



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Evaluación de la inercia térmica del mortero de cemento
con PET particulado como agregado**

Tesis para optar el Título
de Ingeniero Civil

**María José Obando Adrianzén
Jhanpierre Alejandro Ramírez Huancas**

**Asesor:
Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi**

Piura, marzo de 2025

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, María José Obando Adrianzén, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 77091065, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Evaluación de la inercia térmica del mortero de cemento con PET particulado como agregado”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- Jhanpierre Alejandro Ramírez Huancas, identificado con DNI: 70179187

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgtr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI: 02810251

Declaramos que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de nuestra experiencia como investigadores, declaramos que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumimos responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 13/03/2025.



.....
Firma del autor¹



.....
Firma del asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Declaración Jurada de Originalidad del Trabajo Final

Yo, Jhanpierre Alejandro Ramírez Huancas, egresado del Programa Académico de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura, identificado(a) con DNI: 70179187, declaro que:

Soy autor del trabajo final titulado:

“Evaluación de la inercia térmica del mortero de cemento con PET particulado como agregado”

El mismo que presento bajo la modalidad de Tesis para optar el Título profesional de Ingeniero Civil.

Que el trabajo se realizó en coautoría con los siguientes alumnos de la Universidad de Piura.

- María José Obando Adrianzén, identificado con DNI: 77091065

El texto de mi trabajo final es original y no vulnera los derechos de terceros o, de ser el caso, derechos de los coautores, incluidos los derechos de propiedad intelectual, datos personales, entre otros. En tal sentido, el texto de mi trabajo final no ha sido plagiado total ni parcialmente, para lo cual, he respetado las normas internacionales de citas y referencias de las fuentes consultadas. Asimismo, el texto del trabajo final que presento no ha sido publicado ni presentado antes en cualquier medio electrónico o físico; y que la investigación, los resultados, datos, conclusiones y demás información presentada que atribuyo a mi autoría son veraces.

En caso de detectarse el incumplimiento de lo declarado asumo frente a terceros, la Universidad de Piura y/o la Administración Pública toda responsabilidad que pueda derivarse por el trabajo final presentado. Lo señalado incluye responsabilidad pecuniaria incluido el pago de multas u otros por los daños y perjuicios que se ocasionen.

La asesoría del trabajo estuvo a cargo de los siguientes docentes de la Universidad de Piura:

- Mgr. Ing. Gaby Patricia Ruiz Petrozzi, identificado con DNI: 02810251

Declaramos que:

Luego de haber empleado el software de coincidencia Turnitin, revisado las fuentes de información señaladas por el autor, y en razón de nuestra experiencia como investigadores, declaramos que las ideas expuestas en el trabajo final alcanzan las condiciones de calidad, integridad y originalidad acorde a los objetivos institucionales y estándares en materia de investigación. Finalmente, no asumimos responsabilidad por la posible vulneración de derechos de autor en el trabajo final referido, pues tal responsabilidad es exclusiva del autor.

Fecha: 13/03/2025.



Firma del autor¹



Firma del asesor¹

¹ Firma idéntica al DNI. No se admite digital, salvo certificado.

Dedicatoria

A mis padres, cuyo amor incondicional y sacrificio constante han sido el cimiento de mis logros. Su fe inquebrantable en mí me ha impulsado a superar cada obstáculo. A mi familia, amistades y a todos aquellos que sueñan con un futuro más sostenible. Que este trabajo sea un pequeño paso hacia ese ideal.

Obando Adrianzén, María José

A mi madre, cuya fortaleza y amor incondicional han sido mi mayor inspiración. Cada logro es un reflejo de tu dedicación y sacrificio. A mi padre, por enseñarme el valor del trabajo duro y la integridad. Sus consejos y apoyo han sido fundamentales en mi camino al éxito profesional. Que este trabajo inspire a otros a seguir explorando y creando.

Ramírez Huancas, Jhanpierre Alejandro

Agradecimientos

Expresamos nuestra más profunda gratitud a todas las personas e instituciones que han hecho posible este trabajo de investigación. A nuestra asesora de tesis, por su guía invaluable, paciencia y dedicación a lo largo de este proceso. A la Universidad de Piura y a la Facultad de Ingeniería Civil, por brindarnos la formación y los recursos necesarios para desarrollar nuestro potencial como ingenieros.

Agradecemos especialmente al personal del laboratorio por su asistencia técnica y disposición para ayudarnos durante la fase experimental. A nuestras familias, por su apoyo incondicional, comprensión y aliento constante, sin los cuales este logro no hubiera sido posible. A nuestros compañeros de estudio, por su amistad y por los conocimientos compartidos a lo largo de nuestra formación académica. Y finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, contribuyeron con sus conocimientos, consejos y apoyo moral en la realización de este trabajo. A todos ustedes, nuestro más sincero agradecimiento.

Obando Adrianzén, María José

Ramírez Huancas, Jhanpierre Alejandro

Resumen

Esta tesis investiga cómo las partículas de tereftalato de polietileno (PET) influyen en la inercia térmica del mortero, debido a las propiedades poliméricas del PET, se podría reducir la conductividad térmica del mortero sustituyendo el agregado fino parcialmente.

El procedimiento consistió en evaluar morteros con reemplazos porcentuales de PET al 10%, 20%, 30% y 40% en el agregado fino, en ensayos de resistencia a la compresión, flexión y propiedades térmicas del concreto.

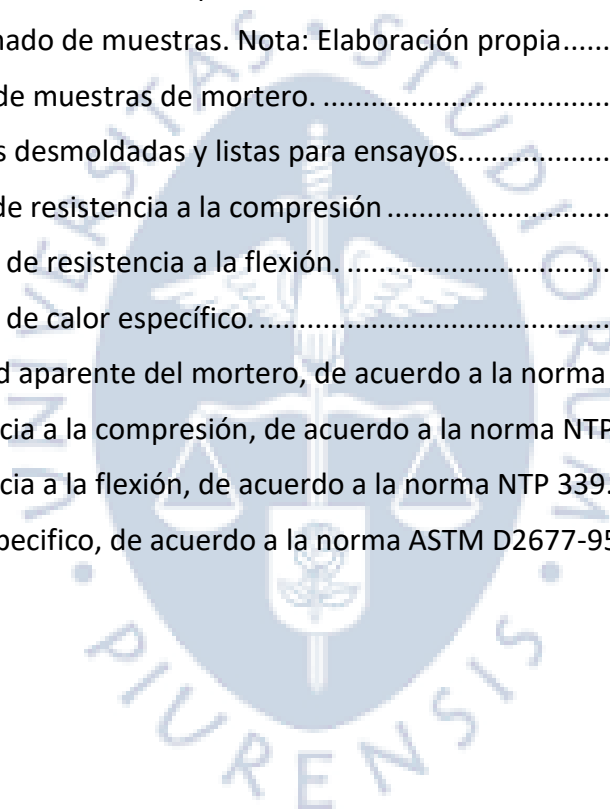
Se observó una disminución del 38.4% en la resistencia a la compresión con un 40% de PET, y solo un ligero aumento del 4.3% en la resistencia a la flexión, con un 20% de PET, incrementó el calor específico del mortero. Con un 40% de PET, el calor específico alcanzó 1406 J/kg°C, siendo un 16.7% más que la muestra estándar; sin embargo, hubo un mínimo aumento de 0.74 kcal/mK en la inercia térmica con la adición de PET.

Se concluye que incluir parcialmente PET en el diseño del mortero efectivamente mejora ciertas propiedades térmicas, especialmente el calor específico, pero para mantener controladas las propiedades mecánicas, se recomienda limitar el reemplazo al 10%, lo cual permitirá un incremento moderado en las propiedades térmicas sin comprometer significativamente las propiedades mecánicas

Tabla de contenido

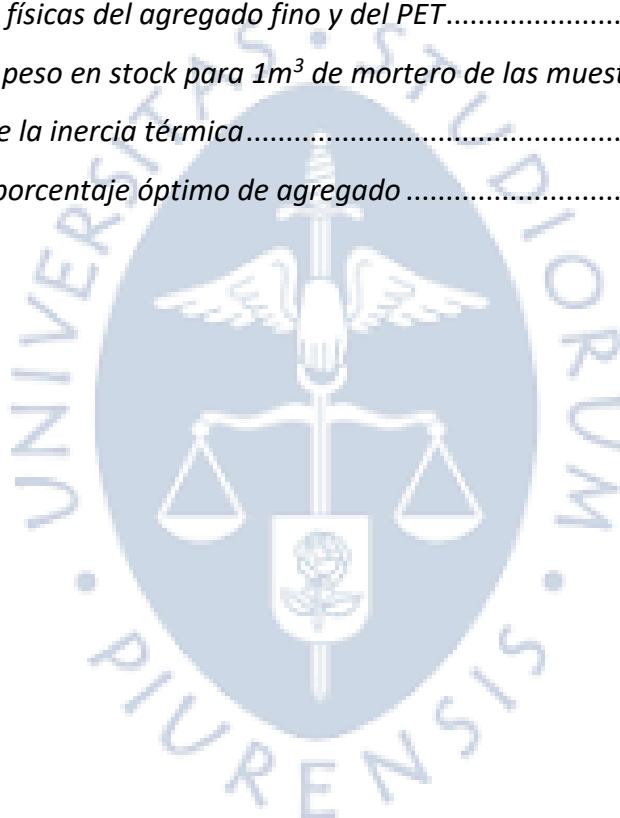
Introducción	11
Capítulo 1 Marco teórico	12
1.1 Sustentabilidad.....	12
1.2 Confort térmico en edificaciones.....	14
1.3 Inercia térmica	16
1.4 Propiedades térmicas del concreto	18
1.5 PET y sus propiedades térmicas.....	20
1.6 Investigaciones sobre PET en el concreto y mortero.....	20
Capítulo 2 Metodología	23
2.1 Plan experimental	23
2.2 Caracterización del PET	24
2.3 Agregado fino.....	25
2.4 Análisis granulométrico.....	26
2.5 Módulo de fineza	26
2.6 Peso unitario suelto	27
2.7 Peso unitario compactado	28
2.8 Ensayo de peso específico y porcentaje de absorción.....	28
2.9 Ensayo de contenido de humedad.....	29
2.10 Densidad del mortero	30
2.11 Resistencia a la compresión y flexión	31
2.12 Calor específico	33
Capítulo 3 Resultados	35
3.1 Caracterización del PET y los agregados	35
3.2 Diseño de mezcla del mortero con PET	36
3.3 Densidad del mortero con PET.....	37
3.4 Resistencia a la compresión del mortero de PET.....	38
3.5 Resistencia a la flexión del mortero de PET	39
3.6 Calor específico del mortero	40
3.7 Inercia térmica del mortero	41
Conclusiones.....	45

Referencias.....	46
Anexos	51
Anexo A1. Peso específico de los agregados.	52
Anexo A2. Análisis granulométrico.	52
Anexo A3. Materiales pesados listos para preparar el mortero	53
Anexo A4. Preparación de mortero con remplazo de agregado fino por PET.....	54
Anexo A5. Preparación de moldes para encofrado de muestras.	54
Anexo A6. Conformado de muestras. Nota: Elaboración propia.....	55
Anexo A7. Curado de muestras de mortero.	55
Anexo A8. Probetas desmoldadas y listas para ensayos.....	56
Anexo A9. Ensayo de resistencia a la compresión	56
Anexo A10. Ensayo de resistencia a la flexión.	57
Anexo A11. Ensayo de calor específico.	57
Anexo B1. Densidad aparente del mortero, de acuerdo a la norma ASTM C642-06. .	58
Anexo B2. Resistencia a la compresión, de acuerdo a la norma NTP 334.051.....	58
Anexo B3. Resistencia a la flexión, de acuerdo a la norma NTP 339.079.	58
Anexo B4. Calor específico, de acuerdo a la norma ASTM D2677-95.	58



Lista de tablas

Tabla 1 <i>Conductividad térmica, densidad y calor específico en algunos materiales</i>	17
Tabla 2 <i>VARIABLES A ANALIZAR EN EL MORTERO CON PET, TODOS A LA EDAD DE 28 DÍAS</i>	24
Tabla 3 <i>Información del PET triturado usado en la presente investigación, proporcionada por el proveedor</i>	25
Tabla 4 <i>Propiedades físicas del agregado fino y del PET</i>	36
Tabla 5 <i>Cantidad en peso en stock para 1m³ de mortero de las muestras evaluadas...</i>	37
Tabla 6 <i>Obtención de la inercia térmica</i>	42
Tabla 7 <i>Análisis del porcentaje óptimo de agregado</i>	43



Lista de figuras

Figura 1 <i>Diagrama de flujo</i>	23
Figura 2 <i>Ubicación de la cantera Chulucanas y localización respecto a Piura</i>	25
Figura 3 <i>Análisis granulométrico de los agregados</i>	26
Figura 4 <i>Peso unitario suelto de los agregados</i>	27
Figura 5 <i>Ensayo de densidad</i>	31
Figura 6 <i>Ensayo de resistencia a la compresión</i>	32
Figura 7 <i>Ensayo de resistencia a la flexión</i>	33
Figura 8 <i>Curva granulométrica del agregado fino y el PET</i>	35
Figura 9 <i>Comparativa de la densidad aparente promedio de mortero con PET</i>	38
Figura 10 <i>Comparativa del ensayo de resistencia a la compresión del mortero</i>	39
Figura 11 <i>Resistencia a la flexión del mortero</i>	40
Figura 12 <i>Calor específico del mortero con PET</i>	41
Figura 13 <i>Inercia térmica del mortero con PET</i>	42
Figura 14 <i>Análisis de los parámetros de Calor específico y Densidad aparente</i>	43

Introducción

La búsqueda de soluciones sostenibles en el ámbito de la construcción es fundamental en la era moderna, donde la preservación del medio ambiente y la eficiencia energética son imperativos, pero con un impacto ambiental muy elevado.

