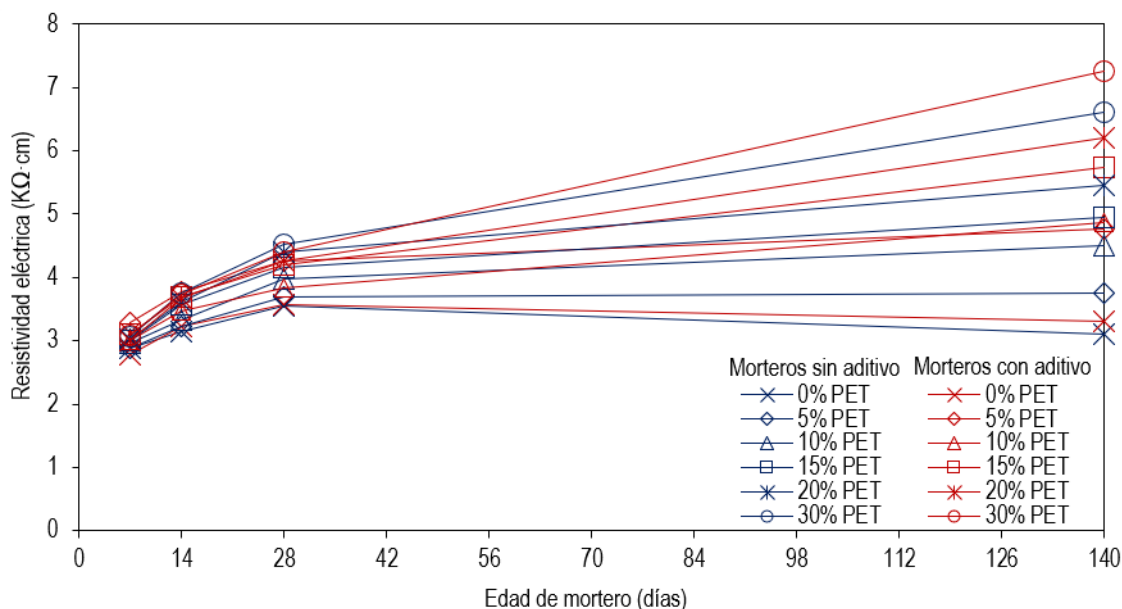


Figura 6.19: Variación de la resistividad eléctrica de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire) en función del tiempo (7, 14, 28 y 140 días).

De manera general, hasta los 140 días la resistividad eléctrica de todos los morteros

estuvo por debajo de $10\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$, por lo que, tomando en cuenta los criterios de evaluación de la NMX-C-514-ONNCCE-2018 [26] si se tuviera acero embebido en los morteros la probabilidad de corrosión de este sería muy alta y por lo tanto se hablaría de matrices con una porosidad interconectada excesiva.

Como se observa en la Fig. 6.19, a edades tempranas (7, 14 y 28 días) la resistividad eléctrica de los diferentes morteros no fluctúa mucho y a los 28 días la resistividad eléctrica de los morteros oscila entre 2.8 y $4.5\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$; los valores de la resistividad eléctrica de los morteros registrada a los 140 días permiten se observe una diferencia numérica con lo que respecta a este parámetro, entre mayor el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET los morteros mayor la resistividad eléctrica, a los 140 días la resistividad eléctrica de los morteros fluctúa de 3.1 (mortero sin partículas PET y sin aditivo reductor de aire) a $7.3\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ (mortero con una sustitución del 30 % de partículas PET), sin embargo, considerando que la resistividad eléctrica hace referencia a la propiedad de un material para oponerse al paso de corriente eléctrica y que las partículas PET son un material con muy baja conductividad eléctrica [102], en el caso particular de este estudio, la resistividad eléctrica de los morteros además de estar en función de variables como la porosidad de los morteros, el grado de saturación de los poros, entre otras, también estuvo en función del contenido de partículas PET⁷, es por ello que entre mayor el contenido de partículas PET mayor la resistividad eléctrica que se registra.

Dentro de la literatura, Sadrmomtazi et al. [62] presentan la resistividad eléctrica de concretos en donde sustituyó 5, 10 y 15 % del peso del agregado fino por partículas PET $< 4.75\text{ cm}$, en este estudio a los 90 días de edad los concretos con partículas PET registraron valores de resistividad eléctrica muy similares a del concreto referencia, aprox. $12 \pm 0.5\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$, en este mismo estudio se reportó la resistividad eléctrica de concreto que además de partículas PET incorpora (i) ceniza volante o (ii) humo de sílice como una sustitución parcial del cemento, en este caso, la resistencia eléctrica de los concretos incrementó de $12\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ (concreto referencia con ceniza volante o humo de sílice) a $34 \pm 1\text{ K}\Omega\cdot\text{cm}$ cuando se sustituyó el 5, 10 y 15 % del agregado fino por partículas PET, los autores concluyen que la incorporación de partículas PET en el concreto no afecta a la resistividad eléctrica del concreto y el incremento de este parámetro lo atribuyen a la incorporación de ceniza volante y humo de sílice que densifican la matriz de concreto, sin embargo, en el estudio realizado en esta investigación se demuestra que la inclusión de partículas PET tiene influencia en los valores de resistividad eléctrica que se registran. A diferencia de un concreto o mortero convencional en donde un valor de resistividad eléctrica alto es sinónimo de un material denso con baja porosidad, en una matriz con partículas PET significa la baja capacidad del material para conducir electricidad debido a la incorporación de un material (partículas PET) con propiedades eléctricas aislantes, por lo tanto, el valor de la resistividad eléctrica no puede ser tomado como un parámetro para evaluar la calidad de concreto o mortero con partículas PET.

En el apéndice A, sección A.7 se presentan los valores de la resistencia eléctrica de los morteros con partículas PET registrados en este estudio.

⁷Entre mayor el contenido de partículas PET en el mortero, mayor la resistividad eléctrica de este.

6.3.3. Absorción capilar

La grafica de la tasa de absorción de los morteros con partículas PET se presenta en la Fig. 6.20. Como se puede observar, el comportamiento de la tasa de absorción en función del tiempo registrada presentó muy poca variabilidad entre los diferentes morteros, para una visualización más puntual, en la Fig. 6.21 se presenta la gráfica de la absorción inicial de los morteros en función del porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET.

