

INFORME DE TESIS - JASP

por JOSE AMARANTO SALAS PEREDA

Fecha de entrega: 28-nov-2023 10:02a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2240854283

Nombre del archivo: TESIS_FINAL_Jose_Salas.docx (35.87M)

Total de palabras: 17084

Total de caracteres: 95570

⁴ **UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TRUJILLO**

BENEDICTO XVI

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE ESTUDIOS PROFESIONAL DE

INGENIERÍA CIVIL



⁵ **INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO SOBRE LA RESISTENCIA EN COMPRESIÓN Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN MORTEROS DE CEMENTO**

⁴ **TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Br. José Amaranto Salas Pereda

ASESOR

⁴ Mg. Aldo Castillo Chung
<https://orcid.org/0000-0002-2270-1671>

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Vivienda, saneamiento y transporte

TRUJILLO – PERÚ

2023

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Excmo. Mons. Héctor Miguel Cabrejos Vidarte, O.F.M.

Arzobispo Metropolitano de Trujillo

Fundador y Gran Canciller de la

Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI

Dr. Luis Orlando Miranda Díaz

Rector de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI

Dra. Mariana Geraldine Silva Balarezo

Vicerrectora académica

Mg, Ing., Breiner Guillermo Díaz Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingeniería

Dra. Ena Obando Peralta

Vicerrectora Académico de Investigación

Dr. Winston Rolando Reaño Portal

Director de la Escuela de Posgrado

Dra. Teresa Sofía Reategui Marin

Secretaria General

¹ **DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD**

Señor(a) Decano(a) de la Facultad de Ingeniería:

Yo, Mg Aldo Roger Castillo Chung con DNI N° 18132971, como asesora del trabajo de investigación **INFLUENCIA DE LA ADICIÓN DE CAUCHO RECICLADO SOBRE LA RESISTENCIA EN COMPRESIÓN Y CONDUCTIVIDAD TÉRMICA EN MORTEROS DE CEMENTO**, desarrollada por el bachiller José Amaranto Salas Pereda ¹ DNI N° 07467688 respectivamente, egresada del Programa Profesional de Ingeniería Civil, considero que dicho trabajo de titulación reúne los requisitos tanto técnicos como científicos y corresponden con las normas establecidas en el reglamento de titulación de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI y en normativa para la presentación de trabajos de titulación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Por tanto, autorizo la presentación del mismo ante el organismo pertinente para que sea sometido a evaluación por la comisión de la clasificación designado por el Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.



Mg. Aldo Castillo Chung
DNI: 18132971

DEDICATORIA

Con amor y gratitud a mis PADRES, quienes en todo momento me orientaron con sus sabios consejos deseando siempre en mí una formación integral, como persona y como ser cognoscente, con la esperanza de forjar un futuro cada vez mejor, del mismo modo a mis PROFESORES, quienes me encaminaron por la senda del estudio.

Como tributo de gratitud por el apoyo incondicional y aliento en todo sentido, dedico este trabajo de investigación traducido en esta Tesis a mi esposa ANA, mis amadas hijas DYANNE y ANGIE, quienes son mi motor, fortaleza y motivo para alcanzar un mundo mejor con el conocimiento y la percepción integral de la ciencia.

Por la manifiesta ayuda moral a mis hermanos, NIXON, y en especial a JORGE quien me apoya con nuevos paradigmas en el campo de la investigación, a fin de que tenga una visión tridimensional, pues la edad no implica experiencia y conocimiento total.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi agradecimiento patente e imperecedero a **Dios** por brindarme la inteligencia y hacerme asertivo en los momentos más difíciles de **carrera profesional**, mostrándome el camino correcto para hacer frente a la adversidad, **por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente** transformando el dolor **en** fuerza interna ayudándome a superar las dificultades habiendo **puesto en mi camino personas que han sido mi soporte y compañía durante todo este proceso**. Del mismo modo a todas aquellas personas que creen y confían en mí, haciendo nacer la esperanza por forjar un mundo cada vez mejor, porque sólo el conocimiento integral hará mejores a los hombres, solo el saber de engrandecer el espíritu, solo la percepción global de la ciencia nos hará más que un ser humano una persona.

De modo especial a **mis padres** Santiago, Helis y al **Asesor** Mg. Ing. Aldo Castillo Chung, su actitud positiva, espíritu de servicio transmitiendo seguridad personal asociado al conocimiento me sirvió mucho para culminar mi tesis. Así mismo a los docentes en mi formación profesional, sus relevantes conocimientos me sirvieron para cristalizar mi ilusión que anhelé y perseguí intensamente para convertirme en un ingeniero civil en el arduo camino de esta efímera vida.

Quien quiera ser grande, que sirva a los demás no que se sirva de los demás.

¡Gracias a todos ustedes!

ÍNDICE

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS.....	ii
CONFORMIDAD DEL ASESOR.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD.....	vi
ÍNDICE.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	x
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
I. INTRODUCCIÓN.....	14
II. METODOLOGÍA.....	26
2.1. Enfoque y tipo.....	26
2.2. Diseño de Investigación.....	26
2.3. Objeto de Estudio.....	27
2.4. Instrumentos, técnicas, equipos de laboratorio de recojo de datos.....	29
2.4.1. Instrumentos de recojo de datos.....	29
2.4.2. Técnicas de recojo de datos.....	30
2.4.3. Equipos de laboratorio de recojo de datos.....	30
2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	30
2.5.1. Técnicas de procesamiento.....	30
2.5.2. Análisis de datos.....	32
2.6. Aspectos éticos en investigación.....	33
2.6.1. Consentimiento informado.....	33
2.6.2. Confidencialidad y privacidad.....	33

2.6.3. Beneficio y no maleficencia.....	33
2.6.4. Divulgación de conflictos de interés.....	33
2.6.5. Revisión ética y cumplimiento normativo.....	34
1 III. RESULTADOS.....	35
3.1. Descripción de resultados.....	35
3.1.1. Densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	35
3.1.2. Porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	37
6 3.1.3. Resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	39
3.1.4. Conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	41
3.1.5. Caracterización morfológica de caucho reciclado.....	43
3.1.6. Caracterización química de cemento Portland tipo I.....	44
3.2. Prueba de Hipótesis.....	46
3.2.1. Densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	46
3.2.2. Porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	48
6 3.2.3. Resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	51
3.2.4. Conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	53
3.2.5. Caracterización morfológica de caucho reciclado.....	55

3.2.6. Caracterización química de cemento Portland tipo I.....	55
16 IV. DISCUSIÓN.....	56
V. CONCLUSIONES.....	60
VI. RECOMENDACIONES.....	61
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	62
ANEXOS.....	66

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imagen de Caucho Reciclado.....	23
Figura 2. Diferentes paneles integrados de aislamiento térmico y decoración.....	25
Figura 3. Diseño del Experimento.....	27
Figura 4. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.....	32
Figura 5. Densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	35
Figura 6. Porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	37
Figura 7. Resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	39
Figura 8. Conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado.....	41
Figura 9. Morfología de caucho reciclado por microscopía óptica.....	43
Figura 10. Espectro FTIR de cemento Portland tipo I.....	44
Figura 11. Prueba de hipótesis de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días.....	46
Figura 12. Prueba de hipótesis de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días.....	47
Figura 13. Prueba de hipótesis de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días.....	48
Figura 14. Prueba de hipótesis de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días.....	50
Figura 15. Prueba de hipótesis de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días.....	51

Figura 16. Prueba de hipótesis de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días52

Figura 17. Prueba de hipótesis de conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días53

Figura 18. Prueba de hipótesis de conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de muestras.....35

Tabla 2. Niveles de variable independiente.....35

RESUMEN

La investigación presente conto con el propósito de evaluar el efecto de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia a la compresión y la conductividad térmica en morteros de cemento. Así mismo, se lograron caracterizar propiedades físicas: como la densidad aparente y porcentaje de porosidad, propiedades químicas como: los grupos funcionales del proceso de curado de los morteros de cemento. La investigación aplicó una metodología de tipo aplicada, cuantitativa y explicativa. Contando con un diseño experimental. La muestra de estudio constó de 240 morteros para ensayo de compresión y conductividad térmica; de relación a/c 0.45 constante y relación agregado: cemento 3:1. Se empleó Cemento Portland Tipo 1, caucho reciclado triturado y arena gruesa. La adición de caucho se dio en niveles de 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 y 40% en peso de cemento. Los morteros fueron sometidos a ensayos de compresión ASTM C109 y a ensayos de conductividad térmica ASTM E1225. Ambos siendo realizados a edades de 7, 14 y 28 días. Como también a métodos de caracterización física y química mediante ASTM C188, microscopía óptica y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR). Como resultados se obtuvo que a medida que el porcentaje de caucho reciclado aumenta en el rango de 0% a 40%, la conductividad térmica, la resistencia en compresión y la densidad disminuyen. Mientras que la porosidad de los morteros aumenta.

Palabras Clave: *aislamiento térmico, caucho reciclado, morteros, cemento*

ABSTRACT

The present research had ² the objective of determining the influence of the addition of recycled rubber on the compressive strength and thermal conductivity in cement mortars. Likewise, physical properties were characterized: such as apparent density and percentage of porosity, chemical properties such as: the functional groups of the curing process of cement mortars. The research applied an applied, quantitative and explanatory methodology. Having an experimental design. The study sample consisted of 240 mortars for compression and thermal conductivity testing; constant w/c ratio 0.45 and aggregate: cement ratio 3:1. Type 1 Portland Cement, crushed recycled rubber and coarse sand were used. The addition of rubber was given at levels of 0, 10, 15, 20, 25, 30, 35 and 40% by weight of cement. The mortars were subjected to ASTM C109 compression tests and ASTM E1225 thermal conductivity tests. Both being carried out at ³⁶ ages of 7, 14 and 28 days. As well as ¹⁵ physical and chemical characterization methods using ASTM C188, optical microscopy and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). As ¹⁵ results, it was obtained that as the percentage of recycled rubber increases in the range from 0% to 40%, the thermal conductivity, compression resistance and density decrease. While the porosity of the mortars increases.

Keywords: *thermal insulation, recycled rubber, mortars, cement*

I. INTRODUCCIÓN

En las zonas altoandinas del Perú es común que se presenten diversos fenómenos meteorológicos entre los que destacan las heladas, sobre todo durante el invierno. Éstas se caracterizan por un brusco descenso de la temperatura por debajo de los cero grados centígrado. Éstas conllevan la intensificación de la sensación de frío y riesgo de contraer infecciones respiratorias agudas. Por otro lado, también pueden causar pérdidas en la producción agrícola, siendo más dañinas durante el verano y la primavera, época en que la mayoría de los cultivos están dentro de su etapa vegetativa o productiva. En el actual contexto de cambios climáticos, se observa un aumento en la intensidad y frecuencia de las heladas, lo que amplía su impacto en la salud y en la economía de las personas. Según el informe del Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres del año 2021, aproximadamente 10 millones de residentes de las áreas elevadas de los Andes sufren anualmente las desgracias que ocasionan las heladas. Estas contribuyen a no solo las enfermedades respiratorias, sino también a las afecciones musculares, dermatológicas, la hipotermia y, en ocasiones, a accidentes mortales. Las infecciones respiratorias agudas, como la gripe y la neumonía, son las más comunes. Aparte de las heladas, en las comunidades andinas se presentan otros factores desafiantes, como la precaria situación socioeconómica, como pobreza y pobreza extrema, extremos de edad, niños que tienen menos de 5 años y adultos que tienen más de 60 años, un estado nutricional deficiente, anemia y desnutrición crónica infantil, una baja cobertura de vacunación (especialmente contra la influenza y el neumococo) y la ubicación geográfica remota y de difícil llegada. Las heladas también contribuyen al aumento de la tasa de absentismo escolar, debido a que dificultan la movilidad y afectan la educación tanto de los niños, como de los adolescentes. Además, al no tener fuentes alternativas de ingresos, las familias tienen limitaciones significativas o nulas en su capacidad de gasto en alimentos y atención médica, lo que dificulta la recuperación de las pérdidas. En la selva peruana, se experimenta un fenómeno meteorológico similar conocido como "frijajes". Aunque generalmente son menos extremos que las heladas, tienen un impacto negativo tanto en la salud como en la economía de la gente.

Abordar esta compleja problemática requiere de intervenciones multisectoriales. Por un lado, el Ministerio de Salud debe ampliar la cobertura de vacunación frente a la influenza y el neumococo, como también implementar proyectos de prevención para combatir la

anemia y también desnutrición infantil. Mientras tanto, ²⁴ el Ministerio de Desarrollo e Inclusión Social debe brindar asistencia social constante, y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento debe desarrollar programas para mejorar las condiciones de vivienda y saneamiento de la población afectada. A pesar de algunos esfuerzos realizados por el Estado Peruano en el año 2020, como la ejecución ⁴² del proyecto llamado "mi abrigo" del Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social, con el fin de acondicionar hogares ante las heladas y friajes en áreas de alto riesgo, donde el crecimiento de la neumonía ha aumentado en menores de 5 años, pasando del 16.42% en el año 2020 al 20.86% en el año actual (MINSA, 2022). Hasta ahora, los esfuerzos para mejorar la vivienda se han centrado en el diseño, sin embargo, se siguen utilizando los mismos materiales tradicionales, sin considerar materiales con propiedades aislantes térmicas. En esta investigación, se busca ² incorporar el caucho reciclado como un material económico y accesible para su uso como aislante térmico en la construcción de viviendas en las zonas andinas afectadas por las heladas. Esto permitirá proteger a los residentes, especialmente a niños y adultos mayores, de las bajas temperaturas. Al mismo tiempo, esta iniciativa contribuirá a reducir la contaminación ambiental causada por materiales sólidos, como el caucho sintético, que se considera uno de los materiales más contaminantes debido a la creciente cantidad de neumáticos desechados anualmente, cuya degradación completa lleva mucho tiempo.

La presente investigación se enfoca en una solución potencial: la incorporación de caucho reciclado como aislante térmico en la construcción de viviendas en estas áreas. Esto ³⁵ podría proporcionar una protección crucial contra las bajas temperaturas, especialmente para los grupos más vulnerables, como los niños y los adultos mayores. Además, esta propuesta tiene un componente ambiental importante, ya que contribuiría a reducir la contaminación ³ causada por el caucho sintético. En este contexto, se plantea la interrogante: ¿Cuál es la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión y conductividad térmica ^{en} morteros de cemento?

El propósito ^{de} esta investigación fue determinar en qué medida el ⁵ porcentaje de caucho reciclado afecta en las propiedades mecánicas, resistencia en compresión y conductividad térmica de morteros de cemento. De modo que al emplear residuos de caucho se pueda contribuir significativamente al desarrollo de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción, abordando problemas tanto ambientales como funcionales.

Esta investigación tiene una gran relevancia connotada de justificación socioambiental, puesto que radica en su potencial abordando las preocupaciones ambientales sobre todo sociales ligada directamente a la salud de estas poblaciones que por las bajas temperaturas extremas que se dan durante las heladas en regiones de gran altitud en zonas de los andes y selva del Perú en un contexto de precariedad de viviendas predisponen a infecciones respiratorias y a otras enfermedades, en particular en la población que es más vulnerable, asociándose una importante morbilidad, a pesar de múltiples esfuerzos del estado y otras instituciones. Por otro lado, desde el punto de vista práctico, esta investigación responde a la urgente necesidad de eficiencia de recursos y ¹ en el sector de la construcción directamente con la reducción de residuos puesto que billones de neumáticos son desechados al año en el mundo, siendo el caucho sintético uno de los materiales sólidos más contaminantes del medio ambiente por su muy lenta degradación. En el presente estudio se plantea reciclar este material y procesarlo triturándolo para usarlo como aislante térmico en la construcción de techos y muros expuestos a heladas y friajes. Así mismo, como se propone un material con mejoradas propiedades para el aislamiento térmico se considera tecnológico ya que se alinea al impulso global, es decir busca la solución de problemas prácticos mediante el diseño de nuevos productos, con nuevos métodos y procedimientos ofreciendo una alternativa con dicho material como es el caucho reciclado en busca de mejorar ⁴⁸ el bienestar familiar y la calidad de vida de estas poblaciones. Con todo ello se minimizará el impacto de estos fenómenos meteorológicos en la salud de la población a la vez que se protege al medio ambiente.

Como objetivo principal se planteó el ³ determinar la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión y conductividad térmica en morteros de cemento. De forma específica se abordaron los objetivos específicos como desarrollar diseño de mezcla ² de morteros de cemento con adición de caucho reciclado, mediante revisión bibliográfica y ensayos preexperimentales. Determinar densidad aparente ² de morteros de cemento con adición de caucho reciclado mediante ASTM 188. Determinar porcentaje de porosidad ² de morteros de cemento con adición de caucho reciclado mediante evaluación microscópica. ³ Determinar la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión ² de morteros de cemento mediante la norma ASTM C109 Determinar ⁹ la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la conductividad térmica de morteros de cemento mediante la norma ASTM E1225.

Con respecto a la hipótesis de investigación se tuvo ³ que la adición de caucho reciclado reduce la resistencia en compresión y conductividad térmica en morteros de cemento.

Como investigaciones previas de nivel internacional, se consideró a Feng et al. (2022) en su investigación obtienen un agregado reciclado modificado con caucho al combinar agregado reciclado y partículas de caucho residual (RP) a fin de contribuir a reducir las emisiones de carbono. Se investigó ³ la resistencia a la compresión uniaxial y la deformación máxima con mezclas de diseño versátiles después de la exposición a diferentes temperaturas que van desde 25 °C (temperatura ambiente) a 600 °C. Los resultados de la prueba mostraron ²⁹ una relación negativa entre la resistencia a la compresión uniaxial y la tasa de reemplazo de agregado reciclado, partículas de caucho y la temperatura. Sin embargo, las partículas de caucho afectaron positivamente tanto la pérdida de la resistencia a la compresión uniaxial como la tensión máxima cuando se expuso a altas temperaturas. Por ende, el caucho reciclado posee propiedades térmicas favorables cuando se combina con material de construcción para las edificaciones.

De igual forma Nascimento et al (2021) en su estudio, tras valorar que la calefacción y refrigeración de los edificios es responsable de casi el 40 % de la demanda de electricidad y de alrededor del 33 % en un contexto de crisis energética y medioambiental mundial, plantean ² la necesidad de mejorar la eficiencia energética de los edificios y hacerlos más sostenibles. Tal es así que investigaron si el caucho triturado de neumáticos reciclados podía usarse como material aislante para paredes y techos planos y así brindar una ruta adicional para su reutilización y desviación de vertederos. Midieron la conductividad térmica del caucho triturado, así como de paredes y techos compuestos con inserción de caucho triturado. Se registró una conductividad térmica del caucho triturado de aproximadamente 0,25 W/m.K, mientras que la conductividad térmica de paredes con inserción de caucho triturado fue de 0,39 W/m.K. También se formuló una simulación numérica en el programa MATLAB en la luego de ser probada y validada se analizaron los efectos del espesor de la pared, la conductividad térmica del material, el color, la dimensión del espacio y el relleno de caucho en el factor de disminución, el retraso de tiempo y la ganancia total de calor interno. Las simulaciones indicaron una reducción del 21% en el factor de decremento y un aumento de alrededor de 1,63 veces en el retraso en comparación con la pared estándar. El

techo plano mostró una reducción del 23,3% en la ganancia de calor solar, al aumentar el espesor de la capa de caucho de 15 a 25 cm.

También Tang et al (2021) en su investigación preparan un concreto a partir de desechos de construcción y caucho reciclado tal que con este material de construcción verde se logre un desarrollo sostenible. La prueba experimental de emisiones de carbono verificó que resulta un material bajo en carbono. Además, se investigaron sus propiedades mecánicas residuales a temperaturas elevadas. Después de la exposición a 200, 400 y 600 C durante 60 min, la curva tensión-deformación, ¹ la resistencia a la compresión, la capacidad de absorción de energía y la resistencia al desconchado con proporciones de reemplazo de agregado reciclado de 50 y 100%, contenidos de caucho de 0, 5, 10, y el 15% fueron explorados con análisis microestructural. Los resultados indicaron que las partículas de caucho podrían reducir la fragmentación de las estructuras de construcción según la teoría de la presión de vapor. Por lo tanto, este estudio proporcionó una guía científica para el diseño de estructuras hechas con concreto a partir de desechos de construcción y caucho reciclado para resistir altas temperaturas.

Asimismo, Hejna et al. (2020) en su estudio hacen una revisión sistemática de investigaciones sobre los compuestos termoestables con contenido de caucho reciclado con diversas matrices de polímeros como base: poliuretanos, epoxi y otras resinas. La aplicación de caucho reciclado en compuestos poliméricos suele ser muy limitada debido a la débil adherencia entre el caucho reciclado y la superficie de la matriz polimérica. Por lo tanto, es necesario promover la interacción interfacial entre estos materiales para mejorar las propiedades de rendimiento de los compuestos de polímero/caucho reciclado. Una solución a este problema son las reacciones in situ entre la matriz y el relleno de caucho reciclado durante la formulación de materiales de construcción e ingeniería. Esto mejora significativamente las propiedades físicas del compuesto, incluyendo las térmicas.

Igualmente, Guo et al (2019) en su estudio evalúan los efectos del tamaño y peso de ³ las partículas de caucho reciclado contenido en las propiedades relevantes del concreto encauchado. Primero, el agregado de caucho tomo el lugar del agregado fino de diferentes ¹⁸ tamaños para producir concreto encauchado. En segundo lugar, se investigaron las propiedades mecánicas y de aislamiento térmico del concreto engomado. Finalmente, se ³¹ examinaron los análisis microestructurales del concreto cauchutado, incluido el microscopio electrónico de barrido (SEM) y la espectroscopia de distribución de energía (EDS). Los

resultados experimentales indicaron ² que la resistencia a la compresión uniaxial del concreto encauchado se redujo, mientras que la deformación máxima aumentó gradualmente y las propiedades de aislamiento térmico mejoraron con el aumento del contenido de caucho o la disminución del tamaño de las partículas de caucho. Además, las partículas de caucho afectaron los modos de falla, dotando al concreto de una fragilidad débil y una fuerte resistencia al agrietamiento. Además, se observó que la adherencia interfacial entre la matriz de caucho y los agregados era débil bajo SEM, lo que parecía ser un factor clave que reducía la resistencia del concreto encauchado.

Thai et al (2019) en su estudio obtienen un aerogel a partir de caucho reciclado de neumáticos triturados combinado con alcohol polivinílico (PVA) y glutaraldehído (GA) como formadores de enlaces cruzados mediante un método de congelación-secado que resulta costo-efectivo. Tras ello se investigan propiedades físicas principales para aplicaciones de alto valor, como el aislamiento térmico y acústico de edificios y la limpieza de derrames de petróleo. El aerogel de caucho tiene una densidad ultrabaja ($\rho_a=0,035 - 0,145$ g/cm³) y alta porosidad (Φ promedio = 84,31 - 96,20 %). Con un método de recubrimiento simple pero efectivo con metoxitrimetilsilano (MTMS), tanto el interior como el exterior de toda la superficie del aerogel de caucho pueden recubrirse bien y así presenta una superhidrofobicidad con un ángulo de contacto con el agua de hasta 134,4°. El aerogel de caucho exhibe excelentes propiedades de aislamiento térmico (K promedio = 0.035 - 0.047W/m.K), muy buena estabilidad térmica hasta 500°C y rigidez significativamente mejorada hasta un módulo de Young de E promedio = 458.12kPa, mucho mayor que el de poliestireno comercial. El aerogel de caucho muestra una muy buena durabilidad ya que recupera su forma original después de las pruebas de compresión. El aerogel de goma tiene un coeficiente de reducción de ruido (NRC) de 0,41 y funciona aproximadamente un 10% mejor que el absorbente de espuma comercial a 2000-3000 Hz. La capacidad máxima de absorción de aceite del aerogel de caucho en este trabajo es de 19,3 g/g, muy competitivo frente a los adsorbentes comerciales.

Por último, El-Nemr et al (2018) en su investigación usan polvo de caucho reciclado como vulcanizado en un molino de dos rodillos en presencia de diversas proporciones de curativos para desarrollar láminas de caucho reciclado desvulcanizado. Se prepararon elastómeros termoplásticos mezclando caucho reciclado o el caucho desvulcanizado reciclado con residuos de poliestireno expandido (EPS) en una proporción fija de 70 de

caucho/30 de EPS en ausencia o presencia de radiación gamma a 100 kGy. Como agente de acoplamiento se utilizó anhídrido maleico (MA) 1 wt% con respecto al caucho. Se observó que los parámetros mecánicos de las mezclas como las propiedades de tracción, reología, dureza (Shore D) y resistencia a la abrasión mejoraron en ambos casos.

Por último, en su estudio, Palma (2017) se enfocó en analizar el progreso y el estado actual de la vivienda rural. Su objetivo era proponer estrategias y recomendaciones que contribuyeran al desarrollo de viviendas rurales en las zonas altas de los Andes que fueran energéticamente eficientes. Para ello, consideró ¹² propuestas de diseño, intervención y construcción de viviendas rurales que habían sido implementadas previamente a través de diversos organismos, como el Gobierno del Perú y organizaciones no gubernamentales internacionales. En su investigación, Palma identificó una alta demanda de calefacción en las viviendas, especialmente durante el invierno, y sugirió que esta demanda podría reducirse significativamente mediante las siguientes estrategias: la eliminación de filtraciones en las viviendas, el aislamiento con una capa de 2 centímetros de espesor, lo que permitiría una reducción del 92.54% en la demanda energética total. Aparte de eso, hizo hincapié en lo crucial que es la ubicación y el tamaño ¹² de las ventanas en relación con la orientación de la casa, fomentando la circulación del aire y la absorción de calor mediante la radiación solar.

Como bases teóricas se partió desde el Caucho Reciclado como Material de Construcción. Según el Informe de la industria del caucho sintético mundial y de China, 2021-2027 de la página web Investigación y Mercados (Research & Markets) en el 2020 se produjeron 14,413 millones de toneladas de caucho sintético, siendo Asia el mayor productor con 8,365 millones de toneladas, en particular China, que en el 2021 produjo 8,117 millones de toneladas. La ¹¹ gestión de los desechos de caucho provenientes de neumáticos de autos, camiones, buses, trenes de aterrizaje de aeronaves, tractores y otros equipos agrícolas, así como ⁴⁵ vehículos industriales como carretillas elevadoras, y medios de transporte cotidianos como coches de bebé, carritos de compras, sillas de ruedas, bicicletas y motocicletas, representa un desafío ambiental significativo. Esto se debe a que el caucho no es biodegradable y puede perdurar durante varias décadas si no se gestiona su eliminación de manera adecuada. Por ello el reciclaje de neumáticos está ganando nueva solidez en la transición hacia una economía circular y se ha convertido en una prioridad de desarrollo en muchos países (Al-Kayiem, 2022). Cerca de 1,5 billones de neumáticos se convierten en desecho cada año en el mundo. Los neumáticos se pueden reencauchar y reutilizar hasta

cierto punto, pero no indefinidamente. El desecho de neumáticos es difícil de procesar para su reciclaje debido a su compleja combinación de materiales. Están hechos de diferentes materiales, generalmente un 14% es caucho natural, 27% caucho sintético producido a partir de hidrocarburos insaturados, 16% de tejidos y rellenos, 14% de alambres de acero para refuerzo y 28% de carbón negro (Al-Kayiem, 2022). A nivel mundial, se estima que sólo el 3.3% de neumáticos producidos anualmente se llega a reciclar (Ruwona et al, 2019). El destino es principalmente para la producción de material derivado (52 %) y combustible (19 %), siendo el primero el más favorable para el medio ambiente (Araujo-Morera, 2021). El caucho es el principal material reciclado a partir de los neumáticos desechados. La ingeniería estructural y la construcción lo utilizan para revestimiento de las áreas de juegos, estacionamientos, estabilización de bancos, relleno de superficies pavimentadas, muros de contención, control de erosión, barricadas de terraplenes de apuntalamiento, rellenos de terraplenes de carreteras y ajuste de asfalto, ya que poseen importantes propiedades como peso ligero, baja presión sobre el suelo, amortiguación mejorada, buenas propiedades de drenaje, masa térmica y buen aislamiento térmico (Hamndi, 2021; Kazmi, 2021). Como masa térmica el caucho puede preservar el calor y ser utilizado como medio de almacenamiento de energía térmica de bajo costo (Al-Kayiem, 2022), mientras que usado como aislante térmico en muros de viviendas evita que cambien bruscamente la temperatura de los ambientes interiores cuando lo hace la temperatura exterior, debido a sus óptimas propiedades térmicas demostradas en diversas investigaciones (Waseem, 2021). Esto resulta muy conveniente en nuestro país, dado que la población a menudo es afectada en su salud y economía por estar expuestas al impacto de las heladas y nevadas (en zonas altoandinas) y friajes (en la región de la selva). De utilizarse el polvo de caucho reciclado en muros y techos de viviendas, incluso en invernaderos para cultivos, se reduciría el impacto de las caídas de temperatura a veces extremas que se dan en heladas, nevadas y friajes.