Las propiedades térmicas de los materiales son clave para la construcción sostenible y la adaptación a condiciones climáticas cambiantes, proporcionando confort térmico y ahorro energético (Avendaño et al., 2020). En el Perú, las zonas en la sierra han experimentado temporadas frías más intensas, alcanzando temperaturas de hasta 11°C (SENAMHI, 2023), lo que ha incrementado la mortalidad por enfermedades respiratorias, especialmente en departamentos como La Libertad, con una tasa de letalidad del 10% en 2024.

El mortero empleado en construcción, aunque resistente estructuralmente, no retiene ni libera calor eficientemente, pues posee un calor específico bajo (Ardia & Rodriguez, 2017), pero podría ser mejorado si se introdujera un material aislante, por ejemplo, reemplazando a los agregados. Esto es especialmente útil en climas cálidos, donde se busca minimizar la ganancia de calor en estructuras de concreto (Castro, 2023).

Se sabe que el PET tiene propiedades aislantes debido a su naturaleza polimérica, que reduce la transferencia de calor al tener un calor específico mayor que el concreto o el mortero de cemento (Guillen y Muciño, 2020). La literatura ha permitido verificar que es posible introducir PET en el mortero hasta un 5% o 10% para no reducir las propiedades mecánicas (Echeverría, 2018; Reyes, 2018; Cobos y Valle, 2021) y han sugerido que se puede explorar el impacto en las capacidades térmicas. En algunos trabajos que evalúan concreto con adiciones de fibras PET de apenas 1% en volumen, el concreto disminuye la conductividad térmica en 19% (Al-Hadithi, Almawla, & Mohammed, 2023) y con contenidos de 20 kg/m³ de tiras PET la conductividad térmica del concreto se reduce hasta en un 30%. Aunque estos resultados se refieren al PET como fibras y no como partículas, es posible imaginar que partículas de PET muy pequeñas y con superplastificante puedan lograr efectos similares.

Este trabajo evalúa el comportamiento térmico del mortero con PET de manera preliminar, buscando determinar la cantidad óptima de PET que mejore las propiedades térmicas sin comprometer la performance del mortero en aplicaciones no estructurales. Si los resultados son favorables se podrán desarrollar soluciones más eficaces para su uso en el mortero.

Capítulo 1

Marco teórico

1.1 Sustentabilidad

La sustentabilidad en el área de la construcción se refiere a la práctica de diseñar, construir y operar edificaciones de manera que se minimice su impacto negativo en el medio ambiente. Esto incluye la eficiencia en el uso de recursos naturales, la mejora de la calidad de vida de las comunidades, y la consideración de aspectos económicos y sociales (Plockova, 2024). El uso de materiales reciclados, como las partículas de PET en el mortero, juega un papel importante en este enfoque, ya que ayuda a reducir el consumo de recursos naturales y a disminuir los residuos generados.

1.1.1 Principios de la construcción sostenible

La construcción sostenible se fundamenta en el respeto hacia la naturaleza y su integración en los diseños arquitectónicos. Este enfoque valora los elementos naturales, como los espacios verdes, la luz y la ventilación natural, que no solo mejoran la calidad de vida de los ocupantes, sino que también fomentan una conexión más profunda con el entorno. Además, la sostenibilidad busca minimizar el impacto ambiental de las edificaciones sobre los ecosistemas circundantes, promoviendo una convivencia armoniosa entre las construcciones humanas y el medio ambiente (INCOBER, 2022).

Un principio clave de la construcción sostenible es la eficiencia en el uso de los recursos. Este concepto abarca la optimización de materiales, agua y energía durante todo el ciclo de vida de una edificación. En la práctica, se implementan tecnologías que reducen el consumo de recursos naturales, como sistemas de recolección de agua de lluvia, iluminación eficiente mediante LED y materiales de bajo impacto ambiental. La correcta gestión de estos recursos no solo disminuye el impacto ambiental, sino que también contribuye a una mayor eficiencia económica y energética (Ambientum, 2024).

Paralelamente, la adopción de tecnologías limpias resulta esencial para reducir las emisiones y el consumo de energía. Esto incluye la incorporación de fuentes de energía renovable, como paneles solares y turbinas eólicas, así como sistemas de calefacción y refrigeración eficientes. La automatización de estos sistemas permite optimizar el consumo energético, logrando una reducción en las emisiones de carbono y, al mismo tiempo, en los costos operativos a largo plazo. Estas tecnologías garantizan edificaciones más sostenibles y económicas a lo largo de su vida útil (Ambientum, 2024).

El reciclaje y la reutilización son pilares fundamentales para minimizar la demanda de nuevos recursos. En el ámbito de la construcción, esto se traduce en el uso de materiales reciclados, la reutilización de componentes de edificaciones existentes y el diseño de estructuras que faciliten su desmontaje y posterior reutilización. Además,

la gestión eficiente de los residuos durante la construcción y demolición es crucial para reducir la cantidad de desechos y su impacto ambiental (INCOBER, 2022).

Un aspecto relevante de la construcción sostenible es la autosuficiencia regional. Este principio aboga por el uso de materiales y recursos locales, lo que reduce la dependencia de importaciones y disminuye la huella de carbono asociada al transporte. Al emplear técnicas constructivas adaptadas a las condiciones climáticas locales, se aprovechan las características naturales del entorno, como la luz solar o la ventilación, mejorando la eficiencia energética de las edificaciones. Esta práctica no solo beneficia al medio ambiente, sino que también fortalece las economías locales y preserva las técnicas tradicionales de construcción (Ambientum, 2024).

La sostenibilidad no solo se enfoca en el medio ambiente, sino también en la equidad social. Por ello, el diseño de edificios y espacios urbanos debe garantizar la accesibilidad, seguridad y salubridad para todas las personas, sin importar su nivel socioeconómico. La construcción de entornos inclusivos fomenta la cohesión social y mejora la calidad de vida, ofreciendo igualdad de oportunidades para todos los sectores de la sociedad.

Finalmente, la construcción sostenible no solo busca minimizar el impacto negativo sobre el medio ambiente, sino también contribuir activamente a la restauración de los ecosistemas degradados. Esto se refleja en la rehabilitación de sitios contaminados, la reforestación de áreas urbanas y la creación de hábitats que promuevan la biodiversidad local. Estos esfuerzos no solo mejoran la calidad del aire y del agua, sino que también crean espacios más saludables para las comunidades y refuerzan el equilibrio natural (INCOBER, 2022).

1.1.2 Reciclaje de materiales en la construcción: El caso del PET

El reciclaje de materiales en la industria de la construcción ha ganado una importancia significativa en las últimas décadas, impulsado por la creciente preocupación por la sostenibilidad y el impacto ambiental. Entre los diversos materiales reciclables, el Tereftalato de Polietileno (PET) ha emergido como una opción prometedora, especialmente en la fabricación de morteros y otros componentes estructurales. Este plástico, ampliamente utilizado en envases y productos de consumo, presenta características que lo hacen particularmente atractivo para su reutilización en el sector de la construcción.

Según Echeverría (2018), el uso de plástico PET reciclado en la fabricación de ladrillos de mortero vibrado ha demostrado que, aunque la resistencia a compresión disminuye con el aumento del porcentaje de PET, alcanzando 110.46 kg/cm^2 con un 9% de PET frente a 161.96 kg/cm^2 en ladrillos sin PET, las propiedades mecánicas aún cumplen con la normativa técnica E.070. Esto resuena con estudios recientes que han

destacado el potencial del PET reciclado no solo para reducir el peso de las estructuras, sino también para mejorar el aislamiento térmico y acústico de los materiales de construcción. Esta capacidad de modificar las propiedades térmicas del mortero es crucial en el contexto de esta investigación, donde la mejora en la eficiencia energética de las edificaciones es un objetivo clave. Sin embargo, el desafío radica en encontrar un equilibrio entre la cantidad de PET incorporado y la conservación de las propiedades mecánicas esenciales del material, lo que requiere un procesamiento adecuado y estudios sobre las proporciones óptimas de PET para su uso en concreto (Echeverría, 2018).

Según Reyes Montoya (2018), la incorporación de PET reciclado en el diseño de mezcla de mortero ha mostrado beneficios considerables, aunque presenta una disminución en la resistencia a compresión a medida que se incrementa el porcentaje de fibras de PET. Por ejemplo, al añadir un 1.5% de PET reciclado en las losas, la resistencia disminuyó en promedio 3% en comparación con el diseño patrón. No obstante, el mortero con fibras de PET reciclado mantuvo su viabilidad estructural, destacándose la mejora en la flexión con un aumento del 5% respecto a los diseños tradicionales. Estos resultados se relacionan con la investigación sobre la influencia del PET en la inercia térmica del mortero, ya que el uso de PET no solo contribuye a la sostenibilidad ambiental, sino que también puede impactar positivamente en el comportamiento térmico de las estructuras en climas cálidos como el de Piura (Reyes, 2018).

Por otro lado, Cobos y Valle (2021) destacan en su estudio que el PET reciclado añadido al mortero mejora ciertas propiedades mecánicas como la resistencia a la flexión y la ductilidad, al tiempo que disminuye el impacto ambiental al reutilizar plásticos desechados. Esta línea de investigación apoya el uso del PET como un componente clave para mejorar la eficiencia energética de los materiales de construcción (Cobos & Valle, 2021).

Mirando hacia el futuro, el campo de investigación sobre el uso de PET reciclado en morteros y otros materiales de construcción sigue en expansión. La investigación continúa explorando nuevas aplicaciones y mejorando las técnicas de procesamiento e integración del PET en diferentes mezclas. Existe un creciente interés en desarrollar morteros "verdes" que no solo incorporen materiales reciclados, sino que también mejoren el rendimiento general de las estructuras en términos de sostenibilidad y eficiencia energética.

1.2 Confort térmico en edificaciones

El confort térmico se refiere a la sensación subjetiva de estar a gusto o satisfecho con la temperatura del entorno; cuando las personas no sienten ni calor ni frío, se considera que experimentan confort térmico o una sensación neutral. Esto ocurre

cuando las condiciones de temperatura, humedad y circulación del aire son favorables para las actividades que se realizan. Por otro lado, el malestar térmico, estudiado principalmente en trabajos sedentarios, puede presentarse incluso cuando se cumplen las normativas de seguridad y salud laboral. Se trata de situaciones en las que los trabajadores perciben el ambiente como demasiado cálido o frío, y su análisis debe llevarse a cabo en el ámbito de la ergonomía preventiva. Es importante tener en cuenta que trabajar en condiciones de frío o calor puede reducir el rendimiento laboral, provocar falta de concentración y aumentar la probabilidad de cometer errores. Existe una relación entre ciertos tipos de accidentes y el ambiente térmico, por lo que en entornos poco confortables se incrementa el riesgo de sufrir accidentes (Chumbiray, 2021).

En el ámbito residencial, el confort térmico juega un papel crucial en el bienestar y la salud de las familias. La falta de un ambiente térmicamente confortable en las viviendas puede tener impactos significativos en todos los miembros del hogar, pero especialmente en los más vulnerables como niños y ancianos. Además, las fluctuaciones extremas de temperatura en la vivienda pueden exacerbar condiciones de salud preexistentes, como enfermedades respiratorias y cardiovasculares. En el caso de los ancianos, el disconfort térmico puede aumentar el riesgo de problemas de salud graves, como la hipotermia en invierno o el golpe de calor en verano (González, 2023).

Para mantener el confort térmico dentro de las edificaciones, se establecen unos estándares, que dependen del tipo de clima donde se encuentre la estructura:

Clima cálido y húmedo: Se deben utilizar materiales ligeros, de poca capacidad térmica, con techo aislante, para una máxima utilización de los vientos que contrarrestan las altas temperaturas.

Clima cálido y seco o frío y seco: Se deben utilizar materiales que brindan un máximo aislamiento, ya que absorben calor.

Clima templado: Se deben utilizar materiales que generan gran aislamiento pero que no impidan la ventilación, para liberar humedad ambiental interna, a la vez que aísla el interior del exterior.

Clima frío: En climas con una gran diferencia de temperatura entre el día y la noche, se deben utilizar materiales combinados, con paredes de gran capacidad térmica en las áreas de uso diurno que refresquen el ambiente y materiales ligeros en las áreas de uso nocturno que generen calor.

En el contexto de Piura, el clima es predominantemente cálido y árido, con temperaturas que pueden superar los 35°C durante gran parte del año. Esto genera la necesidad de utilizar materiales de construcción que ayuden a mitigar las altas temperaturas y contribuyan al confort térmico en las edificaciones. En este sentido, es

esencial contar con materiales que posean una alta inercia térmica, permitiendo la reducción de las variaciones de temperatura al interior de las edificaciones. La incorporación de PET reticulado en el mortero podría influir en la capacidad del material para absorber y liberar calor de manera más eficiente, mejorando el confort térmico y la habitabilidad en este entorno extremo (AccuWeather, 2024).

1.3 Inercia térmica

La inercia térmica en la arquitectura bioclimática es un concepto que busca la regulación natural de las condiciones ambientales, reduciendo la dependencia de sistemas mecánicos, es crucial para la eficiencia energética de los edificios. Los materiales con alta inercia térmica, como piedra, hormigón y cerámica, requieren más energía para cambiar su temperatura, pero mantienen una temperatura constante por más tiempo. En contraste, los materiales de baja inercia térmica, como el vidrio y el metal, se calientan y enfrían rápidamente, pero, aunque requieren menos energía para calentarse, son menos eficientes en mantener una temperatura estable en interiores a lo largo del tiempo (Rincon, 2023), a mayor temperatura en cada uno de ellos, mayor inercia térmica, es decir, mayor calor acumulado por unidad de superficie (Serrano, 2022).