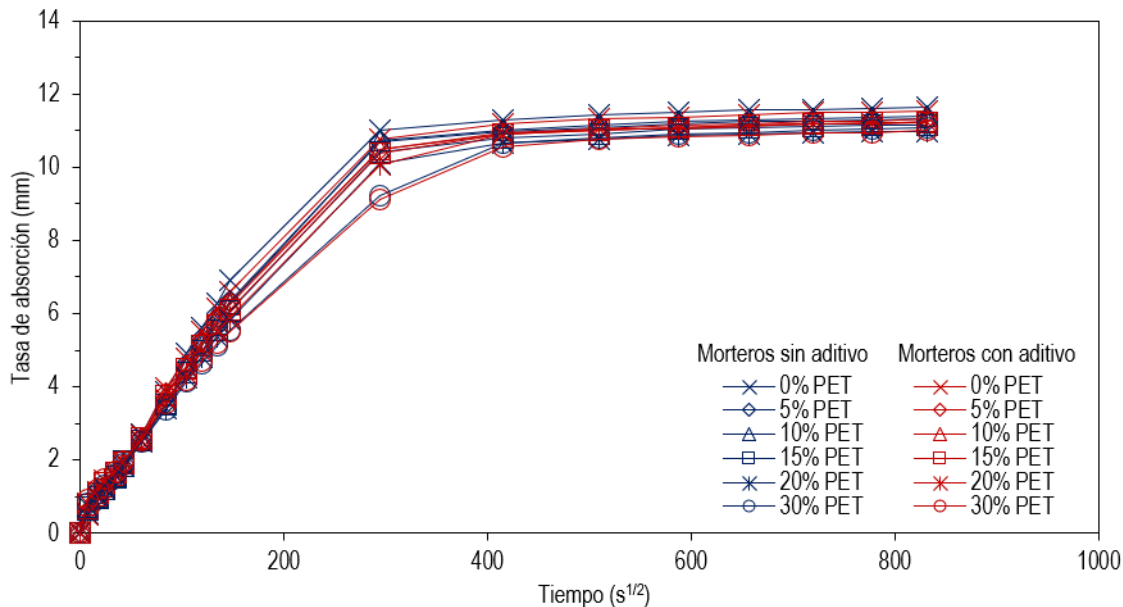


Figura 6.20: . Tasa de absorción de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

Como se aprecia en la Fig. 6.21, el uso de aditivo reductor de aire en los morteros tuvo poco o nulo efecto en la absorción registrada en morteros con igual sustitución, y hubo poca variabilidad en los valores de la absorción inicial de los morteros, los cuales fluctúan de $4.62 \text{ E-}02$ a $3.46 \text{ E-}02 \text{ mm/s}^{1/2}$ cuando se sustituyó 0 y 30 % del volumen del agregado fino por partículas PET respectivamente⁸. En esta misma gráfica también se puede apreciar una correlación lineal entre la absorción inicial de los morteros y el volumen de agregado fino sustituido, entre mayor el porcentaje de partículas PET menor la absorción inicial de los morteros.

La ASTM C1585 [92] especifica que para la obtención de los valores de la absorción inicial y secundaria es necesario que entre los puntos que forman la pendiente exista un coeficiente de correlación no menor a 0.98, en el caso de la absorción inicial este coeficiente fue alcanzado, sin embargo, en el caso de la absorción secundaria esto no fue así, por lo tanto, no se pudo determinar este parámetro, sin embargo, para fines visuales que aporten a la discusión en la Fig. 6.22 se presenta la absorción secundaria de los morteros en función del porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET.

⁸Morteros sin aditivo reductor de aire.

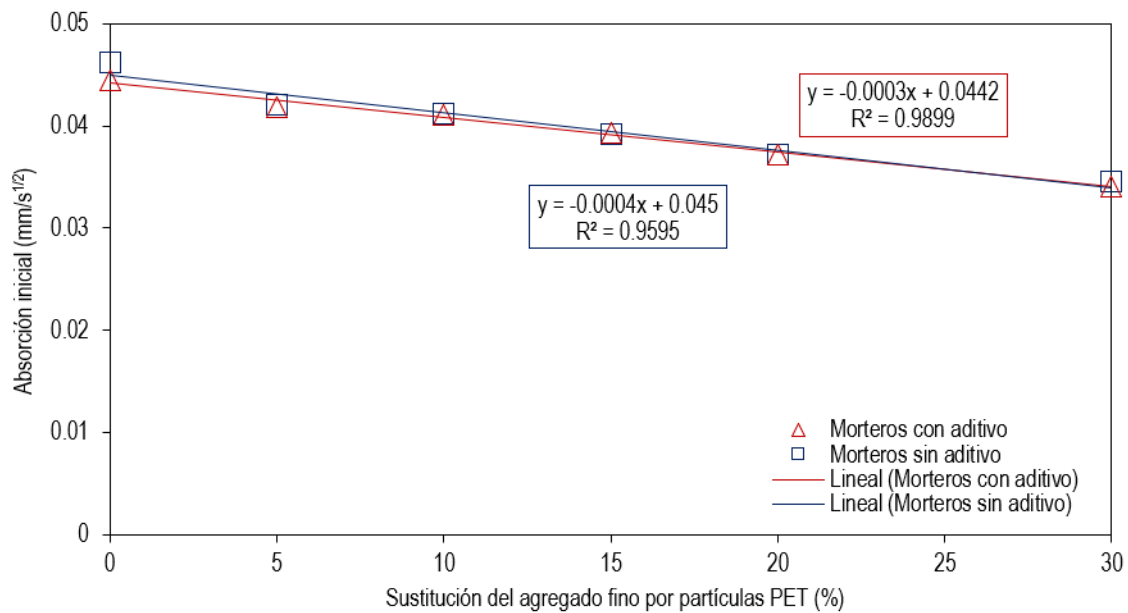


Figura 6.21: Absorción inicial de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