Figura 1

Imagen de Caucho Reciclado (Mukhopadhyay et al., 2018)



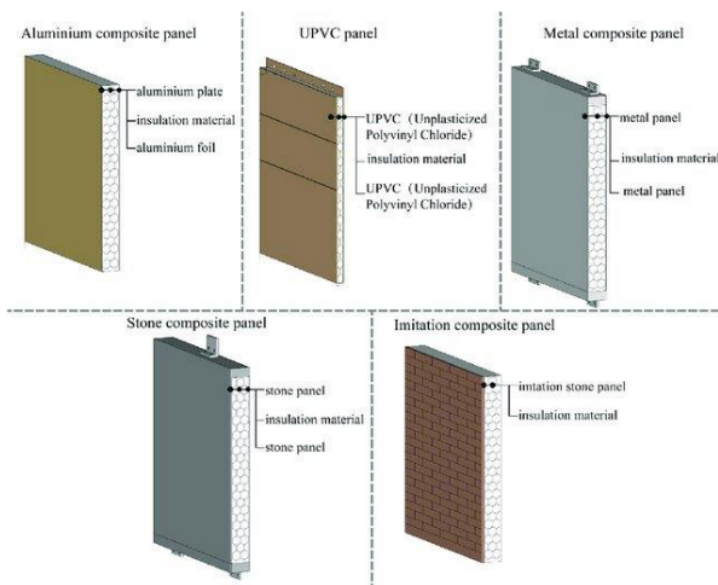
Las Heladas y Friajes por su parte, según el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), las heladas son fenómenos meteorológicos que se producen cuando la temperatura del aire desciende a muy bajas temperatura, incluso a veces a 0°C o menos. Estos fenómenos ocurren sobre todo en las regiones altoandinas, sobre los 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm), cuando el cielo está despejado o con muy escasa nubosidad. En la sierra sur del Perú, en ciertas regiones la temperatura promedio es de 0°C, pero durante las heladas la temperatura desciende aún más por debajo de sus valores normales. Las heladas generalmente inician después de la temporada de lluvias, en abril mientras que terminan en setiembre, registrándose las más bajas temperaturas entre junio y julio. Las consecuencias se dan en la salud de la población, sobre todo porque incrementa la incidencia de infecciones respiratorias agudas y otras, así como en la economía, dado que afecta a los cultivos. Las heladas son más frecuente e intensas en los departamentos de Puno, Cusco, Ayacucho, Huancavelica, Apurímac, Arequipa, Tacna, Moquegua, Pasco y Junín (SENAMHI, 2022). Las heladas se diferencian de las nevadas en que éstas últimas constituyen una precipitación sólida en forma copos de nieve, que ocurren arriba de los 3600 msnm, con cielo cubierto y en condiciones que la temperatura del aire se mantiene por debajo

de los 2 a 3°C, de lo contrario la nieve se funde antes de tocar el suelo. Pese a las diferencias, las nevadas también afectan la salud de la población y los cubren los pastos y cultivos e interrumpen el tránsito por las carreteras. Si se prolongan, la sensación de frío se torna intensa durante todo el día (SENAMHI, 2022). Por su parte los friajes también son fenómenos meteorológicos caracterizado también por bajas temperaturas, aunque menos extremas que las heladas y nevadas. Se presentan en la selva peruana por la llegada de aire frío que llega desde la Antártida pasando por Argentina, Uruguay, Paraguay, Brasil e ingresa por la zona sur de la selva peruana, principalmente Madre de Dios, y se desplaza hacia la zona central y norte de la selva, según la intensidad del fenómeno. El friaje comienza con lluvias de intensidad moderada a fuerte, tormentas eléctricas y viento de sur a norte, la cobertura nubosa hace caer las temperaturas máximas, después las nubes se disipan, dejando un cielo despejado o apenas nublado, acompañado de una corriente de aire frío que, en cuestión de horas, disminuye aún más la temperatura ambiente. El friaje afecta más a los departamentos de Madre de Dios, Ucayali, Puno, Huánuco, San Martín y Loreto según su intensidad, afectando más a la selva baja que a la selva alta. De forma similar que las heladas, la caída de la temperatura durante los friajes es mayor en la zona sur que en la central y norte. Las temperaturas máximas caen en promedio de 35-22 °C debido a la nubosidad, mientras que las mínimas caen de 22 -11°C por el ingreso de aire frío. En nuestro país de forma anual se dan de 6 a 10 friajes, durando 3, 7 y 10 días. Asimismo, con heladas y nevadas, la población y cultivos adaptados a una mayor temperatura, ven comprometidas su salud y economía (SENAMHI, 2022).

Otro concepto primordial en esta tesis es el aislamiento térmico. Este es uno de los componentes relevantes del sistema integrado por techos y muros, debido a que crea un ambiente confortable dentro de las viviendas protegiéndolo del frío, así mismo permite reducir los costos de energía de calefacción (Sika Group, 2020).

Figura 2

Diferentes paneles integrados de aislamiento térmico y decoración (Chen & Li, 2021).



II. METODOLOGÍA

2.1. Enfoque y tipo

Esta **investigación** aplicada se lleva a cabo con el propósito de abordar situaciones problemáticas específicas en el mundo real, centrándose en la evaluación de la eficacia del caucho reciclado como aislante térmico en techos y muros expuestos a heladas y friajes. A través de un análisis de su capacidad para mejorar las propiedades de aislamiento térmico en función de diversas condiciones experimentales y utilizando los instrumentos y materiales adecuados, este estudio contribuye directamente al reciclaje ambiental y a la aplicabilidad práctica en la industria de la construcción. Los hallazgos de este estudio podrán ser implementados en la práctica, permitiendo la utilización de este material en viviendas ubicadas en áreas afectadas por heladas y friajes, con un enfoque especial en las zonas altoandinas, lo que resulta en una mayor sostenibilidad en la construcción.

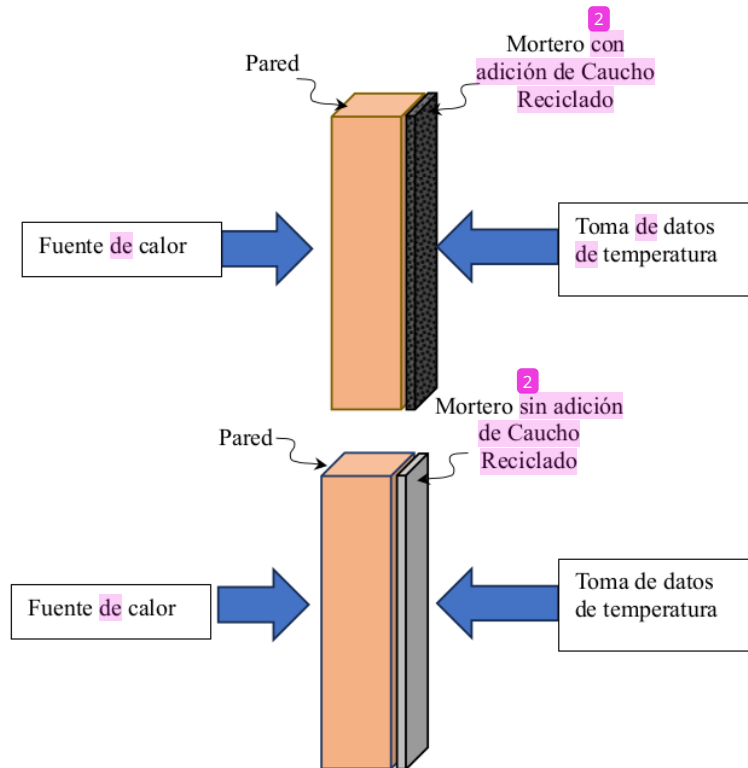
Esta investigación experimental se enfoca en el análisis de la eficacia del caucho reciclado como aislante térmico. Se evalúa su capacidad para actuar como una masa térmica cuando se incorpora en la estructura de muros y techos de viviendas, lo que le permite almacenar calor y liberarlo posteriormente para mitigar las bruscas variaciones de temperatura ocasionadas por las heladas y friajes. El enfoque de esta investigación es explorar en detalle la efectividad del caucho reciclado en esta función específica, profundizando en la comprensión de su principio de aislamiento térmico basado en la capacidad de actuar como una masa térmica. Los resultados de esta investigación aportarán información valiosa sobre cómo este material puede contribuir a sistemas más **eficientes**, complementando las estrategias previamente probadas en nuestro país con **el mismo** propósito.

2.2. Diseño de Investigación

Este **estudio** se basa en **un diseño** de investigación **experimental**. En consecuencia, se han formado dos grupos para el propósito de este estudio. Un grupo es el grupo control, que consiste en morteros sin la incorporación de caucho reciclado, y el otro es el grupo experimental, en el que se añade un porcentaje variable (10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35%, 40%) de la masa de cemento a utilizar.

Figura 3

Diseño del Experimento



2.3. Objeto de Estudio

Universo objetivo: Morteros de cemento

Población: Todos los morteros obtenidos por incorporación de caucho reciclado.

Muestra de estudio: ¹ La muestra de estudio estuvo conformada por: 120 morteros de dimensiones 50x50x50mm para ensayo de compresión y 120 morteros de dimensiones 225x80x20mm para ensayo de conductividad térmica; obtenidos por incorporación de caucho reciclado en distintos diferentes porcentajes.

Tabla 1*Matriz de muestras*

Muestras	Edad de Ensayo			N° total de muestras
	e1: 7 días	e2: 14 días	e3: 28 días	
a1	a1. e1 (5r)	a1. e2 (5r)	a1. e3 (5r)	15
a2	a2. e1 (5r)	a2. e2 (5r)	a2. e3 (5r)	15
a3	a3. e1 (5r)	a3. e2 (5r)	a3. e3 (5r)	15
a4	a4. e1 (5r)	a4. e2 (5r)	a4. e3 (5r)	15
a5	a5. e1 (5r)	a5. e2 (5r)	a5. e3 (5r)	15
a6	a6. e1 (5r)	a6. e2 (5r)	a6. e3 (5r)	15
a7	a7. e1 (5r)	a7. e2 (5r)	a7. e3 (5r)	15
a8	a8. e1 (5r)	a8. e2 (5r)	a8. e3 (5r)	15
N° total de muestras				120

Niveles de Estudio**Tabla 2***Niveles de variable independiente*

VARIABLE INDEPENDIENTE	NIVELES DE ESTUDIO
Caucho reciclado (%)	a1
	a2
	a3
	a4
	a5
	a6
	a7
	a8
VARIABLES DEPENDIENTES	
Resistencia en compresión (MPa)	
Conductividad térmica (W/m ^o K)	

Leyenda

a1: 0% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a2: 10% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a3: 15% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a4: 20% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a5: 25% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a6: 30% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a7: 35% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

a8: 40% de Caucho reciclado - (5 repeticiones)

Variable independiente: Porcentaje de caucho reciclado en 0%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% y 40%.

Variables dependientes:

- Resistencia a la compresión (MPa)
- Conductividad térmica (W/m °K)

4

2.4. Instrumentos, técnicas, equipos de laboratorio de recojo de datos

2.4.1. Instrumentos de recojo de datos

En este estudio, se utilizaron fichas de observación directa como herramienta de recolección de datos. Estas fichas representaron instrumentos esenciales en la investigación, ya que permitieron la captura de información mediante la observación de eventos, comportamientos o situaciones específicas en un entorno particular. Las fichas de observación ofrecieron una estructura organizativa y sistemática para registrar datos durante la observación de fenómenos, lo que posibilitó la recopilación de información detallada y objetiva en diversos contextos. Además, estas fichas facilitaron la revisión, el análisis y la comparación de datos, lo que contribuyó a mantener la rigurosidad metodológica, identificar patrones, respaldar conclusiones y generar conocimiento sólido en investigaciones científicas, estudios sociológicos, análisis de comportamiento humano y otras disciplinas. De esta manera, se mejoró la calidad y la validez de los resultados obtenidos (Olmedo, s.f).

Además, se utilizaron tablas y gráficos, y para evaluar la significación estadística, ¹ se aplicó la prueba t-student con un nivel de confianza del 95%, un error inferior al 5% y un nivel de significación de p menor a 0.05

¹ 2.4.2. Técnicas de recojo de datos

Para la recopilación de datos, se utilizó el método de observación directa. Este método de investigación implicó la observación y registro de eventos, comportamientos y situaciones en un entorno natural sin intervención ni manipulación activa de la situación. La observación directa desempeñó un papel esencial al proporcionar datos objetivos y contextualizados en contextos naturales, lo que permitió la identificación de patrones, la generación de hipótesis y la validación de resultados en diversas disciplinas. Desde la investigación científica hasta el estudio del comportamiento humano, el diseño de productos y la educación, la observación directa enriqueció la comprensión, el descubrimiento y facilitó la toma de decisiones fundamentadas (Okdiario, 2019). En este caso, se fabricaron un total de 120 morteros, que fueron sometidos a ensayos tanto de resistencia a la presión como de conductividad térmica

¹ 2.4.3. Equipos de laboratorio de recojo de datos

Máquina de ensayo compresivo: Empleada para realizar el ensayo de resistencia en compresión.

Microscopio óptico: Empleado para analizar y caracterizar las propiedades morfológicas de las muestras.

Espectrómetro infrarrojo: Empleado para realizar la caracterización de química de los morteros.

²⁵ 2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

2.5.1. Técnicas de procesamiento

Etapal: En esta fase se recolectaron todos los insumos para la conformación de morteros con las adiciones caucho ² reciclado. El caucho reciclado se obtuvo de la trituración de neumáticos en desuso, con una caracterización superficial mediante microscopía óptica. El cemento a utilizar fue el Cemento Portland Tipo 1

Etapla 2: Una vez obtenidos los insumos, se procedió a la realización de ensayos preliminares del diseño de mezcla y de la toma de datos de conductividad térmica según la

norma ya mencionada; esto permitió establecer el diseño de mezcla a utilizar en todo el proceso de investigación, además de adquirir habilidades en la toma de datos de conductividad térmica.

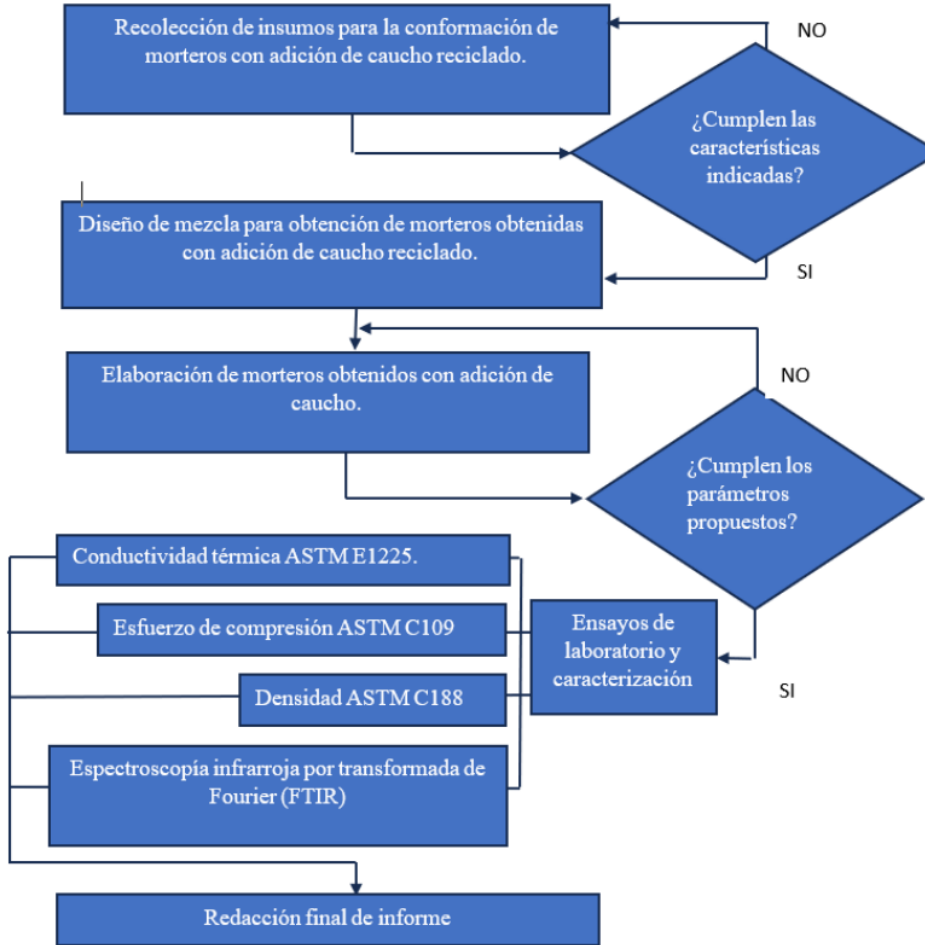
Etapa 3: En esta etapa se realizó el desarrollo de los morteros para la toma de datos finales de los ensayos de compresión y de conductividad térmica. El caucho reciclado fue adicionado en función de la masa de cemento a utilizar; los morteros se confeccionaron con relación agua/cemento constante (0.45); la relación agregado: cemento también se mantendrá constante 3:1. Considerando como tiempo de mezcla de 15 minutos en todos los casos. Después, las muestras se situaron en sus moldes respectivos y se rotularán. Se dejó curar 24 horas a temperatura ambiente, para luego ser desmoldados. Luego se curará a 3 edades (7, 14 y 28 días), en cada uno de ellas se evaluará tanto a la resistencia a la compresión como la conductividad térmica.

Etapa 4: Llegado a cumplir las edades propuestas. Se realizaron los ensayos propuestos además de métodos de caracterización adicionales. Entre la caracterización adicional tenemos los datos de densidad aparente mediante ASTM C188 y porosidad mediante microscopía óptica. También se empleará la caracterización mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), a fin de determinar los grupos funcionales propios del proceso de curado de morteros de cemento. Los ensayos mecánicos se realizarán de forma aleatoria, con un número de 05 repeticiones para el ensayo de compresión ASTM C109, como también en el ensayo de conductividad térmica ASTM E1225. Cabe señalar que todos los ensayos se realizarán a 7, 14 y 28 días de edad.

Etapa 5: En la etapa siguiente, los datos recolectados previamente serán sometidos a un análisis estadístico de varianza. Este proceso habilitará la creación de un informe exhaustivo que documentará los hallazgos y avances de la investigación.

Figura 4

Diagrama de flujo del procedimiento experimental



43
2.5.2. Análisis de Datos

La revisión y análisis de la información recopilada fue llevada a cabo mediante un proceso eficiente de registro y organización de cada dato obtenido en el transcurso de la investigación experimental. Inicialmente, se registraron los resultados preliminares en un cuaderno de notas para documentarlos de manera sistemática. Posteriormente, se procedieron a la evaluación de estos datos mediante una prueba de hipótesis unifactorial, con un nivel de confiabilidad del 95%, un error menor al 5%, y un nivel de significación de

p inferior a 0.05. Este análisis estadístico y el modelo matemático se aplicó con el propósito de verificar la similitud entre los grupos objeto de estudio. De esta manera, se busca respaldar y fundamentar las conclusiones acerca de las similitudes y diferencias en los datos recopilados durante la investigación.

2.6. Aspectos éticos en investigación

2.6.1. Consentimiento informado

El consentimiento informado se refiere a un procedimiento en el cual los involucrados en la investigación adquieren plena conciencia de los objetivos, métodos y posibles peligros asociados al estudio. Los participantes deben dar su autorización de manera voluntaria y, previamente, después de haber sido debidamente instruidos con información completa y comprensible acerca de la investigación (Denison, 2023).

2.6.2. Confidencialidad y privacidad

La confidencialidad en la investigación se refiere a la obligación de proteger la información personal de los participantes y garantizar que sus datos no sean divulgados o identificables. La privacidad implica respetar el derecho de las personas a mantener el control sobre su información personal y mantenerla fuera del alcance de terceros no autorizados (Denison, 2023).

2.6.3. Beneficio y no maleficencia

El principio de beneficencia se relaciona con la obligación de que la investigación tenga el potencial de beneficiar a la sociedad o a los participantes, ya sea directa o indirectamente. La no maleficencia implica evitar causar daño innecesario a los participantes o al medio ambiente como resultado de la investigación (Denison, 2023).

2.6.4. Divulgación de conflictos de interés

La divulgación de conflictos de interés se refiere a la responsabilidad de los investigadores de revelar cualquier interés financiero, profesional o personal que podría influir en sus resultados, decisiones o interpretaciones. Esto garantiza la transparencia y la integridad en la investigación (Denison, 2023).

2.6.5. Revisión ética y cumplimiento normativo

La revisión ética se refiere al proceso por el cual un comité encargado de la ética de la investigación examina un estudio para garantizar que cumple con las normas éticas y legales pertinentes. La conformidad normativa implica la adhesión a las regulaciones y directrices establecidas por instituciones, entidades gubernamentales y órganos éticos (Denison, 2023).

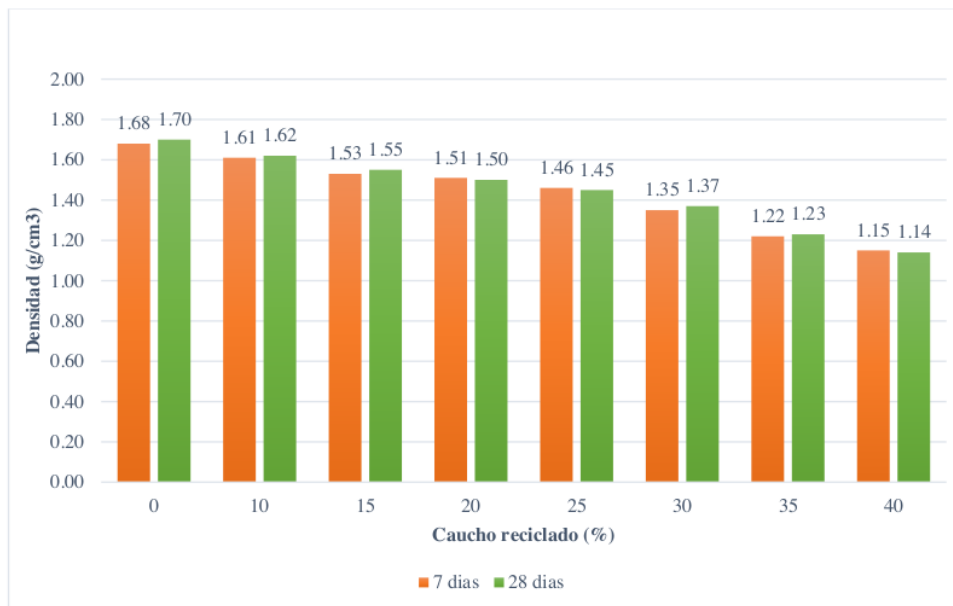
III. RESULTADOS

3.1. Descripción de resultados

3.1.1. Densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 5

Densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado



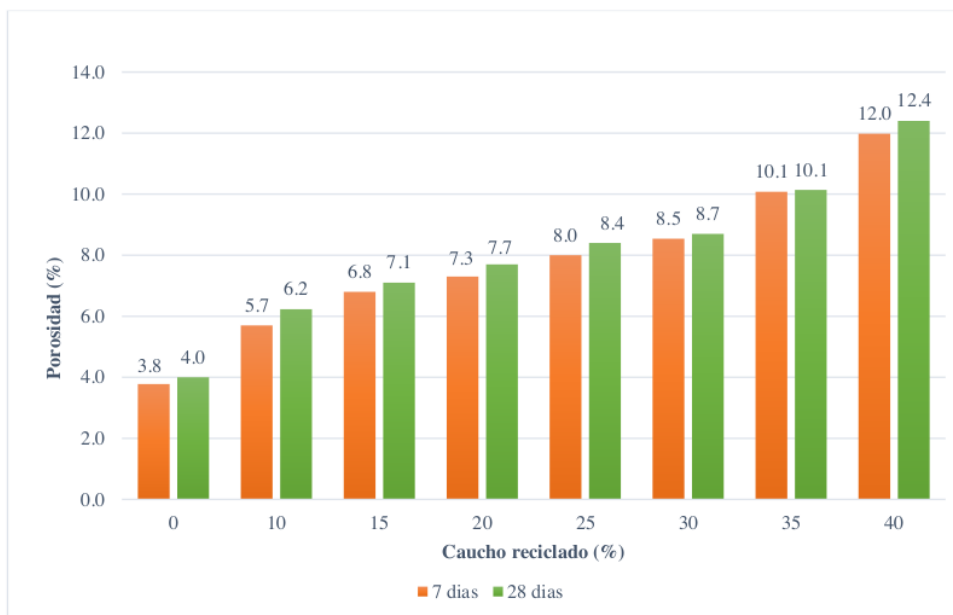
En la figura mostrada, se presenta un análisis de la propiedad de densidad, medida en g/cm^3 en morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a través del tiempo de ensayo. El grafico parte desde los resultados del grupo control con un contenido de 0% de caucho reciclado para tomar de referencia inicial. Luego se presenta el grupo experimental con niveles de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% y 40% de caucho reciclado. Asimismo, se observan resultados a través del tiempo, en 7 y 28 días. Cada barra en el grafico muestra el resultado que engloba cierto nivel de caucho reciclado, a cierta edad y su respectiva densidad. A primera vista, a los 7 días, notamos que el mortero de cemento sin caucho reciclado (0%) muestra una densidad inicial relativamente alta de 1.68 g/cm^3 . Esto sugiere que la mezcla de cemento sin la incorporación de caucho reciclado es más densa en esta etapa temprana de curado. Sin embargo, a medida que incrementamos el porcentaje de caucho reciclado en la mezcla, la densidad se reduce de forma constante. La reducción en la densidad se vuelve más pronunciada a medida que el porcentaje de incorporación de caucho

reciclado aumenta, como se evidencia al llegar a 10% de incorporación, donde la densidad se reduce a 1.61 g/cm³, y esta tendencia continúa a lo largo de la serie. La caída más significativa en la densidad ocurre al pasar del 30% al 35% de incorporación, donde la densidad desciende de 1.35 g/cm³ a 1.22 g/cm³. Ahora, a los 28 días, notamos una diferencia en la densidad inicial del mortero de cemento sin caucho reciclado (0%), que es ligeramente más alta en comparación con los 7 días, alcanzando 1.70 g/cm³. Esto sugiere que, con un tiempo de curado más prolongado, la densidad puede aumentar ligeramente. Sin embargo, la tendencia general de reducción en la densidad ¹ al aumentar el porcentaje de incorporación de caucho reciclado se mantiene constante. La ² disminución en la densidad es gradual y continua mientras se aumenta el porcentaje de incorporación de caucho reciclado, con la densidad más baja registrada nuevamente en el 40% de incorporación, con un valor de 1.14 g/cm³. Por lo que podemos decir que este gráfico demuestra de manera clara cómo la inclusión de caucho reciclado influye en la densidad de los morteros de cemento en dos momentos de tiempo diferentes (7 y 28 días). Además, muestra que, en términos generales, la densidad se reduce ¹ a medida que se aumenta el porcentaje de caucho reciclado agregado, aunque se nota que el tiempo de curado más prolongado a los 28 días resulta en una densidad ligeramente mayor en comparación con los 7 días para todas las proporciones de incorporación de caucho reciclado. Esto podría indicar que el material se sigue compactando y densificando a medida que el tiempo de curado se prolonga, aunque la ³ influencia de la incorporación de caucho reciclado en la reducción de la densidad persiste en ambas edades.