En climas fríos, la inercia térmica se puede utilizar para ayudar a mantener las viviendas cálidas durante el invierno. Los materiales de alta inercia térmica como por ejemplo los suelos de piedra o cerámica pueden absorber el calor durante el día de las chimeneas o calderas y liberarlo por la noche, ayudando a mantener la vivienda cálida. En climas cálidos, la inercia térmica puede utilizarse para ayudar a mantener las viviendas frescas durante el verano, reduciendo así la necesidad de utilizar sistemas de refrigeración activos (Alaloul, John, & Musarat, 2020).

La inercia térmica se expresa mediante la densidad y el calor específico de un material. Cuanto mayor sea cada uno de estos factores, mayor será la capacidad del material para acumular calor por unidad de superficie. Se mide en $\text{Kcal/m}^3\text{C}$ o $\text{J/m}^3\text{C}$, resultado de multiplicar el calor específico y la densidad del material (Serrano, 2022). En la tabla 1 se muestran algunos valores característicos de materiales usados en construcción como la conductividad térmica (λ), junto con valores de densidad (ρ) y calor específico (C_p).

Tabla 1*Conductividad térmica, densidad y calor específico en algunos materiales*

Material	λ	ρ	C_p
	W/mK	kg/m ³	J/kgK
Poliuretano	0.026	30	1400
Aire	0.026	1.223	1063
Poliestireno	0.035	50	1675
Espuma fenólica	0.038	30	1400
Lana de vidrio	0.041	200	656
Corcho comprimido	0.085	540	2000
Mortero de cemento	0.090	1920	669
Madera de construcción	0.130	630	1360
Madera de pino	0.148	640	2512
Madera pesada	0.200	700	1250
Concreto celular	0.220	600	880
Tierra con paja	0.300	400	900
Yeso	0.488	1440	837
Mortero cemento / arena	0.530	1570	1000
Agua	0.582	1000	4187
Ladrillos de arcilla	0.814	1800	921
Tierra muro portante	0.850	2000	900
Vidrio plano	1.160	2490	830
Arcilla	1.279	1460	879
Piedra arenisca	1.300	2000	712
Concreto pesado	1.750	2300	920
Piedra	1.861	2250	712
Mármol	2.900	2590	800
Granito	3.500	2500	754
Acero	50	7800	512
Aluminio	160	2800	896
Cobre	399	8900	385

Nota: Tomado de Guillen y Muciño. (2020).

Se aprecia que la tendencia es ascendente respecto a los valores de conductividad térmica en los materiales, siendo el acero, aluminio y cobre los que poseen una mayor conductividad térmica por encima de los 20 W/mK°, denominándose como materiales conductores, mientras que el mortero de cemento que es el objeto de estudio de esta investigación posee un valor inferior a la unidad y con un calor específico relativamente alto que supera a materiales como el acero, madera, arcilla, piedra y otros de menor capacidad calorífica; sin embargo, su baja densidad respecto a esos metales

lo convierte en un material aislante. Por otro lado, los materiales poliméricos como el poliestireno y el poliuretano son claramente aislantes porque necesitan más energía para elevar su temperatura en comparación con el mortero, a lo que se suma su bajo peso que le permite tener una inercia térmica menor al mortero convencional.

1.4 Propiedades térmicas del concreto

El concreto se considera relativamente mal conductor del calor en comparación con otros materiales como el acero o el aluminio. Esta baja conductividad térmica lo convierte en un aislante térmico natural, lo que significa que puede ayudar a mantener las temperaturas estables en estructuras y a reducir la pérdida de calor o frío, lo que puede resultar en ahorros significativos de energía. La capacidad calorífica o calor específico que llega a ser aceptable para sus características terminas es $669 \text{ J/Kg } ^\circ\text{C}$, aunque para el cemento Portland puede variar en el rango de $840\text{-}1100 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ (Ruiz, 2022). Estas propiedades hacen que el concreto sea una opción popular en la construcción sostenible y en el diseño de edificios con alto rendimiento energético. Además, el uso de concreto en la construcción puede reducir la dependencia de materiales más contaminantes y promover prácticas constructivas más respetuosas con el medio ambiente (Barnard, Rubio, & Thielemans, 2021).

Sin embargo, es esencial tener en cuenta que las propiedades térmicas del concreto pueden variar según su composición, contenido de humedad y densidad, entre otros factores. Esto significa que el tipo de concreto utilizado en un proyecto específico puede afectar su capacidad de mantener la temperatura adecuada en un edificio o estructura, lo que requiere una consideración cuidadosa al seleccionar el material en aplicaciones sensibles al clima o a la temperatura ambiente (Llerena & Sallica, 2022).

1.4.1 Según su composición

Según Llerena & Sallica (2022), las propiedades térmicas del concreto pueden variar según su composición, especialmente en términos de los materiales agregados y aditivos utilizados en su fabricación. Algunas de las propiedades térmicas que se ven influenciadas por la composición del concreto incluyen:

El tipo y la cantidad de agregados utilizados en el concreto pueden afectar su conductividad térmica. Por ejemplo, el uso de agregados ligeros como la perlita o la vermiculita puede reducir la conductividad térmica del concreto, haciéndolo más eficiente como aislante térmico.

Por otro lado, la inclusión de materiales como escorias de alto horno o cenizas volantes en el concreto puede aumentar su capacidad térmica específica, lo que le permite absorber y liberar calor de manera más efectiva.

1.4.2 Según su contenido de humedad

El contenido de humedad en el concreto puede influir en varias de sus propiedades térmicas. Cuando el concreto está seco, tiene una conductividad térmica más baja y una capacidad de almacenamiento de calor menor en comparación con el concreto saturado, debido a que el aire atrapado en los poros del concreto actúa como un aislante térmico. Sin embargo, el concreto saturado puede tener una mayor capacidad para absorber y liberar calor debido al agua presente en su estructura, lo que puede ayudar a moderar las fluctuaciones de temperatura en un edificio (Llerena & Sallica, 2022). Además, el contenido de humedad también puede afectar la resistencia al fuego del concreto, ya que el agua presente en su interior puede evaporarse y ayudar a enfriar la estructura durante un incendio. Por ello, el contenido de humedad en el concreto que puede influir en las propiedades térmicas se considera de varias maneras:

- **Capacidad térmica:** El concreto húmedo tiene una capacidad térmica más alta que el concreto seco, lo que significa que puede almacenar más calor. Esto se debe a que el agua tiene una capacidad calorífica mayor que la del concreto en sí.
- **Conductividad térmica:** El contenido de humedad también puede afectar la conductividad térmica del concreto. El concreto húmedo tiene una conductividad térmica ligeramente mayor que el concreto seco, ya que el agua es un mejor conductor de calor que el concreto.
- **Aislamiento térmico:** El concreto seco puede proporcionar un mejor aislamiento térmico que el concreto húmedo, esto se debe a que el agua es un conductor de calor, por lo que la presencia de humedad en el concreto puede facilitar la transferencia de calor a través del material.

1.4.3 Según su densidad

El concreto de baja densidad tiende a tener una conductividad térmica más baja, lo que significa que es mejor aislante térmico que el concreto de alta densidad. Esto se debe a que en el concreto de baja densidad hay más aire atrapado entre las partículas, lo que reduce la transferencia de calor a través del material. Por otro lado, el concreto de alta densidad tiene una conductividad térmica más alta, lo que significa que transfiere el calor más rápidamente, aunque también puede tener una mayor capacidad térmica, lo que significa que puede almacenar más calor (Guillén & Muciño, 2020).

1.5 PET y sus propiedades térmicas

El Tereftalato de Polietileno (PET) es un material derivado del plástico convencional, que es producido a partir del petróleo crudo, gas y aire. El PET es un material 100% reciclable, lo que permite que sea reutilizado no solo para la fabricación de empaques en la industria alimentaria sino también en la industria de la construcción, como para la fabricación de tubería en PVC (Esfandabad et al., 2020).

El PET exhibe una excelente resistencia a la humedad. Esto significa que es altamente impermeable al agua, por lo que es ampliamente utilizado en la fabricación de envases para líquidos, tales como botellas de agua y refrescos (Kim, Wang, & Galloway, 2022). El PET también, es conocido por su resistencia a la tracción, lo que significa que puede soportar fuerzas de tensión significativas antes de romperse. También exhibe una buena resistencia al impacto (Kangavar et al., 2022).

En cuanto a sus propiedades térmicas, el polietileno tereftalato (PET) tiene resistencia al calor moderada, de modo que puede resistir temperaturas elevadas sin derretirse o degradarse significativamente. Su punto de fusión típico está en el rango de 250 a 260 °C, lo que lo hace apto para su procesamiento mediante técnicas de moldeo por extrusión o inyección (Esfandabad et al., 2020), también puede someterse a ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento sin sufrir degradación significativa. Además, retiene sus propiedades físicas y químicas incluso después de múltiples ciclos de esterilización (Eriksen, Christiansen, Daugaard, & Astrup, 2019).

1.6 Investigaciones sobre PET en el concreto y mortero

La principal fuente de PET como residuo reciclado son las botellas de agua. Suele ser transparente y relativamente muy delgado, aunque en la actualidad se puede encontrar con configuraciones físicas muy diversas. Dado que el espesor de las botellas es muy delgado, la partícula resultante de la trituración tendrá forma de hojuelas, especialmente si el tamaño se establece por encima de 1 mm. En general, entre 1 mm y 4 mm se pueden considerar partículas pequeñas y de 5 mm hasta 12.5 mm, partículas grandes.

Los estudios que evalúan la incorporación del PET como partículas en el concreto reportan efectos negativos en las propiedades mecánicas y en la trabajabilidad. Por ejemplo, Albano et al. (2009), encontraron que las mezclas de concreto con PET muestran una disminución en la resistencia a la compresión, a la tracción y en el módulo de elasticidad en niveles de 0%, 10% y 20%, respectivamente. Alves et al. (2011) y Saikia & Brito (2014) encontraron que una adición de hasta 7.5% de PET reduce la resistencia a la compresión hasta en un 15%, pero con incrementos significativos de ductilidad.

Respecto a la resistencia del mortero, Frigione (2010) determinó valores de resistencia a la compresión y a la tracción que están entre un 0,4% y un 1,9 % de inferioridad a las de los concretos de referencia al reemplazar un 5% en peso de arena sílicea por trozos de agregado liviano de PET. Al parecer, las partículas gruesas o finas, pero laminares y angulosas incorporadas al concreto hacen que las mezclas sean menos trabajables y exigen un aumento en la relación agua/cemento, disminuyendo la resistencia a la compresión, mientras que las partículas de PET con formas volumétricas favorecen la trabajabilidad de las mezclas y disminuyen su efecto negativo en la resistencia mecánica (Ferreira, y otros, 2012)

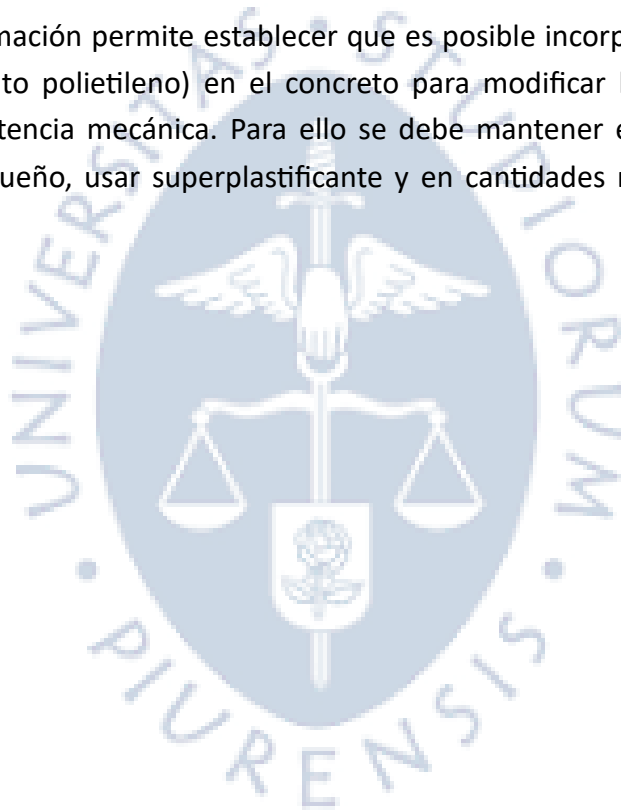
Si bien esta disminución de la resistencia mecánica se puede atribuir a la forma laminar del PET, el uso de aditivos superplastificantes hace posible mejorar la resistencia mecánica del concreto. Alves et al. (2011) observó que al emplear partículas de mayor volumen y un aditivo súper plastificante para mantener la trabajabilidad, se logró mejorar la resistencia mecánica del concreto, sin importar el tamaño de las partículas usadas. Dagliya et al. (2023) encontraron que el tereftalato de polietileno (PET) como reemplazo parcial de la arena en concreto y mortero de cemento, en niveles de sustitución del 3 y 5% con superplastificante, no disminuyen la resistencia a la compresión respecto a la muestra de control sin PET.

Por otro lado, el efecto negativo de las partículas de PET en el concreto disminuye si se usan tamaños de partículas más pequeñas (Saikia & Brito, 2014). Por ejemplo, cuando el PET se usó como polvo (menos de 1mm) los niveles de reemplazo pudieron ser mayores, alcanzando una sustitución de hasta 30% con el PET, sin disminución significativa de la trabajabilidad (Xiong, y otros, 2023). Estos resultados indican que el tamaño de la partícula condiciona, a su vez, los niveles de reemplazo en el concreto, por lo que para lograr mayores reemplazos se tendría que reducir el tamaño de la partícula y usar superplastificante.

A pesar de la disminución en las propiedades mecánicas un beneficio significativo reportado en la literatura es el incremento en la energía a la fractura o en la ductilidad (Xiong, y otros, 2023). Por ejemplo, Albano et al. (2009) encontró que con contenidos de PET del 10% se logra un incremento significativo de la ductilidad a pesar de la disminución de la resistencia a la compresión. Similar resultado obtuvo Frigione (2010) al reemplazar un 5% en peso de arena agregado de PET, obteniendo una ductilidad ligeramente superior a la muestra de control. Similares resultados obtuvieron Alves et al. (2011) y Saikia & Brito (2014) alcanzando incrementos significativos de ductilidad con contenidos de PET de hasta 7.5%. Esta mayor ductilidad puede ser de gran valor en aplicaciones donde el material puede requerir capacidad de deformación y en el caso de los morteros para tarrajeos, esta capacidad podría ser de gran relevancia.