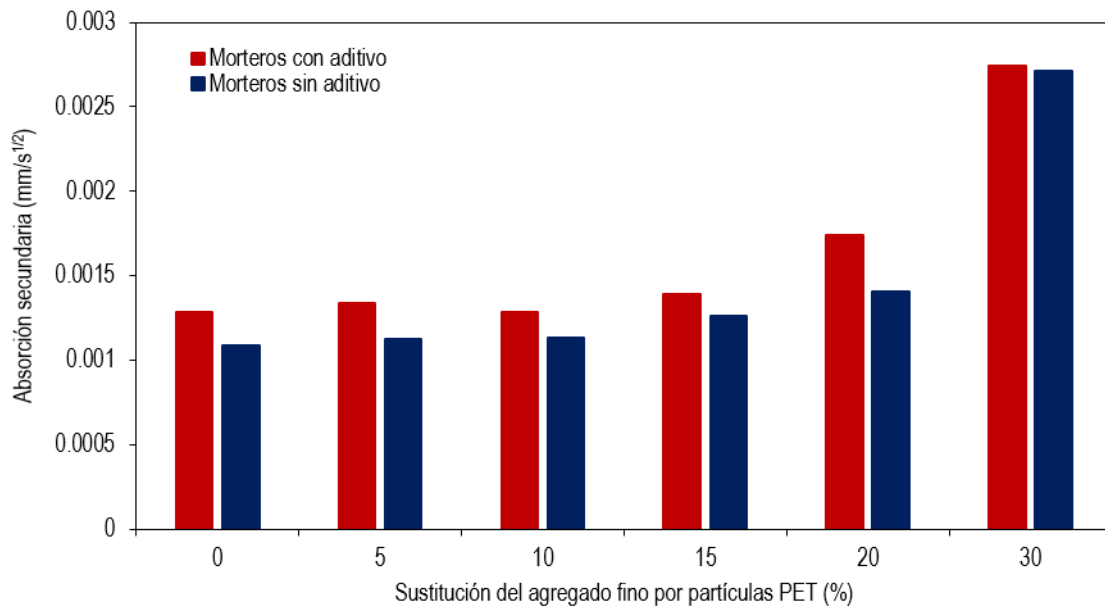


Figura 6.22: Absorción secundaria de morteros con partículas PET (con y sin aditivo reductor de aire).

Como se observa en la Fig. 6.22, los valores de la absorción secundaria incrementan ligeramente conforme aumenta la cantidad de agregado fino sustituido por partículas PET, contrario a lo observado en la absorción inicial de los morteros. Autores que estudiaron parámetros relacionados con la absorción de agua reportaron que el porcentaje de absorción es mayor en morteros [52] y concretos [62] con partículas PET, este comportamiento lo

atribuyen al incremento en la porosidad de la matriz debido a una baja cohesión entre las partículas y el resto de los materiales.

En el presente estudio, se observó que entre mayor la cantidad de partículas PET mayor el contenido de aire en los morteros y por lo tanto, mayor porosidad (lo cual también se confirma con los valores de la velocidad de pulso ultrasónico) , por ello la absorción secundaria es mayor conforme incrementa el porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET, sin embargo, tomando en cuenta los valores de la absorción inicial se puede deducir que la tasa de absorción de los morteros es más lenta debido a la incorporación de partículas PET que no absorben agua, no obstante, la porosidad de los morteros incrementa conforme aumenta el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET debido a como señalan otros autores la baja cohesión de las partículas PET con el resto de la matriz [52,62].

Los valores de la absorción inicial y secundaria de los morteros con partículas PET se presentan en el apéndice A, sección A8.

6.3.4. Inspección visual

En la Fig. 6.23 se presentan las imágenes correspondientes a la inspección visual realizada a un mismo espécimen por mezcla de mortero.

Como se observa en la Fig. 6.23, cuando se compara la superficie de los morteros en función del porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET se puede apreciar que hay un incremento en la cantidad de vacíos conforme incrementa el contenido de partículas PET, lo que nos indica una matriz más porosa, esto concuerda con los resultados obtenidos del contenido de aire y absorción de los morteros, en donde estos valores incrementan conforme aumenta el porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET.

Con respecto a la superficie de morteros con y sin aditivo se aprecia que no hay diferencias significativas entre los morteros con una misma sustitución. Los morteros con y sin aditivo reductor de aire en donde se sustituyó el 0, 5, 10 y 15 % del agregado fino por partículas PET presentan una superficie casi lisa y sin imperfecciones, los morteros con y sin aditivo con una sustitución de 20 y 30 % visualmente presentaron una mayor cantidad de vacíos, sin embargo, en ninguna de la superficie de los morteros se presentaron oquedades que puedan considerarse mayores con respecto a los morteros sin partículas PET.

Comparando los especímenes con igual sustitución, de los 28 a los 140 días de edad no se observa ninguna diferencia a excepción del cambio de coloración de la superficie de los morteros, esto debido a la presencia de humedad, a los 28 días los especímenes se encontraban bajo una condición de saturación y a los 140 días los especímenes ya habían estado expuestos 112 días en condiciones ambientales naturales . La no variación en la superficie de los morteros se puede correlacionar con el comportamiento incremental de los valores incrementales de la resistencia a la compresión y de VPU registrados desde los 7 hasta los 160 días.

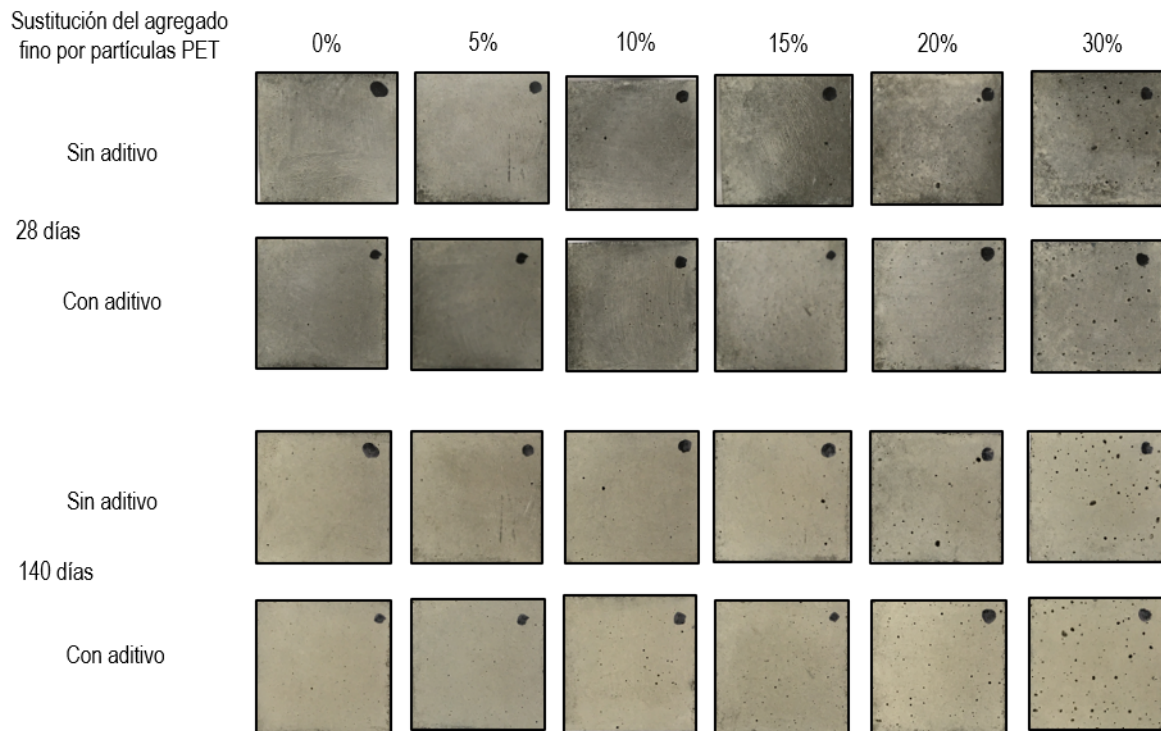


Figura 6.23: Inspección visual de especímenes de mortero con y sin aditivo (1/3).