3.1.2. Porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 6

Porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado



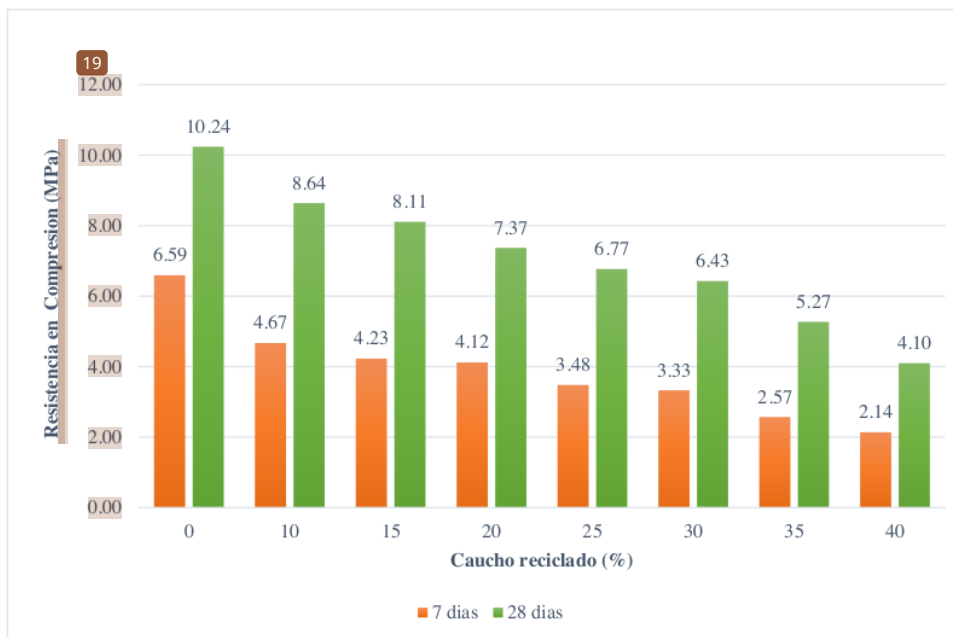
En la figura mostrada, se presenta un análisis de la propiedad de porosidad en morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a lo largo del tiempo de ensayo. El gráfico comienza con los resultados del grupo control, que no contiene caucho reciclado (0%), y sirve como punto de referencia inicial. Luego se exhiben los resultados del grupo experimental, que abarcan niveles de incorporación de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% y 40% de caucho reciclado. Además, se muestran los resultados a lo largo del tiempo, tanto a los 7 días como a los 28 días. Cada barra en el gráfico representa el resultado que engloba un cierto nivel de caucho reciclado, a una edad específica y su respectiva porosidad. En esta representación, podemos observar cómo la incorporación de caucho reciclado influye en la porosidad de los morteros de cemento a lo largo del tiempo de curado. A los 7 días, la porosidad de los morteros de cemento se analiza minuciosamente. Se inicia con el grupo de control, donde no se ha añadido caucho reciclado (0%), y se observa una porosidad inicial del 3.8%. Esto indica que el mortero de cemento ya presenta una cierta cantidad de porosidad en esta etapa temprana del proceso de curado. Mientras se aumenta el porcentaje de incorporación de caucho reciclado, la porosidad también aumenta significativamente. Por

ejemplo, al agregar un 10% de caucho reciclado, la porosidad se eleva a un 5.7%, lo que sugiere que la inclusión de caucho reciclado en la mezcla aumenta considerablemente la porosidad en comparación con el grupo de control. Esta tendencia ascendente se mantiene constante a medida que se aumenta el nivel de incorporación. La mayor porosidad registrada en esta etapa se observa en el 40% de incorporación, donde alcanza un 12%. En el análisis a los 28 días, se aprecia un ligero incremento en la porosidad en comparación con los resultados a los 7 días. Por ejemplo, en el grupo de control (0%), la porosidad pasa del 3.8% a un 4% a los 28 días. Esto sugiere que el material sigue desarrollando cierta porosidad incluso con un tiempo de curado más prolongado. La tendencia general de aumento en la porosidad con la incorporación de caucho reciclado se mantiene constante a lo largo de las dos edades de curado. Esto significa que, a los 28 días, la influencia de la incorporación de caucho reciclado en el aumento de la porosidad persiste. La mayor porosidad se sigue registrando en el nivel de incorporación del 40%, donde alcanza un valor de 12.4%, lo que confirma que una mayor cantidad de caucho reciclado en la mezcla resulta en una porosidad significativamente mayor a lo largo del tiempo.

3.1.3. Resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 7

Resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado



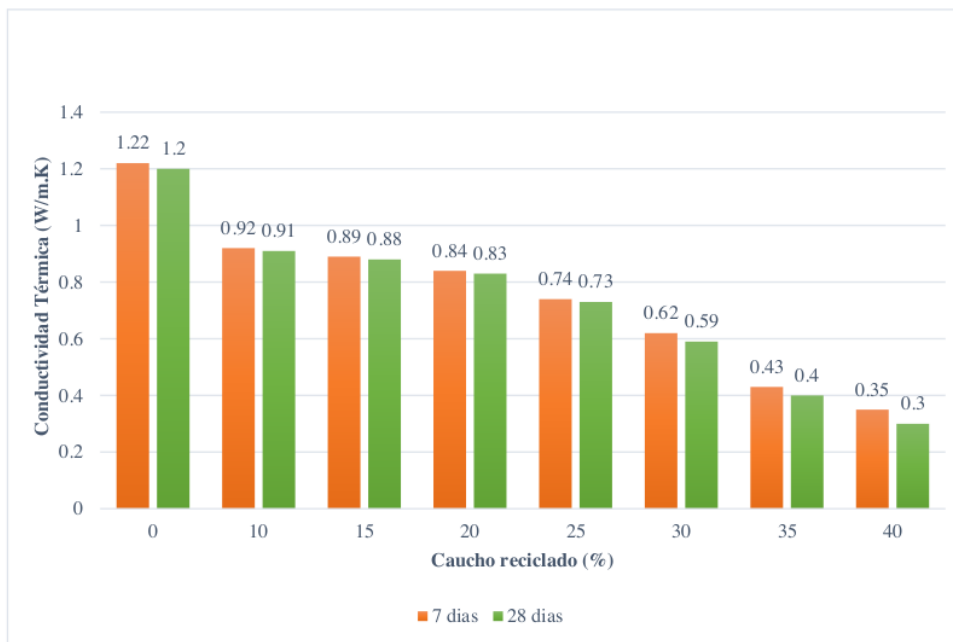
En la figura mostrada, se presenta un análisis de la propiedad de resistencia en compresión en MPa en morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a lo largo del tiempo de ensayo. El gráfico parte desde los resultados del grupo control con un contenido de 0% de caucho reciclado como punto de referencia inicial. Luego se exhiben los resultados del grupo experimental con niveles de 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% y 40% de caucho reciclado. Asimismo, se observan los resultados a lo largo del tiempo, en 7 y 28 días. Cada barra en el gráfico muestra el resultado que engloba un cierto nivel de caucho reciclado, a una edad específica y su respectiva resistencia en compresión en MPa. A los 7 días, el gráfico nos proporciona una visión detallada de la resistencia en compresión de los morteros de cemento bajo diferentes niveles de incorporación de caucho reciclado. Comenzando con el grupo de control, que contiene un 0% de caucho reciclado, observamos que la resistencia en compresión inicial es relativamente alta, alcanzando 6.59 MPa. Esto indica que el mortero de cemento sin caucho reciclado es más resistente a la compresión en

esta etapa temprana del proceso de curado. Conforme avanzamos a los niveles de incorporación de caucho reciclado, notamos una disminución significativa en la resistencia en compresión. Por ejemplo, al agregar un 10% de caucho reciclado, la resistencia se reduce a 4.67 MPa, y esta tendencia de disminución persiste a medida que aumenta el nivel de incorporación. La mayor reducción en la resistencia se observa al pasar del 30% al 35% de incorporación, donde la resistencia cae de 3.33 MPa a 2.57 MPa. Estos resultados sugieren que la inclusión de cantidades crecientes de caucho reciclado en la mezcla de mortero de cemento tiene un impacto notable en la resistencia en compresión a los 7 días. En el análisis a los 28 días, se aprecia un panorama diferente. El grupo de control, con 0% de caucho reciclado, sigue manteniendo la resistencia en compresión más alta, pero ahora alcanza los 10.24 MPa. Esto sugiere que el tiempo de curado prolongado ha fortalecido significativamente el material sin la incorporación de caucho reciclado. A medida que avanzamos en los niveles de incorporación de caucho reciclado, la resistencia en compresión sigue reduciendo, pero de manera menos pronunciada en comparación con los 7 días. Por ejemplo, a un 10% de incorporación, la resistencia se reduce a 8.64 MPa, y esta tendencia continúa a medida que aumenta el nivel de incorporación. La mayor reducción en la resistencia a los 28 días se registra nuevamente al pasar del 30% al 35% de incorporación, donde la resistencia se reduce de 6.43 MPa a 5.27 MPa. Estos resultados indican que el tiempo de curado prolongado permite una cierta recuperación en la resistencia, aunque la influencia de la incorporación de caucho reciclado en la reducción de la resistencia persiste en ambas edades de curado. Por lo que se puede apreciar cómo la resistencia en compresión de los morteros de cemento se ve significativamente afectada por la incorporación de caucho reciclado tanto a los 7 días como a los 28 días de curado. Además, se destaca que el tiempo de curado más largo a los 28 días resulta en una disminución menos pronunciada en la resistencia en comparación con los 7 días, pero la influencia de la incorporación de caucho reciclado en la reducción de la resistencia persiste en ambas edades.

3.1.4. Conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 8

Conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado



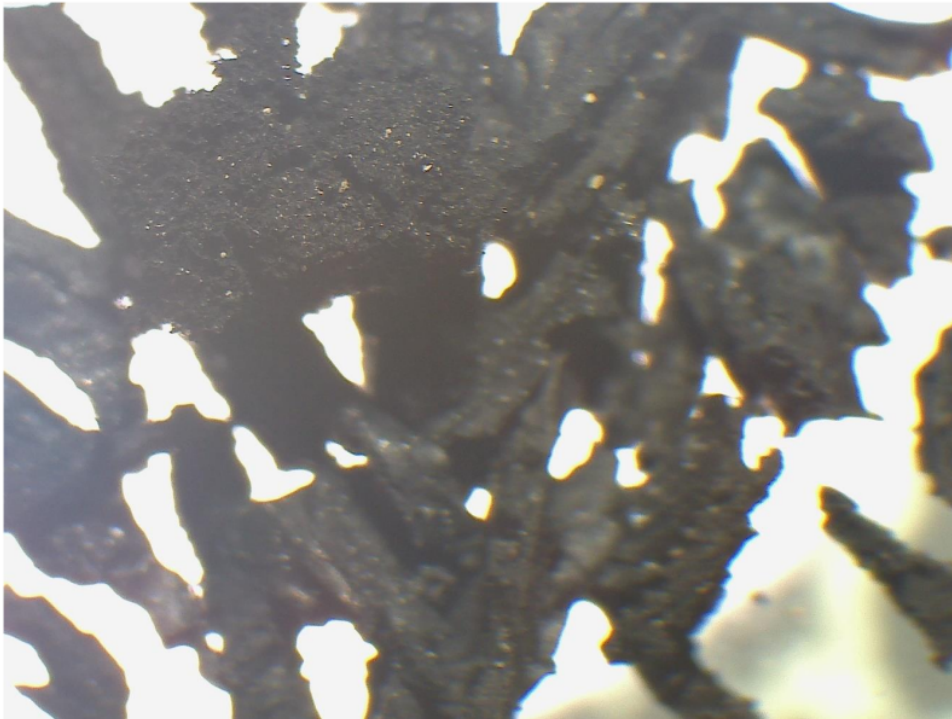
En la figura presentada, se muestra un análisis de la propiedad de conductividad térmica en $W/m \cdot K$ en morteros de cemento bajo la influencia de la incorporación de caucho reciclado a lo largo del período de ensayo. El gráfico comienza con los resultados del grupo de control, que contiene un 0% de caucho reciclado y se utiliza como referencia inicial. Luego se exponen los resultados del grupo experimental con niveles de incorporación de caucho reciclado del 10%, 15%, 20%, 25%, 30%, 35% y 40%. Además, se muestran los resultados a lo largo del tiempo, a los 7 y 28 días. Cada barra en el gráfico representa el resultado que engloba un cierto nivel de caucho reciclado, en una etapa específica y su respectiva conductividad térmica en $W/m \cdot K$. A los 7 días, el gráfico ofrece una visión detallada de cómo la conductividad térmica se comporta en los morteros de cemento bajo diferentes niveles de incorporación de caucho reciclado. Comenzando con el grupo de control que contiene un 0% de caucho reciclado, observamos que la conductividad térmica inicial es de $1.22 W/m \cdot K$, indicando que el mortero de cemento sin caucho reciclado es

relativamente buen conductor de calor en esta etapa temprana del proceso de curado. Conforme avanzamos a los niveles de incorporación de caucho reciclado, notamos una disminución significativa en la conductividad térmica. Por ejemplo, al agregar un 10% de caucho reciclado, la conductividad térmica se reduce a 0.92 W/m·K, y esta tendencia de reducción persiste ¹ a medida que aumenta el nivel de incorporación. La mayor reducción en la conductividad térmica se observa al pasar del 30% al 35% de incorporación, donde la conductividad térmica se reduce de 0.62 W/m·K a 0.43 W/m·K. Estos resultados destacan que la inclusión de mayores cantidades de caucho reciclado en la mezcla de mortero de cemento tiene un impacto notable en la disminución de la conductividad térmica a los 7 días. En la serie de datos de 28 días, el grupo de control con 0% de caucho reciclado sigue manteniendo la conductividad térmica más alta, pero ahora alcanza los 1.2 W/m·K. A medida que avanzamos en los niveles de incorporación de caucho reciclado, la conductividad térmica sigue reduciendo o se mantiene relativamente constante, dependiendo de los niveles de incorporación. Por ejemplo, a un 10% de incorporación, la conductividad térmica se reduce a 0.91 W/m·K, y esta tendencia continúa a medida que aumenta el nivel de incorporación. ³ Es importante señalar que la influencia de la incorporación de caucho reciclado en la reducción de la conductividad térmica persiste en ambas edades de curado. A diferencia de lo observado en algunas propiedades, como la resistencia en compresión, donde el tiempo de curado prolongado puede permitir cierta recuperación de las propiedades, en el caso de la conductividad térmica, esta no experimenta recuperación. En lugar de eso, se mantiene relativamente constante o se reduce aún más con el tiempo, dependiendo de la cantidad de caucho reciclado añadido. ² La influencia de la incorporación de caucho reciclado sigue siendo evidente a los 28 días, y no hay un aumento en la conductividad térmica con el tiempo.

3.1.5. Caracterización morfológica de caucho reciclado

Figura 9

Morfología de caucho reciclado por microscopía óptica

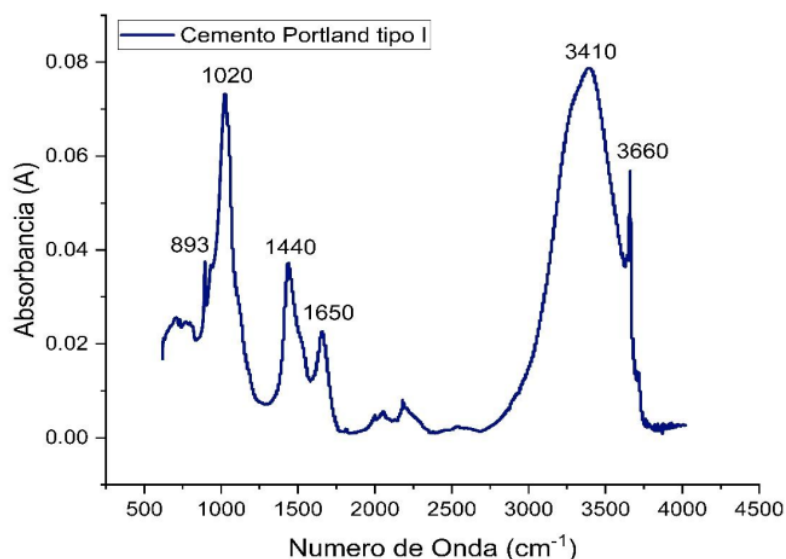


La imagen mostrada presenta una vista detallada de la superficie del caucho reciclado triturado, capturada mediante microscopía óptica a una magnificación de 2 aumentos. Los filamentos de color negro que dominan la imagen representan los componentes del caucho reciclado. Estos filamentos presentan una apariencia intrincada y se entrelazan en diferentes direcciones, creando una estructura compleja. Las rugosidades y texturas en la superficie del material son especialmente notables. Estas rugosidades muestran variaciones en la altura y la forma de la superficie del caucho, lo que sugiere que el proceso de triturado ha dado como resultado una superficie no uniforme. Estas irregularidades pueden ser de diferentes tamaños y formas, lo que agrega complejidad y detalle a la imagen. Además, es posible que se observen zonas más claras o áreas donde la textura es más suave, lo que podría indicar diferencias en la densidad o la composición del caucho reciclado en diferentes partes de la muestra.

3.1.6. Caracterización química de cemento Portland tipo I

Figura 10

Espectro FTIR de cemento Portland tipo I



La figura mostrada, presenta el espectro FTIR que nos permite adentrarnos en la composición química del cemento Portland tipo I, fundamental en la elaboración de morteros con inclusión de caucho reciclado. Este análisis se llevó a cabo mediante microscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR). En la gráfica, en el eje horizontal, encontramos el número de onda en cm^{-1} , que señala la ubicación de los picos en el espectro. Mientras que, en el eje vertical, se refleja la absorbancia, indicando cuánta luz es absorbida por el cemento en función de la frecuencia. Dentro de este espectro, se revelan varios picos de absorción que desvelan información crucial acerca de la composición química del cemento: como por ejemplo a 893 cm^{-1} , se evidencian vibraciones de enlaces Si-O-Si, confirmando la presencia de silicatos incluyendo minerales como alita, belita y ferrita, componentes típicos del cemento Portland. El pico a 1020 cm^{-1} está relacionado con vibraciones de enlaces Si-O, lo que confirma aún más la presencia de silicio en la muestra. A 1440 cm^{-1} , se aprecia un pico que sugiere la existencia de grupos carbonatos (CO_3^{2-}), que suelen formarse debido a la interacción con el dióxido de carbono del aire. El pico a 1650 cm^{-1} se encuentra en la región

de vibraciones de enlaces C=O, indicando posiblemente la presencia de carbonatos o grupos carbonilo (C=O) en el cemento. Por último, los picos a 3410 cm^{-1} y 3660 cm^{-1} sugieren vibraciones de grupos OH , lo que podría estar vinculado a la existencia de agua o hidroxilos en la muestra. Estos grupos desempeñan un papel fundamental en el proceso de hidratación del cemento.

3.2. Prueba de hipótesis

3.2.1. Densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 11

Prueba de hipótesis de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	8.41	1.682	0.00167
10%	5	8.04	1.608	0.00317
15%	5	7.65	1.53	0.00175
20%	5	7.54	1.508	0.00217
25%	5	7.31	1.462	0.00357
30%	5	6.73	1.346	0.00243
35%	5	6.08	1.216	0.00243
40%	5	5.74	1.148	0.00217

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.22111	7	0.17444429	72.0844156	8.83212E-18	2.31274119
Dentro de los grupos	0.07744	32	0.00242			
Total	1.29855	39				

28

Una prueba de hipótesis es una herramienta estadística utilizada para evaluar afirmaciones o suposiciones sobre poblaciones o muestras de datos. La principal razón para llevar a cabo una prueba de hipótesis radica en la necesidad de tomar decisiones basadas en evidencia estadística sólida en lugar de depender únicamente de observaciones o intuiciones. En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la densidad de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un periodo de 7 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la densidad de los morteros con y sin incorporación de caucho reciclado. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 72.08 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el

alfa (α) del 0.05, siendo $8.83E^{-18}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la densidad de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 7 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

Figura 12

Prueba de hipótesis de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	8.52	1.704	0.00113
10%	5	8.12	1.624	0.00088
15%	5	7.73	1.546	0.00058
20%	5	7.49	1.498	0.00082
25%	5	7.26	1.452	0.00127
30%	5	6.85	1.37	0.0004
35%	5	6.13	1.226	0.00158
40%	5	5.69	1.138	0.00097

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.3000775	7	0.18572536	194.731698	2.21603E-24	2.31274119
Dentro de los grupos	0.03052	32	0.00095375			
Total	1.3305975	39				

En esta figura, se lleva a cabo una ¹prueba de hipótesis para investigar la densidad de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un período de 28 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la densidad de los morteros con y sin

incorporación de caucho reciclado. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 194.73 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) del 0.05, siendo $2.22E^{-24}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la densidad de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 28 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

3.2.2. Porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 13

Prueba de hipótesis de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	19.05	3.81	0.0015
10%	5	28.58	5.716	0.00248
15%	5	34.08	6.816	0.00243
20%	5	36.6	7.32	0.00135
25%	5	40.12	8.024	0.00273
30%	5	42.43	8.486	0.00333
35%	5	50.57	10.114	0.00213
40%	5	60.17	12.034	0.00138

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	226.31568	7	32.3308114	14924.7831	2.37972E-54	2.31274119
Dentro de los grupos	0.06932	32	0.00216625			
Total	226.385	39				

En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la porosidad de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un período de 7 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%,

representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la porosidad de los morteros con y sin incorporación de caucho reciclado. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 14924.78 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) del 0.05, siendo $2.38E^{-54}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la porosidad de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 7 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

Figura 14

Prueba de hipótesis de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0%	5	20.02	4.004	0.00223
10%	5	31.11	6.222	0.00447
15%	5	35.6	7.12	0.00225
20%	5	38.59	7.718	0.01347
25%	5	42.07	8.414	0.00383
30%	5	43.49	8.698	0.00837
35%	5	50.54	10.108	0.00267
40%	5	62.12	12.424	0.00258

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	222.97303	7	31.85329	6391.430148	1.84599E-48	2.312741187
Dentro de los grupos	0.15948	32	0.00498375			
Total	223.13251	39				

En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la porosidad de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un período de 28 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la porosidad de los morteros con y sin incorporación de caucho reciclado. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 6391.43 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) del 0.05, siendo $1.84E^{-48}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la porosidad de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 28 días. En consecuencia, se

acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

⁶
3.2.3. Resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 15

Prueba de hipótesis de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	32.95	6.59	0.01075
10%	5	23.35	4.67	0.0088
15%	5	21.13	4.226	0.01983
20%	5	20.62	4.124	0.04163
25%	5	17.4	3.48	0.00745
30%	5	16.66	3.332	0.03267
35%	5	12.84	2.568	0.01752
40%	5	10.68	2.136	0.00828

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	66.848558	7	9.54979393	519.964278	4.3267E-31	2.31274119
Dentro de los grupos	0.58772	32	0.01836625			
Total	67.436278	39				

En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la resistencia en compresión de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un periodo de 7 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la resistencia en **compresión de los morteros con** y sin incorporación **de caucho reciclado. En** este caso, el valor F calculado

es mayor que el valor crítico para F, siendo 519.96 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) del 0.05, siendo $4.33E^{-31}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la resistencia en compresión de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 7 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

Figura 16

Prueba de hipótesis de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	51.22	10.244	0.00803
10%	5	43.19	8.638	0.00557
15%	5	40.56	8.112	0.00697
20%	5	36.86	7.372	0.00557
25%	5	33.38	6.676	0.09203
30%	5	32.15	6.43	0.19125
35%	5	26.33	5.266	0.01483
40%	5	20.48	4.096	0.01933

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	131.8220575	7	18.8317225	438.4823913	6.42092E-30	2.312741187
Dentro de los grupos	1.37432	32	0.0429475			
Total	133.1963775	39				

En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la resistencia en compresión de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un período de 28 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada.

La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la resistencia en **compresión de los morteros con** y sin incorporación **de** caucho **reciclado**. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 438.48 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) del 0.05, siendo $6.42E^{-30}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas **en la resistencia en compresión de los morteros de cemento** debido a la incorporación **de** caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 28 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

3.2.4. Conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Figura 17

Prueba de hipótesis de conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	6.11	1.222	0.00457
10%	5	4.61	0.922	0.00057
15%	5	4.45	0.89	0.0024
20%	5	4.22	0.844	0.00268
25%	5	3.71	0.742	0.00067
30%	5	3.12	0.624	0.00093
35%	5	2.14	0.428	0.00137
40%	5	1.74	0.348	0.00077

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	2.80991	7	0.40141571	230.037659	1.64393E-25	2.31274119
Dentro de los grupos	0.05584	32	0.001745			
Total	2.86575	39				

En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la conductividad térmica de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un período de 7 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la conductividad térmica de los morteros con y sin incorporación de caucho reciclado. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 230.04 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) de 0.05, siendo $1.64E^{-25}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la conductividad térmica de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 7 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

Figura 18

Prueba de hipótesis de conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	6.02	1.204	0.00173
10%	5	4.54	0.908	0.00197
15%	5	4.39	0.878	0.00037
20%	5	4.16	0.832	0.00472
25%	5	3.65	0.73	0.00055
30%	5	2.97	0.594	0.00148
35%	5	1.99	0.398	0.00317
40%	5	1.49	0.298	0.00802

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3.0200575	7	0.43143679	156.814824	6.4017E-23	2.31274119
Dentro de los grupos	0.08804	32	0.00275125			
Total	3.1080975	39				

En esta figura, se lleva a cabo una prueba de hipótesis para investigar la conductividad térmica de morteros de cemento que han sido modificados con la incorporación de caucho reciclado durante un período de 28 días. Se tomó de parámetros, porcentaje de confiabilidad 95%, representado por un alfa (α) de 0.05. En la figura, se presentan datos importantes, que incluyen la F calculada, el valor crítico para F y la probabilidad asociada. La F calculada es el resultado de la prueba de hipótesis, que se compara con el valor crítico para F para confirmar si se dan suficientes discrepancias en la conductividad térmica de los morteros con y sin incorporación de caucho reciclado. En este caso, el valor F calculado es mayor que el valor crítico para F, siendo 156.81 y 2.31 respectivamente. De la misma forma la probabilidad (p-valor) es menor que el alfa (α) del 0.05, siendo $6.40E^{-23}$. Mediante estas comparaciones se demuestra que se ha encontrado evidencia estadística de variaciones significativas en la conductividad térmica de los morteros de cemento debido a la incorporación de caucho reciclado en comparación con los morteros sin incorporación después de 28 días. En consecuencia, se acepta la hipótesis planteada, lo que rescata la importancia de las variaciones observadas en este estudio.

3.2.5. Caracterización morfológica de caucho reciclado

En el caso de la caracterización morfológica del caucho reciclado por microscopía óptica, se centró en la observación visual de las muestras. Al utilizar esta técnica, se obtuvieron imágenes que proporcionaron descripciones cualitativas de la morfología del caucho reciclado. Al tratarse de descripciones cualitativas y carecer de datos cuantitativos, no es posible realizar análisis de hipótesis estadísticas en este proceso de investigación en particular.

3.2.6. Caracterización química de cemento Portland tipo I

En el caso de la caracterización química del cemento Portland Tipo I, se enfocó en la obtención de espectros y la identificación cualitativa de grupos funcionales presentes en el material. Estos espectros revelaron la presencia de grupos funcionales característicos, aunque no se obtuvieron datos cuantitativos precisos. La falta de estos datos en este enfoque cualitativo impide la realización de análisis de hipótesis estadísticas.

IV. DISCUSIÓN

- Los resultados de la figura 5, exhibieron un análisis de la propiedad de densidad de los morteros de cemento bajo la influencia de la incorporación de caucho reciclado a lo largo del tiempo de ensayo. A primera vista, a los 7 días, notamos que el mortero de cemento sin caucho reciclado (0%) mostró una densidad inicial relativamente alta de 1.68 g/cm³. Esta densidad inicial se debe a la naturaleza compacta y densa del cemento Portland Tipo I. El cemento tiene partículas finamente molidas y se encuentra en una etapa temprana de hidratación, lo que contribuye a su alta densidad (Meden et al., 2014). Sin embargo, a medida que aumentamos el porcentaje de caucho reciclado en la mezcla, la densidad disminuyó de forma constante. Esto se debe al efecto del caucho reciclado, que es menos denso que el cemento. El caucho reciclado introduce porosidad en la mezcla, ya que sus partículas son menos densas y no se compactan tan eficientemente como las partículas de cemento. A medida que aumenta el porcentaje de incorporación de caucho reciclado, la porosidad en la mezcla aumenta, lo que resulta en una reducción de la densidad global (Abdelaleem et al., 2018). La reducción en la densidad se volvió más pronunciada a medida que incrementamos el porcentaje de caucho reciclado, ya que la influencia del caucho en la porosidad y la disminución de la densidad se hace más evidente. A niveles más altos de incorporación de caucho reciclado, la mezcla se vuelve más porosa y menos densa. A los 28 días, notamos una diferencia en la densidad inicial del mortero de cemento sin caucho reciclado (0%), que es ligeramente más alta en comparación con los 7 días, alcanzando 1.70 g/cm³. Este aumento en la densidad a los 28 días se debe al proceso de hidratación continua del cemento. Logrando que a medida que el cemento continúa endureciéndose con el tiempo, se formen más enlaces químicos, lo que resulta en una estructura más densa (Meden et al., 2014). Sin embargo, la tendencia general de reducción en la densidad al aumentar el porcentaje de incorporación de caucho reciclado se mantiene constante. La disminución en la densidad a lo largo del tiempo se debe principalmente a la introducción del caucho reciclado, que persiste en su efecto de reducir la densidad global. Aunque el cemento sigue endureciéndose y aumentando ligeramente su densidad a los 28 días, la influencia del caucho reciclado en la porosidad de la mezcla prevalece, lo que resulta en una densidad final menor en comparación con el control sin caucho reciclado.