En cuanto a las propiedades térmicas, la literatura relacionada es muy limitada y sólo se ha hecho con el PET en forma de fibras. Sin embargo, los resultados parecen prometedores. Con adiciones de fibras PET de apenas 1% en volumen se obtiene una disminución del 19% de la conductividad térmica del concreto (Al-Hadithi, Almawla, & Mohammed, 2023) y con contenidos de 20 kg/m³ de tiras PET la conductividad térmica del concreto se reduce hasta en un 30%. Aunque estos resultados se lograron usando el PET como fibras y no como partículas, evidencian una posibilidad elevada de conseguir un efecto positivo en las propiedades térmicas, siempre que el efecto en las propiedades mecánicas se controle usando tamaños de PET muy pequeños y se opte por usar superplastificantes para mantener la trabajabilidad.

Esta información permite establecer que es posible incorporar de las partículas del PET (tereftalato polietileno) en el concreto para modificar la inercia térmica sin disminuir la resistencia mecánica. Para ello se debe mantener el PET particulado en tamaño muy pequeño, usar superplastificante y en cantidades menores del 40% del agregado.



Capítulo 2 Metodología

2.1 Plan experimental

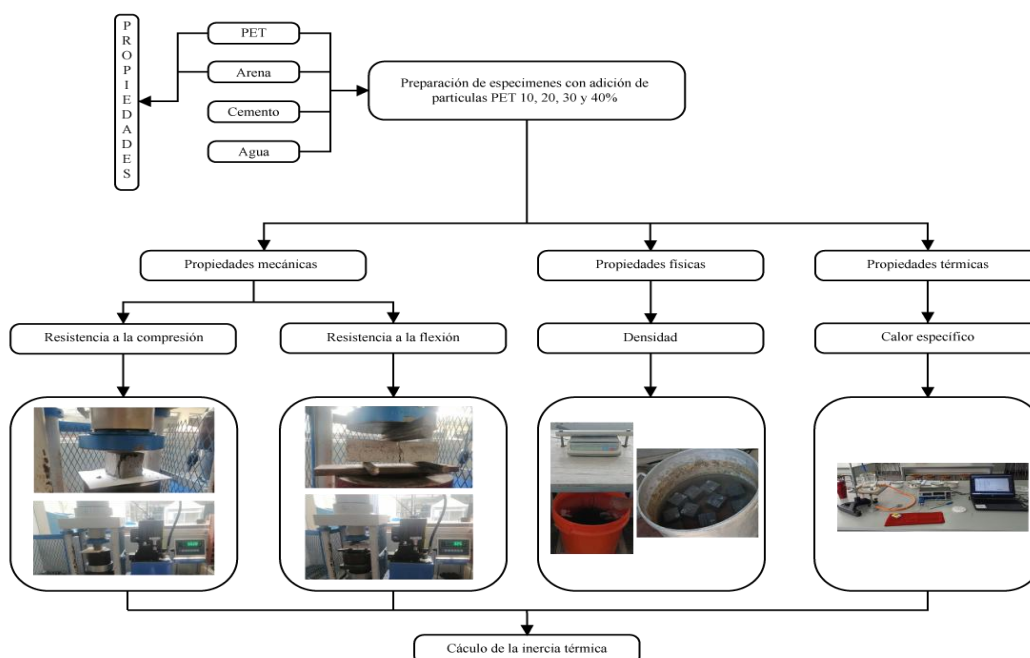
La presente investigación es de tipo experimental con un enfoque cuantitativo, con un alcance preliminar y exploratorio. Siendo el objetivo del trabajo determinar el efecto del PET en las propiedades mecánicas y térmicas del mortero de recubrimiento, el trabajo se enfocará en establecer esta variación comparando las adiciones del PET con un mortero patrón sin PET. Para ello, se usará un PET triturado que se comercializa en Lima que tiene tamaños de partículas en el rango de 2 y 4 mm.

La investigación comienza con la obtención del PET triturado, distribuido por una empresa local. Se hará la caracterización del PET y agregados, midiendo la forma a través de imágenes, además de la densidad, y la absorción al agua. Como se muestra en el anexo A3.

Para el diseño del mortero con PET se hará un reemplazo del agregado desde el 10%, 20%, 30% y 40 % en volumen, como se muestra en el anexo A4, que son los porcentajes sugeridos por la literatura (Albano et al. 2009). Se evaluará la densidad, la resistencia a la compresión y flexión, así como el calor específico. En la figura 1 se esquematiza el proceso experimental.

Figura 1

Diagrama de flujo



En la tabla 2 se detallan las variables a analizar en el mortero con PET. De acuerdo con este detalle, para las pruebas mecánicas se fabricaron 3 elementos para cada muestra, ensayadas a los 28 días, haciendo un total de 15 cubos de 5 x 5 x 5 cm para los ensayos de resistencia a la compresión y 15 vigas de 4 x 4 x 16 cm para ensayos de resistencia a la flexión. Para medir las propiedades térmicas, se realizaron 50 dados de 1 x 1 x 1 cm para medir el calor específico (Cp) y para calcular la densidad, como parte de los ensayos de propiedades físicas del mortero, se usaron cubos de 5 x 5 x 5 cm. Como se observan en los anexos A5 y A6.

Tabla 2

Variables a analizar en el mortero con PET, todos a la edad de 28 días

MUESTRA	ENSAYO DE PROPIEDADES FÍSICAS	ENSAYOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS		ENSAYOS DE PROPIEDADES TÉRMICAS
	Densidad	Compresión	Flexión	Calor Específico
Patrón 0%	3	3	3	10
10%	3	3	3	10
20%	3	3	3	10
30%	3	3	3	10
40%	3	3	3	10
TOTAL	15	15	15	50

2.2 Caracterización del PET

El PET usado corresponde con un residuo triturado que se comercializa en el entorno local, procedente de la empresa “MC Plásticos Reciclados”. El PET es mayormente poliéster y corresponde con el tipo “JADE - CZ-328”, el cual es usado para la fabricación de botellas de bebidas carbonatadas y botellas grandes de 3 a 5 gal. En la tabla 3 se muestran las respectivas características del material seleccionado.

Tabla 3

Información del PET triturado usado en la presente investigación, proporcionada por el proveedor

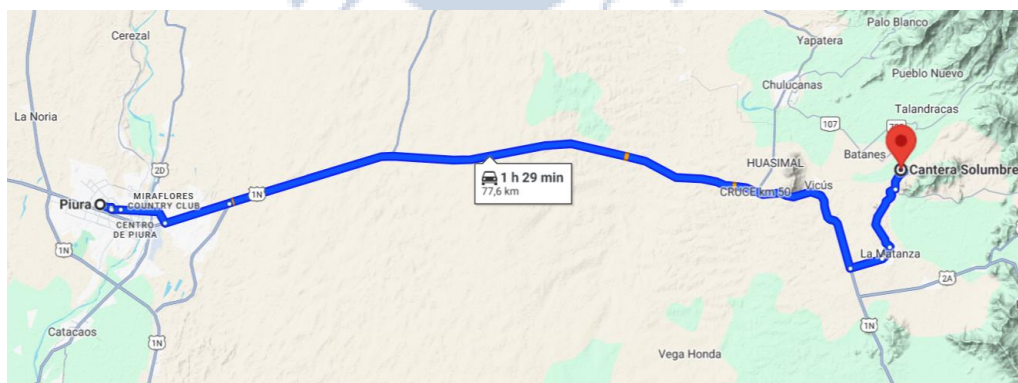
Ítem	Unidades	Índice
I.V.	dL/g	0.85 ± 0.02
Cristalidad	%	≤ 60
Coloración	L	≥ 82
	b	≤ 1.0
Contenido de COOH	mol/t	≤ 25
Contenido de acetaldehído	ppm	≤ 1.0
Contenido de arena	ppm	≤ 100
Punto de fusión	$^{\circ}\text{C}$	243 ± 2
Peso por 100 fichas	g	1.55 ± 0.10

2.3 Agregado fino

Para el agregado fino se realizaron diferentes ensayos con la finalidad de obtener el módulo de fineza, el peso unitario suelto, el peso unitario compactado, el peso específico, el contenido de humedad y, por último, el porcentaje de absorción. En la figura 2 se presenta la locación geográfica de la cantera Chulucanas, de donde se extrajo el agregado para el presente estudio. El material extraído de esta cantera proviene de una formación geológica sedimentaria, caracterizada por una alta presencia de cuarzo y feldespatos, lo que lo aproxima a materiales con propiedades térmicas similares a los que se detallan en la Tabla 1, especialmente en términos de conductividad térmica y calor específico, que suelen estar asociados a arenas de origen silíceo.

Figura 2

Ubicación de la cantera Chulucanas y localización respecto a Piura



Nota: Toma de Google Maps Google Maps. (2024).

2.4 Análisis granulométrico

El ensayo de granulometría es un procedimiento utilizado para determinar la distribución de tamaños de partículas en un suelo o agregado, consiste en separar y clasificar las partículas según su tamaño, utilizando tamices de malla con diferentes aberturas (NTP-400.012, 2018).

Se utilizó la NTP 400.012, iniciando con el lavado de la muestra con la finalidad de retirar los limos y arcillas. Seguidamente, la muestra se llevó al horno por 24 horas obteniendo la muestra seca. Luego de enfriar, se procedió a pesar la muestra, como se muestra en el anexo A1, se depositó en el juego de tamices, que estaban ordenadas de mayor a menor y un tamiz más de fondo para que no perder el material, como se ve en el anexo A2. Luego de ello, se procedió a colocar el juego de tamices en una superficie plana y se comenzó a mover hasta llegar a un movimiento constante, pasado los 3 minutos, se procedió a pesar el contenido de cada tamiz e incluido el fondo.

Figura 3

Análisis granulométrico de los agregados



2.5 Módulo de fineza

Medida utilizada para evaluar la distribución de tamaño de partículas en un agregado, se calcula dividiendo la suma de los porcentajes acumulativos retenidos en cada tamiz estándar por 100. Un módulo de fineza alto indica una mayor proporción de partículas finas, mientras que uno bajo sugiere un contenido mayor de partículas gruesas (NTP-400.012, 2018).

2.6 Peso unitario suelto

También conocido como peso volumétrico, se refiere al peso de un material por unidad de volumen en condiciones específicas de compactación y humedad, este ensayo sirve para determinar la densidad de un material, como suelo o agregados, en dos estados: suelto y compactado. El ensayo se realiza para evaluar cómo la compactación y la humedad afectan el peso de un material (NTP-400.017, 2011).

Tomando en cuenta que el recipiente cilíndrico estuvo calibrado, la muestra se colocó en un recipiente para proceder con el cuartero, de modo que se obtuvo una muestra uniforme. Luego se procedió a agregar la arena gruesa con ayuda del cucharón de metal, en forma helicoidal a una altura no mayor de 5 cm de la superficie del recipiente hasta llenarlo completamente. Luego, con la ayuda de la varilla de acero de $\varnothing 5/8''$ se procedió a quitar el exceso de la arena para que quede a nivel del recipiente. Por último, se tomó nota del peso del recipiente cilíndrico con la muestra.

Figura 4

Peso unitario suelto de los agregados



El peso unitario se calcula aplicando la ecuación 1:

$$P.U.S = \frac{W_m}{V_r} \quad (1)$$

En donde el P.U.S es el peso unitario suelto en kg/m^3 , W_m es el peso de la muestra en kg, que se obtiene restando el peso del recipiente con la muestra y el peso del recipiente vacío, V_r es el volumen del recipiente en m^3 .

2.7 Peso unitario compactado

El peso unitario compactado (P.U.C) se refiere al peso de una unidad de volumen de material a granel en condiciones específicas de compactación y humedad. Este ensayo se realiza para evaluar la capacidad de un material para compactarse y obtener una densidad específica requerida para una aplicación (NTP-400.017, 2011).

Tomando en cuenta que el recipiente cilíndrico estuvo calibrado, la muestra se colocó en un recipiente para proceder con el cuarteo, de modo que se obtuvo una muestra uniforme, seguido se procedió a agregar con ayuda del cucharón de metal, la arena gruesa hasta 1/3 de la capacidad del recipiente; luego, con la ayuda de la varilla de acero de $\varnothing 5/8''$ se procedió a apisonar 25 veces en forma helicoidal; luego, se agregó material hasta los 2/3 de capacidad del recipiente, seguido de 25 golpes; por último, se llenó en su totalidad la capacidad del recipiente seguido del apisonado con 25 golpes, teniendo así la muestra compactada, terminando con el ensayo con la toma del peso del recipiente cilíndrico con la muestra.

El peso unitario se calcula aplicando la ecuación 2:

$$P.U.C = \frac{W_m}{V_r} \quad (2)$$

En donde el P.U.C es el peso unitario compactado en kg/m^3 , W_m es el peso de la muestra en kg, que se obtiene restando el peso del recipiente con la muestra y el peso del recipiente vacío, V_r es el volumen del recipiente en m^3 .

2.8 Ensayo de peso específico y porcentaje de absorción

El ensayo de peso específico y porcentaje de absorción según la norma ASTM C642-06 es un método estandarizado que se utiliza para determinar las propiedades físicas de los agregados de mortero, como su densidad y su capacidad de absorber agua. Este ensayo es crucial para entender la calidad y la idoneidad de los materiales usados en la fabricación de mortero y otras mezclas de construcción.

El peso específico se refiere a la relación entre el peso de un volumen dado de material y el peso de un volumen igual de agua. En el contexto de esta norma, se determina tanto en condiciones secas como saturadas. Esto permite evaluar cómo la porosidad del material afecta su densidad y, por lo tanto, su comportamiento en mezclas de mortero.