Como se describió en el capítulo “Metodología Experimental” la inspección visual se realizó a tres especímenes por mezcla de mortero, en el apéndice A, sección A.9 se presentan las imágenes de los especímenes faltantes, la superficie de los demás especímenes presenta las mismas características que su homólogo de la Fig. 6.23.

Capítulo 7

Conclusiones

- El contenido de aire de los morteros incrementa conforme aumenta la cantidad de partículas PET, de 1.6 % (mortero referencia) a 4.1 % cuando se sustituye el 30 % del agregado fino por partículas PET, esto debido a la fricción que las partículas irregulares con perfiles angulares ejercen con el resto de los componentes del mortero. El aumento en el contenido de aire que genera la inclusión de partículas PET en el mortero puede ser minimizado si se utilizan partículas PET con una distribución de tamaño proporcional a las del agregado.
- El uso de 50 g/m^3 de aditivo reductor de aire en las mezclas no influyó de para reducir el contenido de aire de los morteros, por lo tanto, en este estudio y con la dosificación utilizada no se justifica su uso.
- La fluidez de los morteros disminuye conforme aumenta el porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET debido a la geometría irregular con perfiles angulares y superficie rugosa de las partículas que generan fricción con el resto de los componentes de la mezcla.
- La densidad de los morteros disminuye conforme aumenta la cantidad de partículas PET en la matriz debido a la diferencia entre la gravedad específica del agregado fino (2.79) y de las partículas PET (1.39). La disminución de la densidad de los morteros es directamente proporcional al porcentaje de volumen de agregado fino sustituido por partículas PET. La densidad disminuye 2.25 % por cada 5 % del volumen de agregado fino que se sustituye por partículas PET.
- La resistencia a la compresión de los morteros disminuye conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET, esto se atribuye a la baja adherencia de las partículas con el resto de los componentes de los morteros. El efecto en la resistencia a la compresión que propician las partículas PET en los morteros puede ser aminorado si se utilizan con una granulometría distribuida similar a la del agregado fino.

- La conductividad térmica de los morteros disminuye conforme incrementa la cantidad de partículas PET ya que propician un retraso en la propagación de calor debido a su baja conductividad térmica con respecto a la del resto de los componentes de la matriz. La conductividad térmica de los morteros con partículas PET es directamente proporcional a la densidad de estos, entre menor la densidad de los morteros menor su conductividad térmica.
- El uso de 50 g/m^3 de aditivo reductor de aire no modificó la fluidez, ni la densidad de los morteros con partículas PET, ni tampoco alteró las propiedades mecánicas o térmicas de los morteros con partículas PET.
- La inclusión de partículas PET en la mezcla genera morteros porosos, lo que se ve reflejado en los valores de VPU, los cuales disminuyen conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET. La VPU es un parámetro que puede ser utilizado para monitorear y evaluar la calidad de los morteros con partículas PET.
- La resistividad eléctrica de los morteros aumenta conforme incrementa el porcentaje de sustitución del agregado fino por partículas PET debido a la baja conductividad eléctrica de las partículas PET.
- Debido a su morfología y a una baja adhesión con el resto de los materiales, la inclusión de partículas PET en morteros genera porosidad interna en la matriz, por lo tanto, entre mayor el porcentaje de agregado fino sustituido por partículas PET mayor la tasa de absorción de los morteros.
- La tasa de absorción capilar en morteros con partículas PET es más lenta debido a que las partículas PET son menos absorbentes que el agregado fino. Entre mayor la cantidad de partículas PET en los morteros más lenta la tasa de absorción capilar de los morteros.

Capítulo 8

Recomendaciones

Derivado de los resultados obtenidos en esta investigación, a continuación, se enlistan algunas recomendaciones para futuros trabajos de investigación relacionados con este tema.

- Monitoreo de las propiedades de los morteros con partículas PET a edades más avanzadas.
- En el caso del presente estudio 50 g/m^3 de aditivo reductor de aire en los morteros no fue suficiente para propiciar cambios en las propiedades de los morteros, si bien, se utilizó la dosificación máxima recomendada por el proveedor se recomienda fabricar morteros con una dosificación más alta de aditivo y/o morteros que incluyan una sinergia de aditivos para ver si es posible mejorar el desempeño de este tipo de morteros.
- Análisis costo beneficio de este tipo de matrices.
- Investigación sobre tratamientos a las partículas PET para mejorar su adhesión con el resto de la matriz.
- Análisis de otras propiedades físicas como la resistencia al impacto o resistencia a la abrasión.

Se identificó que la mengua de las propiedades de los morteros puede ser minimizada si se controla la granulometría de las partículas PET, sin embargo, la primicia del uso de este material es el aprovechamiento y encapsulamiento de un residuo por lo que, el gasto energético que requeriría su separación por tamaño de partículas tendría que ser evaluado, se recomienda un estudio económico y de energía para valorar su uso.

Apéndice A

Resultados

A.1. Contenido de aire

Tabla A.1: Valores del contenido de aire de las mezclas de mortero con y sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Contenido de aire (%)	
	Sin aditivo	Con aditivo
0	1.6	1.5
5	2.3	2.4
10	2.9	2.9
15	3.3	2.7
20	4.2	3.3
30	4.1	3.6

A.2. Densidad en estado fresco

Tabla A.2: Valores de la densidad en estado fresco de las mezclas de mortero con y sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Densidad en estado fresco (kg/m^3)	
	Sin aditivo	Con aditivo
0	2207	2209
5	2159	2156
10	2112	2113
15	2071	2084
20	2018	2038
30	1955	1965

A.3. Densidad en estado endurecido

Tabla A.3: Valores de la densidad en estado endurecido de morteros con y sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Densidad en estado endurecido (kg/m^3)	
	Sin aditivo	Con aditivo
0	2176	2179
5	2111	2104
10	2066	2058
15	2014	2012
20	1974	1982
30	1878	1882

A.4. Resistencia a la compresión

Tabla A.4: Valores de la resistencia a la compresión de morteros con partículas PET sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Resistencia a la compresión (MPa)			
	7 días	28 días	56 días	160 días
0	36.3	41.2	48.2	49
5	33.1	38.1	43.5	47.8
10	31.9	37.2	42.5	47.2
15	32.2	35.6	42.3	43.3
20	27.9	27.2	36.1	39.7
30	26.5	28.7	32.2	34

Tabla A.5: Valores de la resistencia a la compresión de morteros con partículas PET con aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Resistencia a la compresión (MPa)			
	7 días	28 días	56 días	160 días
0	36	40.1	48.1	49.4
5	33.5	39	43.1	47
10	30.8	36.9	40.8	44.9
15	30.2	33.3	39.8	42.5
20	29.3	32.6	36.4	40.1
30	28.2	30	32.6	36.1

A.5. Conductividad térmica

Tabla A.6: Valores de conductividad de morteros con y sin aditivo (condición “seco”, $23 \pm 2^\circ\text{C}$).