- Los resultados de la figura 6 por su parte, presentaron un análisis de la propiedad de porosidad de los morteros de cemento bajo la ⁸ influencia de la incorporación de caucho reciclado a lo largo del tiempo de ensayo. A la edad de 7 días, se observó una porosidad inicial del 3.8% en el grupo de control (0%), ² donde no se añadió caucho reciclado. Esto se debe a las características intrínsecas ¹ de los morteros de cemento. Durante el proceso de mezcla y fraguado, se generan espacios vacíos o poros entre las partículas de cemento y agregados. Estos poros pueden contener aire o agua y, por lo tanto, contribuyen a la porosidad inicial. ¹ A medida que aumentamos el porcentaje de incorporación de caucho ³³ reciclado, la porosidad también aumentó significativamente. Esto se debe a que el caucho reciclado tiene una densidad mucho menor que el cemento, como ya se mencionó en la discusión anterior, y no puede formar enlaces químicos tan fuertes con los otros componentes de la mezcla (Qin et al., 2019). Esta falta de cohesión lleva a una mayor separación ³³ entre las partículas de caucho reciclado y la matriz de cemento, lo que resulta en una mayor porosidad. Además, el proceso de dispersión del caucho reciclado puede introducir pequeñas discontinuidades en la estructura de la matriz, como microgrietas o vacíos, contribuyendo aún más a la porosidad. A los 28 días, se observó un ligero aumento en la porosidad en comparación con los resultados a los 7 días. Este aumento se debe al proceso continuo de hidratación del cemento. A medida que el cemento sigue hidratándose y formando enlaces químicos, la estructura se ² vuelve más densa. Sin embargo, la tendencia general de aumento en la porosidad ³ con la incorporación de caucho reciclado se mantiene constante. ³ La influencia persistente de la incorporación de caucho reciclado en la porosidad se debe a que ² el caucho reciclado no contribuye de manera significativa a la formación de enlaces químicos que densifiquen la estructura (Qin et al., 2019). Además, la introducción de caucho reciclado puede generar micro vacíos o discontinuidades en la matriz del mortero, lo que también contribuye a la porosidad.
- Los resultados de la figura 7, presentaron un análisis de la propiedad de resistencia ⁸ en compresión de los morteros de cemento bajo la influencia de la incorporación de caucho reciclado a lo largo del tiempo de ensayo. A los 7 días, el grupo de control sin caucho reciclado ² (0%) mostró una resistencia en compresión de 6.59 MPa. Esto se debió a que el ² cemento Portland tipo I utilizado en la mezcla es conocido por su capacidad para desarrollar resistencia en compresión en las etapas iniciales de

curado. El cemento Portland contiene alita, belita y ferrita, que son minerales que contribuyen a la formación de productos de hidratación como la etringita y la silicata de calcio hidratada (C-S-H), que aportan resistencia a la mezcla (Ashraf et al., 2016). Sin embargo, a medida que se agregaba caucho reciclado, la resistencia en compresión disminuía. Esta disminución en la resistencia en compresión está relacionada con la porosidad y la densidad. La incorporación de caucho reciclado en la mezcla aumenta la porosidad de los morteros de cemento, como ya vimos en la discusión anterior. Esto se debe a que el caucho reciclado tiene una estructura porosa en sí mismo y no forma enlaces químicos fuertes con el cemento, lo que da como resultado una mayor cantidad de vacíos en la mezcla (Nehdi & Khan, 2001). La porosidad actúa como discontinuidades en el material, debilitando la matriz del mortero de cemento y reduciendo su capacidad para soportar cargas de compresión. Además, la porosidad también influye en la densidad del material, ya que una mayor cantidad de poros reduce la densidad global de la mezcla. La densidad se reduce a medida que aumenta el porcentaje de caucho reciclado debido a su menor densidad en comparación con el cemento Portland (Hotchin, 2023). La combinación de mayor porosidad y menor densidad resulta en una reducción significativa de la resistencia en compresión de los morteros de cemento. Los vacíos y la falta de cohesión entre el caucho reciclado y la matriz de cemento debilitan la estructura y reducen la capacidad de resistencia del material. A los 28 días por su parte, el grupo de control sin caucho reciclado (0%) mostró una resistencia en compresión de 10.24 MPa. El tiempo de curado prolongado permitió un mayor desarrollo de la resistencia en compresión, ya que dio lugar a una hidratación más completa del cemento Portland y a la formación de productos de hidratación adicionales. Esto incluye una mayor cantidad de silicato de calcio hidratado (C-S-H) que contribuye a la resistencia de la mezcla (Ashraf et al., 2016). Sin embargo, a medida que se aumentaba el porcentaje de caucho reciclado, la resistencia en compresión seguía reduciendo, aunque de manera menos pronunciada en comparación con los 7 días. La influencia del caucho reciclado en la porosidad y la densidad persiste debido a la incapacidad para formar enlaces químicos sólidos con los otros componentes del mortero de cemento. Aunque la resistencia en compresión puede recuperarse ligeramente debido al mayor tiempo de curado, la influencia negativa del caucho reciclado en la porosidad y la densidad sigue siendo un factor importante en la disminución de la resistencia.

- Por último, los resultados de la figura 8, presentaron un análisis de la propiedad de conductividad térmica de los morteros de cemento bajo la influencia de la incorporación de caucho reciclado a lo largo del tiempo de ensayo. A los 7 días, se mostró una disminución en la conductividad térmica de los morteros de cemento a medida que se incrementó el porcentaje de caucho reciclado. Esto se debe a la incorporación de caucho reciclado en la mezcla que agrega partículas con baja conductividad térmica en comparación con el cemento. Esto significa que la transmisión de calor a través de la mezcla se ve obstaculizada por la presencia de estas partículas no conductoras (Mu et al., 2007). Cuanto mayor sea el porcentaje de caucho reciclado, mayor será el efecto de bloqueo en la conducción del calor. Además, el caucho reciclado suele tener una estructura porosa, lo que aumenta aún más su capacidad para atrapar el calor y reduce la velocidad a la que puede ser conducido (Qin et al., 2019). También, la porosidad de la mezcla, influenciada por la presencia del caucho reciclado, también juega un papel importante en la disminución de la conductividad térmica. Los espacios vacíos actúan como barreras para el flujo de calor, ya que el calor se disipa en las cavidades en lugar de propagarse eficientemente a través del material (Qin et al., 2019). Estos factores combinados dan como resultado la disminución de la conductividad térmica en morteros con incorporación de caucho reciclado. El calor se transfiere de manera menos eficiente debido a la presencia de partículas no conductoras y a la estructura porosa de la mezcla. Por otro lado, a los 28 días, la disminución de la conductividad térmica persiste y, en algunos casos, se mantiene constante o se reduce aún más con respecto a los 7 días. Esto se debe a que la influencia del caucho reciclado en la conductividad térmica sigue siendo dominante y no experimenta recuperación con el tiempo. El cemento Portland, a medida que continúa su proceso de hidratación, puede formar una estructura más densa y homogénea, lo que teóricamente podría aumentar la conductividad térmica. Sin embargo, la influencia del caucho reciclado en la reducción de la conductividad térmica persiste debido a su capacidad para atrapar el calor y obstaculizar la transmisión de calor a través del material. Por lo tanto, la conductividad térmica no experimenta una recuperación significativa con el tiempo, y la influencia de la incorporación de caucho reciclado sigue siendo evidente a los 28 días.

V. CONCLUSIONES

- Se demostró que la adición de caucho reciclado tiene una influencia significativa tanto en la resistencia en compresión como en la conductividad térmica de los morteros de cemento. Estos dos parámetros se ven notablemente afectados por la cantidad de caucho reciclado agregado a la mezcla, lo que sugiere que la inclusión de caucho reciclado en la producción de morteros de cemento es un factor clave a considerar en la formulación de dichos materiales.
- Se llevó a cabo un diseño de mezcla de morteros de cemento con adición de caucho reciclado utilizando una combinación de revisión bibliográfica y ensayos preexperimentales. Esto permitió establecer las proporciones adecuadas de caucho reciclado en la mezcla para fines de experimentación.
- La densidad aparente de los morteros de cemento con adición de caucho reciclado se evaluó siguiendo las pautas establecidas en la norma ASTM 188. Los resultados demostraron que la densidad disminuyó mientras se aumentó el contenido de caucho reciclado en la mezcla, lo que indica que la adición de caucho reciclado conduce a una reducción en la densidad del material.
- La porosidad de los morteros de cemento con adición de caucho reciclado se evaluó mediante observación microscópica. Los resultados revelaron un aumento significativo en la porosidad a medida que se incrementó la cantidad de caucho reciclado en la mezcla. Esto confirma que la inclusión de caucho reciclado está directamente relacionada con un aumento en la porosidad de los morteros de cemento.
- La resistencia en compresión de los morteros de cemento se evaluó según la norma ASTM C109. Se observó una disminución considerable en la resistencia mientras se aumentó el contenido de caucho reciclado en la mezcla, lo que indica que la adición de caucho reciclado tiene un impacto negativo en la resistencia en compresión de los morteros de cemento.
- La conductividad térmica de los morteros de cemento se midió siguiendo la norma ASTM E1225. Los resultados demostraron que la conductividad térmica disminuyó significativamente a medida que se aumentó la cantidad de caucho reciclado en la mezcla. Esto indica que la inclusión de caucho reciclado reduce la capacidad del material para conducir el calor.

VI. RECOMENDACIONES

- Realizar un seguimiento a largo plazo de morteros de cemento con caucho reciclado para evaluar cómo resisten las condiciones ambientales y el envejecimiento.
- Explorar cómo la adición de otras adicciones, como fibras sintéticas o químicos modificadores de cemento, puede interactuar con el caucho reciclado y mejorar aún más las propiedades de los morteros, especialmente en términos de resistencia en compresión.
- Evaluar la conductividad térmica en aplicaciones específicas, como aislamiento térmico en la construcción, y evaluar cómo los morteros de caucho reciclado funcionan en situaciones del mundo real para comprender mejor su eficacia en entornos prácticos.
- Realizar estudios de costo-beneficio en proyectos de construcción que utilicen morteros de caucho reciclado para determinar si la inversión en estos materiales es justificable y ahorra costos a largo plazo en términos de mantenimiento y eficiencia energética.
- Examinar la toxicidad y la sostenibilidad de los morteros de caucho reciclado, lo que puede ser de gran importancia en aplicaciones que requieran materiales respetuosos con el medio ambiente y seguros para la salud humana.
- Colaborar entre expertos en diferentes campos, como la ingeniería civil, la química y la sostenibilidad, para abordar de manera integral los desafíos y oportunidades asociados con los morteros de caucho reciclado.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdelaleem, Basem H. & Ismail, Mohamed & Hassan, Assem. (2018). The combined effect of crumb rubber and synthetic fibers on impact resistance of self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*. 162. 816-829.
- Al-Kayiem, H., Bhayo, B., Magaril, E., Ravi, P. Rudimentary assessment of waste-to-wealth of used tires crumbs in thermal energy storage. *Recycling*. 2022; 7(3):40.
- Aoudia K, Azem S, Ait Hocine, Gratton M., Pettarin V., Seghar S. (2017) Recycling of waste tire rubber: microwave devulcanization and incorporation in a thermoset resin. *Waste Management*, 60, 471-481,
- Araujo-Morera, J., Verdejo, R., López-Manchado, M.A., Hernández Santana, M. (2021) Sustainable mobility: the route of tires through the circular economy model. *Waste Manag.*, 126, 309–322.
- Ashraf, Warda & Olek, Jan & Jeong, Hyungu & Atakan, Vahit. (2016). Effects of High Temperature on Carbonated Calcium Silicate Cement (CSC) and Ordinary Portland Cement (OPC) Paste.
- Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED, 2021). *Escenarios de riesgo por heladas y friajes 2021*.
- Chen, Lei & Li, Yangluxi. (2021). Research on feature of thermal performance of integrated composite system. *International Journal of Low-Carbon Technologies*. 16.
- Denison, G. (2023). Ethical considerations in research: Best practices and examples. Prolific
- El-Nemr K.F., Khalil A.M., Fathy E.S. (2018). Thermoplastic elastomers based on waste rubber and expanded polystyrene: Role of devulcanization and ionizing radiation. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 23(1), 58-69.
- Feng W., Wang Y., Sun J., Tang Y., Wu D., Jiang Z., Wang J., Wang X. (2022), Prediction of thermo-mechanical properties of rubber-modified recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 318, 125970.
- Guo, J., Huang, M., Huang, S., Wang, S. (2019). An experimental study on mechanical and thermal insulation properties of rubberized concrete including its microstructure. *Appl. Sci.* 9, 2943.

- Hejna A., Korol J., Przybysz-Romatowska M., Zedler L., Chmielnicki B., Formela K. (2020). Waste tire rubber as low-cost and environmentally-friendly modifier in thermoset polymers—A review. *Waste Manag.*, 108, 106-118.
- Kazmi, S.M.S., Munir, M.J., Wu, Y.-F. (2021). Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: A new compression casting approach. *Resour. Conserv. Recycl.*, 167, 105353.
- Molina, J., Horn M. y Gómez, M. (2020). Evaluación sistemática del desempeño térmico de un módulo experimental de vivienda alto andina para lograr el confort térmico con energía solar. *Tecnia*, 30(1), 70-79.
- Meden, Anton & Medvescek, Simona & Kaucic, Venceslav. (2014). Influence of Various Carbonates on the Hydration of Portland Cement. *Acta Crystallographica Section A Foundations and Advances*. 70. C1770-C1770.
- Ministerio de Salud Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (2022). *Sala de Situación del IRA, neumonía y SOB/Asma - Perú*.
- ¹⁴ Ministerio de Salud Centro Nacional de Epidemiología, Prevención y Control de Enfermedades (2019). Plan de Reducción de la Vulnerabilidad ante la temporada de bajas temperaturas 2019-2021.
- Mu, Qihong & Feng, Shengyu & Diao, Guangzhao. (2007). Thermal conductivity of silicone rubber filled with ZnO. *Polymer Composites*. 28. 125 - 130.
- Mukhopadhyay, Anal & Shi, Xijun & Zollinger, Dan. (2018). Recycling and Reuse of Materials in Transportation Projects-Current Status and Potential Opportunities Including Evaluation of RCA Concrete Pavements Along an Oklahoma Interstate Highway.
- ⁷ Nascimento, U.S., Ismail, K.A.R., Lino, F.A.M. et al (2021). Crushed rubber from used tires for thermal insulation of walls and flat roofs: modeling, validation and comparison with conventional technology. *Arab J Sci Eng.*, 46, 12355–12372.
- Nehdi, Moncef & Khan, A. (2001). Cementitious Composites Containing Recycled Tire Rubber: An Overview of Engineering Properties and Potential Applications. *Cement Concrete and Aggregates - CEMENT CONCRETE AGGREGATES*. 23.

Palma, E. (2017). Estrategias de eficiencia energética para la vivienda rural de la zona bioclimática mesoandina de Cusco - Perú. [Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia].

38
Qin, Gang & Shen, Zhongshuo & Yu, Yongqiang & Fan, Lidan & Cao, Hongwei & Yin, Chaowei. (2019). Effect of Silicone Rubber of a Waste Composite Insulator on Cement Mortar Properties. *Materials*. 12. 2796.

Research and Markets (October 24, 2022). *Global and China Synthetic Rubber Industry Report, 2021-2027*.

Hotchin, Iva. (2023). Analysis of Some Chemicals of Portland Cement.

Ruwona, W.; Danha, G.; Muzenda, E. (2019) A Review on Material and Energy Recovery from Waste Tyres. *Procedia Manuf.*, 35, 216–222.

Tang Y.C., Feng W., Chen Z., Nong Y., Yao M., Liu J. (2021). Experimental and theoretical investigation on the thermo-mechanical properties of recycled aggregate concrete containing recycled rubber. *Front. Mater.*, 8, 10.3389.

Thai, Q.B., Siang, T.E., Le, D.K., Shah, W.A., Phan-Thien, N., Duong, H.M. (2019). Advanced fabrication and multi-properties of rubber aerogels from car tire waste. *Coll. Surf. A.*, 577, 702–708.

Waseem Hittini, Abdel-Hamid I. Mourad, Basim Abu-Jdayil (2021). Utilization of devulcanized waste rubber tire in development of heat insulation composite. *Journal of Cleaner Production*, 280(2), 124492.

Wongsa, Ampol & Sata, Vanchai & Nematollahi, Behzad & Sanjayan, Jay & Chindaprasirt, Prinya. (2018). Mechanical and thermal properties of lightweight geopolymer mortar incorporating crumb rubber.

¹ ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
<p>TÍTULO</p> <p>Influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión y conductividad térmica en morteros de cemento</p>	<p>3 Hipótesis General La adición de caucho reciclado reduce la resistencia en compresión y la conductividad térmica en morteros de cemento.</p> <p>3 ¿Cuál es la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión y conductividad térmica en morteros de cemento?</p>	<p>3 Objetivo General Determinar la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión y conductividad térmica en morteros de cemento.</p> <p>2 Objetivos específicos Desarrollar diseño de mezcla de morteros de cemento con adición de caucho reciclado, mediante revisión bibliográfica y ensayos preexperimentales.</p>	<p>Variable Independiente Caucho reciclado (%)</p> <p>Variables dependientes Resistencia a la compresión.</p> <p>σ: Esfuerzo (MPa)</p> <p>Conductividad térmica</p>	<p>Tipo Aplicada, explicativa y Cuantitativa</p> <p>Métodos Deductivo</p> <p>Diseño Experimental</p> <p>Población Todos los morteros obtenidos por incorporación de caucho reciclado</p> <p>Muestra 120 morteros de dimensiones 50x50x50mm para ensayo de compresión y 120 morteros de dimensiones 22.5x80x20mm para</p>	

2 cemento con adición de caucho reciclado mediante evaluación microscópica.

3 Determinar la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la resistencia en compresión de morteros de cemento mediante la norma ASTM C109

9 Determinar la influencia de la adición de caucho reciclado sobre la conductividad térmica de morteros de cemento mediante la norma ASTM E1225.

ensayo de conductividad térmica; obtenidos por incorporación de caucho reciclado en distintos diferentes porcentajes.

2 **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**
Observación directa y Formatos de instrumentos de medición.

1 **Métodos de análisis de investigación**
t-student
ANOVA unidireccional

Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Items	Instrumentos	Escala de medición
Variable independiente Caucho reciclado	<p>Material que se obtiene de los neumáticos desechados, el caucho desmenuzado y triturado, libre de todo el acero y fibra. Contribuyendo al reciclaje ambiental, se elimina toda la combinación de materiales que componen el neumático para utilizarlo como aislante térmico (Ebnesaajad y Landrock, 2015).</p>	<p>Relación porcentual de la masa del aglomerante respecto a la masa de la incorporación</p>	<p>% = (masa total de cemento/masa de incorporación) * 100</p>	Registro	Nominal	Ficha de observación	Porcentaje
Variable dependiente Esfuerzo de compresión	<p>Se habla de la habilidad de un material o estructura para mantener su forma y resistir las fuerzas aplicadas en su superficie. Cuando un material se comprime, tiende a contraerse, mientras que bajo tensión se alarga. Esta característica es de gran</p>	<p>Registro de carga aplicada versus área de muestra en función del tiempo</p>	<p>$\sigma = F/A$</p> <p>σ: Esfuerzo (MPa) F: Fuerza (N) A: Área (mm²)</p>	Registro	Nominal	Fichas de observación	MPa

importancia en la ingeniería y la construcción, ya que influye en la elección de materiales para asegurar la estabilidad y la seguridad de las estructuras en diferentes situaciones (Mishra, 2021).

La conductividad térmica de

un material se refiere a su capacidad para conducir el

calor. Este concepto se basa en cuánto calor puede transferir

un material a través de una

unidad de tiempo y área cuando existe una diferencia de

temperatura de un grado entre

sus extremos. La conductividad térmica depende

de factores como la estructura molecular, la composición química y la densidad del material (Lead, 2022).

$$k = (Q * L) / (A * \Delta T)$$

Donde:

k: conductividad térmica.

Q: calor transferido

L: espesor

A: área transversal

ΔT : diferencia de temperatura

Tasa de transferencia de calor por dimensión una determinada temperatura

Variable dependiente
Conductividad térmica

Nominal

Registro

Fichas de observación

(W/(m·K)).

Anexo 3: Resultados prueba de hipótesis

Prueba de hipótesis de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	8.41	1.682	0.00167
10%	5	8.04	1.608	0.00317
15%	5	7.65	1.53	0.00175
20%	5	7.54	1.508	0.00217
25%	5	7.31	1.462	0.00357
30%	5	6.73	1.346	0.00243
35%	5	6.08	1.216	0.00243
40%	5	5.74	1.148	0.00217

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.22111	7	0.17444429	72.0844156	8.83212E-18	2.31274119
Dentro de los grupos	0.07744	32	0.00242			
Total	1.29855	39				

Prueba de hipótesis de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	8.52	1.704	0.00113
10%	5	8.12	1.624	0.00088
15%	5	7.73	1.546	0.00058
20%	5	7.49	1.498	0.00082
25%	5	7.26	1.452	0.00127
30%	5	6.85	1.37	0.0004
35%	5	6.13	1.226	0.00158
40%	5	5.69	1.138	0.00097

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	1.3000775	7	0.18572536	194.731698	2.21603E-24	2.31274119
Dentro de los grupos	0.03052	32	0.00095375			
Total	1.3305975	39				

Prueba de hipótesis de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0%	5	19.05	3.81	0.0015
10%	5	28.58	5.716	0.00248
15%	5	34.08	6.816	0.00243
20%	5	36.6	7.32	0.00135
25%	5	40.12	8.024	0.00273
30%	5	42.43	8.486	0.00333
35%	5	50.57	10.114	0.00213
40%	5	60.17	12.034	0.00138

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	226.31568	7	32.3308114	14924.7831	2.37972E-54	2.31274119
Dentro de los grupos	0.06932	32	0.00216625			
Total	226.385	39				

Prueba de hipótesis de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	20.02	4.004	0.00223
10%	5	31.11	6.222	0.00447
15%	5	35.6	7.12	0.00225
20%	5	38.59	7.718	0.01347
25%	5	42.07	8.414	0.00383
30%	5	43.49	8.698	0.00837
35%	5	50.54	10.108	0.00267
40%	5	62.12	12.424	0.00258

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	222.97303	7	31.85329	6391.430148	1.84599E-48	2.312741187
Dentro de los grupos	0.15948	32	0.00498375			
Total	223.13251	39				

Prueba de hipótesis de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	32.95	6.59	0.01075
10%	5	23.35	4.67	0.0088
15%	5	21.13	4.226	0.01983
20%	5	20.62	4.124	0.04163
25%	5	17.4	3.48	0.00745
30%	5	16.66	3.332	0.03267
35%	5	12.84	2.568	0.01752
40%	5	10.68	2.136	0.00828

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	66.848558	7	9.54979393	519.964278	4.3267E-31	2.31274119
Dentro de los grupos	0.58772	32	0.01836625			
Total	67.436278	39				

Prueba de hipótesis de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	51.22	10.244	0.00803
10%	5	43.19	8.638	0.00557
15%	5	40.56	8.112	0.00697
20%	5	36.86	7.372	0.00557
25%	5	33.38	6.676	0.09203
30%	5	32.15	6.43	0.19125
35%	5	26.33	5.266	0.01483
40%	5	20.48	4.096	0.01933

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	131.8220575	7	18.8317225	438.4823913	6.42092E-30	2.312741187
Dentro de los grupos	1.37432	32	0.0429475			
Total	133.1963775	39				

Prueba de hipótesis de conductividad térmica de morteros de cemento bajo el de caucho reciclado a 7 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0%	5	6.11	1.222	0.00457
10%	5	4.61	0.922	0.00057
15%	5	4.45	0.89	0.0024
20%	5	4.22	0.844	0.00268
25%	5	3.71	0.742	0.00067
30%	5	3.12	0.624	0.00093
35%	5	2.14	0.428	0.00137
40%	5	1.74	0.348	0.00077

ANÁLISIS DE VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	2.80991	7	0.40141571	230.037659	1.64393E-25	2.31274119
Dentro de los grupos	0.05584	32	0.001745			
Total	2.86575	39				

Prueba de hipótesis de conductividad térmica de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado a 28 días

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0%	5	6.02	1.204	0.00173
10%	5	4.54	0.908	0.00197
15%	5	4.39	0.878	0.00037
20%	5	4.16	0.832	0.00472
25%	5	3.65	0.73	0.00055
30%	5	2.97	0.594	0.00148
35%	5	1.99	0.398	0.00317
40%	5	1.49	0.298	0.00802

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	3.0200575	7	0.43143679	156.814824	6.4017E-23	2.31274119
Dentro de los grupos	0.08804	32	0.00275125			
Total	3.1080975	39				

Anexo 4: Resultados de laboratorio

Resultados de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Densidad (g/cm ³)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 1 / a1	1.7	1.69	1.62	1.67	1.73	1.68
MC2 - 1 / a2	1.54	1.6	1.58	1.69	1.63	1.61
MC3 - 1 / a3	1.46	1.53	1.54	1.57	1.55	1.53
MC4 - 1 / a4	1.44	1.51	1.49	1.56	1.54	1.51
MC5 - 1 / a5	1.39	1.46	1.43	1.55	1.48	1.46
MC6 - 1 / a6	1.28	1.35	1.32	1.41	1.37	1.35
MC7 - 1 / a7	1.15	1.22	1.19	1.28	1.24	1.22
MC8 - 1 / a8	1.08	1.18	1.12	1.19	1.17	1.15
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 2 / a1	1.66	1.68	1.73	1.71	1.74	1.70
MC2 - 2 / a2	1.59	1.61	1.62	1.63	1.67	1.62
MC3 - 2 / a3	1.53	1.56	1.52	1.54	1.58	1.55
MC4 - 2 / a4	1.48	1.5	1.46	1.53	1.52	1.50
MC5 - 2 / a5	1.41	1.46	1.42	1.49	1.48	1.45
MC6 - 2 / a6	1.34	1.36	1.38	1.39	1.38	1.37
MC7 - 2 / a7	1.2	1.22	1.18	1.25	1.28	1.23
MC8 - 2 / a8	1.11	1.17	1.1	1.16	1.15	1.14

Resultados de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Porosidad (%)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 1 / a1	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.8
MC2 - 1 / a2	5.8	5.7	5.7	5.8	5.7	5.7
MC3 - 1 / a3	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.8
MC4 - 1 / a4	7.3	7.3	7.3	7.3	7.4	7.3
MC5 - 1 / a5	8.0	8.0	8.1	7.9	8.1	8.0
MC6 - 1 / a6	8.5	8.6	8.4	8.5	8.5	8.5
MC7 - 1 / a7	10.1	10.1	10.2	10.1	10.1	10.1
MC8 - 1 / a8	12.1	12.1	12.0	12.0	12.0	12.0
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 2 / a1	4.0	3.9	4.1	4.0	4.0	4.0
MC2 - 2 / a2	6.2	6.2	6.2	6.3	6.2	6.2
MC3 - 2 / a3	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.1
MC4 - 2 / a4	7.8	7.7	7.8	7.8	7.5	7.7
MC5 - 2 / a5	8.5	8.4	8.4	8.5	8.3	8.4
MC6 - 2 / a6	8.7	8.7	8.8	8.6	8.7	8.7
MC7 - 2 / a7	10.1	10.1	10.1	10.2	10.1	10.1
MC8 - 2 / a8	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.4