El porcentaje de absorción indica la cantidad de agua que un material poroso puede absorber cuando está completamente seco y luego se sumerge en agua hasta que alcanza un estado de saturación. Se expresa como un porcentaje del peso seco del material. Este dato es esencial para ajustar la cantidad de agua en la mezcla de concreto

y para prever el comportamiento del concreto en condiciones de humedad (ASTM C642-06, 2019)

Comienza con la preparación de la muestra, que incluye su limpieza y secado en un horno hasta alcanzar un peso constante para eliminar toda humedad. Posteriormente, se pesa la muestra seca en una balanza. El siguiente paso es la saturación de la muestra, sumergiéndola en agua durante 24 horas para que se llene completamente de agua. Después de la saturación, se limpia la superficie de la muestra con un paño húmedo para eliminar el exceso de agua y se pesa en estado saturado. Luego, se realiza un pesaje bajo agua para determinar el peso sumergido.

A partir de estos datos, se calcula el peso específico como en la ecuación 3 y ecuación 4, que es el peso seco dividido por el volumen desplazado (determinado a partir de la diferencia entre el peso saturado y el peso sumergido). El porcentaje de absorción se calcula como la diferencia entre el peso saturado y el peso seco, dividido por el peso seco y multiplicado por 100. Este proceso permite determinar de manera precisa la densidad y la capacidad de absorción del material.

$$Pe = \frac{W_o}{V - V_a} \quad (3)$$

En donde Pe es el peso específico en g/m³, Wo es el peso de la muestra seca al horno en gramos, V es el volumen total de la muestra en m³ y Va es el volumen del agua añadida en m³.

$$Abs = \frac{500 - W_o}{W_o} \times 100 \quad (4)$$

En donde Abs es el grado de Absorción en %, Wo es el peso de la muestra seca al horno en gramos.

2.9 Ensayo de contenido de humedad

Este ensayo se utiliza para calcular la cantidad de agua presente en el agregado (ver ecuación 5). El ensayo usa una muestra mínima de 1000 gr. Se inicia colocando el peso del recipiente, luego se procedió a pesar el recipiente más la muestra, luego, se colocó el recipiente con la muestra en el horno a 110°C por 24 horas. Por último, una vez retirado del horno, se dejó enfriar para luego volver a tomar el peso del recipiente más la muestra seca.

$$H = \frac{W_{mh} - W_{ms}}{W_{ms}} \times 100 \quad (5)$$

En donde H es el contenido de humedad en %, Wmh es el peso inicial de la muestra y Wms es el peso de la muestra seca.

2.10 Densidad del mortero

La masa de una unidad de volumen de mortero, expresada comúnmente en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), representa cuánta masa está contenida en una determinada cantidad de volumen del material. En este caso cada pieza a ensayar tiene un volumen no menor de 64 cm^3 . Para este ensayo se midió el peso seco, el peso saturado después de la inmersión, ver anexo A7, el peso saturado después del hervido y el peso aparente sumergido (NTP-339.187, 2002).

El bloque se seca durante 24 horas y se verifica su sequedad mediante pesadas precisas, luego de secarse al horno, se sumerge en agua a 21°C por menos de 48 horas, tras cada inmersión, se seca y pesa cada 24 horas hasta que las diferencias en las masas sean insignificantes. Este proceso registra la masa tras saturación por inmersión. Después, se coloca en un recipiente con agua y se hierve, luego se enfría, se seca y se pesa nuevamente. Se suspende en agua para calcular su masa aparente y, con estos datos, se calcula la absorción, densidad aparente y volumen de poros permeables, la densidad, la absorción y el porcentaje de vacíos. Para ello, se usaron las ecuaciones 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13:

$$\%_{\text{absorción luego de inmersión}} = \frac{B - A}{A} \times 100 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \%_{\text{absorción luego de inmersión y hervido}} \\ = \frac{C - A}{A} \times 100 \end{aligned} \quad (7)$$

$$g_1 = \left[\frac{A}{C - D} \right] \rho \quad (8)$$

$$g_{1 \text{ despues de la imersión}} = \left[\frac{B}{C - D} \right] \rho \quad (9)$$

$$g_{1 \text{ despues de la imersión y hervido}} = \left[\frac{C}{C - D} \right] \rho \quad (10)$$

$$g_2 = \left[\frac{A}{A - D} \right] \rho \quad (11)$$

$$\% = \frac{g_2 - g_1}{g_2} \times 100 \quad (12)$$

$$= \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (13)$$

Donde A es la masa de la muestra seca en gramos; B es la masa saturada superficialmente seca después de la inmersión medida en gramos; C es la masa de la muestra saturada superficialmente seca después de la inmersión y hervido, medida en gramos; D es la masa aparente de la muestra en agua después de la inmersión y hervido medida en gramos, g_1 es la densidad seca en Mg/m^3 , g_2 es la densidad aparente en Mg/m^3 y ρ es la densidad del agua en Mg/m^3 . Los resultados se observan en el anexo B1.

Figura 5

Ensayo de densidad



2.11 Resistencia a la compresión y flexión

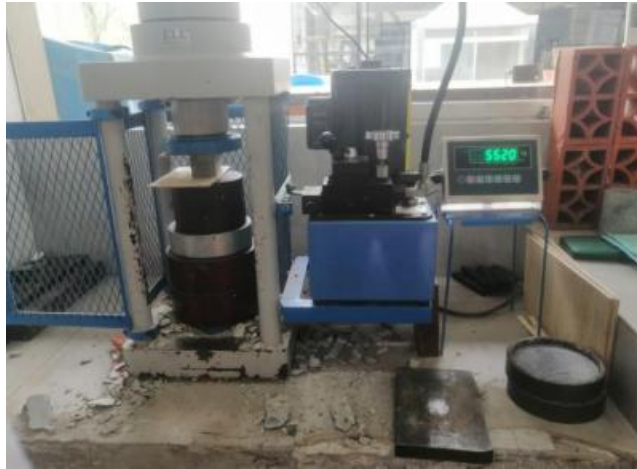
Las propiedades mecánicas se evaluaron midiendo la resistencia a la compresión y a la flexión. Para la resistencia a la compresión se utilizaron cubos de 5 x 5 x 5 cm siguiendo la norma NTP 334.051. Para la resistencia a la flexión se utilizaron vigas de 4 x 4 x 16 cm y el ensayo se hizo según la NTP 334.057. Los especímenes se evaluaron a los 28 días, con 3 testigos por muestra, como se observar en el anexo A8.

2.11.1 Resistencia a la compresión

Los especímenes son sometidos a ensayo inmediatamente después de ser retirados de la poza de curado, según lo establecido en la NTP 334.051 (1998). Después de verificar la planicidad de las caras utilizando una regla recta, el espécimen se coloca en la máquina de ensayo, ver figura 6, y se procede con el ensayo, ver anexo A9. Los resultados de los ensayos se presentan en el anexo B2.

Figura 6

Ensayo de resistencia a la compresión



2.11.2 Resistencia a la flexión

Evalúa la capacidad de un mortero para resistir fuerzas de flexión mediante la preparación de muestras de mortero que se someten a cargas controladas en condiciones de laboratorio específicas. La resistencia a la flexión del mortero se calcula registrando la carga aplicada y la deformación resultante, ver ecuación 14. Este ensayo se usará como medida indirecta de la ductilidad (NTP-334.120, 2023).

Inicia con la preparación de muestras prismáticas, las cuales se fabrican y curan bajo condiciones controladas para asegurar su estabilidad. Una vez curadas, se colocan en una máquina de ensayo de flexión, ver figura 7, donde se aplica una carga en el centro de la muestra de forma gradual y controlada, como se muestra en el anexo A10. Se registran tanto la carga aplicada como la deformación resultante a intervalos específicos; el ensayo continúa hasta que la muestra se fractura. Finalmente, se calcula la resistencia a la flexión del mortero utilizando los datos obtenidos durante el ensayo.

Figura 7*Ensayo de resistencia a la flexión*

$$f_r = \frac{3P}{2bd^2} \quad (14)$$

Donde P es la carga máxima aplicada durante el ensayo, b es el ancho de la muestra y d es la altura de la muestra. Los resultados de los ensayos se muestran en el anexo B3.

2.12 Calor específico

Para medir el calor específico se usó el método especificado por la norma ASTM D2766-95 titulada “Método estándar para la determinación del calor específico en líquidos y sólidos”.

Primero, se toma el peso de las muestras de 1x1x1cm; se usa como instrumento el calorímetro vacío, como se muestra en el anexo A11. Posteriormente se añade agua suficiente al calorímetro que logre tapar las muestras; esto se repite varias veces hasta tener una medida constante. Luego de ello se coloca el termómetro en el calorímetro, seguidamente se colocan las muestras en el agua dentro de un vaso precipitado y se pone en el mechero hasta que llegue al punto de ebullición. Luego se toma la temperatura con ayuda de un termómetro y se usa una cuchareta para desplazar los cuerpos teniendo en cuenta que la cuchareta debe tener la misma temperatura que la estufa para evitar pérdidas de calor. Por lo tanto, se calientan los cuerpos de prueba y la cuchareta en la cocina hasta su momento de ebullición. Al momento de la ebullición se trasladan las muestras al calorímetro con la cuchareta, se cierra el calorímetro y se agita mediante movimientos circulares, esperando un momento hasta que la temperatura se mantenga constante y se mide la temperatura.

Con los datos del peso de la muestra, el peso del agua, la temperatura inicial del calorímetro, la temperatura final de calorímetro con la pieza caliente y la temperatura final de ebullición se estima el calor específico con la ecuación 15:

$$C_e = \frac{(m_a + A)(T_e - T_1)C_a}{m_c(T_2 - T_e)} \quad (15)$$

Donde C_e es el calor específico del sólido (J/kg/K), m_a es la masa del agua en el calorímetro (kg), m_c es la masa del sólido en kg, A es el equivalente en agua del calorímetro en kg, T_e es la temperatura de equilibrio, T_1 es la temperatura del agua en el calorímetro en Kelvin, T_2 es la temperatura del cuerpo correspondiente a la ebullición del agua en Kelvin y C_a es el calor específico del agua (J/kg/K). Los resultados de los ensayos se observan en el anexo B4.



Capítulo 3

Resultados

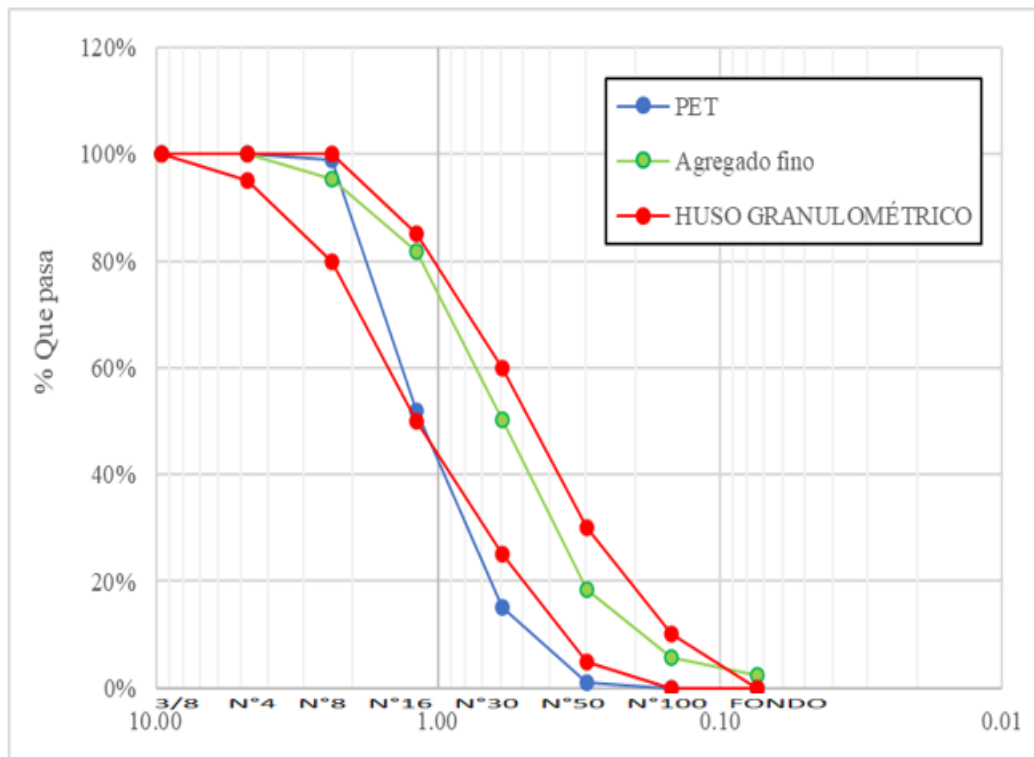
3.1 Caracterización del PET y los agregados

El PET escogido en la investigación corresponde con el “JADE - CZ-328”, cuyas características fueron especificadas en la **Tabla 3** del capítulo 2.

En la figura 8 se presentan las curvas granulométricas del agregado fino natural y PET particulado. Se puede observar que, en el caso del agregado fino, para el de 3/8 de pulgada, el 100% del material pasa, el 91.4% de las partículas pasa a través del tamiz N° 4, el 66.4% pasa a través del tamiz N° 8, el 43.5% pasa a través del tamiz N° 16, en el tamiz N° 30 pasa el 26.7%, para el tamiz N° 50 pasa el 13.5%, el 5.8% pasa a través del tamiz N° 100, finalmente, ningún material pasa en el fondo. En general, la curva granulométrica se encuentra, en su mayoría, dentro del huso granulométrico recomendado por la norma ASTM C136 “Método de prueba estándar para el análisis de tamices de agregados finos y gruesos” para mezclas de mortero, aunque en la malla N°200 se observa un punto fuera del rango.