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Conductividad térmica $W/m \cdot K$	
	Sin aditivo	Con aditivo
0	1.22	1.21
5	1.12	1.06
10	1.08	1.14
15	1.01	0.97
20	0.86	0.83
30	0.76	0.82

Tabla A.7: Valores de conductividad de morteros con y sin aditivo (condición “saturado”, $23 \pm 2^\circ\text{C}$).

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Conductividad térmica $W/m \cdot K$	
	Sin aditivo	Con aditivo
0	1.77	1.74
5	1.55	1.70
10	1.53	1.57
15	1.44	1.40
20	1.34	1.37
30	1.07	1.12

A.6. Velocidad de pulso ultrasónico

Tabla A.8: Valores de la velocidad de pulso ultrasónico de morteros con partículas PET sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)			
	7 días	14 días	28 días	133 días
0	4161	4315	4341	4214
5	4049	4190	4204	4044
10	3964	4095	4081	3921
15	3834	3912	3895	3779
20	3715	3797	3765	3631
30	3582	3614	3574	3390

Tabla A.9: Valores de la velocidad de pulso ultrasónico de morteros con partículas PET con aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Velocidad de pulso ultrasónico (m/s)			
	7 días	14 días	28 días	133 días
0	4219	4254	4244	4281
5	4185	4185	4199	4230
10	4017	4058	4049	4012
15	3809	3942	3899	3824
20	3737	3838	3781	3765
30	3550	3650	3599	3517

A.7. Resistividad eléctrica

Tabla A.10: Valores de la resistividad eléctrica de morteros con partículas PET sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Resistividad eléctrica ($K\Omega \cdot cm$)			
	7 días	14 días	28 días	140 días
0	2.9	3.2	3.6	3.1
5	2.9	3.2	3.7	3.8
10	3	3.3	4	4.5
15	3	3.6	4.2	5
20	3	3.6	4.4	5.4
30	3.1	3.8	4.5	6.6

Tabla A.11: Valores de la resistividad eléctrica de morteros con partículas PET con aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Resistividad eléctrica ($K\Omega \cdot cm$)			
	7 días	14 días	28 días	140 días
0	2.8	3.2	3.6	3.3
5	3.3	3.8	4.3	4.8
10	3	3.5	3.8	4.9
15	3.1	3.7	4.2	5.7
20	3	3.7	4.3	6.2
30	3.1	3.7	4.4	7.3

A.8. Absorción capilar

Tabla A.12: Valores de la absorción inicial ($R > 0.98$) y absorción secundaria ($R < 0.98$) de morteros con y sin aditivo.

Sustitución del agregado fino por partículas PET (%)	Absor. inicial ($mm/s^{1/2}$)		Absor. secundaria ($mm/s^{1/2}$)	
	Sin aditivo	Con aditivo	Sin aditivo	Con aditivo
0	4.62 E-02	4.44 E-02	1.09 E-03	1.28 E-03
5	4.21 E-02	4.18 E-02	1.12 E-03	1.34 E-03
10	4.12 E-02	4.11 E-02	1.13 E-03	1.28 E-03
15	3.92 E-02	3.93 E-02	1.26 E-03	1.39 E-03
20	3.72 E-02	3.72 E-02	1.41 E-03	1.74 E-03
30	3.46 E-02	3.40 E-02	2.71 E-03	2.75 E-03

A.9. Inspección visual

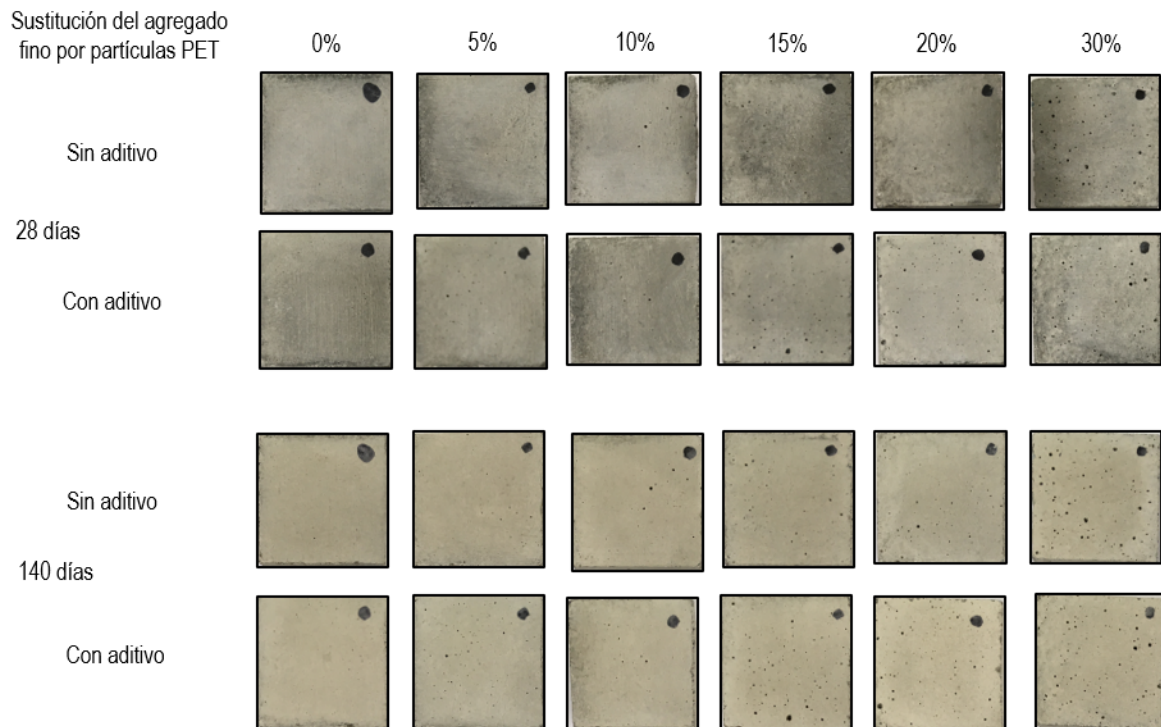


Figura A.1: Inspección visual de especímenes de mortero con y sin aditivo (2/3).