Resultados de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Resistencia en compresión (MPa)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 1 / a1	6.45	6.71	6.64	6.52	6.63	6.59
MC2 - 1 / a2	4.54	4.78	4.62	4.73	4.68	4.67
MC3 - 1 / a3	4.36	4.19	4.31	4	4.27	4.23
MC4 - 1 / a4	4.14	3.78	4.17	4.32	4.21	4.12
MC5 - 1 / a5	3.34	3.56	3.49	3.47	3.54	3.48
MC6 - 1 / a6	3.64	3.25	3.17	3.28	3.32	3.33
MC7 - 1 / a7	2.54	2.78	2.52	2.42	2.58	2.57
MC8 - 1 / a8	2.01	2.25	2.13	2.19	2.1	2.14
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 2 / a1	10.15	10.38	10.28	10.19	10.22	10.24
MC2 - 2 / a2	8.55	8.71	8.59	8.72	8.62	8.64
MC3 - 2 / a3	8.02	8.24	8.09	8.14	8.07	8.11
MC4 - 2 / a4	7.26	7.42	7.34	7.39	7.45	7.37
MC5 - 2 / a5	6.14	6.82	6.88	6.79	6.75	6.68
MC6 - 2 / a6	6.1	6.49	6.01	6.43	7.12	6.43
MC7 - 2 / a7	5.18	5.14	5.25	5.31	5.45	5.27
MC8 - 2 / a8	3.87	4.16	4.08	4.13	4.24	4.10

Resultados de densidad de conductividad térmica de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Conductividad térmica (W/m.K)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MP1 - 1 / a1	1.28	1.25	1.11	1.21	1.26	1.22
MP2 - 1 / a2	0.95	0.91	0.92	0.94	0.89	0.92
MP3 - 1 / a3	0.82	0.92	0.94	0.86	0.91	0.89
MP4 - 1 / a4	0.79	0.83	0.87	0.81	0.92	0.84
MP5 - 1 / a5	0.71	0.76	0.72	0.77	0.75	0.74
MP6 - 1 / a6	0.58	0.61	0.63	0.66	0.64	0.62
MP7 - 1 / a7	0.38	0.41	0.46	0.42	0.47	0.43
MP8 - 1 / a8	0.32	0.34	0.39	0.36	0.33	0.35
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MP1 - 2 / a1	1.21	1.22	1.15	1.18	1.26	1.20
MP2 - 2 / a2	0.95	0.92	0.84	0.94	0.89	0.91
MP3 - 2 / a3	0.87	0.87	0.88	0.86	0.91	0.88
MP4 - 2 / a4	0.79	0.83	0.95	0.81	0.78	0.83
MP5 - 2 / a5	0.71	0.76	0.72	0.71	0.75	0.73
MP6 - 2 / a6	0.58	0.56	0.63	0.56	0.64	0.59
MP7 - 2 / a7	0.32	0.41	0.37	0.42	0.47	0.40
MP8 - 2 / a8	0.32	0.34	0.14	0.36	0.33	0.30

Anexo 5: Fotografías de la investigación

Morteros cubicos con 0% de caucho reciclado



Morteros cubicos ² con 10% de caucho reciclado



Morteros cubicos con 15% de caucho reciclado



Morteros cubicos con 20% de caucho reciclado



Morteros cubicos con 25% de caucho reciclado



Morteros cubicos con 30% de caucho reciclado



Morteros cubicos con 35% de caucho reciclado



Morteros cubicos con 40% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 0% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 10% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 15% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 20% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 25% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 30% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 35% de caucho reciclado



Morteros cubicos rectangulares con 40% de caucho reciclado



Muestra de cemento Portland tipo I



Mezcla de agregado fino



Incorporación de caucho reciclado



Mezcla de solidos



Adición de agua



Amasado final de mezcla



Colocación de mezcla en molde cubico



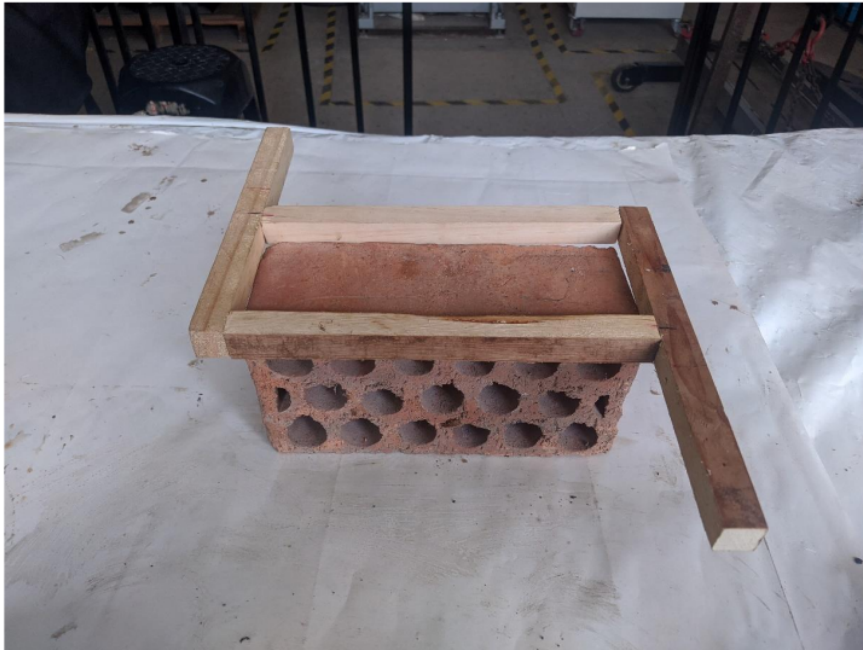
Compactación de mezcla en molde cubico



Mezclas en molde cúbico



Sistema de molde cubico rectangular



Colocación de mezcla en molde cubico rectangular



Compactado de mezcla en molde cúbico rectangular



Vista isométrica de mortero



Vista de base inferior de mortero



Vista de base superior de mortero



Vista de base superior de mortero cubico rectangular



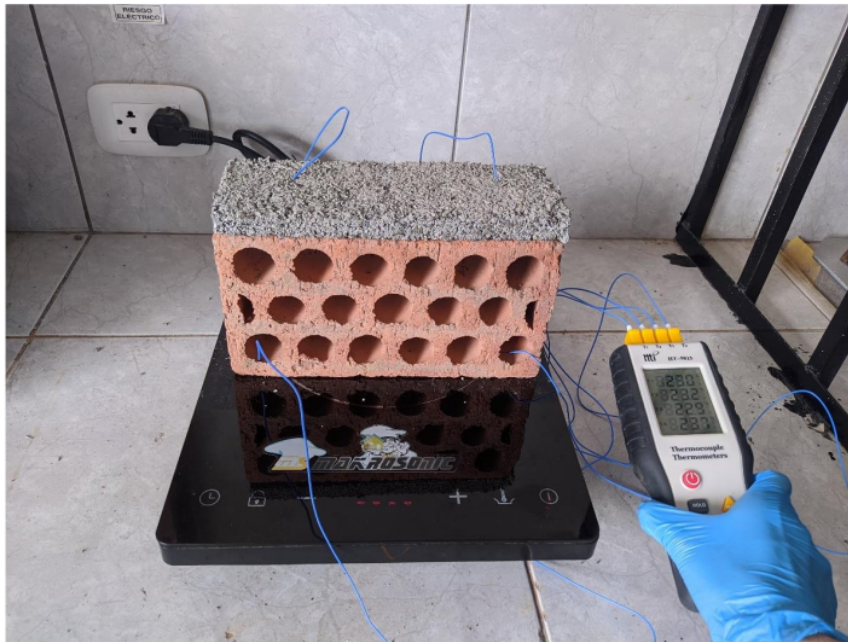
Prueba de resistencia en compresión



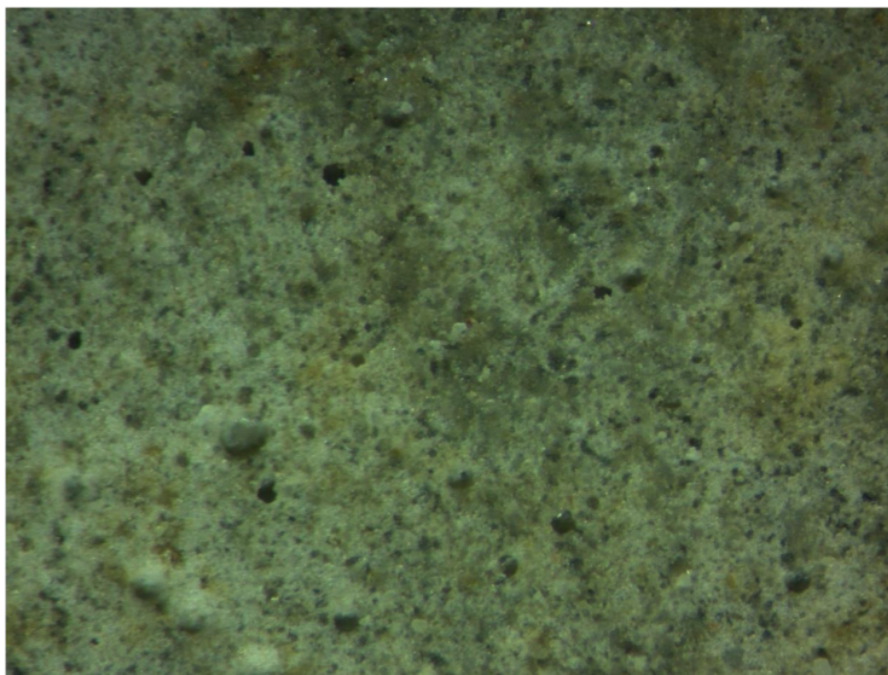
Falla mecánica de compresión de mortero



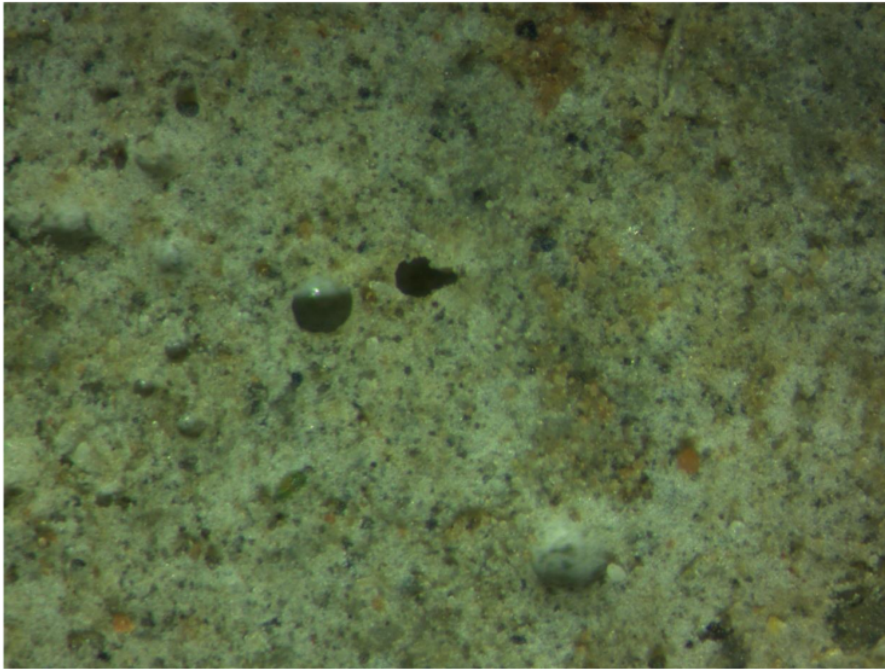
Toma de temperaturas en sistema de conductividad térmica



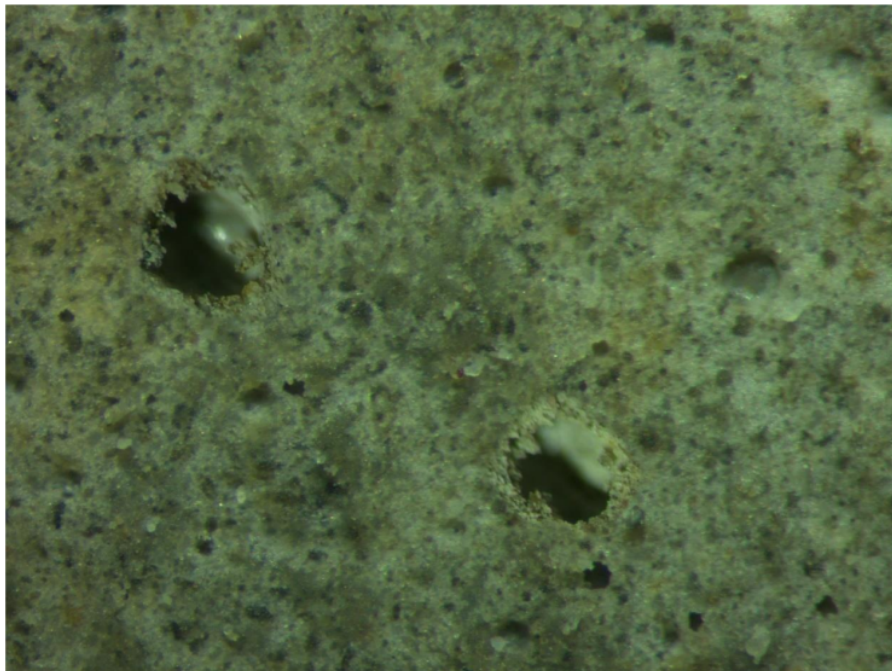
Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 0% de caucho reciclado



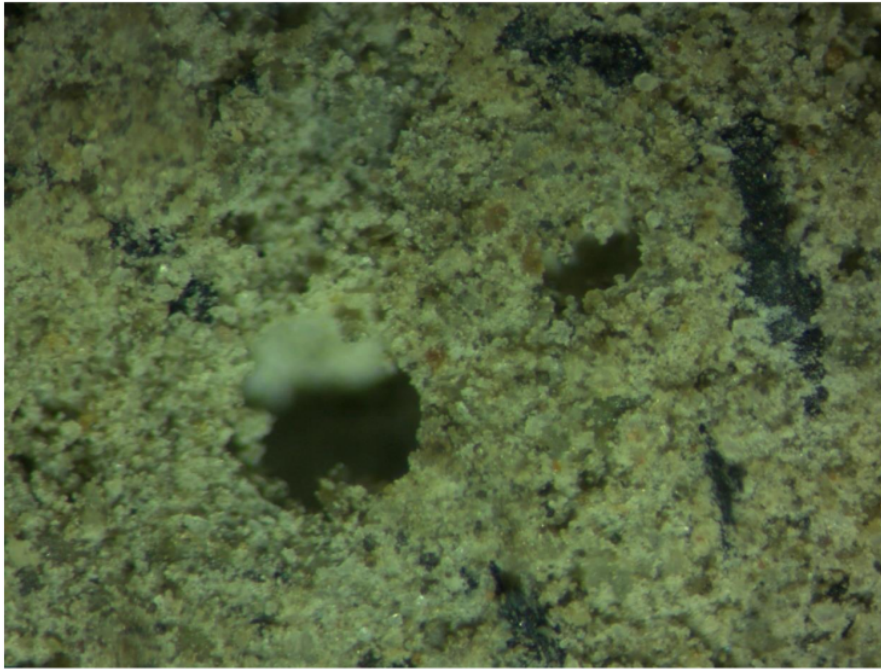
Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 10% de caucho reciclado



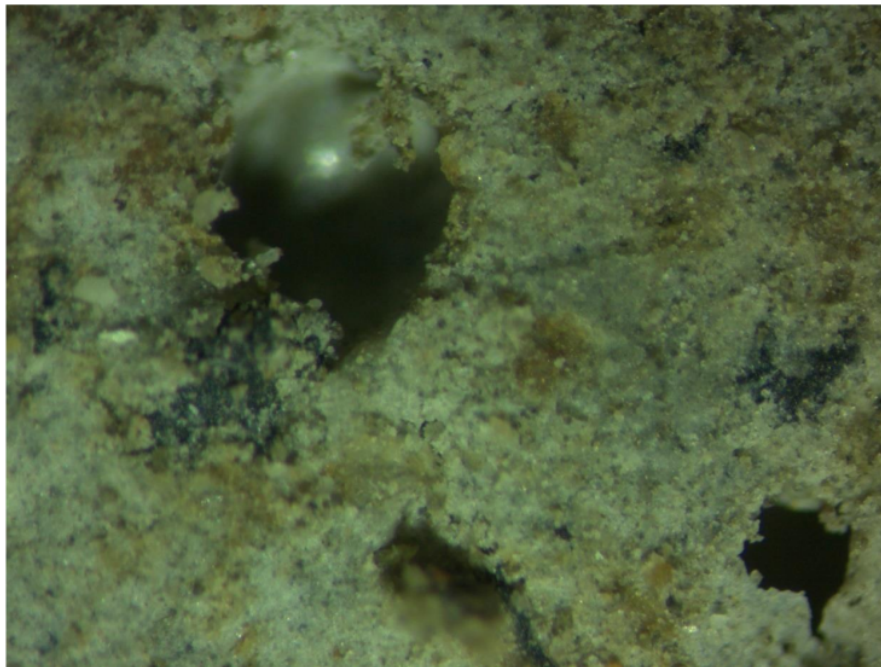
Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 15% de caucho reciclado



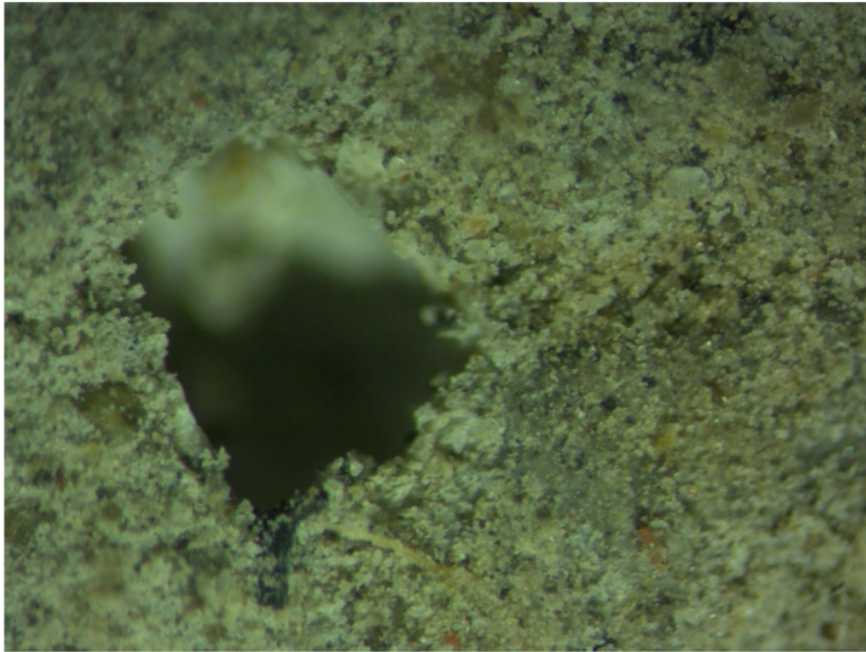
Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 20% de caucho reciclado



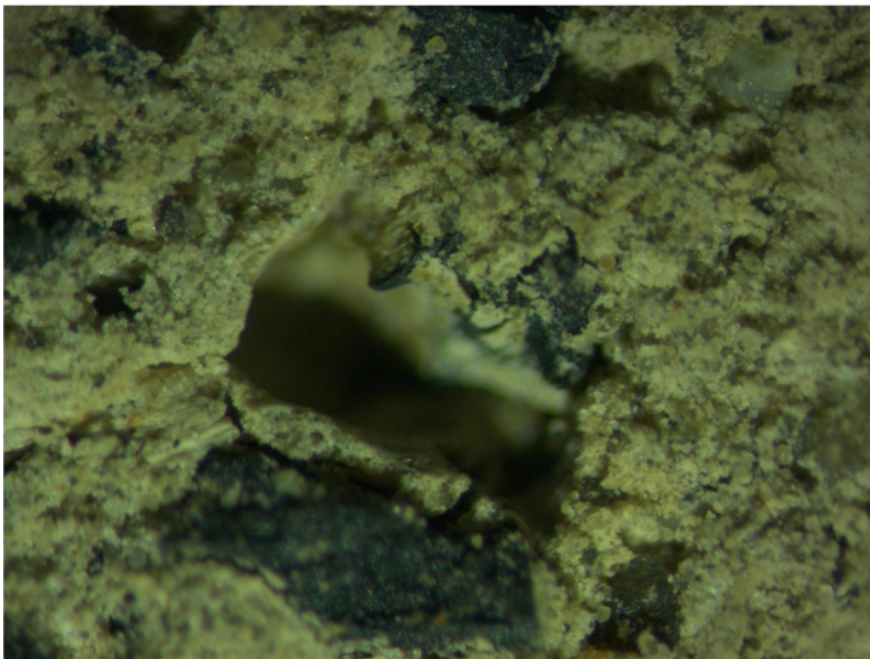
Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 25% de caucho reciclado



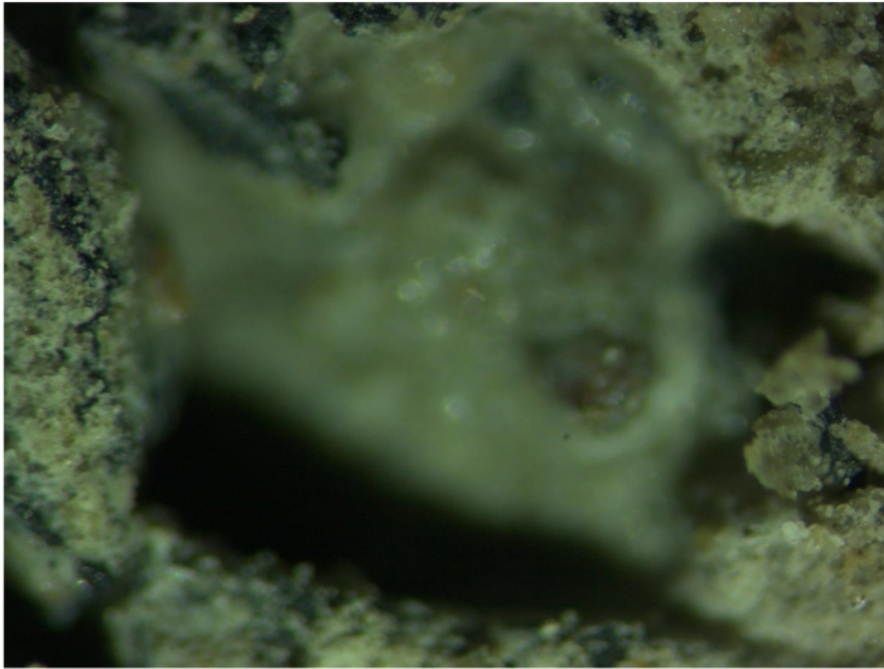
Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 30% de caucho reciclado



Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 35% de caucho reciclado



Micrografía de superficie porosa de mortero de cemento con 40% de caucho reciclado



Anexo 6: Normas utilizadas

Norma ASTM C188



Designation: C 188 – 95 (Reapproved 2003)

American Association State
Highway and Transportation Officials Standard
AASHTO No.: T133

Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement¹

This standard is issued under the fixed designation C 188; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the density of hydraulic cement. Its particular usefulness is in connection with the design and control of concrete mixtures.

1.2 The density of hydraulic cement is defined as the mass of a unit volume of the solids.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

- 2.1 *ASTM Standards:*
C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement²
C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials³

3. Apparatus

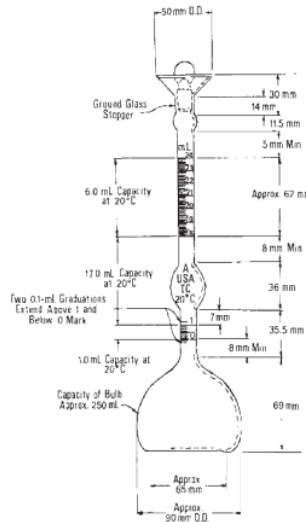
3.1 *Le Chatelier flask*—The standard flask, which is circular in cross section, with shape and dimensions conforming essentially to Fig. 1 (Note 1). The requirements in regard to tolerance, inscription and length, spacing, and uniformity of graduation will be rigidly observed. There shall be a space of at least 10 mm between the highest graduation mark and the lowest point of grinding for the glass stopper.

3.1.1 The material of construction shall be excellent quality glass, transparent and free of striae. The glass shall be chemically resistant and shall have small thermal hysteresis. The flasks shall be thoroughly annealed before being graduated. They shall be of sufficient thickness to ensure reasonable resistance to breakage.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement, and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.
Current edition approved June 10, 2003. Published August 2003. Originally approved in 1944. Last previous edition approved in 1995 as C 188 – 95.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.




NOTE—Variations of a few millimetres in such dimensions as total height of flask, diameter of base, and so forth, are to be expected and will not be considered sufficient cause for rejection. The dimensions of the flask shown in Fig. 1 apply only to new flasks and not to flasks in use which meet the other requirements of this test method.

FIG. 1 Le Chatelier Flask for Density Test

3.1.2 The neck shall be graduated from 0 to 1 mL and from 18 to 24 mL in 0.1-mL graduations. The error of any indicated capacity shall not be greater than 0.05 mL.

3.1.3 Each flask shall bear a permanent identification number and the stopper, if not interchangeably ground, shall bear the same number. Interchangeable ground-glass parts shall be marked on both members with the standard-taper symbol, followed by the size designation. The standard temperature shall be indicated, and the unit of capacity shall be shown by the letters "mL" placed above the highest graduation mark.

 C 188 – 95 (2003)

3.2 Kerosine, free of water, or naphtha, having a density greater than 0.73 g/mL at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ shall be used in the density determination.

3.3 The use of alternative equipment or methods for determining density is permitted provided that a single operator can obtain results within $\pm 0.03\text{ Mg/m}^3$ of the results obtained using the flask method.

NOTE 1—The design is intended to ensure complete drainage of the flask when emptied, and stability of standing on a level surface, as well as accuracy and precision of reading.

4. Procedure

4.1 Determine the density of cement on the material as received, unless otherwise specified. If the density determination on a loss-free sample is required, first ignite the sample as described in the test for loss on ignition in section 16.1 on Portland Cement of Test Methods C 114.

4.2 Fill the flask (Note 2) with either of the liquids specified in 3.2 to a point on the stem between the 0 and the 1-mL mark. Dry the inside of the flask above the level of the liquid, if necessary, after pouring. Record the first reading after the flask has been immersed in the water bath (Note 3) in accordance with 4.4.

NOTE 2—It is advisable to use a rubber pad on the table top when filling or rolling the flask.

NOTE 3—Before the cement has been added to the flask, a loose-fitting, lead-ring weight around the stem of the flask will be helpful in holding the flask in an upright position in the water bath, or the flask may be held in the water bath by a buret clamp.

4.3 Introduce a quantity of cement, weighed to the nearest 0.05 g, (about 64 g for portland cement) in small increments at the same temperature as the liquid (Note 2). Take care to avoid splashing and see that the cement does not adhere to the inside of the flask above the liquid. A vibrating apparatus may be used to accelerate the introduction of the cement into the flask and to prevent the cement from sticking to the neck. After all the cement has been introduced, place the stopper in the flask and roll the flask in an inclined position (Note 2), or gently whirl it in a horizontal circle, so as to free the cement from air until no further air bubbles rise to the surface of the liquid. If a proper amount of cement has been added, the level of the liquid will be in its final position at some point of the upper series of

graduations. Take the final reading after the flask has been immersed in the water bath in accordance with 4.4.

4.4 Immerse the flask in a constant-temperature water bath for sufficient periods of time in order to avoid flask temperature variations greater than 0.2°C between the initial and the final readings.

5. Calculation

5.1 The difference between the first and the final readings represents the volume of liquid displaced by the mass of cement used in the test.

5.2 Calculate the cement density, ρ , as follows:

$$\rho(\text{Mg/m}^3) = \rho(\text{g/cm}^3) = \text{mass of cement, g/displaced volume, cm}^3$$

NOTE 4—The displaced volume in millilitres is numerically equal to the displaced volume in cubic centimetres.

NOTE 5—Density in megagrams per cubic metre (Mg/m^3) is numerically equal to grams per cubic centimetre (g/cm^3). Calculate the cement density, ρ , to three decimal places and round to the nearest 0.01 Mg/m^3 .

NOTE 6—In connection with proportioning and control of concrete mixtures, density may be more usefully expressed as specific gravity, the latter being a dimensionless number. Calculate the specific gravity as follows: $\text{Sp gr} = \text{cement density/water density at } 4^\circ\text{C}$ (at 4°C the density of water is $1\text{ Mg/m}^3(1\text{g/cm}^3)$).

6. Precision and Bias

6.1 The single-operator standard deviation for portland cements has been found to be 0.012.⁴ Therefore, the results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 0.03.

6.2 The multilaboratory standard deviation for portland cements has been found to be 0.037.⁴ Therefore, the results of two properly conducted tests from two different laboratories on samples of the same cement should not differ by more than 0.10.⁴

6.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that might be associated with this test method, no statement on bias is being made.