Figura 8

Curva granulométrica del agregado fino y el PET



En cuanto al PET, la granulometría tiene una gradación adecuada para un material de esta categoría, sin embargo, en los tamices N° 100 y N° 200 retiene mayor

cantidad de material que mínimo establecido por huso granulométrico. En general, se puede decir que el PET tiene la tendencia similar a la del agregado fino analizado.

Finalmente, en la tabla 4 se resumen las propiedades físicas de ambos materiales. Se puede observar que el módulo de finura del PET es mayor que el agregado natural, por lo que sus partículas son de mayor tamaño que las del agregado fino. Así mismo, los pesos unitarios suelto y compactado del PET son menor que de la arena natural, fundamentalmente porque su peso específico es de igual forma menor que el del agregado fino, lo que supone 9% menos que el agregado natural. Esto significa que el agregado fino tiene mayor durabilidad que el PET reticulado, pero con una menor capacidad de inmersión frente al PET. Se observa también que el contenido de humedad del PET es menor que el del agregado natural, esto se debe a que el PET es más ligero que el agregado fino.

Tabla 4

Propiedades físicas del agregado fino y del PET

Ensayos	Agregado fino	PET
Módulo de fineza	2.5	3.5
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1528	471
Peso unitario compactado (kg/m ³)	1643	483
Peso específico (g/m ³)	1521	1380
Contenido de humedad (%)	2.63	0.49
Porcentaje de absorción (%)	1.38	0.00

3.2 Diseño de mezcla del mortero con PET

Siguiendo los lineamientos normativos que indica el comité del American Concrete Institute (ACI), se procedió a dosificar las cantidades en peso para el mortero analizado. Considerando que el PET tiene un peso específico muy diferente respecto a la arena natural, los reemplazos de arena por PET se hicieron en volumen.

Tabla 5*Cantidad en peso en stock para 1m³ de mortero de las muestras evaluadas*

	Contenido de PET				
	0%	10%	20%	30%	40%
Cemento (kg)	590	590	626	660	666
Agregado fino (kg)	1340	1206	1010	833	706
PET (kg)	-	70	132	186	246
Agua (kg)	307	306	322	337	339
a/c	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Flujo (%)	120 -130	120 -130	120 -130	120 -130	120 -130
Factor cemento (bls/m ³)	13.88	13.88	14.73	13.88	19.58

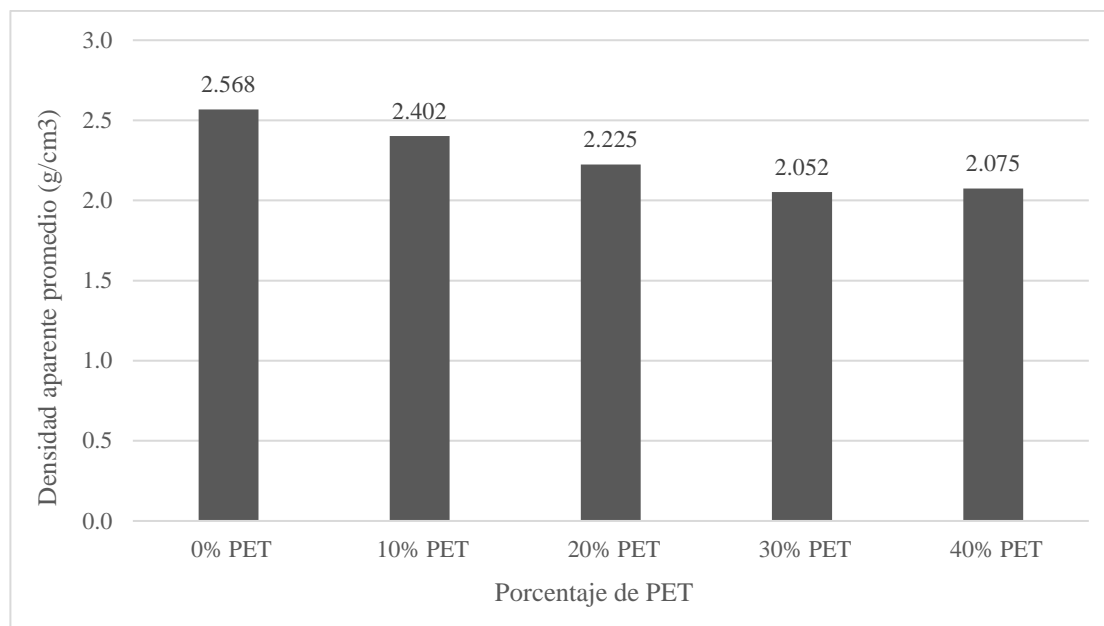
Durante la dosificación se pudo observar que, a medida que se aumentaba la cantidad de PET era necesario ajustar la cantidad de pasta en la mezcla para mantener el flujo. Por ello se ajustó la cantidad de pasta en cada muestra para garantizar la trabajabilidad.

3.3 Densidad del mortero con PET

Se determinó la densidad de las diferentes mezclas de mortero con PET mediante el método estándar especificado en la norma internacional ASTM C642-06. Los resultados presentados en la figura 9, muestra la variación de la densidad en función del porcentaje de PET incorporado.

Figura 9

Comparativa de la densidad aparente promedio de mortero con PET



Se observa que la densidad del mortero disminuyó con el incremento del contenido de PET. La mezcla patrón sin PET presentó una densidad de 2.568 g/cm³, mientras que la mezcla con el mayor contenido de PET (40%) mostró una densidad de 2.075 kg/m³, lo que representa una reducción del 19.2%. Esta variación en la densidad puede atribuirse a la densidad del PET, que es menor en un 16% que la del agregado convencional analizado, por lo se explicaría esta reducción en este aspecto.

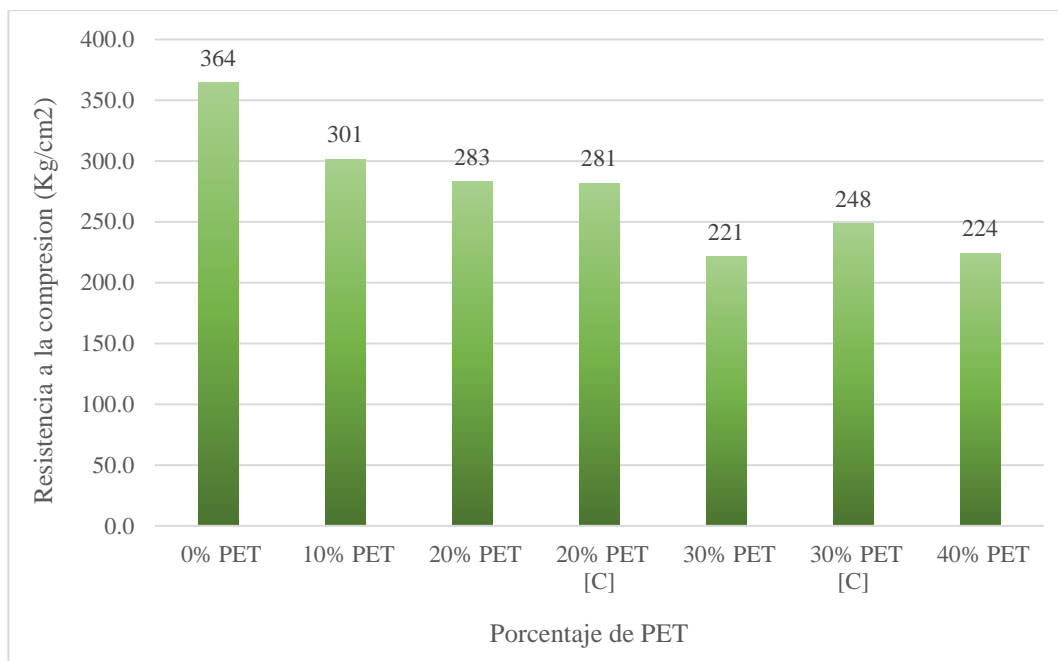
Además, luego del porcentaje de 30% los valores se muestran como una línea de valor constante que se puede deber a la saturación del sistema, siendo que para porcentajes altos no se distribuye el material de manera efectiva en la mezcla, aun siendo de baja densidad el material respecto al agregado.

3.4 Resistencia a la compresión del mortero de PET

Los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se presentan en la figura 10, donde se observa la variación de la resistencia en función del porcentaje de PET incorporado. Se observa una resistencia a la compresión lineal descendente con el incremento del contenido de PET.

Figura 10

Comparativa del ensayo de resistencia a la compresión del mortero

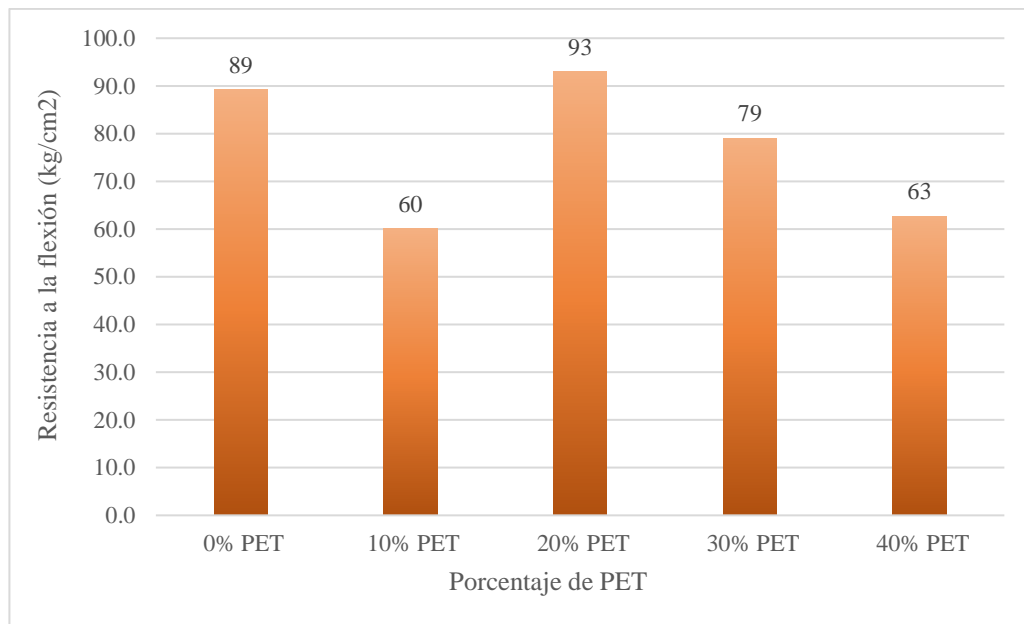


La mezcla patrón con 0% de PET mostró la mayor resistencia a la compresión, con un valor de 364 kg/cm², mientras que la mezcla con 40% de PET presentó la menor resistencia, con 224 kg/cm² lo que representa el 60% de la resistencia original. Este fenómeno es debido a que el PET reduce la densidad general de la mezcla, a pesar de que se ha incrementado la cantidad de pasta en estas mezclas.

Según Frigione (2010), puede reducir la resistencia a la compresión debido a la naturaleza no reactiva y flexible de este material. Al incorporar partículas de PET en la mezcla, se altera la estructura interna del mortero, generando una menor cohesión entre los componentes cementantes y los agregados. Esto crea puntos débiles en la matriz, lo que reduce la capacidad del mortero para resistir las cargas aplicadas. Además, al ser un material plástico, el PET no contribuye a las propiedades mecánicas del mortero, afectando la homogeneidad y la transferencia de esfuerzos dentro del material, lo que resulta en una menor resistencia a la compresión.

3.5 Resistencia a la flexión del mortero de PET

La figura 11 ilustra los resultados de las pruebas de resistencia a la flexión para las diferentes mezclas de mortero con PET. Se observó que la incorporación de PET modificó significativamente la resistencia a la flexión del mortero.

Figura 11*Resistencia a la flexión del mortero*

La resistencia a la flexión máxima se obtuvo con la mezcla de 20% de PET, alcanzando un valor de 92.97 kg/cm², lo que representa un aumento del 4.3% respecto al mortero patrón. Por otro lado, la mezcla con 10% de PET mostró la menor resistencia a la flexión, con un valor de 60.08 kg/cm² que representa el 65.3% del valor de la muestra patrón. Se observa una disminución en la resistencia a la flexión al reemplazar el agregado fino con un 10% de PET, lo cual podría estar relacionado con una distribución ineficiente de las partículas de PET en la mezcla debido a su menor peso en comparación con la arena. Esto posiblemente genera una segregación de las partículas, lo que compromete la homogeneidad de la mezcla y su desempeño mecánico.

Sin embargo, al incrementar el reemplazo al 20%, la resistencia a la flexión aumenta, lo que sugiere que en este porcentaje se alcanza una distribución óptima de las partículas de PET, permitiendo que funcionen como refuerzo mecánico dentro de la matriz de cemento. A partir de este valor, una mayor proporción de PET provoca una reducción en la resistencia, ya que el material, siendo menos duro que la arena, ofrece menos resistencia mecánica, además de tener una adherencia deficiente con la pasta de cemento, afectando la cohesión global del compuesto.