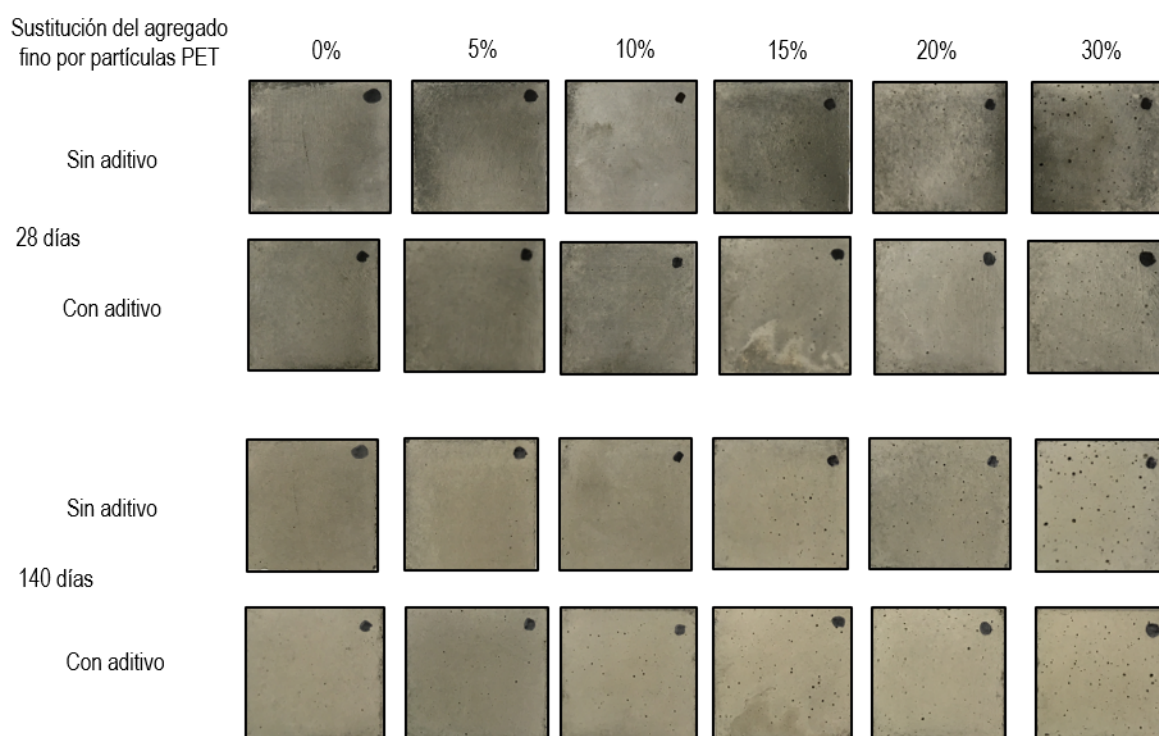


Figura A.2: Inspección visual de especímenes de mortero con y sin aditivo (3/3).

Bibliografía

- [1] Soroka, I. (1979). Portland cement paste and concrete. Macmillan International Higher Education.
- [2] Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C. (2002). Design and control of concrete mixtures, portland cement Association. Skokie, Illinois, USA.
- [3] NMX-C-414-ONNCCE-2004 (2004). Industria de la construcción–Cementos hidráulicos–Especificaciones y métodos de prueba.
- [4] ASTM C150/C150M-20 (2020). Standard Specification for Portland Cement. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [5] Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2017). Concrete microstructure, properties and materials.
- [6] De Guzmán, D. S. (2001). Tecnología del concreto y del mortero. Pontificia Universidad Javeriana.
- [7] ASTM C125-20 (2020). Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [8] NBR, A. (2015). 8953: 2015-Concreto para fins estruturais-Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [9] UNE-EN 998-2 (2018). Specification for mortar for masonry- Part 2: Masonry mortar. European Committee for Standardization, Brussels.
- [10] ACI Committee 211.1. (2009). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91). American Concrete Institute.
- [11] ACI Committee 318. (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI 318-19). American Concrete Institute.
- [12] Czichos, H., Saito, T., & Smith, L. E. (Eds.). (2011). Springer handbook of metrology and testing. Springer Science & Business Media.

- [13] Jelle, B. P. (2011). Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions—Properties, requirements and possibilities. *Energy and buildings*, 43(10), 2549-2563.
- [14] Asadi, I., Shafigh, P., Hassan, Z. F. B. A., & Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete—A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81-93.
- [15] NMX-C-523-ONNCCE-2016 (2016). Industria de la construcción—Durabilidad de estructuras de concreto reforzado—Concentración de cloruros solubles en agua y ácido—Determinación en concreto hidráulico—Método de extracción y método de determinación por ión selectivo.
- [16] ACI Committee 201.2 (2016). Guide to Durable Concrete (ACI 201.2 R-16). American Concrete Institute.
- [17] Rincón, O. T., Carruyo, C. A., Andrade, C., Helene, P., & Díaz, I. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. DURAR: Red Temática XV. B Durabilidad de la Armadura—Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el desarrollo.
- [18] Sanjuán, M. A. & Castro P. (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. A. C. (IMCYC).
- [19] Taylor, H. F. W., Famy, C., & Scrivener, K. L. (2001). Delayed ettringite formation. *Cement and concrete research*. 31(5), 683-693.
- [20] NMX-C-275-ONNCCE-2019 (2019). Industria de la construcción—Concreto Hidráulico—Determinación de la Velocidad de Pulso Ultrasónico a través del Concreto—Método de Ensayo.
- [21] REAL ACADEMIA ESPAÑOLA: Diccionario de la lengua española, 23.^a ed., [versión 23.3 en línea]. <https://dle.rae.es/>[Fecha de la consulta: Julio 03, 2020].
- [22] Hankins, D., Moskowitz, J. W., & Stillinger, F. H. (1970). Water molecule interactions. *The Journal of Chemical Physics*, 53(12), 4544-4554.
- [23] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). Concrete technology. England: Longman Scientific & Technical.
- [24] ACI CT (2018). ACI Concrete Terminology (ACI CT-18). American Concrete Institute.
- [25] Fagerlund, G. (1986). On the capillarity of Concrete. *Nordic Concrete Research*. Oslo, 11(6), 12-25.
- [26] NMX-C-514-ONNCCE-2018 (2018). Industria de la construcción—Resistividad eléctrica del concreto hidráulico—Especificaciones y métodos de ensayo.