7. Keywords

7.1 density; hydraulic cement; specific gravity

⁴ These numbers represent the 1s and d2s limits described in Practice C 670.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 109/C 109M – 08

Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)¹

This standard is issued under the fixed designation C 109/C 109M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reappraisal. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reappraisal.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of the compressive strength of hydraulic cement mortars, using 2-in. or [50-mm] cube specimens.

NOTE 1—Test Method C 349 provides an alternative procedure for this determination (not to be used for acceptance tests).

1.2 This test method covers the application of the test using either inch-pound or SI units. The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 Values in SI units shall be obtained by measurement in SI units or by appropriate conversion, using the Rules for Conversion and Rounding given in Standard IEEE/ASTM SI 10, of measurements made in other units.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.)²*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*³

C 91 Specification for Masonry Cement

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement

C 150 Specification for Portland Cement

C 230/C 230M Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

C 349 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)

C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes

C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements

C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

C 778 Specification for Standard Sand

C 989 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars

C 1005 Specification for Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements

C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement

C 1328 Specification for Plastic (Stucco) Cement

C 1329 Specification for Mortar Cement

C 1437 Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar
IEEE/ASTM SI 10 Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System

3. Summary of Test Method

3.1 The mortar used consists of 1 part cement and 2.75 parts of sand proportioned by mass. Portland or air-entraining portland cements are mixed at specified water/cement ratios. Water content for other cements is that sufficient to obtain a flow of 110 ± 5 in 25 drops of the flow table. Two-inch or [50-mm] test cubes are compacted by tamping in two layers.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.27 on Strength.

Current edition approved Dec. 1, 2008. Published January 2009. Originally approved in 1934. Last previous edition approved in 2007 as C 109/C 109M – 07¹.

² See the section on Safety, Manual of Cement Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

The cubes are cured one day in the molds and stripped and immersed in lime water until tested.

4. Significance and Use

4.1 This test method provides a means of determining the compressive strength of hydraulic cement and other mortars and results may be used to determine compliance with specifications. Further, this test method is referenced by numerous other specifications and test methods. Caution must be exercised in using the results of this test method to predict the strength of concretes.

5. Apparatus

5.1 *Weights and Weighing Devices*, shall conform to the requirements of Specification C 1005. The weighing device shall be evaluated for precision and accuracy at a total load of 2000 g.

5.2 *Glass Graduates*, of suitable capacities (preferably large enough to measure the mixing water in a single operation) to deliver the indicated volume at 20 °C. The permissible variation shall be ±2 mL. These graduates shall be subdivided to at least 5 mL, except that the graduation lines may be omitted for the lowest 10 mL for a 250-mL graduate and for the lowest 25 mL of a 500-mL graduate. The main graduation lines shall be circles and shall be numbered. The least graduations shall extend at least one seventh of the way around, and intermediate graduations shall extend at least one fifth of the way around.

5.3 *Specimen Molds*, for the 2-in. or [50-mm] cube specimens shall be tight fitting. The molds shall have not more than three cube compartments and shall be separable into not more than two parts. The parts of the molds when assembled shall be positively held together. The molds shall be made of hard metal not attacked by the cement mortar. For new molds the Rockwell hardness number of the metal shall be not less than 55 HRB. The sides of the molds shall be sufficiently rigid to prevent spreading or warping. The interior faces of the molds shall be plane surfaces and shall conform to the tolerances of Table 1.

5.4 *Mixer, Bowl and Paddle*, an electrically driven mechanical mixer of the type equipped with paddle and mixing bowl, as specified in Practice C 305.

5.5 *Flow Table and Flow Mold*, conforming to the requirements of Specification C 230/C 230M.

5.6 *Tamper*, a nonabsorptive, nonabrasive, nonbrittle material such as a rubber compound having a Shore A durometer hardness of 80 ± 10 or seasoned oak wood rendered nonabsorptive by immersion for 15 min in paraffin at approximately 392 °F or [200 °C], shall have a cross section of about ½ by

1 in. or [13 by 25 mm] and a convenient length of about 5 to 6 in. or [120 to 150 mm]. The tamping face shall be flat and at right angles to the length of the tamper.

5.7 *Trowel*, having a steel blade 4 to 6 in. [100 to 150 mm] in length, with straight edges.

5.8 *Moist Cabinet or Room*, conforming to the requirements of Specification C 511.

5.9 *Testing Machine*, either the hydraulic or the screw type, with sufficient opening between the upper bearing surface and the lower bearing surface of the machine to permit the use of verifying apparatus. The load applied to the test specimen shall be indicated with an accuracy of ±1.0 %. If the load applied by the compression machine is registered on a dial, the dial shall be provided with a graduated scale that can be read to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 2). The dial shall be readable within 1 % of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment that is easily accessible from the outside of the dial case, and with a suitable device that at all times until reset, will indicate to within 1 % accuracy the maximum load applied to the specimen.

5.9.1 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 2—As close as can be read is considered ½ in. or [0.5 mm] along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of the scale interval is about as close as can reasonably be read when the spacing on the load indicating mechanism is between ½ in. or [1 mm] and ⅙ in. or [1.6 mm]. When the spacing is between ⅙ in. or [1.6 mm] and ⅓ in. or [3.2 mm], one third of the scale interval can be read with reasonable certainty. When the spacing is ⅓ in. or [3.2 mm] or more, one fourth of the scale interval can be read with reasonable certainty.

TABLE 1 Permissible Variations of Specimen Molds

Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	[<0.025 mm]	[<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in. ± 0.005	2 in. ± 0.02	[50 mm ± 0.13 mm]	[50 mm ± 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in.	2 in. + 0.01 in.	[50 mm + 0.25 mm]	[50 mm + 0.25 mm]
	to - 0.005 in.	to - 0.015 in.	to - 0.13 mm]	to - 0.38 mm]
Angle between adjacent faces ^a	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°

^a Measured at points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

5.9.2 The upper bearing shall be a spherically seated, hardened metal block firmly attached at the center of the upper head of the machine. The center of the sphere shall lie at the center of the surface of the block in contact with the specimen. The block shall be closely held in its spherical seat, but shall be free to tilt in any direction. A hardened metal bearing block shall be used beneath the specimen to minimize wear of the lower platen of the machine. To facilitate accurate centering of the test specimen in the compression machine, one of the two surfaces of the bearing blocks shall have a diameter or diagonal of between 2.83 in. [70.7 mm] (See Note 3) and 2.9 in. [73.7 mm]. When the upper block bearing surface meets this requirement, the lower block bearing surface shall be greater than 2.83 in. [70.7 mm]. When the lower block bearing surface meets this requirement, the diameter or diagonal of upper block bearing surface shall be between 2.83 and 3 $\frac{1}{8}$ in. [70.7 and 79.4 mm]. When the lower block is the only block with a diameter or diagonal between 2.83 and 2.9 in. [70.7 and 73.7 mm], the lower block shall be used to center the test specimen. In that case, the lower block shall be centered with respect to the upper bearing block and held in position by suitable means. The bearing block surfaces intended for contact with the specimen shall have a Rockwell hardness number not less than 60 HRC. These surfaces shall not depart from plane surfaces by more than 0.0005 in. [0.013 mm] when the blocks are new and shall be maintained within a permissible variation of 0.001 in. or [0.025 mm].

NOTE 3—The diagonal of a 2 in. [50 mm] cube is 2.83 in. [70.7 mm].

6. Materials

6.1 Graded Standard Sand:

6.1.1 The sand (Note 4) used for making test specimens shall be natural silica sand conforming to the requirements for graded standard sand in Specification C 778.

NOTE 4—*Segregation of Graded Sand*—The graded standard sand should be handled in such a manner as to prevent segregation, since variations in the grading of the sand cause variations in the consistency of the mortar. In emptying bins or sacks, care should be exercised to prevent the formation of mounds of sand or craters in the sand, down the slopes of which the coarser particles will roll. Bins should be of sufficient size to permit these precautions. Devices for drawing the sand from bins by gravity should not be used.

7. Temperature and Humidity

7.1 *Temperature*—The temperature of the air in the vicinity of the mixing slab, the dry materials, molds, base plates, and mixing bowl, shall be maintained between 73.5 \pm 5.5 °F or [23.0 \pm 3.0 °C]. The temperature of the mixing water, moist closet or moist room, and water in the storage tank shall be set at 73.5 \pm 3.5 °F or [23 \pm 2 °C].

7.2 *Humidity*—The relative humidity of the laboratory shall be not less than 50 %. The moist closet or moist room shall conform to the requirements of Specification C 511.

8. Test Specimens

8.1 Make two or three specimens from a batch of mortar for each period of test or test age.

9. Preparation of Specimen Molds

9.1 Apply a thin coating of release agent to the interior faces of the mold and non-absorptive base plates. Apply oils and greases using an impregnated cloth or other suitable means. Wipe the mold faces and the base plate with a cloth as necessary to remove any excess release agent and to achieve a thin, even coating on the interior surfaces. When using an aerosol lubricant, spray the release agent directly onto the mold faces and base plate from a distance of 6 to 8 in. or [150 to 200 mm] to achieve complete coverage. After spraying, wipe the surface with a cloth as necessary to remove any excess aerosol lubricant. The residue coating should be just sufficient to allow a distinct finger print to remain following light finger pressure (Note 5).

9.2 Seal the surfaces where the halves of the mold join by applying a coating of light cup grease such as petrolatum. The amount should be sufficient to extrude slightly when the two halves are tightened together. Remove any excess grease with a cloth.

9.3 Seal molds to their base plates with a watertight sealant. Use microcrystalline wax or a mixture of three parts paraffin to five parts rosin by mass. Paraffin wax is permitted as a sealant with molds that clamp to the base plate. Liquefy the wax by heating it to a temperature of between 230 and 248 °F or [110 and 120 °C]. Effect a watertight seal by applying the liquefied sealant at the outside contact lines between the mold and its base plate (Note 6).

9.4 Optionally, a watertight sealant of petroleum jelly is permitted for clamped molds. Apply a small amount of petroleum jelly to the entire surface of the face of the mold that will be contacting the base plate. Clamp the mold to the base plate and wipe any excess sealant from the interior of the mold and base plate.

NOTE 5—Because aerosol lubricants evaporate, molds should be checked for a sufficient coating of lubricant immediately prior to use. If an extended period of time has elapsed since treatment, retreatment may be necessary.

NOTE 6—*Watertight Molds*—The mixture of paraffin and rosin specified for sealing the joints between molds and base plates may be found difficult to remove when molds are being cleaned. Use of straight paraffin is permissible if a watertight joint is secured, but due to the low strength of paraffin it should be used only when the mold is not held to the base plate by the paraffin alone. When securing clamped molds with paraffin, an improved seal can be obtained by slightly warming the mold and base plate prior to applying the wax. Molds so treated should be allowed to return to room temperature before use.

10. Procedure

10.1 Composition of Mortars:

10.1.1 The proportions of materials for the standard mortar shall be one part of cement to 2.75 parts of graded standard sand by weight. Use a water-cement ratio of 0.485 for all portland cements and 0.460 for all air-entraining portland cements. The amount of mixing water for other than portland and air-entraining portland cements shall be such as to produce a flow of 110 \pm 5 as determined in accordance with 10.3 and shall be expressed as weight percent of cement.

 C 109/C 109M – 08

10.1.2 The quantities of materials to be mixed at one time in the batch of mortar for making six and nine test specimens shall be as follows:

	Number of Specimens	
	6	9
Cement, g	500	740
Sand, g	1375	2035
Water, mL		
Portland (0.485)	242	359
Air-entraining portland (0.460)	230	340
Other (to flow of 110 ± 5)

10.2 Preparation of Mortar:

10.2.1 Mechanically mix in accordance with the procedure given in Practice C 305.

10.3 Determination of Flow:

10.3.1 Determine flow in accordance with procedure given in Test Method C 1437.

10.3.2 For portland and air-entraining portland cements, merely record the flow.

10.3.3 In the case of cements other than portland or air-entraining portland cements, make trial mortars with varying percentages of water until the specified flow is obtained. Make each trial with fresh mortar.

10.3.4 Immediately following completion of the flow test, return the mortar from the flow table to the mixing bowl. Quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl and then remix the entire batch 15 s at medium speed. Upon completion of mixing, the mixing paddle shall be shaken to remove excess mortar into the mixing bowl.

10.3.5 When a duplicate batch is to be made immediately for additional specimens, the flow test may be omitted and the mortar allowed to stand in the mixing bowl 90 s without covering. During the last 15 s of this interval, quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl. Then remix for 15 s at medium speed.

10.4 Molding Test Specimens:

10.4.1 Complete the consolidation of the mortar in the molds either by hand tamping or by a qualified alternative method. Alternative methods include but are not limited to the use of a vibrating table or mechanical devices.

10.4.2 Hand Tamping—Start molding the specimens within a total elapsed time of not more than 2 min and 30 s after completion of the original mixing of the mortar batch. Place a layer of mortar about 1 in. or [25 mm] (approximately one half of the depth of the mold) in all of the cube compartments. Tamp the mortar in each cube compartment 32 times in about 10 s in 4 rounds, each round to be at right angles to the other and consisting of eight adjoining strokes over the surface of the specimen, as illustrated in Fig. 1. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the molds. The 4 rounds of tamping (32 strokes) of the mortar shall be completed in one cube before going to the next. When the tamping of the first layer in all of the cube compartments is completed, fill the compartments with the remaining mortar and then tamp as specified for the first layer. During tamping of the second layer, bring in the mortar forced out onto the tops of the molds after each round of tamping by means of the gloved fingers and

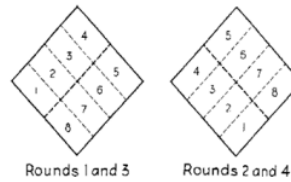


FIG. 1 Order of Tamping in Molding of Test Specimens

the tamper upon completion of each round and before starting the next round of tamping. On completion of the tamping, the tops of all cubes should extend slightly above the tops of the molds. Bring in the mortar that has been forced out onto the tops of the molds with a trowel and smooth off the cubes by drawing the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) once across the top of each cube at right angles to the length of the mold. Then, for the purpose of leveling the mortar and making the mortar that protrudes above the top of the mold of more uniform thickness, draw the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) lightly once along the length of the mold. Cut off the mortar to a plane surface flush with the top of the mold by drawing the straight edge of the trowel (held nearly perpendicular to the mold) with a sawing motion over the length of the mold.

10.4.3 Alternative Methods—Any consolidation method may be used that meets the qualification requirements of this section. The consolidation method consists of a specific procedure, equipment and consolidation device, as selected and used in a consistent manner by a specific laboratory. The mortar batch size of the method may be modified to accommodate the apparatus, provided the proportions maintain the same ratios as given in 10.1.2.

10.4.3.1 Separate qualifications are required for the following classifications:

Class A, *Non-air entrained cements*—for use in concrete, such as sold under Specifications C 150, C 595, and C 1157.

Class B, *Air-entrained cements*—for use in concrete, such as sold under Specifications C 150, C 595, and C 1157.

Class C, *Masonry, Mortar and Stucco Cements*—such as sold under Specifications C 91, C 1328, and C 1329.

10.4.3.2 An alternative method may only be used to test the cement types as given in 10.4.3.1 above, for which it has been qualified.

10.4.3.3 It can also be used for Strength Activity Index determinations for fly ash and slag, such as sold under Specifications C 618 and C 989, provided the alternative method has qualified for both Class A and Class C cements.

10.4.4 Qualification Procedure—Contact CCRL to purchase cement samples that have been used in the Proficiency Sample Program (PSP). Four samples (5 Kg each) of the class to be qualified will be required to complete a single qualification (See Note 7).

10.4.4.1 In one day, prepare replicate 6-cube or 9-cube batches using one of the cements and cast a minimum of 36 cubes. Complete one round of tests on each cement on different days. Store and test all specimens as prescribed in the sections below. Test all cubes at the age of 7-days.

10.4.4.2 Tabulate the compressive strength data and complete the mathematical analyses as instructed in Annex A1.

10.4.5 *Requalification of the Alternate Compaction Method:*

10.4.5.1 Requalification of the method shall be required if any of the following occur:

(1) Evidence that the method may not be providing data in accordance with the requirements of Table 2.

(2) Results that differ from the reported final average of a CCRL-PSP sample with a rating of 3 or less.

(3) Results that differ from the accepted value of a known reference sample with established strength values by more than twice the multi-laboratory 1s % values of Table 2.

Before starting the requalification procedure, evaluate all aspects of cube fabrication and testing process to determine if the offending result is due to some systematic error or just an occasional random event.

10.4.5.2 If the compaction equipment is replaced, significantly modified, repaired, or has been recalibrated, requalify the equipment in accordance with 10.4.4.

NOTE 7—It is recommended that a large homogenous sample of cement be prepared at the time of qualification for use as a secondary standard and for method evaluation. Frequent testing of this sample will give early warning of any changes in the performance of the apparatus.

10.5 *Storage of Test Specimens*—Immediately upon completion of molding, place the test specimens in the moist closet or moist room. Keep all test specimens, immediately after molding, in the molds on the base plates in the moist closet or moist room from 20 to 72 h with their upper surfaces exposed to the moist air but protected from dripping water. If

the specimens are removed from the molds before 24 h, keep them on the shelves of the moist closet or moist room until they are 24-h old, and then immerse the specimens, except those for the 24-h test, in saturated lime water in storage tanks constructed of noncorroding materials. Keep the storage water clean by changing as required.

10.6 *Determination of Compressive Strength:*

10.6.1 Test the specimens immediately after their removal from the moist closet in the case of 24-h specimens, and from storage water in the case of all other specimens. All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible tolerance prescribed as follows:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	±½ h
3 days	±1 h
7 days	±3 h
28 days	±12 h

If more than one specimen at a time is removed from the moist closet for the 24-h tests, keep these specimens covered with a damp cloth until time of testing. If more than one specimen at a time is removed from the storage water for testing, keep these specimens in water at a temperature of 73.5 ± 3.5 °F or [23 ± 2 °C] and of sufficient depth to completely immerse each specimen until time of testing.

10.6.2 Wipe each specimen to a surface-dry condition, and remove any loose sand grains or incrustations from the faces that will be in contact with the bearing blocks of the testing machine. Check these faces by applying a straightedge (Note 8). If there is appreciable curvature, grind the face or faces to plane surfaces or discard the specimen. A periodic check of the cross-sectional area of the specimens should be made.

NOTE 8—*Specimen Faces*—Results much lower than the true strength will be obtained by loading faces of the cube specimen that are not truly plane surfaces. Therefore, it is essential that specimen molds be kept scrupulously clean, as otherwise, large irregularities in the surfaces will occur. Instruments for cleaning molds should always be softer than the metal in the molds to prevent wear. In case grinding specimen faces is necessary, it can be accomplished best by rubbing the specimen on a sheet of fine emery paper or cloth glued to a plane surface, using only a moderate pressure. Such grinding is tedious for more than a few thousandths of an inch (hundredths of a millimetre); where more than this is found necessary, it is recommended that the specimen be discarded.

10.6.3 Apply the load to specimen faces that were in contact with the true plane surfaces of the mold. Carefully place the specimen in the testing machine below the center of the upper bearing block. Prior to the testing of each cube, it shall be ascertained that the spherically seated block is free to tilt. Use no cushioning or bedding materials. Bring the spherically seated block into uniform contact with the surface of the specimen. Apply the load rate at a relative rate of movement between the upper and lower platens corresponding to a loading on the specimen with the range of 200 to 400 lbs/s [900 to 1800 N/s]. Obtain this designated rate of movement of the platen during the first half of the anticipated maximum load and make no adjustment in the rate of movement of the platen in the latter half of the loading especially while the cube is yielding before failure.

NOTE 9—It is advisable to apply only a very light coating of a good quality, light mineral oil to the spherical seat of the upper platen.

TABLE 2 Precision

	Test Age, Days	Coefficient of Variation 1s % ^A	Acceptable Range of Test Results d2s % ^A
Portland Cements			
Constant water-cement ratio:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.6	10.2
Av	3	3.8	10.7
	7	3.8	10.7
Multi-lab	3	6.8	19.2
	7	6.4	18.1
Av	3	6.6	18.7
	7	6.6	18.7
Blended Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.8	10.7
Av	3	3.4	9.6
	7	3.8	10.7
Multi-lab	3	7.8	22.1
	7	7.6	21.5
Av	3	7.4	20.9
	7	7.6	21.5
Masonry Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	7	7.9	22.3
	28	7.5	21.2
Av	7	7.7	21.8
	28	7.7	21.8
Multi-lab	7	11.8	33.4
	28	12.0	33.9
Av	7	11.9	33.7
	28	11.9	33.7

^A These numbers represent, respectively, the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C 670.

11. Calculation

11.1 Record the total maximum load indicated by the testing machine, and calculate the compressive strength as follows:

$$f_m = P/A \quad (1)$$

where:

f_m = compressive strength in psi or [MPa],
 P = total maximum load in lbf or [N], and
 A = area of loaded surface in² or [mm²].

Either 2-in. or [50-mm] cube specimens may be used for the determination of compressive strength, whether inch-pound or SI units are used. However, consistent units for load and area must be used to calculate strength in the units selected. If the cross-sectional area of a specimen varies more than 1.5 % from the nominal, use the actual area for the calculation of the compressive strength. The compressive strength of all acceptable test specimens (see Section 12) made from the same sample and tested at the same period shall be averaged and reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

12. Report

12.1 Report the flow to the nearest 1 % and the water used to the nearest 0.1 %. Average compressive strength of all specimens from the same sample shall be reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

13. Faulty Specimens and Retests

13.1 In determining the compressive strength, do not consider specimens that are manifestly faulty.

13.2 The maximum permissible range between specimens from the same mortar batch, at the same test age is 8.7 % of the average when three cubes represent a test age and 7.6 % when two cubes represent a test age (Note 10).

NOTE 10—The probability of exceeding these ranges is 1 in 100 when the within-batch coefficient of variation is 2.1 %. The 2.1 % is an average for laboratories participating in the portland cement and masonry cement

reference sample programs of the Cement and Concrete Reference Laboratory.

13.3 If the range of three specimens exceeds the maximum in 13.2, discard the result which differs most from the average and check the range of the remaining two specimens. Make a retest of the sample if less than two specimens remain after discarding faulty specimens or discarding tests that fail to comply with the maximum permissible range of two specimens.

NOTE 11—Reliable strength results depend upon careful observance of all of the specified requirements and procedures. Erratic results at a given test period indicate that some of the requirements and procedures have not been carefully observed; for example, those covering the testing of the specimens as prescribed in 10.6.2 and 10.6.3. Improper centering of specimens resulting in oblique fractures or lateral movement of one of the heads of the testing machine during loading will cause lower strength results.

14. Precision and Bias

14.1 *Precision*—The precision statements for this test method are listed in Table 2 and are based on results from the Cement and Concrete Reference Laboratory Reference Sample Program. They are developed from data where a test result is the average of compressive strength tests of three cubes molded from a single batch of mortar and tested at the same age. A significant change in precision will not be noted when a test result is the average of two cubes rather than three.

14.2 These precision statements are applicable to mortars made with cements mixed, and tested at the ages as noted. The appropriate limits are likely, somewhat larger for tests at younger ages and slightly smaller for tests at older ages.

14.3 *Bias*—The procedure in this test method has no bias because the value of compressive strength is defined in terms of the test method.

15. Keywords

15.1 compressive strength; hydraulic cement mortar; hydraulic cement strength; mortar strength; strength

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. ANALYSES OF TEST RESULTS FOR QUALIFICATION OF ALTERNATE COMPACTION METHODS

A1.1 *Calculation of Average Within-Batch Standard Deviation and Elimination of Outliers*—Tabulate the results for each cement sample (or round) in separate spreadsheets. In the spreadsheet, list results of each batch in columns and complete the calculations as shown in Table A1.1.

A1.1.1 Eliminate any outliers from the test data and repeat the calculations until none of the values lie outside the normal range.

A1.1.2 Tabulate the cube strengths with all the outliers eliminated and complete the calculations as shown in Table A1.2.

A1.2 *Summary of Results*—Compile the results of the four

rounds and complete the calculations as shown in Table A1.3. The number of outliers shall not exceed 5 % of the total number of tests when rounded to the nearest whole number (for example, 4 rounds \times 4 batches \times 9 cubes = 144 tests \times (5%/100) = 7.2 or 7).

A1.3 *Precision Qualification*—Calculate the relative within batch error (RWBE %) as shown in Table A1.3. This value must be less than 2.1 % to comply with the limit established in Note 10 of this specification.

A1.4 *Bias Qualification*—The test results compiled in Table A1.3 are evaluated against three limits to demonstrate an acceptable qualification. The limits have been established

TABLE A1.1 Example Using 9 Cube Batch

Round – 2
CCRL Sample # 140 Industry Average Strength, $X_i = 32.923$
Cast Date – 00/00/00

7-Day Strengths, MPa				
A	B	C	D	E
Batch No.	1	2	3	4
Cube 1	33.0	34.3	34.4	33.2
Cube 2	33.9	32.5	34.0	34.0
Cube 3	33.4	34.0	34.1	33.8
Cube 4	33.1	33.8	34.0	33.8
Cube 5	33.0	33.4	34.2	34.0
Cube 6	32.8	33.7	31.8	33.1
Cube 7	33.6	32.6	33.9	32.8
Cube 8	31.5	32.1	33.0	33.3
Cube 9	33.6	34.3	33.4	34.4
Average, X_b	33.10	33.42	33.65	33.60
SD_b	0.70	0.82	0.81	0.52
N_b	9	9	9	9
$(N_b - 1)SD_b^2$	3.936	5.432	5.265	2.145
			N_r	36
			X_r	33.44
			SD_r	0.692
			MND	1.703
Normal Range				
Max	34.81	35.12	35.35	35.30
Min	31.40	31.71	32.95	31.89
Outliers	None	None	Cube 6	None

where:
 X_i = industry average strength (CCRL),
 X_b = average of tests values in a single batch,
 SD_b = standard deviation of a single batch = $\sqrt{\frac{\sum_{c \in b} (X - X_b)^2}{N_b - 1}}$
 N_b = number of tests per batch,
 $(N_b - 1)SD_b^2$ = an intermediate calculation,
 N_r = total number of tests per round,
 X_r = grand average of tests values obtained per round, MPa,
 SD_r = mean standard deviation of round = $\sqrt{\frac{\sum_{b \in r} [(N_b - 1)SD_b^2]}{N_r - 1}}$
MND = maximum normal deviation: use Excel® function “=norminv(1-0.25/N,0,SD)” or equivalent, or use statistical tables to find the inverse integrated normal distribution for an integral value of (1-0.25/n) in a normal distribution with $\sigma = SD_r$.

Normal Range:
 Maximum = ($X_b + MND$).
 Minimum = ($X_b - MND$).
 Outlier = any test value falling outside the calculated normal range.

statistically from analyses of historical CCRL data and are given in Table A1.4.

A1.5 Rationale for the Limits Given in A1.4:

A1.5.1 The multi-laboratory precision (1s%) for the average of n batches is given by:

$$s\%_{ML,n} = \sqrt{s\%_{ML}^2 - \left(1 - \frac{1}{n}\right) s\%_{SO}^2}$$

A1.5.2 The limit for deviation of the individual rounds (no failures being allowed when 4 rounds are performed) is 1.2 $s\%_{ML,n}$, as used in Test Methods C 114.

A1.5.3 The multi-laboratory precision (1s%) for the mean of 4 rounds is 0.5 $s\%_{ML,n}$.

TABLE A1.2 Test Data After the Elimination of Outliers (Example Using 9 Cube Batch)

Round – 2
CCRL Sample # 140 Industry Average Strength, $X_i = 32.923$
Cast Date – 00/00/00

Raw Cube Data:

7-Day Strengths, MPa				
A	B	C	D	E
Batch No.	1	2	3	4
Cube 1	33.0	34.3	34.4	33.2
Cube 2	33.9	32.5	34.0	34.0
Cube 3	33.4	34.0	34.1	33.8
Cube 4	33.1	33.8	34.0	33.8
Cube 5	33.0	33.4	34.2	34.0
Cube 6	32.8	33.7	31.8	33.1
Cube 7	33.6	32.6	33.9	32.8
Cube 8	33.6	32.1	33.0	33.3
Cube 9	33.6	34.3	33.4	34.4
Average, X_{bv}	33.29	33.42	33.89	33.60
SD_{bv}	0.39	0.82	0.46	0.52
N_{bv}	8	9	8	9
$(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2$	1.092	5.348	1.462	2.159
			N_{rv}	34
			X_{rv}	33.55
			X_i	32.92
			SD_{rv}	0.55
			E_r , MPa	0.63
			RE_r , %	1.91

where:
 X_{bv} = average of valid test values obtained per batch, MPa,
 X_i = industry average strength (CCRL), MPa,
 SD_{bv} = $\sqrt{\frac{\sum_{v \in b} (X - X_{bv})^2}{N_{bv} - 1}}$
 N_{bv} = number of valid tests per batch,
 $(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2$ = an intermediate calculation,
 N_{rv} = total number of valid tests of the round,
 X_{rv} = grand average of valid tests for the round, MPa,
 SD_{rv} = mean standard deviation of the round = $\sqrt{\frac{\sum_{v \in r} [(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2]}{N_{rv} - 1}}$
 E_r = error = ($X_i - X_{rv}$), MPa, and
 RE_r = relative error for the round, % = 100(E_r/X_{rv}).