3.6 Calor específico del mortero

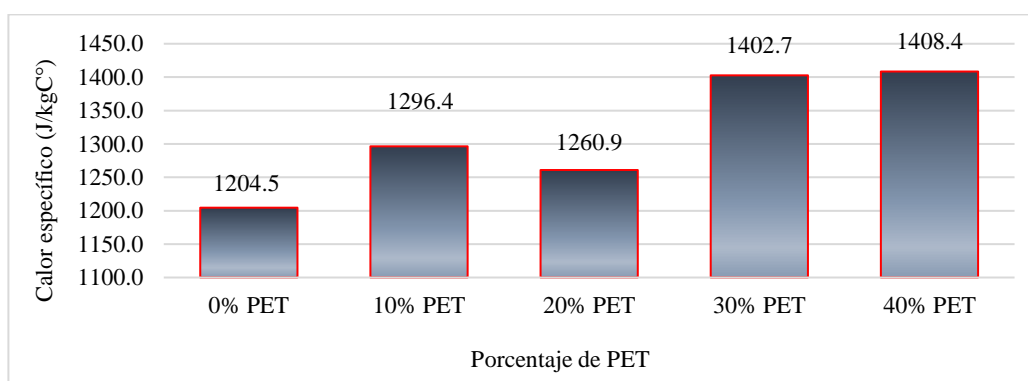
El calor específico de las muestras de mortero, se muestran en la figura 12, se puede notar que el calor específico medido para el mortero patrón de 1204.5 J/Kg °C, lo que es mayor a lo reportado en la literatura para un mortero de cemento convencional de 669 J/Kg °C, según Ruiz (2022). Esto podría deberse a la naturaleza mineralógicas de

la arena usada en la presente investigación, cuyas propiedades térmicas parecen diferir bastante respecto a los agregados de los materiales de referencia.

Al hacer la incorporación de PET, se verifica que el calor específico del mortero tiende a aumentar de manera casi lineal con el PET; ya que con 10% de PET logra los 1296,4 J/Kg °C, pero es visible que al usar 20% de PET decae a 1260.9 J/Kg °C. Esta reducción puede atribuirse al mayor calor específico que tiene el PET respecto al mortero de cemento. A esto se suma la menor densidad del PET respecto al mortero convencional, lo cual reduce la densidad global del mortero; sin embargo, al usar 30% de PET vuelve a aumentar en 1402.7 J/Kg °C, siendo la muestra con 40% de PET la que presentó el mayor calor específico, con un valor de 1408.4 J/Kg °C, a comparación con la muestra patrón que solo alcanza los 1204.5 J/Kg °C. Como el calor específico se mide por unidad de masa, un material menos denso, pero con similar capacidad de almacenamiento térmico mostrará un calor específico mayor.

Figura 12

Calor específico del mortero con PET



Para el reemplazo del 10% de PET hay un ligero aumento en el calor específico, lo cual podría corresponder con un incremento en la porosidad del material al incluir poco PET, como se había comentado en los apartados anteriores. Se sabe que el aire tiene un calor específico mayor al del mortero de cemento, aunque mucho menor que el del PET. Al usar 20% se reduce un poco en relación con el 10% de PET, pero esa variación podría estar asociada a las variaciones propias del reemplazo, cambios en la porosidad o en la homogeneidad del material resultante. Sin embargo, al usar proporción de 30% y 40% de PET, el calor específico aumenta no sólo por la presencia de PET, sino también por el incremento que se da en la porosidad.

3.7 Inercia térmica del mortero

En la tabla 6 se muestra la obtención de la inercia térmica multiplicando la densidad por el calor específico. En la figura 13 se han graficado los resultados de la inercia térmica estimada a partir de la densidad y el calor específico medidos, donde se

puede observar que la incorporación de PET disminuyó la inercia térmica del mortero en su mayoría.

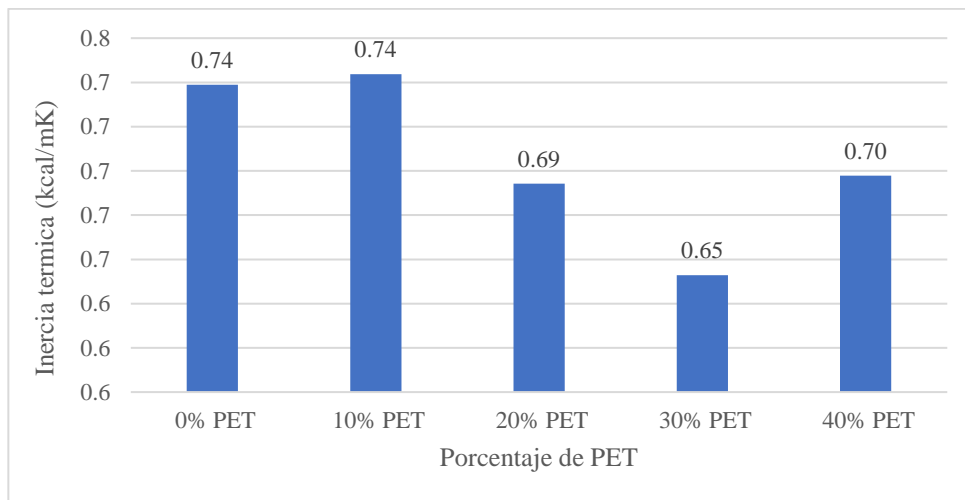
Tabla 6

Obtención de la inercia térmica

INERCIA TERMICA DEL MORTERO			
Muestra	Densidad	Calor específico	I. térmica
Patrón con 0% PET	2.56	0.28	0.73
Reemplazo con 10% PET	2.40	0.31	0.74
Reemplazo con 20% PET	2.22	0.31	0.69
Reemplazo con 30% PET	2.05	0.31	0.65
Reemplazo con 40% PET	2.07	0.33	0.69

Figura 13

Inercia térmica del mortero con PET



Aunque se observa una relación no lineal entre el contenido de PET y la inercia térmica del mortero, la muestra con 10% de PET mostró un incremento de la inercia térmica respecto a la muestra patrón, con un valor de 0.74 kcal/mK, lo que representa un aumento porcentual del 0.67%. Esta variación en los valores puede deberse a la baja densidad del PET y el alto calor específico del PET. Sin embargo, la tendencia general es a disminuir este valor hasta un valor mínimo para un 30% de PET, por encima del cual, vuelve a incrementarse para el 40% de PET. Esto indicaría que hay un efecto no sólo de la presencia de PET, sino de la porosidad y heterogeneidad asociada a su incorporación, que debiera ser evaluada con más detalle en otras investigaciones para identificar los factores reales que afectan las propiedades térmicas medidas en el presente estudio.

Al agrupar los datos obtenido de la densidad y calor específico del mortero, se presenta la tabla 7, donde se muestra el análisis comparativo usando datos de tendencia normalizada, para identificar el porcentaje óptimo de PET. Se identifica un valor óptimo del 10% de PET, como se ve en la figura 14.

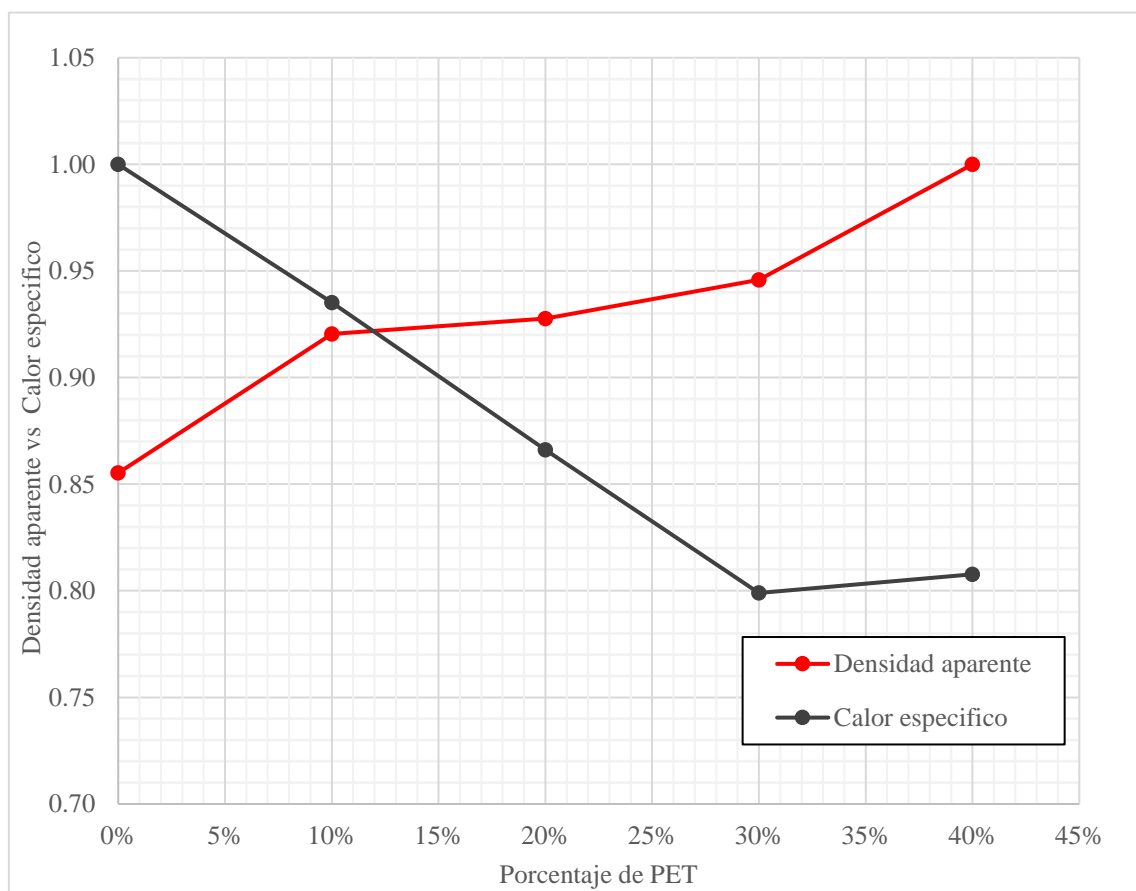
Tabla 7

Análisis del porcentaje óptimo de agregado

Densidad vs Calor específico (tendencia normalizada)		
0%	1.00	0.85
10%	0.93	0.92
20%	0.86	0.92
30%	0.79	0.94
40%	0.80	1.00

Figura 14

Análisis de los parámetros de Calor específico y Densidad aparente



A partir de las tendencias normalizadas de cada propiedad, se observó cómo la densidad aparente tiene un comportamiento lineal y decreciente, mientras que el calor

específico tiende a crecer a un ritmo menor de lo que disminuye la densidad aparente. Esto explica por qué se identifica un valor máximo de inercia térmica alrededor del 10% y una tendencia a disminuir al seguir aumentando el contenido de PET en el mortero.

Este resultado indica que el PET, lejos de hacer aislante al mortero, lo hace menos eficiente desde el punto de vista energético, aunque con una capacidad de variación muy rápida. Para aplicación podría ser muy favorable que el material tenga menos energía para calentarse, pero no para aplicaciones en edificaciones, donde el confort térmico requiere de una inercia menor.



Conclusiones

En el presente estudio, se evaluó el comportamiento del mortero de cemento con porcentajes de reemplazo de agregado fino por PET particulado (0%, 10%, 20%, 30% y 40%), analizando sus propiedades mecánicas y térmicas. Se realizaron pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, mediciones de calor específico, densidad y se estimó la inercia térmica. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre el comportamiento del mortero con PET particulado, permitiendo obtener las siguientes conclusiones:

En relación con la resistencia a la compresión, se observó que el aumento en el porcentaje de reemplazo de PET está inversamente relacionado con la resistencia a la compresión. La muestra con 40% de PET presentó la mayor reducción, con una disminución de aproximadamente 38.4% en comparación con el mortero patrón, a pesar de mantener la relación a/c constante y aumentar la cantidad de pasta. Este resultado se atribuye a la menor resistencia mecánica del PET en comparación con el agregado fino convencional.

En cuanto a la resistencia a la flexión, el reemplazo del 20% de PET en la matriz de cemento optimiza la distribución de las partículas, lo que permite que actúen como un refuerzo mecánico efectivo, aumentando la resistencia a la flexión en un valor de 92.97 kg/cm², lo que representa un aumento del 4.3% respecto al mortero patrón. Sin embargo, reemplazos superiores a este porcentaje generan una disminución en la resistencia debido a que el PET es menos duro que la arena; ya que, al tener menor dureza en comparación con la arena y baja adherencia con la pasta de cemento, ofrece menos resistencia mecánica, afectando la cohesión de los componentes del concreto.

Se concluye que la incorporación de PET particulado como reemplazo parcial del agregado fino en el mortero de cemento tiene efectos significativos en sus propiedades mecánicas y térmicas. Mientras que las resistencias a la compresión y flexión disminuyen, el calor específico aumenta, aunque la inercia térmica disminuye, lo que podría ser beneficioso para aplicaciones donde se necesite elevada conductividad térmica.

El porcentaje óptimo de reemplazo de PET para lograr un aumento en la inercia térmica es de 10%, donde se logra un punto de equilibrio entre la reducción de las propiedades mecánicas y la mejora significativa en las propiedades térmicas. Este porcentaje de reemplazo del 10% logra un incremento moderado, ya que, por encima de este porcentaje, no se logra superar la inercia térmica patrón.