-
- [27] Castro, P., Castillo, R., & Carpio, J. J. (1998). Corrosión en estructuras de concreto armado. Teoría, Inspección, Diagnostico, Vida Útil y Reparaciones, 1^a edición IMCYC, México.
- [28] Canevarolo, S. V. (2019). Polymer Science: A Textbook for Engineers and Technologists. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
- [29] Anshuman, S. (2018). Introduction to Plastic Engineering.
- [30] Crawford, R. J., & Martin, P. J. (2020). Plastics engineering. Butterworth-Heinemann.
- [31] Wagner, M., & Lambert, S. (2018). Freshwater microplastics: emerging environmental contaminants?. Springer Nature.
- [32] Rocha-Santos, T., & Duarte, A. C. (2015). A critical overview of the analytical approaches to the occurrence, the fate and the behavior of microplastics in the environment. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 65, 47-53.
- [33] Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Physiochemical properties and degradation. Microplastic Pollutants: Elsevier, 57-100.
- [34] Xanthos, M., & Dagli, S. S. (1991). Compatibilization of polymer blends by reactive processing. *Polymer Engineering & Science*, 31(13), 929-935.
- [35] Pacheco-Torgal, F., Khatib, J., Colangelo, F., & Tuladhar, R. (Eds.). (2018). Use of recycled plastics in eco-efficient concrete. Woodhead Publishing.
- [36] Awaja, F., & Pavel, D. (2005). Recycling of PET. *European Polymer Journal*, 41(7), 1453-1477.
- [37] Spencer, D. B. (2016). Recycling–Household Waste.
- [38] Prasad, M. N. V. (Ed.). (2015). Bioremediation and bioeconomy. Elsevier.
- [39] Thompson, R. C., Moore, C. J., Vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1526), 2153-2166.
- [40] Dilkes-Hoffman, L. S., Pratt, S., Lant, P. A., & Laycock, B. (2019). The role of biodegradable plastic in solving plastic solid waste accumulation. In *Plastics to Energy* (pp. 469-505). William Andrew Publishing.
- [41] Dimitrov, N., Krehula, L. K., Siročić, A. P., & Hrnjak-Murčić, Z. (2013). Analysis of recycled PET bottles products by pyrolysis-gas chromatography. *Polymer Degradation and Stability*, 98(5), 972-979.

- [42] Rivera Gutierrez, X. J., Cobos Quevedo, O. D. J., & Remes Troche, J. M. (2016). The carcinogenic effects of acetaldehyde. A current view. *Gaceta Mexicana de Oncología*, 15(4), 231-239.
- [43] Yang, Z., Lü, F., Zhang, H., Wang, W., Shao, L., Ye, J., & He, P. (2020). Is Incineration the Terminator of Plastics and Microplastics?. *Journal of Hazardous Materials*, 123429.
- [44] Thomas, S., Rane, A. V., Kanny, K., Abitha, V. K., & Thomas, M. G. (Eds.). (2018). Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles. William Andrew Publishing.
- [45] Gomes, T. S., Visconte, L. L., & Pacheco, E. B. (2019). Life cycle assessment of polyethylene terephthalate packaging: an overview. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(3), 533-548.
- [46] Gu, L., & Ozbakkaloglu, T. (2016). Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*, 51, 19-42.
- [47] Sharma, R., & Bansal, P. P. (2016). Use of different forms of waste plastic in concrete—a review. *Journal of Cleaner Production*, 112, 473-482.
- [48] Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, 28(10), 1835-1852.
- [49] Marzouk, O. Y., Dheilly, R. M., & Queneudec, M. (2007). Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites. *Waste Management*, 27(2), 310-318.
- [50] Albano, C., Camacho, N., Hernandez, M., Matheus, A., & Gutierrez, A. (2009). Influence of content and particle size of waste pet bottles on concrete behavior at different w/c ratios. *Waste Management*, 29(10), 2707-2716.
- [51] Remadnia, A., Dheilly, R. M., Laidoudi, B., & Quéneudec, M. (2009). Use of animal proteins as foaming agent in cementitious concrete composites manufactured with recycled PET aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(10), 3118-3123.
- [52] Hannawi, K., Kamali-Bernard, S., & Prince, W. (2010). Physical and mechanical properties of mortars containing PET and PC waste aggregates. *Waste Management*, 30(11), 2312-2320.
- [53] Ávila Córdoba, L., Martínez-Barrera, G., Barrera Díaz, C., Ureña Nuñez, F., & Loza Yañez, A. (2013). Effects on mechanical properties of recycled PET in cement-based composites. *International Journal of Polymer Science*, 2013.
- [54] Rahmani, E., Dehestani, M., Beygi, M. H. A., Allahyari, H., & Nikbin, I. M. (2013). On the mechanical properties of concrete containing waste PET particles. *Construction and Building Materials*, 47, 1302-1308.

-
- [55] Akçaözoglu, S., & Ulu, C. (2014). Recycling of waste PET granules as aggregate in alkali-activated blast furnace slag/metakaolin blends. *Construction and Building Materials*, 58, 31-37.
- [56] Araghi, H. J., Nikbin, I. M., Reskati, S. R., Rahmani, E., & Allahyari, H. (2015). An experimental investigation on the erosion resistance of concrete containing various PET particles percentages against sulfuric acid attack. *Construction and Building Materials*, 77, 461-471.
- [57] Nikbin, I. M., Rahimi, S., Allahyari, H., & Fallah, F. (2016). Feasibility study of waste Poly Ethylene Terephthalate (PET) particles as aggregate replacement for acid erosion of sustainable structural normal and lightweight concrete. *Journal of Cleaner Production*, 126, 108-117.
- [58] Rahimi, S., Nikbin, I. M., Allahyari, H., & Habibi, S. (2016). Sustainable approach for recycling waste tire rubber and polyethylene terephthalate (PET) to produce green concrete with resistance against sulfuric acid attack. *Journal of Cleaner Production*, 126, 166-177.
- [59] Mohammed, A. A. (2017). Flexural behavior and analysis of reinforced concrete beams made of recycled PET waste concrete. *Construction and Building Materials*, 155, 593-604.
- [60] Akçaözoglu, S., Atiş, C. D., & Akçaözoglu, K. (2010). An investigation on the use of shredded waste PET bottles as aggregate in lightweight concrete. *Waste Management*, 30(2), 285-290.
- [61] Frigione, M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30(6), 1101-1106.
- [62] Sadrmomtazi, A., Dolati-Milehsara, S., Lotfi-Omran, O., & Sadeghi-Nik, A. (2016). The combined effects of waste Polyethylene Terephthalate (PET) particles and pozzolanic materials on the properties of self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2363-2373.
- [63] Azhdarpour, A. M., Nikoudel, M. R., & Taheri, M. (2016). The effect of using polyethylene terephthalate particles on physical and strength-related properties of concrete; a laboratory evaluation. *Construction and Building Materials*, 109, 55-62.
- [64] Saxena, R., Siddique, S., Gupta, T., Sharma, R. K., & Chaudhary, S. (2018). Impact resistance and energy absorption capacity of concrete containing plastic waste. *Construction and Building Materials*, 176, 415-421.
- [65] Yesilata, B., Isiker, Y., & Turgut, P. (2009). Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1878-1882.