A1.5.4 The limit for deviation of the mean of 4 rounds (95 % confidence) is 1.96 times this, or 0.98 $s\%_{ML,n}$.

A1.5.5 The values for $s\%_{ML}$ and $s\%_{SO}$ for Cement Classes A and C (non-air-entrained cements for concrete and cements for mortar respectively) are the 7-day values in the current precision statement of Test Method C 109/C 109M. There appears to be no data for Cement Class B (air-entrained cements for concrete). Working on the assumption that the value of this quantity is related to the air content, the values adopted for Class B are the mean of the A- and C-values.

A1.5.6 For the applicable conditions, the equations above give the following:

Derivation of Limits for Table A1.4

Cement Class	A	B	C	A	B	C
Batches per Round (n)	6	6	6	4	4	4
Single Operator s% (single batch)	3.6	5.75	7.9	3.6	5.75	7.9
Multi-Laboratory s% (single batch)	6.4	9.1	11.8	6.4	9.1	11.8
Multi-Laboratory s% (n batches)	5.5	7.4	9.3	5.6	7.6	9.6
Limit for deviation of a single round %	6.6	8.9	11.2	6.7	9.1	11.5
Limit for deviation of mean of four rounds %	5.4	7.3	9.2	5.5	7.5	9.4


 **C 109/C 109M – 08**

TABLE A1.3 Summary of Results

A	B CCRL #	C Day	D X_i MPa	E X_{rv} MPa	F RE_{rv} %	G N_{rv}	H SD_{rv}	I $(N_r-1)SD_r^2$
Round 1	139	1	28.47	30.42	6.85	36	0.97	32.93
Round 2	140	2	32.92	33.55	1.91	34	0.55	9.98
Round 3	141	3	32.64	33.14	1.53	34	0.47	7.29
Round 4	142	4	32.24	33.01	2.39	36	0.51	9.10
							Max, RE_{rv} , %	6.85
							Mean, RE_{rv} , %	3.17
							GMWBE, MPa	0.65
							RWBE, %	2.01
							Max RWBE, % ^A	2.1
							Precision Test	Pass

where:

- X_f = industry average strength, MPa,
- X_{rv} = grand mean value of the valid tests of a round,
- RE_{rv} , % = relative error = $100(X_i - X_{rv})$,
- N_{rv} = total number of valid tests of the round,
- SD_{rv} = mean standard deviation of a round =

$$\sqrt{\frac{\sum_{Batch} [(N_{bv} - 1)SD_{rv}^2]}{N_{rv} - 1}}$$

$(N_r-1)SD_r^2$ = intermediate calculation,

X_g = grand mean value of all valid tests (4 rounds),

N_g = total number of valid tests in 4 rounds,

GMWBE = grand mean within-batch error, MPa =

$$\sqrt{\frac{\sum_{Round} [(N_{rv} - 1)SD_{rv}^2]}{N_g - 1}}$$


RWBE = relative within batch error, % = $100(\text{GMWBE} / X_g)$, and

Max RWBE = maximum allowed RWBE = 2.10 % (See Note 10).

^A See Note 9.

TABLE A1.4 Bias Qualification Requirements

	6 Cube Batches (Min 6 Batches per Round)			9 Cube Batches (Min 4 Batches per Round)		
Cement Classification (see 10.4.3.1)	A	B	C	A	B	C
Max allowable relative error any 4 or 6 batches, MARE _r %	6.6	8.9	11.2	6.7	9.1	11.5
Max allowable relative error mean of 4 rounds of 4 or 6 batches <5 % failures, GRE%	5.4	7.3	9.2	5.5	7.5	9.4
Minimum allowable confidence limit, % MACL %	95	95	95	95	95	95

 **C 109/C 109M – 08**

**TABLE A1.5 Bias Tests
(Example Using 9-Cube Batches, Class A Cement)**

MREr %, the maximum relative error value of the four rounds	6.85
MAREr %, max allowable MREr from Table A1.4	6.7
	Fails
GRE %, the average REr % of the four rounds	3.13
Maximum limit of MGREg % from Table A1.4	5.5
	Pass
Bias confidence limit, CL %	96.99
Minimum allowable confidence limit, MACL % (from Table A1.4)	95
	Pass

The above results indicate the data fails to show compliance.

where:

- MREr*, % = the maximum relative error, % obtained for any round (from values in column F, Table A1.3),
- MAREr*, % = the maximum allowable relative error, % of any Round (Table A1.4),
- GRE*, % = the grand average of the REr, % values of the four rounds,
- MAREg*, % = maximum allowed GRE, % value (average of column F, Table A1.3), and
- CL*, % = bias confidence limit, %, the confidence with which it can be stated that the error of the mean of 4 rounds is non-zero. Calculate this by use of Excel® function “=ttest(<range of industry means>,<range of values obtained>,1,1)” or equivalent, or use statistical tables to find the confidence in a one-tailed, paired-value t-test on the set of round errors.

NOTE—The qualification method fails for bias if (1) the MREr exceeds the MAREr, % limit; or if (2) the GRE, % exceeds the MGREg limit and the CL, % exceeds 95 %.

SUMMARY OF CHANGES

Committee C01 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 109/C 109M – 07^{e1}, that may impact the use of this test method. (Approved December 1, 2008).

(1) Revised 5.1.

(2) Revised 9.3, added new 9.4, and revised Note 6.

Committee C01 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 109/C 109M – 05, that may impact the use of this test method. (Approved August 15, 2007).

(1) Revised 5.9.2.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: E1225 – 13

Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids Using the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique¹

This standard is issued under the fixed designation E1225; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last approval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method describes a steady state technique for the determination of the thermal conductivity, λ , of homogeneous-opaque solids (see **Notes 1 and 2**). This test method is applicable to materials with effective thermal conductivities in the range $0.2 < \lambda < 200 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ over the temperature range between 90 and 1300 K. It can be used outside these ranges with decreased accuracy.

Note 1—For purposes of this technique, a system is homogeneous if the apparent thermal conductivity of the specimen, λ_a , does not vary with changes of thickness or cross-sectional area by more than $\pm 5\%$. For composites or heterogeneous systems consisting of slabs or plates bonded together, the specimen should be more than 20 units wide and 20 units thick, respectively, where a unit is the thickness of the thickest slab or plate, so that diameter or length changes of one-half unit will affect the apparent λ_a by less than $\pm 5\%$. For systems that are non-opaque or partially transparent in the infrared, the combined error due to inhomogeneity and photon transmission should be less than $\pm 5\%$. Measurements on highly transparent solids must be accompanied with infrared absorption coefficient information, or the results must be reported as apparent thermal conductivity, λ_a .

Note 2—This test method may also be used to evaluate the contact thermal conductance/resistance of materials.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E37 on Thermal Measurements and is the direct responsibility of Subcommittee E37.05 on Thermophysical Properties.

Current edition approved Oct. 1, 2013. Published November 2013. Originally approved in 1987. Last previous edition approved in 2009 as E1225 – 09. DOI: 10.1520/E1225-13.

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:²
E230 Specification and Temperature-Electromotive Force (EMF) Tables for Standardized Thermocouples

3. Terminology

3.1 *Descriptions of Terms and Symbols Specific to This Standard:*

3.1.1 *Terms:*

3.1.1.1 *thermal conductivity, λ* —the time rate of heat flow, under steady conditions, through unit area, per unit temperature gradient in the direction perpendicular to the area;

3.1.1.2 *apparent thermal conductivity*—when other modes of heat transfer through a material are present in addition to conduction, the results of the measurements performed according to this test method will represent the apparent or effective thermal conductivity for the material tested.

3.1.2 *Symbols:*

$\lambda_M(T)$ = thermal conductivity of meter bars (reference materials) as a function of temperature, (W/(m·K)),
 λ_M^1 = thermal conductivity of top meter bar (W/(m·K)),
 λ_M^2 = thermal conductivity of bottom meter bar (W/(m·K)),
 $\lambda_S(T)$ = thermal conductivity of specimen corrected for heat exchange where necessary, (W/(m·K)),
 $\lambda'_S(T)$ = thermal conductivity of specimen calculated by ignoring heat exchange correction, (W/(m·K)),
 $\lambda_I(T)$ = thermal conductivity of insulation as a function of temperature, (W/(m·K)),

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

- T = absolute temperature (K),
- Z = position as measured from the upper end of the column, (m),
- l = specimen length, (m),
- T_j = the temperature at Z_j , (K),
- q' = heat flow per unit area, (W/m²),
- $\delta\lambda, \delta T$, etc. = uncertainty in λ, T , etc.,
- r_A = specimen radius, (m),
- r_B = guard cylinder inner radius, (m), and
- $T_g(z)$ = guard temperature as a function of position, z , (K).

4. Summary of Test Method

4.1 A test specimen is inserted under load between two similar specimens of a material of known thermal properties. A temperature gradient is established in the test stack and heat losses are minimized by use of a longitudinal guard having approximately the same temperature gradient. At equilibrium conditions, the thermal conductivity is derived from the measured temperature gradients in the respective specimens and the thermal conductivity of the reference materials.

4.2 General Features of Test Method:

4.2.1 The general features of the guarded longitudinal heat flow technique are shown in Fig. 1. A specimen of unknown thermal conductivity, λ_s , but having an estimated thermal conductance of λ_M/l_M , is mounted between two meter bars of known thermal conductivity, λ_M , of the same cross-section and similar thermal conductance, λ_M/l_M . A more complex but suitable arrangement is a column consisting of a disk heater with a specimen and a meter bar on each side between heater and heat sink. Approximately one-half of the power would then flow through each specimen. When the meter bars and specimen are right-circular cylinders of equal diameter the technique is described as the cut-bar method. When the cross-sectional dimensions are larger than the thickness it is described as the flat slab comparative method. Essentially, any shape can be used, as long as the meter bars and specimen have the same conduction areas.

4.2.2 A force is applied to the column to ensure good contact between specimens. The stack is surrounded by an insulation material of thermal conductivity, λ_I . The insulation is enclosed in a guard shell with a radius, r_B , held at the temperature, $T_g(z)$. A temperature gradient is imposed on the column by maintaining the top at a temperature, T_1 , and the bottom at temperature T_2 . $T_g(z)$ is usually a linear temperature gradient matching approximately the gradient established in the test stack. However, an isothermal guard with $T_g(z)$ equal to the average temperature of the specimen may also be used. An unguarded system is not recommended due to the potential very large heat losses, particularly at elevated temperatures (1).³ At steady state, the temperature gradients along the sections are calculated from measured temperatures along the two meter bars and the specimen. The value of λ_s , as uncorrected for heat shunting) can then be determined using the following equation where the notation is shown in Fig. 1:

$$\lambda_s = \frac{Z_4 - Z_3}{T_4 - T_3} \frac{\lambda_M}{2} \left(\frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} + \frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \right) \quad (1)$$

This is a highly idealized situation, however, since it assumes no heat exchange between the column and insulation at any position and uniform heat transfer at each meter bar-specimen interface. The errors caused by these two assumptions vary widely and are discussed in Section 10. Because of these two effects, restrictions must be placed on this test method, if the desired accuracy is to be achieved.

5. Significance and Use

5.1 The comparative method of measurement of thermal conductivity is especially useful for engineering materials including ceramics, polymers, metals and alloys, refractories, carbons, and graphites including combinations and other composite forms of each.

5.2 Proper design of a guarded-longitudinal system is difficult and it is not practical in a method of this type to try to establish details of construction and procedures to cover all contingencies that might offer difficulties to a person without technical knowledge concerning theory of heat flow, temperature measurements, and general testing practices. Standardization of this test method is not intended to restrict in any way the future development by research workers of new or methods or improved procedures. However, new or improved techniques must be thoroughly tested. Requirements for qualifying an apparatus are outlined in Section 10.

6. Requirements

6.1 Meter Bar Reference Materials:

6.1.1 Reference materials or transfer standards with known thermal conductivities must be used for the meter bars. Since the minimum measurement error of the method is the uncertainty in λ_M , it is preferable to use standards available from a National Metrology Institute. Other reference materials are available because numerous measurements of λ have been made and general acceptance of the values has been obtained. Table 1 lists some of the recognized reference materials. Fig. 2 shows the approximate variation of λ_M with temperature.

6.1.2 Table 1 is not exhaustive and other materials may be used as references. The reference material and the source of λ_M values shall be stated in the report.

6.1.3 The requirements for any reference material include stability over the temperature range of operation, compatibility with other system components, reasonable cost, ease of temperature sensor attachment, and an accurately known thermal conductivity. Since heat shunting errors for a specific λ_I increase as λ_M/λ_s varies from unity, (1) the reference which has a λ_M nearest to λ_s should be used for the meter bars.

6.1.4 If a sample's thermal conductivity λ_s is between the thermal conductivity values of two types of reference materials, the reference material with the higher λ_M should be used to reduce the total temperature drop along the column.

6.2 Insulation Materials:

6.2.1 A large variety of powder, particulate, and fiber materials exists for reducing both radial heat flow in the column-guard annulus and surrounds, and for heat shunting

³ The boldface numbers in parentheses refer to a list of references at the end of this test method.

TABLE 1 Reference Materials For Use as Meter Bars

Material	Temperature Range (K)	Percentage Uncertainty (\pm %)	Thermal Conductivity (W/m·K)
Electrolytic Iron ^{A,B}	2 to 1000	2	See Table 3.
Tungsten ^C	4 to 300	2	See Table 4.
	300 to 2000	2 to 5	
	>2000	5 to 8	
Austenitic Stainless ^D	200 to 1200	<5 %	See Table 5.
Copper ^E	85 to 1250	<2	$\lambda_M = 416.31 - 0.05904T + 7.0872 \times 10^{-7}T^3$
Pyroceram ^{F,G,H,I,J,K}	298 to 1025 K	6.5	$\lambda = 2.332 + 515.2/T$ $\lambda = 3.65367 - 6.64042 \times 10^{-4}T - 218.93771T + 116163T^2$
	4 for T > 300 K		$\lambda_M = (84.7/T) + 1.484 + 4.94 \times 10^{-4}T + 9.6 \times 10^{-13}T^4$
Fused Silica ^{L,M}	1300	<8	
Pyrex ^{N,O,P,Q}	90 to 600	Up to 900 K	$\lambda = 1.1036 + 1.659 \times 10^{-3}(T-273.15) - 3.982 \times 10^{-6}(T-273.15)^2 + 6.746 \times 10^{-9}(T-273.15)^3$
	140 to 470	<2 for T > 200 K	K
310 Stainless Steel ^{R,R}	300 to 1020	4	$\lambda = 12.338 + 1.781 \times 10^{-2}(T-273.15)$
430 Stainless Steel ^{R,R}	300 to 770	4	$\lambda = 20.159 + 1.589 \times 10^{-2}(T-273.15) - 1.283 \times 10^{-5}(T-273.15)^2$
Inconel 600 ^{R,R}	300 to 1020	4	$\lambda = 12.479 + 1.648 \times 10^{-2}(T-273.15) + 3.741 \times 10^{-6}(T-273.15)^2$
Nimonic 75 ^{T,K,R}	300 to 1020	4	$\lambda = 11.958 + 1.657 \times 10^{-2}(T-273.15) + 3.252 \times 10^{-6}(T-273.15)^2$

^A SRM 8420 is available from National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD, U.S.
^B Hurst, J. G., and Lankford, A. B., "Report of Investigation, Research Materials 8420 and 8421, Electrolytic Iron, Thermal Conductivity and Electrical Resistivity as a Function of Temperature from 2 to 1000K," National Institutes of Standards and Technology (nee National Bureau of Standards), Gaithersburg, MD, USA, 1984.
^C Hurst, J. G., and Giarratano, P. J., Certificate, Standard Reference Material 730, *Thermal Conductivity - Tungsten*, National Institutes of Standards and Technology (nee National Bureau of Standards), Gaithersburg, MD, 1976.
^D Hurst, J. G., Sparks, L. L., and Giarratano, P. J., Certificate, Standard Reference Material 735, *Thermal Conductivity - Austenitic Stainless Steel*, National Institutes of Standards and Technology (nee National Bureau of Standards), Gaithersburg, MD, USA, 1975.
^E Moore, J. P., Graves, R. S., and McElroy, D. L., "Thermal Conductivity and Electrical Resistivity of High-Purity Copper from 78 to 400 °K," *Canadian Journal of Physics*, Vol 45, 1967, pp. 3849-3865.
^F Pyroceram is a trademark by Corning Incorporated, Corning, NY.
^G Salmon, D. R., Roebben, G., and Brandt, R., "Certification of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity up to 1025 K of Glass-Ceramic Reference Material BCR-720," EUR Report 21764, Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM), Geel, Belgium, 2007.
^H Stoe, D. E., Therritus, M. A., and Jacobs - Fedore, R. A., "Thermophysical Properties of Pyroceram™ 9606," *Thermal Conductivity 27 / Thermal Expansion 15*, H. Wang, W. Porter, eds., DEStech Publications, Lancaster, PA, 2005, pp. 382-390.
^I BCR-2013 is available from the Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM), Geel, Belgium, U.S.
^J BCR-724 is available from the Laboratory of the Government Chemists (LGC), Teddington, Middlesex, UK, U.S.
^K Tye, R. P., and Salmon, D. R., "Development of New Thermal Conductivity Reference Materials: A Summary of Recent Contributions by National Physical Laboratory," *Thermal Conductivity 27 / Thermal Expansion 15*, H. Wang (ed.), DEStech Publications, Lancaster PA, 2005, pp. 372-381.
^L Above 700 K a large fraction of heat conduction in fused silica will be by radiation and the actual effective values may depend on the emittances of bounding surfaces and meter bar size.
^M Recommended values from Table 3017 A-R-2 of the Thermophysical Properties Research Center Data Book, Vol. 3, "Nonmetallic Elements, Compounds, and Mixtures," Purdue University, Lafayette, Indiana.
^N Pyrex is a trademark by Corning Incorporated, Corning, NY.
^O Tye, R. P., and Salmon, D. R., "Thermal Conductivity Certified Reference Materials: Pyrex 7740 and Polymethylmethacrylate," *Thermal Conductivity 26 / Thermal Expansion 14*, R. Dinwiddie, ed., DEStech Publications, Lancaster, PA, 2005, pp. 437-451.
^P BCR-39 is available from the Institute for Reference Materials and Measurements (IRMM), Geel, Belgium, U.S.
^Q Salmon, D., "Thermal Conductivity of Insulations Using Guarded Hot Plates, including Recent Developments and Sources of Reference Materials," *Measurement Science and Technology*, Vol 12, 2001, pp. R89-R98.
^R Clark, J., and Tye, R., "Thermophysical Properties Reference Data for Some Key Engineering Alloy," *High Temperatures - High Pressures*, Vols 35/36, 2003/2004, pp. 1-14.
^S Inconel is a trademark by Special Metals Corporation, Huntington WV.
^T Nimonic is a trademark by Special Metals Corporation, Huntington WV.
^U This is the sole source of supply of this material known to the committee at this time. If you are aware of alternative suppliers, please provide this information to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend.

6.4 Reduction of Contact Resistance:

6.4.1 This test method requires uniform heat transfer at the meter bar to specimen interfaces whenever the temperature sensors are within a distance equal to r_A from an interface (6). This requirement necessitates a uniform contact resistance across the adjoining areas of meter bars and specimens. This is normally attained by use of an applied axial load in conjunction with a conducting medium at the interfaces. Measurements in a vacuum environment are not recommended, unless the vacuum is required for protection purposes.

6.4.2 For the relatively thin specimens normally used for materials having a low thermal conductivity, the temperature sensors must be mounted close to the surface and in consequence the uniformity of contact resistance is critical. In such cases, a very thin layer of a compatible highly conductive fluid, paste, soft metal foil, or screen shall be introduced at the interfaces.

6.4.3 Means shall be provided for imposing a reproducible and constant load along the column with the primary purpose of minimizing interfacial resistances at meter bar-specimen

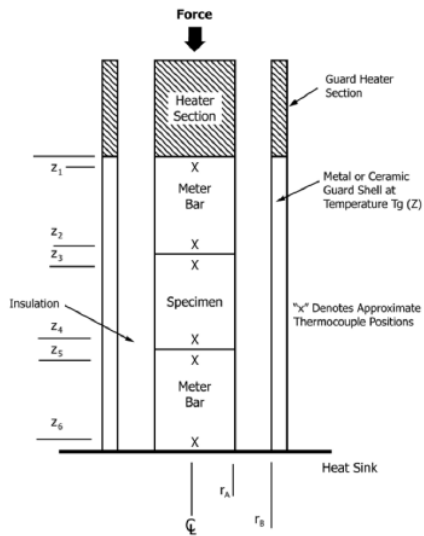


FIG. 1(a) Schematic of a Comparative-Guarded-Longitudinal Heat Flow System Showing Possible Locations of Temperature Sensors

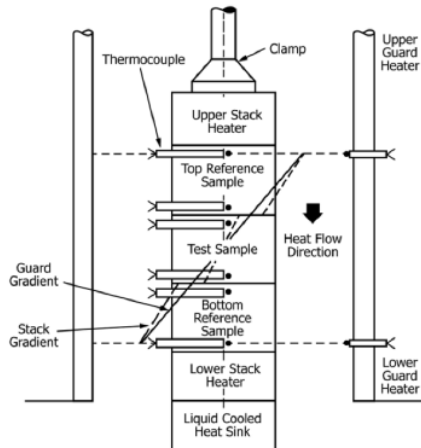


FIG. 1(b) Schematic of Typical Test Stack and Guard System Illustrating Matching of Temperature Gradients

FIG. 1

along the column. Several factors must be considered during selection of the most appropriate insulation. The insulation must be stable over the anticipated temperature range, have a low λ_p , and be easy to handle. In addition, the insulation should not contaminate system components such as the temperature sensors, it must have low toxicity, and it should not conduct electricity. In general, powders and particulates are used since they pack readily. However, low density fiber blankets can also be used.

6.2.2 Some candidate insulations are listed in Table 2.

6.3 Temperature Sensors:

6.3.1 There shall be a minimum of two temperature sensors on each meter bar and two on the specimen. Whenever possible, the meter bars and specimen should each contain three sensors. The extra sensors are useful in confirming linearity of temperature versus distance along the column, or indicating an error due to a temperature sensor decalibration.

6.3.2 The type of temperature sensor depends on the system size, temperature range, and the system environment as controlled by the insulation, meter bars, specimen, and gas within the system. Any sensor possessing adequate accuracy may be used for temperature measurement (2) and be used in large systems where heat flow perturbation by the temperature sensors would be negligible. Thermocouples are normally employed. Their small size and the ease of attachment are distinct advantages.

6.3.3 When thermocouples are employed, they should be fabricated from wires which are 0.1 mm diameter or less. A constant temperature reference shall always be provided for all cold junctions. This reference can be an ice-cold slurry (3), a constant temperature zone box, or an electronic ice point reference. All thermocouples shall be fabricated from either calibrated thermocouple wire (4) or from wire that has been certified by the supplier to be within the limits of error specified in Table 1 of Standard E230.

6.3.4 Thermocouple attachment is important to this technique in order to ensure that reliable temperature measurements are made at specific points. The various techniques are illustrated in Fig. 3. Intrinsic junctions can be obtained with metals and alloys by welding individual thermo-elements to the surfaces (Fig. 3a). Butt or bead welded thermocouple junctions can be rigidly attached by peening, cementing, or welding in fine grooves or small holes (Fig. 3b, 3c, and 3d).

6.3.5 In Fig. 3b, the thermocouple resides in a radial slot, and in Fig. 3c the thermocouple is pulled through a radial hole in the material. When a sheathed thermocouple or a thermocouple with both thermoclements in a two-hole electrical insulator is used, the thermocouple attachment shown in Fig. 3d can be used. In the latter three cases, the thermocouple should be thermally connected to the solid surface using a suitable glue or high temperature cement. All four of the procedures shown in Fig. 3 should include wire tempering on the surfaces, wire loops in isothermal zones, thermal wire grounds on the guard, or a combination of all three (5).

6.3.6 Since uncertainty in temperature sensor location leads to large errors, special care must be taken to determine the correct distance between sensors and to calculate the possible error resulting from any uncertainty.

TABLE 2 Suitable Thermal Insulation Materials

Material ^a	Typical Thermal Conductivity (W/(m·K))		
	300K	800K	1300K
Poured Powders			
Diatomaceous Earth	0.053	0.10	0.154
Bubbled Alumina	0.21	0.37	0.41
Bubbled Zirconia	0.19	0.33	0.37
Vermiculite	0.07	0.16	...
Perlite	0.050	0.17	...
Blankets and Felts			
Aluminosilicate 60–120 kg/m ³	0.044	0.13	0.33
Zirconia 60–90 kg/m ³	0.039	0.09	0.25

^a All materials listed can be used up to the 1300 K limit of the comparative longitudinal except where noted.

TABLE 3 Thermal Conductivity of Electrolytic Iron^a

Temperature, K	Thermal Conductivity, (W/m·K)
2	12.32
3	18.48
4	24.62
5	30.76
6	36.88
7	42.97
8	49.0
9	55.0
10	61.0
12	72.8
14	84.2
16	95.2
18	105.7
20	115.7
25	137.4
30	153.9
35	164.5
40	169.1
45	168.3
50	163.6
60	149.1
70	134.9
80	123.8
90	115.4
100	108.9
150	92.7
200	86.7
250	81.5
300	76.4
400	67.5
500	60.2
600	53.6
700	47.49
800	41.96
900	37.12
1000	32.98

^a Hurst, J. G., and Lankford, A. B., Report of Investigation, Research Materials 8420 and 8421, Electrolytic Iron, Thermal Conductivity and Electrical Resistivity as a Function of Temperature from 2 to 1000K, National Institute of Standards and Technology (nee Bureau of Standards), 1984.

interfaces. Since the force applied to the column usually affects the contact resistance, it is desirable that this force be variable to ensure that λ_s does not change with force variation. This force can be applied either pneumatically, hydraulically, by spring action, or by putting a dead weight on the column. The above load mechanisms have the advantage of remaining constant with change in column temperature. In some cases, the compressive strength of the specimen might be so low that the applied force must be limited to the dead weight of the upper meter bar. In this case, special care must be taken to limit

TABLE 4 Thermal Conductivity of Tungsten^a

Temperature, K	Thermal Conductivity, (W/m·K)
4	154
6	231
8	306
10	377
12	444
14	503
16	553
18	591
20	618
30	585
40	438
50	330
60	275
70	245
80	229
90	218
100	211
120	202
140	197
160	194
180	190
200	187
250	180
300	172
350	164
400	157
450	151
500	146
600	138
700	132
800	127
900	123
1000	120
1200	114
1400	110
1600	107
1800	105
2000	102
2200	101
2400	99
2600	98
2800	97
3000	97

^a Hurst, J. G., and Giannatano, P. J., Certificate, Standard Reference Material 730, Thermal Conductivity — Tungsten, National Institute of Standards and Technology (nee National Bureau of Standards), 1976.

errors caused by poor contact, by judicious positioning of temperature sensors away from any heat flow perturbation at the interfaces.

6.5 Guard Cylinder:

6.5.1 The specimen-meter bar column shall be enclosed within a guard tube or pipe normally of right circular symmetry. This guard cylinder can be either a metal or a ceramic but its inside radius should be such that the ratio r_g/r_A will be between 2.0 and 3.5 (1). This guard cylinder shall contain at least one heater for controlling the temperature profile along the guard.

6.5.2 The guard shall be constructed and operated so that the temperature of the guard surface is either isothermal and equal to the approximate mean temperature of the specimen or preferably has an approximately linear profile with the top and bottom ends of the guard matched to corresponding positions along the column. In each case, at least three temperature sensors shall be attached to the guard at known positions to measure the temperature profile.