Referencias

- Alaloul, W., John, V., & Musarat, M. (2020). Mechanical and Thermal Properties of Interlocking Bricks Utilizing Wasted Polyethylene Terephthalate. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1). doi:10.1186/s40069-020-00399-9
- Albano, C., Camacho, N., Hernández, M., Matheus, A., & Guitierrez, 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. doi:10.1016/j.wasman.2009.05.007
- Al-Hadithi, A., Almawla, S., & Mohammed, M. (2023). Fresh, mechanical and impact properties of self-compacting lightweight concrete containing PET fiber residues. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8, 268. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s41062-023-01223-5>
- Al-Rahmman, F., Al-Hadithi, A., & Al-Asafi, J. (2024). Enhancement the Mechanical Properties of Ferrocement Mortar by Adding Waste Plastic Fibers. *AIP Conference Proceedings*, 3009(1). doi:10.1063/5.0190543
- Alves, J., Portellaa, K., Joukoskia, A., Mendesa, R., & Santos, E. (2011). Use of residual polymers in concrete for the repair of hydraulic dam surfaces. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1049-1055. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.073>
- ASTM C177-13. (2019). *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus*. Obtenido de <https://www.astm.org/c0177-13.html>
- ASTM C642-06. (2019). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete*. Obtenido de <https://www.astm.org/c0642-06.html>
- Avendaño, C., & Martinez, A. (2020). Determination of the optimum thermal inertia of construction materials for housing in different Chilean climatic zones. *Reseñas de energías renovables y sostenibles*, 131. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110031>
- Barnard, E., Rubio, J., & Thielemans, W. (2021). Chemolytic depolymerization of PET: a review. *Química verde*(11), 3765-3789. Obtenido de <https://doi.org/10.1039/D1GC00887K>
- Chumbiray, I. (2021). *Análisis del confort térmico en escuela modelo de la sierra peruana y evaluación de mejoramiento térmico mediante el uso de principios*

- bioclimáticos*. Tesis de pregrado , PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ. Obtenido de https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/19292/CHUMBIRAY_ALONSO_IVAN_NOEL_ANALISIS_COMFORT_TERMICO.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Dagliya, M., Bocharé, R., & Nekiá, D. (2023). Experimental investigation using non biodegradable pet as a partial replacement of sand in concrete. *Indian Concrete Journal*, 97(10), 31 -39. Obtenido de <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85175799881&partnerID=40&md5=ca9cf284467a1b4a35dd0421b654a3e2>
- Eriksen, M., Christiansen, J., Daugaard, A., & Astrup, T. (2019). Closing the loop for PET, PE and PP waste from households: Influence of material properties and product design for plastic recycling. *Waste Management*, 96, 75 - 85. doi:10.1016/j.wasman.2019.07.005
- Esfandabad, A., Motevalizadeh, S., Sedghi, R., Ayar, P., & Asgharzadeh, S. (2020). Fracture and mechanical properties of asphalt mixtures containing granular polyethylene terephthalate (PET). *Construction and Building Materials*, 259(120410). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.120410
- Ferreira, N., Rodrigues, F., Martins, L., Ortigao, C., Caramelo, F., Mendes, L., . . . Varela, J. (2012). Image-based data corrections for Positron Emission Mammography. *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*(6551695), 3040 - 3043. doi:10.1109/NSSMIC.2012.6551695
- Frigione, M. (2010). Recycling of PET bottles as fine aggregate in concrete. *Waste Management*, 30(6), 1101-1106. Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.01.030>
- Google Maps. (2024). *Cantera Chulucanas*. Obtenido de <https://maps.app.goo.gl/hrjeDzSiefmBhuaY7>
- Guillén, C., & Muciño, A. (2020). Ahorro energético en vivienda social mediante la implementación de materiales regionales. *Vivienda y Comunidades Sustentables*(8), 59-80. Obtenido de <https://www.redalyc.org/journal/6651/665170465003/html/>
- Infante, J., & Valderrama, C. (2019). Technical, Economic and Environmental Analysis of the Manufacture of Concrete Blocks with Recycled Polyethylene Terephthalate

- (PET). *Información tecnológica*, 30(5), 25-36. Obtenido de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642019000500025>
- Kangavar, M., Lokuge, W., Manalo, A., Karunasena, W., & Frigione, M. (2022). Investigation on the properties of concrete with recycled polyethylene terephthalate (PET) granules as fine aggregate replacement. *Case Studies in Construction Materials*, 16(e00934). doi:10.1016/j.cscm.2022.e00934
- Kim, K. H., Wang, J., & Galloway, T. (2022). PET films are most widely used in the biaxially oriented, heat-stabilized form. *Microbes and Microbial Biotechnology for Green Remediation*, 30, 575-587. doi:10.1016/B978-0-323-90452-0.00049-9
- Llerena, B., & Sallica, L. (2022). *Influencia del Tereftalato de Polietileno en Concreto para el Diseño Sismoestructural en Edificio Multifamiliar, Jirón Retamas San Juan de Lurigancho, 2022*. Tesis de pregrado, Universidad Cesar Vallejo. Retrieved from file:///C:/Users/HP/Downloads/Llerena_VB-Sallica_LLK-SD.pdf
- Mashaan, N., Chegenizadeh, A., & Nikraz, H. (2021). Laboratory properties of waste PET plastic-modified asphalt mixes. *Recycling*, 6(3). doi:10.3390/recycling6030049
- NTP-334.051. (1998). *CEMENTOS. Método para determinar la resistencia a la compresión de morteros de Cemento Portland cubos de 50 mm de lado* (2da edición ed.). Lima, Lima, Perú: INDECOPI. Retrieved from <https://es.scribd.com/document/377182831/NTP-334-051-resistencia-a-la-compresion-cubos-de-mortero-pdf>
- NTP-334.120. (2023). *Método de ensayo normalizado de resistencia a la flexión de mortero de cemento hidráulico* (3ª Edición ed.). Lima, Lima, Perú: INDECI.
- NTP-339.185. (2019). *AGREGADOS. Metodo Contenido de Humedad Total Evaporable de Agregados Por Secado*. Retrieved from https://kupdf.net/download/ntp-3391852013-agregados-metodo-contenido-de-humedad-total-evaporable-de-agregados-por-secado_59c03b5808bbc55813686f84_pdf
- NTP-339.187. (2002). *HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, absorción y porcentaje de vacíos del hormigón (concreto) endurecido*. Lima, Perú: INDECOPI.
- NTP-400.012. (2018). *AGREGADOS. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global*. Retrieved from <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-privada-de-tacna/tecnologia-del-concreto/ntp400-norma-tecnica-peruana-granulometria-de-los-agregados/4659039>

- NTP-400.017. (2011, 02 02). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad (“Peso Unitario”) y los vacíos en los agregados.* Retrieved from <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-catolica-de-santa-maria/tecnologia-del-concreto/ntp-400-017-2011-peso-unitario-y-vacios-en-los-agregados/9695078>
- NTP-400.021. (2013). *AGREGADOS. Método de ensayo normalizado para la densidad, la densidad relativa (peso específico) y absorción del agregado grueso.* INDECOPI, Lima. Retrieved from <https://bit.ly/3Q0PoRb>
- Plockova, J. (17 de Abril de 2024). *U.S. Green Building Council.* Recuperado el 20 de Octubre de 2024, de U.S. Green Building Council: <https://www.usgbc.org/articles/leed-warehouse-and-distribution-center-projects-balance-size-and-efficiency>
- Reader, A., Corda, G., Mehranian, A., Costa-Luis, C. d., Ellis, S., & Schnabel, J. (2021). Deep learning for PET image reconstruction. *IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences*, 5(1), 1-25. doi:doi: 10.1109/TRPMS.2020.3014786.
- Rincon, J. (2023). Confort térmico en edificios educativos naturalmente ventilados: un estudio en bioclima templado-seco. *Revista de Arquitectura*, 25(1), 12-24. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/8769449.pdf>
- Saikia, N., & Brito, J. d. (2014). Mechanical properties and abrasion behavior of concrete with shredded PET bottle waste as a partial replacement of natural aggregates. *Construction and Building Materials*, 236-244. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.049>
- SENAMHI. (2023). *MINISTERIO DEL AMBIENTE.* Obtenido de <https://www.senamhi.gob.pe/?p=heladas-y-friajes>
- Serrano, P. (03 de Febrero de 2022). La inercia térmica de los materiales de construcción [Artículo] Calor y Frio. Portal sectorial de las instalaciones. Obtenido de <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/materiales/la-inercia-termica-de-los-materiales-de-construccion.html>
- Smaoui, H., Trabelsi, A., Kammoun, Z., & Aouicha, B. (2023). Mechanical, physical, blast waves and ballistic impact resistance properties of a concrete incorporating thermally treated PET inclusions. *Construction and Building Materials*, 365(15). Obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130088>

- Xiong, B., Falliano, D., Restuccia, L., Di Trapani, F., Demartino, C., & Marano, G. (2023). Mortar with Substituted Recycled PET Powder: Experimental Characterization and Data-Driven Strength Predictive Models. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 35(9). doi:10.1061/JMCEE7.MTENG-16065
- Zerig, T., Aidoud, A., Belachia, M., Djedid, T., & Abbas, M. (2023). Combined sand eco-mortar reinforced with polyethylene Terephthalate: Behavior and optimization using RSM method. *Construction and Building Materials*, 133160(10.1016/j.conbuildmat.2023.133160), 400.



Anexos



Anexo A1. Peso específico de los agregados.

Nota: Elaboración propia.



Anexo A2. Análisis granulométrico.

Nota: Elaboración propia



Anexo A3. Materiales pesados listos para preparar el mortero

Nota: Elaboración propia



Anexo A4. Preparación de mortero con remplazo de agregado fino por PET.

Nota: Elaboración propia

**Anexo A5. Preparación de moldes para encofrado de muestras.**

Nota: Elaboración propia



Anexo A6. Conformado de muestras. Nota: Elaboración propia



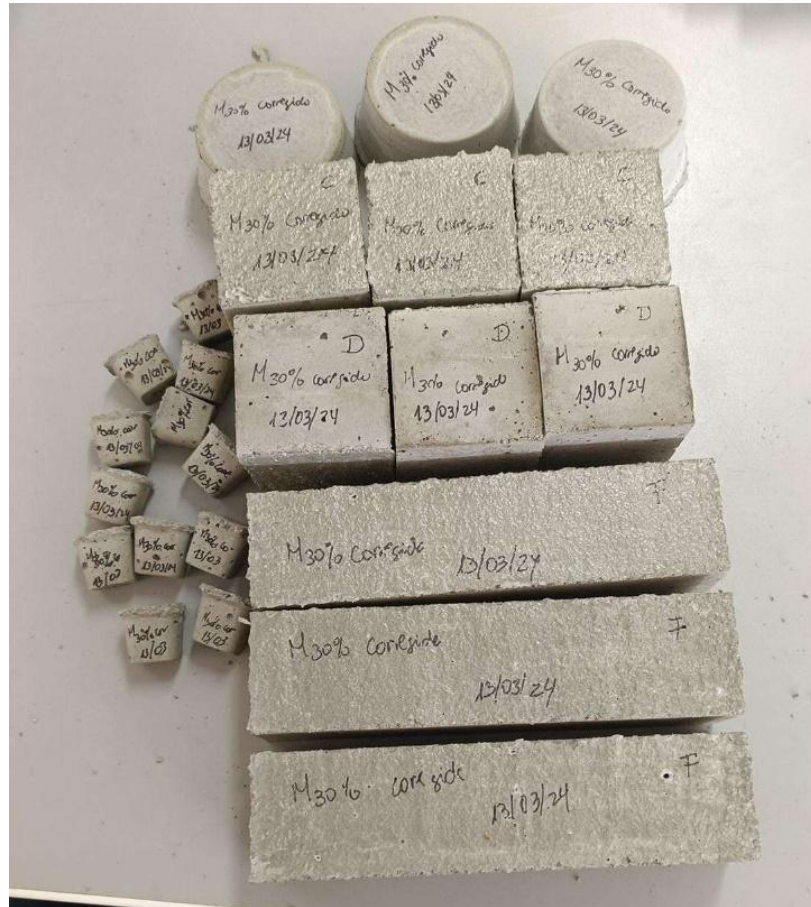
Anexo A7. Curado de muestras de mortero.

Nota: Elaboración propia



Anexo A8. Probetas desmoldadas y listas para ensayos.

Nota: Elaboración propia

**Anexo A9. Ensayo de resistencia a la compresión**

Nota: Elaboración propia



Anexo A10. Ensayo de resistencia a la flexión.

Nota: Elaboración propia



Anexo A11. Ensayo de calor específico.

Nota: Elaboración propia



Anexo B1. Densidad aparente del mortero, de acuerdo a la norma ASTM C642-06.

DENSIDAD APARANTE BAJO LA NORMA ASTM C 642-06				
Muestra	Ensayo 01	Ensayo 02	Ensayo 03	Promedio
Patrón con 0% PET	2.567	2.576	2.562	2.568
Reemplazo con 10% PET	2.4	2.403	2.403	2.402
Reemplazo con 20% PET	2.186	2.26	2.228	2.225
Reemplazo con 30% PET	2.06	2.051	2.045	2.052
Reemplazo con 40% PET	2.071	2.074	2.079	2.075

Anexo B2. Resistencia a la compresión, de acuerdo a la norma NTP 334.051.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN BAJO LA NORMA NTP 334.051				
Muestra	Ensayo 01	Ensayo 02	Ensayo 03	Promedio
Patrón con 0% PET	308	424	361	364.333
Reemplazo con 10% PET	325	271	308	301.333
Reemplazo con 20% PET	292	275	282	283.000
20% PET (Corrección)	257	299	289	281.667
Reemplazo con 30% PET	212	221	231	221.333
30% PET (Corrección)	239	253	253	248.333
Reemplazo con 40% PET	204	238	231	224.333

Anexo B3. Resistencia a la flexión, de acuerdo a la norma NTP 339.079.

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN BAJO LA NORMA NTP 339.079				
Muestra	Ensayo 01	Ensayo 02	Ensayo 03	Promedio
Patrón con 0% PET	93.52	82.97	90.94	89.143
Reemplazo con 10% PET	59.3	62.58	58.36	60.080
Reemplazo con 20% PET	77.34	78.52	80.39	78.750
20% PET (Corrección)	89.77	91.64	97.5	92.970
Reemplazo con 30% PET	69.61	76.41	76.17	74.063
30% PET (Corrección)	82.03	72.89	82.27	79.063
Reemplazo con 40% PET	84.61	52.5	51.09	62.733

Anexo B4. Calor específico, de acuerdo a la norma ASTM D2677-95.

Muestra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Prom.
0% PET	1246	1150	1160	1323	1266	1161	1262	1119	1193	1180	1211	1177	1204.5
10% PET	1401	1350	1219	1251	1300	1301	1176	1236	1212	1312	1338	1455	1296.4
20% PET	1326	1237	1221	1247	1295	1249	1328	1252	1252	1216	1268	1238	1260.9
30% PET	1304	1509	1314	1614	1296	1450	1302	1364	1318	1604	1294	1460	1402.7
40% PET	1328	1381	1370	1446	1600	1410	1293	1299	1397	1397	1587	1389	1408.4