- [66] Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., & Cho, S. K. (2005). Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776-781.
- [67] Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., & Lachemi, M. (2009). Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829-2835.
- [68] Silva, R. V., de Brito, J., & Saikia, N. (2013). Influence of curing conditions on the durability-related performance of concrete made with selected plastic waste aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 35(1), 23-31.
- [69] Saikia, N., & de Brito, J. (2014). Mechanical properties and abrasion behaviour of concrete containing shredded PET bottle waste as a partial substitution of natural aggregate. *Construction and Building Materials*, 52, 236-244.
- [70] Safi, B., Saidi, M., Aboutaleb, D., & Maallem, M. (2013). The use of plastic waste as fine aggregate in the self-compacting mortars: Effect on physical and mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 43, 436-442.
- [71] Islam, M. J., Meherier, M. S., & Islam, A. R. (2016). Effects of waste PET as coarse aggregate on the fresh and harden properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 125, 946-951.
- [72] Thorneycroft, J., Orr, J., Savoikar, P., & Ball, R. J. (2018). Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and Building Materials*, 161, 63-69.
- [73] Schaefer, C. E., Kupwade-Patil, K., Ortega, M., Soriano, C., Büyüköztürk, O., White, A. E., & Short, M. P. (2018). Irradiated recycled plastic as a concrete additive for improved chemo-mechanical properties and lower carbon footprint. *Waste Management*, 71, 426-439.
- [74] Akçaözoglu, S., Akçaözoglu, K., & Atiş, C. D. (2013). Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA). *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 721-726.
- [75] Bahij, S., Omary, S., Feugeas, F., & Faqiri, A. (2020). Fresh and hardened properties of concrete containing different forms of plastic waste—A review. *Waste Management*, 113, 157-175.
- [76] ASTM C33/C33M-18 (2018). Standard Specification for Concrete Aggregates. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

-
- [77] Holland, B. J., & Hay, J. N. (2002). The thermal degradation of PET and analogous polyesters measured by thermal analysis–Fourier transform infrared spectroscopy. *Polymer*, 43(6), 1835-1847.
- [78] Mecozzi, M., & Nisini, L. (2019). The differentiation of biodegradable and non-biodegradable polyethylene terephthalate (PET) samples by FTIR spectroscopy: A potential support for the structural differentiation of PET in environmental analysis. *Infrared Physics & Technology*, 101, 119-126.
- [79] Djebara, M., Stoquert, J. P., Abdesselam, M., Muller, D., & Chami, A. C. (2012). FTIR analysis of polyethylene terephthalate irradiated by MeV He+. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 274, 70-77.
- [80] Masmoudi, F., Fenouillot, F., Mehri, A., Jaziri, M., & Ammar, E. (2018). Characterization and quality assessment of recycled post-consumption poly (ethylene terephthalate)(PET). *Environmental Science and Pollution Research*, 25(23), 23307-23314.
- [81] ASTM C305-14 (2015). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [82] ASTM C109/C109M-20b (2020). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens). *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [83] ASTM C192/C192M-19 (2019). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [84] ASTM C511-19 (2019). Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [85] ASTM C138/C138M-17a (2017). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [86] ASTM C1437-15 (2015). Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [87] ASTM C185-20 (2020). Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [88] ASTM D5334-14 (2014). Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.

- [89] ASTM C597-16 (2016). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [90] ASTM C1876-19 (2019). Standard Test Method for Bulk Electrical Resistivity or Bulk Conductivity of Concrete. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [91] Zhutovsky, S., & Hooton, R. D. (2019). Role of sample conditioning in water absorption tests. *Construction and Building Materials*, 215, 918-924.
- [92] ASTM C1585-13 (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. *ASTM International*, West Conshohocken, PA.
- [93] Recommandation de la RILEM LC2 (1978). Functional classification of lightweight concrete, n 64, 11 281.
- [94] Dautères, A., De Windt, L., Bartier, D., Sammaljärvi, J., Barnichon, J. D., Techer, I., & Detilleux, V. (2016). Impact of a 70° C temperature on an ordinary Portland cement paste/claystone interface: An in situ experiment. *Cement and Concrete Research*, 83, 164-178.
- [95] Zentar, R., Wang, H., & Wang, D. (2021). Comparative study of stabilization/solidification of dredged sediments with ordinary Portland cement and calcium sulfo-aluminate cement in the framework of valorization in road construction material. *Construction and Building Materials*, 279, 122447.
- [96] Almeshal, I., Tayeh, B. A., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., Mohamed, A. M., & Alaskar, A. (2020). Use of recycled plastic as fine aggregate in cementitious composites: A review. *Construction and Building Materials*, 253, 119146.
- [97] Asadi, I., Shafigh, P., Hassan, Z. F. B. A., & Mahyuddin, N. B. (2018). Thermal conductivity of concrete - A review. *Journal of Building Engineering*, 20, 81-93.
- [98] Siddique, R. (2007). Waste materials and by-products in concrete. *Springer Science & Business Media*.
- [99] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. *World Bank Publications*.
- [100] Schwanse, E. (2011). Recycling policies and programmes for PET drink bottles in Mexico. *Waste Management & Research*, 29(9), 973-981.
- [101] Atlas, P. (2019). Facts and figures about the world of synthetic polymers. Heinrich Böll Foundation, Berlin.
- [102] Gulrez, S. K., Ali Mohsin, M. E., Shaikh, H., Anis, A., Pulose, A. M., Yadav, M. K., & Al-Zahrani, S. M. (2014). A review on electrically conductive polypropylene and polyethylene. *Polymer composites*, 35(5), 900-914.