TABLE 5 Thermal Conductivity of Austenitic Stainless Steel^A

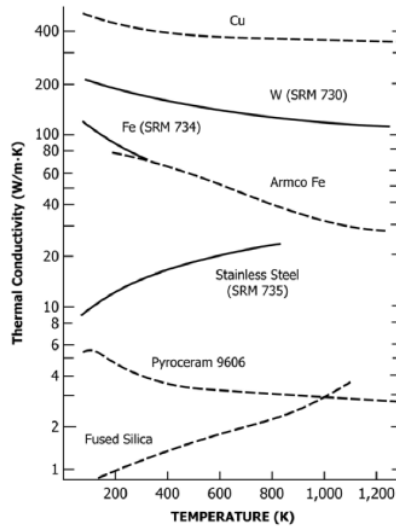
Temperature, K	Thermal Conductivity, (W/m·K)
5	0.466
6	0.565
7	0.676
8	0.796
9	0.921
10	1.05
12	1.32
14	1.58
16	1.86
18	2.13
20	2.40
25	3.07
30	3.72
35	4.34
40	4.92
45	5.47
50	5.98
55	6.45
60	6.88
65	7.28
70	7.64
75	7.97
80	8.27
85	8.55
90	8.80
95	9.04
100	9.25
110	9.65
120	9.99
130	10.3
140	10.6
150	10.9
160	11.1
170	11.4
180	11.6
190	11.9
200	12.1
250	13.2
300	14.3
350	15.3
400	16.2
450	17.1
500	17.9
600	19.3
700	20.6
800	21.9
900	23.0
1000	24.1
1100	25.1
1200	26.1

^A Hurst, J. G., Sparks, L. L., and Giarratano, P. J., Certificate, Standard Reference Material 735, Thermal Conductivity — Austenitic Stainless Steel, Thermal Conductivity as a Function of Temperature (5 to 1200 K), National Institute of Standards and Technology (see National Bureau of Standards), 1975.

6.6 System Instrumentation:

6.6.1 The combination of temperature sensor and the instrument used for measuring the sensor output shall be adequate to ensure a temperature measurement precision of ±0.04 K and an absolute error less than ±0.5 %.

6.6.2 Instrumentation for this technique shall be adequate to maintain the required temperature control and measure all pertinent output voltages with accuracy commensurate with the system capability. Although control can be manual, a technique of this general description can be automated so that a computer carries out all the control functions, acquires all pertinent voltages, and calculates the thermal conductivity (7).



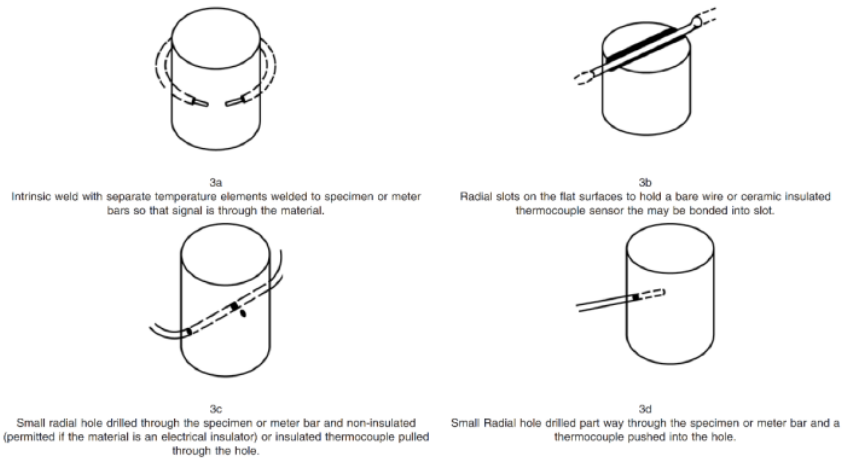
NOTE 1—The material selected for the meter bars should have a thermal conductivity as near as possible to the thermal conductivity of the unknown.

FIG. 2 Approximate Values for the Thermal Conductivity of Several Possible Reference Materials for Meter Bars

7. Sampling and Conditioning Test Specimens

7.1 Test Specimens—This test method is not restricted to a particular geometry. General practice is to use cylindrical or square cross-sections. The conduction area of the specimen and reference samples must be the same to within 1 % (see Note 3) and any difference in area shall be taken into account in the calculations of the result. For the cylindrical configuration, the radii of the specimen and meter bars must agree to within ±1 % and the specimen radius, r_A , must be such that r_M/r_A is between 2.0 and 3.5. Each flat surface of the specimen and reference must be flat with a surface finish equal to or better than 32- and the normal to each end shall be parallel with the specimen axis to within ±10 min.

NOTE 3—In some cases this requirement is not necessary. For example, some apparatus might consist of meter bars and specimen with high values of λ_M and λ_S so that thermal shunting errors would be small for long sections. These sections might be long enough to permit temperature sensor attachment to be far enough away from the interfaces to ensure that heat flow was uniform. The specimen length should be selected based on considerations of radius and thermal conductivity. When λ_M is higher than the thermal conductivity of stainless steel, long specimens with length / r_A >> 1 can be used. These long specimens permit the use of large distances between temperature sensors and this reduces the percentage error derived from the uncertainty in sensor position. When λ_M is lower than the thermal conductivity of stainless steel, the sample's length must be reduced because uncertainty due to the heat shunting becomes too large.



Note 1—In all cases the thermoclements should be thermally tempered or thermally grounded on the guard, or both, to minimize temperature measurement errors due to heat flow into or out of the hot junction.

FIG. 3 Thermocouple Attachments

7.2 Sampling and Conditioning—Unless specifically required or prescribed, one representative specimen shall be prepared from the sample.

8. Calibration and Verification

8.1 There are many situations that call for equipment verifications before operations on unknown materials can be successfully accomplished. These include the following:

- 8.1.1 After initial equipment construction.
- 8.1.2 When the ratio of λ_M to λ_S is less than 0.3 or greater than 3 and it is not possible to match thermal conductance values.
- 8.1.3 When the specimen shape is complex or the specimen is unusually small.
- 8.1.4 When changes have been made in the system geometry.
- 8.1.5 When meter bar or insulation material other than those listed in 5.1 and 5.2 are considered for use, and
- 8.1.6 When the apparatus has been previously operated to a high enough temperature to change the properties of a component such as thermocouples' sensitivity.

8.2 These verification tests shall be run by comparing at least two reference materials in the following manner:

8.2.1 A reference material which has the closest thermal conductivity to the estimated thermal conductivity of the unknown sample should be machined according to 6.1, and

8.2.2 The thermal conductivity λ of the specimen fabricated from a reference material shall then be measured as described in Section 9, using meter bars fabricated from another refer-

ence material which has the closest λ to that of the specimen. For example, verification tests might be performed on a Pyroceram⁴ specimen using meter bars fabricated from stainless steel. If the measured thermal conductivity of the specimen disagrees with the value from Table 1 after applying the corrections for heat exchange, additional effort is required to find the error source(s).

9. Procedure

9.1 Where possible and practical, select the reference specimens (meter bars) such that the thermal conductance is of the same order of magnitude as that expected for the test specimen. After instrumenting and installing the proper meter bars, the specimen should be instrumented similarly. It should then be inserted into the test stack such that it is aligned between the meter bars with at least 99 % of each specimen surface in contact with the adjacent meter bar. Soft foil or other contacting medium may be used to reduce interfacial resistance. If the system must be protected from oxidation during the test or if operation requires a particular gas or gas pressure to control λ_p , the system should be pumped and purged, and the operating gas and pressure established. The predetermined force required for reducing the effects of non-uniform interfacial resistance should be applied to the load column.

9.2 Heaters at either end of the column should be energized (see Note 4) and adjusted until the temperature differences

⁴ Pyroceram is a trademark by Corning Incorporated, Corning, NY.

between positions Z_1 and Z_2 , Z_3 and Z_4 , and Z_5 and Z_6 are between 200 times the imprecision of the ΔT measurements and 30 K, and the specimen is at the average temperature desired for the measurement. Although the exact temperature profile along the guard is not important for $r_g/r_s \geq 3$, the power to the guard heaters should be adjusted until the temperature profile along the guard, $T_g(z)$, is constant with respect to time to within ± 0.1 K and either:

9.2.1 Approximately linear so that $T_g(z)$ coincides with the temperature along the sample column at a minimum of three places including the temperature at the top sensor on the top meter bar, the bottom sensor on the bottom bar, and the specimen midplane; or

9.2.2 Constant with respect to z to within ± 5 K and matched to the average temperature of the test specimen.

NOTE 4—These heaters can either be attached to the ends of the meter bars or to a structure adjacent to the meter bar. The heaters can be powered with alternating or direct current. The power to these heaters shall be steady enough to maintain short term temperature fluctuations less than ± 0.03 K on the meter bar temperature sensor nearest the heater. These two heaters, in conjunction with the guard shell heater and the system coolant shall maintain long term temperature drift less than ± 0.05 K/h.

9.3 After the system has reached steady state (T drift < 0.05 K/h), measure the output of all temperature sensors.

10. Calculation

10.1 Approximate Specimen Thermal Conductivity:

10.1.1 The outputs from the temperature sensors shall be converted to temperature, and the apparent heat flow per unit area, q' , in the meter bars shall be calculated using the following:

$$q'_T = \lambda_M \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} \tag{2}$$

top bar

$$q'_B = \lambda_M \frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \tag{3}$$

bottom bar

In each of these equations, the λ_M value (see Note 5) to be inserted shall be obtained from the information of 6.1 for the average meter bar temperature. Although these two values, q'_T and q'_B , should agree with each other to within about $\pm 10\%$ when heat exchange with the insulation is small, good agreement is not a sufficient condition (nor always a necessary condition) for low heat shunting error.

10.1.2 A value for the specimen thermal conductivity at temperature $(T_3 + T_4)/2$, as uncorrected for heat exchange with the insulation, can then be calculated using the following:

$$\lambda'_S = \frac{(q'_T + q'_B)(Z_4 - Z_3)}{2(T_4 - T_3)} \tag{4}$$

NOTE 5—This type of calculation procedure actually requires only two temperature sensors on each column section. In this case, the third sensor on each section serves as a test for consistency of the other two. Some calculation procedures require more than the two sensors to obtain more knowledge about the temperature gradient dT/dZ .

10.2 Corrections for Extraneous Heat Flow:

10.2.1 Calculation of the specimen thermal conductivity by a simple comparison of temperature gradients in the meter bars to that in the specimen is less valid when the specimen or meter bars, or both, have low thermal conductivities relative to that of the insulation. The apparatus should be designed to minimize these errors. The deviation from uniform heat flow has been expressed as follows (1):

$$\gamma = F_g F_\lambda \tag{5}$$

where F_g is a function of system dimensions, and F_λ is a function of λ_M , λ_T , and λ_S (1). The F_g term has a value between 2 and 3 for the ratio of guard radius to column radius specified for this system. The F_λ term is shown in Fig. 4 as a function of λ/λ_I for various values of λ_M/λ_I for a linear guard. At high ratios of λ_M/λ_I and λ_S/λ_I , corrections would not be necessary since the departure from ideal heat flow would be small. For example, the product of F_g and F_λ would be less than 0.10 (10%) for all measurements where λ_M/λ_I and λ_S/λ_I are greater than 30. If the value of $F_g F_\lambda$ is to be kept below 10%, the ratios λ_M/λ_I and λ_S/λ_I must be within the boundaries on Fig. 4.

10.2.2 Measurements on materials where the ratios of λ_M/λ_I and λ_S/λ_I do not fall within these boundaries shall be accompanied with corrections for extraneous heat flow. These corrections can be determined in the following three different ways:

10.2.2.1 Use of analytical techniques as described by Didion (1) and Flynn (8).

10.2.2.2 Using calculations from finite-difference or finite-element heat conduction codes, and

10.2.2.3 Determined experimentally by using several reference materials or transfer standards of different thermal conductance as specimens. The procedure must be used cautiously since all such specimens should have the same size as the specimen with an unknown thermal conductivity and have the same surface finish.

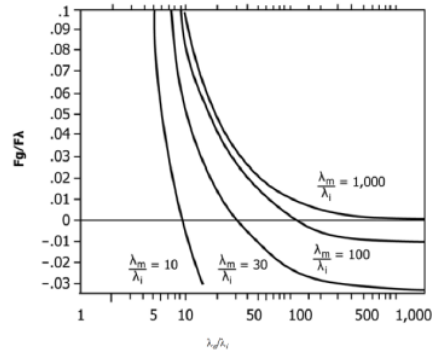


FIG. 4 Fractional Heat Exchange Between the Meter Bar-Specimen Column and Surrounding Insulation as a Function of λ_M/λ_I for Several Values of λ_S/λ_I

11. Report

11.1 The report of the test results shall include the following:

11.1.1 Complete specimen identification including shape and size;

11.1.2 Complete identification of insulation and source of λ_T values, gas, and gas pressure;

11.1.3 Statements of temperature sensor type, size, and attachment procedure;

11.1.4 Complete listing of the geometrical dimensions of the system including r_A, r_B , specimen height, meter bar height, and distances between temperature sensors;

11.1.5 Column force;

11.1.6 Meter bar material and source of λ_M values if other than those listed in Table 1;

11.1.7 Reference to the use of this test method shall include a statement of the percentage variation of the qualification results about the true value. For example, "thermal conductivity results on Pyroceram using stainless steel meter bars were within $\pm 4\%$ of the accepted values for Pyroceram over the temperature range from 250 to 900 K;"

11.1.8 Variations, if any, from this test method. If results are to be reported as having been obtained by this method, then all requirements prescribed by this method shall be met. Where such conditions are not met, the phrase, "All requirements of this method have been met with the exception of ..." shall be added and a complete list of the exceptions included;

11.1.9 Measured values of temperature and specimen thermal conductivity; and

11.1.10 The specific dated version of this standard used.

12. Precision and Bias

12.1 *Example of Error Estimation:*

12.1.1 Assumptions for a system where both meter bars and the specimen are of equal length is that the sensor spacings are all 13 mm and $\lambda_M \approx \lambda_S$:

$$\left| \frac{\delta \lambda_M}{\lambda_M} \right| = |0.003| \tag{6}$$

$$Z_2 - Z_1 \sim Z_4 - Z_3 \sim Z_6 - Z_5 = 13 \text{ mm};$$

$$T_2 - T_1 \sim T_4 - T_3 \sim T_6 - T_5 = 10 \text{ K};$$

$$\delta(Z_2 - Z_1) \sim \delta(Z_4 - Z_3) \sim \delta(Z_6 - Z_5) = 0.2 \text{ mm}; \text{ and}$$

$$\delta(T_2 - T_1) \sim \delta(T_4 - T_3) \sim \delta(T_6 - T_5) = 0.04 \text{ K}.$$

12.1.2 The maximum value of $\delta(Z_2 - Z_1)$ etc. was approximated by assuming an uncertainty of ± 0.5 (sensor diameter) at each temperature measurement position. Therefore, if the diameter of each sensor is 0.2 mm, the uncertainty in the difference would be ± 0.2 mm. The number for $\delta(T_2 - T_1)$ etc. was calculated based on the sensor absolute accuracy.

12.1.3 With these values the fractional uncertainty in λ'_S will be 0.069% or $\pm 6.9\%$.

12.2 Indeterminate Errors:

12.2.1 There are at least three other errors that can contribute to total system error and these are (1) non-uniform interfacial resistance, (2) heat exchange between the column and the guard, and (3) heat shunting through the insulation around the column. These three errors must be minimized or appropriate corrections applied to the data if the desired accuracy is to be obtained.

12.2.2 The contributions from the last two errors can be determined approximately using results from appropriate experiments carried out at different levels of guard temperature to specimen stack temperature out of balance.

12.3 *Overall*—An international, inter-laboratory round robin study also involving absolute methods (9, 10) has shown that a precision of $\pm 6.8\%$ can be attained over the temperature range 300 to 600 K. Although no definite bias could be established these are indications that the values were on the order of 2% lower than those obtained by absolute methods. This cited paper is on file at ASTM as a research report.⁵

⁵ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:E37-1010. Contact ASTM Customer Service at service@astm.org.

REFERENCES

(1) Didion, D. A., "An Analysis and Design of a Linear Guarded Cut-Bar Apparatus for Thermal Conductivity Measurements," AD-665789, January, 1968, available from the National Technical Information Service, Springfield, VA.

(2) Finch, D. I., "General Principles of Thermoelastic Thermometry," *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Vol. 3, Part 2, Section I, Reinhold Publishing Corporation, 1962, pp. 3-31.


(3) Caldwell, F. R., "Temperatures of Thermocouple Reference Junctions in an Ice Bar," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, Vol 69C, No. 2, 1965, pp. 95-101.

(4) American Society of Mechanical Engineers (ASME): PTC 19.3, *Temperature Measurement*, Part 3, 1974, p. 1232.

(5) Anderson, R. L., and Kollie, T. G., "Problems in High Temperature Thermometry," *CRC Critical Reviews in Analytical Chemistry*, Vol 6, 1976, pp. 171-221.

(6) Fried, E., "Thermal Conduction Contribution to Heat Transfer at Contacts," *Thermal Conductivity*, Vol 2, Tye, R. P., ed., Academic Press, New York, 1969, pp. 253-274.

(7) Morgan, M. T., and West, G. A., "Thermal Conductivity of the Rocks in the Bureau of Mines Standard Rock Site," *Thermal Conductivity 16*, Larsen, D. C., ed., Plenum Press, New York, 1983, pp. 79-90.

 E1225 – 13

- (8) Flynn, D. R., "Thermal Conductivity of Ceramics," *Mechanical and Thermal Properties of Ceramics*, Special Publication 303, National Bureau of Standards, 1969, pp. 63–123.
- (9) Hulstrom, L. C., Tye, R. P., and Smith, S. E., "Round-Robin Testing of Thermal Conductivity Reference Materials," *Thermal Conductivity 19*, Yarbrough, D. W., ed., Plenum Press, New York, 1985, pp. 199–211.
- (10) Hulstrom, I. C., "Interlaboratory Comparison Testing of Thermal Conductivity Reference Materials to 573 K; A Progress Report," *High Temperatures-High Pressures*, Vol 17, 1985, pp. 707–708.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; <http://www.copyright.com/>

Anexo 7: Resultados Turnitin



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

REPORTE DE ANALISIS DE FISICO QUIMICO MECANICOS DE MUESTRAS

SOLICITANTE: Br. José Amaranto Salas Pereda

Fecha: 30 octubre 2023. Nota: Muestras puestas en laboratorio

Tabla 1.0 Resultados de densidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Densidad (g/cm ³)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 1 / a1	1.7	1.69	1.62	1.67	1.73	1.68
MC2 - 1 / a2	1.54	1.6	1.58	1.69	1.63	1.61
MC3 - 1 / a3	1.46	1.53	1.54	1.57	1.55	1.53
MC4 - 1 / a4	1.44	1.51	1.49	1.56	1.54	1.51
MC5 - 1 / a5	1.39	1.46	1.43	1.55	1.48	1.46
MC6 - 1 / a6	1.28	1.35	1.32	1.41	1.37	1.35
MC7 - 1 / a7	1.15	1.22	1.19	1.28	1.24	1.22
MC8 - 1 / a8	1.08	1.18	1.12	1.19	1.17	1.15
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 2 / a1	1.66	1.68	1.73	1.71	1.74	1.70
MC2 - 2 / a2	1.59	1.61	1.62	1.63	1.67	1.62
MC3 - 2 / a3	1.53	1.56	1.52	1.54	1.58	1.55
MC4 - 2 / a4	1.48	1.5	1.46	1.53	1.52	1.50
MC5 - 2 / a5	1.41	1.46	1.42	1.49	1.48	1.45
MC6 - 2 / a6	1.34	1.36	1.38	1.39	1.38	1.37
MC7 - 2 / a7	1.2	1.22	1.18	1.25	1.28	1.23
MC8 - 2 / a8	1.11	1.17	1.1	1.16	1.15	1.14



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 2.0. Resultados de porosidad de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Porosidad (%)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 1 / a1	3.8	3.8	3.8	3.8	3.9	3.8
MC2 - 1 / a2	5.8	5.7	5.7	5.8	5.7	5.7
MC3 - 1 / a3	6.8	6.8	6.8	6.8	6.9	6.8
MC4 - 1 / a4	7.3	7.3	7.3	7.3	7.4	7.3
MC5 - 1 / a5	8.0	8.0	8.1	7.9	8.1	8.0
MC6 - 1 / a6	8.5	8.6	8.4	8.5	8.5	8.5
MC7 - 1 / a7	10.1	10.1	10.2	10.1	10.1	10.1
MC8 - 1 / a8	12.1	12.1	12.0	12.0	12.0	12.0
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 2 / a1	4.0	3.9	4.1	4.0	4.0	4.0
MC2 - 2 / a2	6.2	6.2	6.2	6.3	6.2	6.2
MC3 - 2 / a3	7.1	7.1	7.1	7.2	7.2	7.1
MC4 - 2 / a4	7.8	7.7	7.8	7.8	7.5	7.7
MC5 - 2 / a5	8.5	8.4	8.4	8.5	8.3	8.4
MC6 - 2 / a6	8.7	8.7	8.8	8.6	8.7	8.7
MC7 - 2 / a7	10.1	10.1	10.1	10.2	10.1	10.1
MC8 - 2 / a8	12.4	12.4	12.4	12.5	12.5	12.4



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 3.0 Resultados de resistencia en compresión de morteros de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Resistencia en compresión (MPa)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 1 / a1	6.45	6.71	6.64	6.52	6.63	6.59
MC2 - 1 / a2	4.54	4.78	4.62	4.73	4.68	4.67
MC3 - 1 / a3	4.36	4.19	4.31	4	4.27	4.23
MC4 - 1 / a4	4.14	3.78	4.17	4.32	4.21	4.12
MC5 - 1 / a5	3.34	3.56	3.49	3.47	3.54	3.48
MC6 - 1 / a6	3.64	3.25	3.17	3.28	3.32	3.33
MC7 - 1 / a7	2.54	2.78	2.52	2.42	2.58	2.57
MC8 - 1 / a8	2.01	2.25	2.13	2.19	2.1	2.14
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MC1 - 2 / a1	10.15	10.38	10.28	10.19	10.22	10.24
MC2 - 2 / a2	8.55	8.71	8.59	8.72	8.62	8.64
MC3 - 2 / a3	8.02	8.24	8.09	8.14	8.07	8.11
MC4 - 2 / a4	7.26	7.42	7.34	7.39	7.45	7.37
MC5 - 2 / a5	6.14	6.82	6.88	6.79	6.75	6.68
MC6 - 2 / a6	6.1	6.49	6.01	6.43	7.12	6.43
MC7 - 2 / a7	5.18	5.14	5.25	5.31	5.45	5.27
MC8 - 2 / a8	3.87	4.16	4.08	4.13	4.24	4.10



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 4.0. Resultados de densidad de conductividad térmica de cemento bajo el efecto de caucho reciclado

Conductividad térmica (W/m.K)						
7 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MP1 - 1 / a1	1.28	1.25	1.11	1.21	1.26	1.22
MP2 - 1 / a2	0.95	0.91	0.92	0.94	0.89	0.92
MP3 - 1 / a3	0.82	0.92	0.94	0.86	0.91	0.89
MP4 - 1 / a4	0.79	0.83	0.87	0.81	0.92	0.84
MP5 - 1 / a5	0.71	0.76	0.72	0.77	0.75	0.74
MP6 - 1 / a6	0.58	0.61	0.63	0.66	0.64	0.62
MP7 - 1 / a7	0.38	0.41	0.46	0.42	0.47	0.43
MP8 - 1 / a8	0.32	0.34	0.39	0.36	0.33	0.35
28 días						
Mortero	R1	R2	R3	R4	R5	Promedio
MP1 - 2 / a1	1.21	1.22	1.15	1.18	1.26	1.20
MP2 - 2 / a2	0.95	0.92	0.84	0.94	0.89	0.91
MP3 - 2 / a3	0.87	0.87	0.88	0.86	0.91	0.88
MP4 - 2 / a4	0.79	0.83	0.95	0.81	0.78	0.83
MP5 - 2 / a5	0.71	0.76	0.72	0.71	0.75	0.73
MP6 - 2 / a6	0.58	0.56	0.63	0.56	0.64	0.59
MP7 - 2 / a7	0.32	0.41	0.37	0.42	0.47	0.40
MP8 - 2 / a8	0.32	0.34	0.14	0.36	0.33	0.30

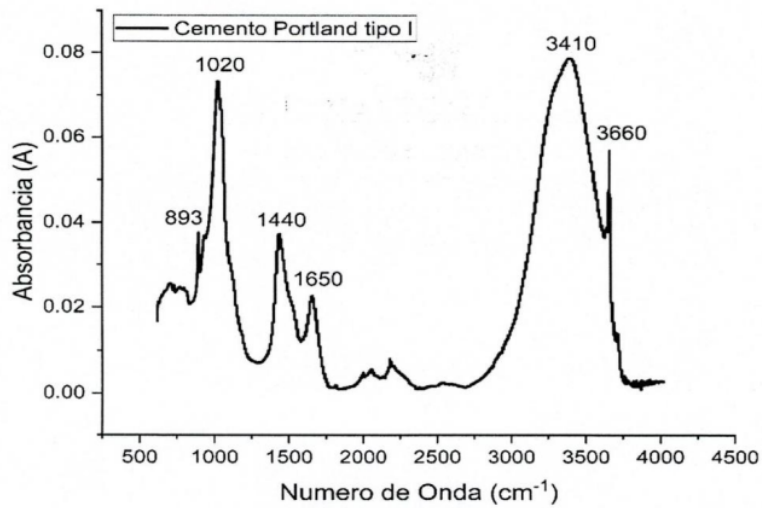


UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Gráfico 1.0 Espectro FTIR de cemento Portland tipo I



Dr. Ing. Vega Anticona Alexander Y.
Jefe de Laboratorio

ALEXANDER Y. VEGA ANTICONA
ING. DE MATERIALES
R. CIP. 83348

INFORME DE TESIS - JASP

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uct.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	3%
3	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	1%
5	repositorio.usanpedro.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	AMIN SALVADOR NAZER VARELA. "Caracterización y determinación de las propiedades cementantes de escorias de cobre del siglo XIX de la Región de Atacama, Chile para su uso en construcción", Universitat Politecnica de Valencia, 2016 Publicación	<1%
7	link.springer.com Fuente de Internet	<1%

8

repositorio.unj.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

9

M. Fernández Cánovas, N. Hurtado Selva, G. M. Kawiche. "Influencia que sobre las propiedades físico-mecánicas de los morteros de cemento Portland tiene la adición de colofonia y tanino", *Materiales de Construcción*, 2012

Publicación

<1 %

10

"Reutilización de residuos de construcción en la fabricación de conglomerantes de activación alcalina.", 'Universitat Politecnica de Valencia'

Fuente de Internet

<1 %

11

neumaticosparacoches.com

Fuente de Internet

<1 %

12

renati.sunedu.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

13

[Submitted to Universidad Ricardo Palma](#)

Trabajo del estudiante

<1 %

14

minem.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

15

repositorium.uminho.pt

Fuente de Internet

<1 %

16

repositorio.untrm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

17	es.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
18	www.revistaalconpat.org Fuente de Internet	<1 %
19	Submitted to Universidad Libre Seccional Pereira Trabajo del estudiante	<1 %
20	Submitted to Universidad Tecnológica de Honduras Trabajo del estudiante	<1 %
21	Submitted to Universidad de Huanuco Trabajo del estudiante	<1 %
22	blog.ssa.gov Fuente de Internet	<1 %
23	diariocorreo.pe Fuente de Internet	<1 %
24	Fernando González Vigil, Pilar Obando Hirano. "Economía aplicada: ensayos de investigación económica 2017", Universidad del Pacífico, 2020 Publicación	<1 %
25	repositorio.unsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
26	Submitted to Universidad Andina Nestor Caceres Velasquez Trabajo del estudiante	<1 %

27	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to Escuela Superior Politécnica del Litoral Trabajo del estudiante	<1 %
29	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
30	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	minas.medellin.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
32	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	revistas.unimilitar.edu.co Fuente de Internet	<1 %
34	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
35	www.df.gob.mx Fuente de Internet	<1 %
36	www.dspace.uce.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
37	www.lostiempos.com Fuente de Internet	<1 %
38	www.mdpi.com	

Fuente de Internet

<1 %

39

"Summaries", World's Poultry Science Journal, 2019

Publicación

<1 %

40

community.withairbnb.com

Fuente de Internet

<1 %

41

es.mongabay.com

Fuente de Internet

<1 %

42

jalayo.blogspot.com

Fuente de Internet

<1 %

43

repositorio.upci.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

44

repositorio.upla.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

45

www.ainia.es

Fuente de Internet

<1 %

46

www.bancomundial.org.ve

Fuente de Internet

<1 %

47

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

48

www.spell.org.br

Fuente de Internet

<1 %

Excluir citas Activo

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía Activo