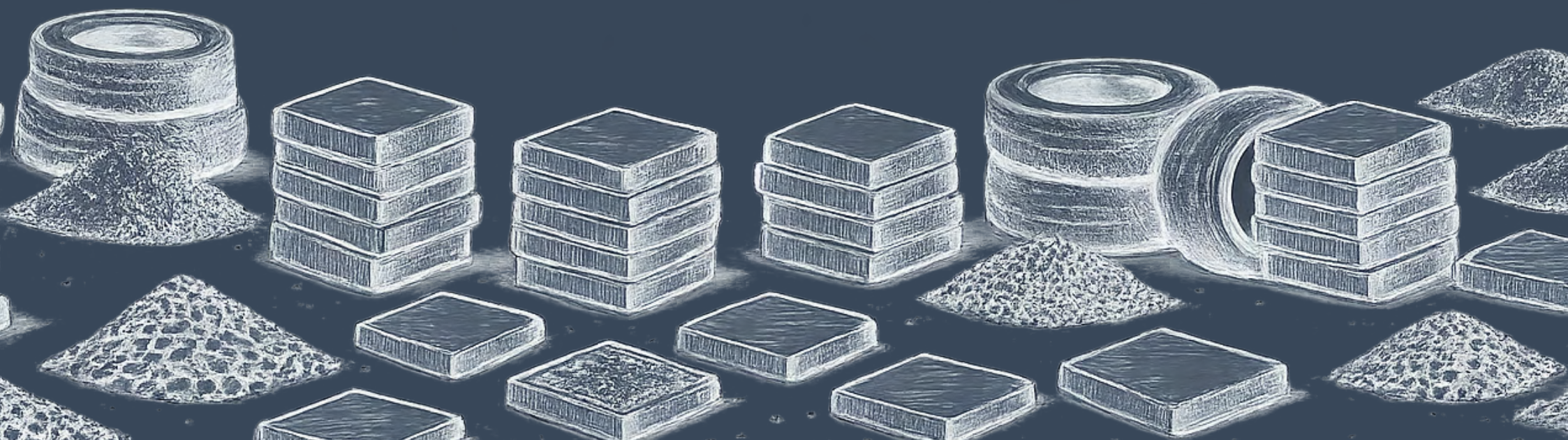


Baldosa de hormigón con caucho reciclado para espacio público de la zona climática continental lluviosa de Ecuador





FACULTAD DE
ARQUITECTURA

Escuela de Arquitectura

PROYECTO FINAL DE CARRERA PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE ARQUITECTO

Baldosa de hormigón con caucho reciclado para espacio público de la zona climática continental lluviosa de Ecuador

Autores

Brandon Esteban Ayavaca Zúñiga
Jonnathan Andrés Taipe Olson

Directora

Mgt. Ana Llerena Encalada

Cuenca - Ecuador
2026

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre Tania, a mis padres, Ruben y Jorge, que a pesar de los dolores de cabeza que les he dado, nunca han dejado de creer en mí y apoyarme sin dudarlo. Han sido el pilar más importante de mi vida.

A mis abuelas, María y Carmen por su amor, apoyo y confianza incondicional durante cada etapa de este camino. A mis abuelos, Jose N. y Jose A. Sin ustedes, nada de esto habría sido posible.

A mi tía Azucena, que a pesar de la distancia, su amor es mi apoyo incondicional, por estar presente en momentos importantes de este proceso y por creer en mí incluso cuando yo mismo dudaba de mis capacidades. Gracias por cada consejo, cada conversación y cada gesto de apoyo que me ayudó a seguir adelante.

A mis mejores amigos, por estar presentes en los momentos buenos y, sobre todo, en los más difíciles. Gracias por acompañarme, escucharme y recordarme que nunca estaba solo.

También dedico este logro a mí mismo, porque detrás de estas páginas existe un proceso personal que marcó mi vida. El último año estuvo lleno de momentos complejos que pusieron a prueba mi fortaleza, pero también me enseñaron que soy capaz de superar mucho más de lo que alguna vez imaginé. La arquitectura no solo me formó profesionalmente.. me permitió descubrir una versión de mí que desconocía. Nunca pensé llegar a estudiar una carrera universitaria, porque mis sueños en algún momento estaban en otro lugar. Hoy, al mirar todo el camino recorrido, entiendo que los límites muchas veces existen solo en nuestra mente.

Este proyecto representa esfuerzo, crecimiento y la prueba de que incluso después de los momentos más difíciles, siempre es posible volver a levantarse.

Con mucho cariño, Esteban Ayavaca

Agradecimiento

Expreso mi agradecimiento a mi madre, a mis padres, y a mi familia, por ser el pilar fundamental de mi vida y acompañarme incondicionalmente en cada etapa de este camino. Gracias por su amor, sacrificio y apoyo constante, los cuales hicieron posible no solo este proyecto, sino también mi crecimiento personal y profesional.

A mi tutora, Anita, por su guía, paciencia y dedicación, aunque jamás fue mi profesora en ciclos previos a este proyecto, tiene mi total admiración por su conocimiento.

A mi amigo y compañero de tesis, Jonathan, por compartir conmigo este proceso lleno de aprendizajes, desafíos y momentos que marcarán esta etapa de nuestras vidas.

De manera especial, quiero agradecer a una persona que fue muy importante en este proceso y en gran parte de mi vida. Gracias porque, aunque probablemente nunca lo imaginaste, fuiste una de las razones por las que decidí estudiar arquitectura. En un momento donde no tenía claro mi futuro y pensaba que mi vida iba por otro camino, estabas tú y de alguna manera, despertaste en mí la motivación para intentarlo. Gracias por haber aportado con tus conocimientos y apoyo en una parte de esta tesis, pero sobre todo por haber sido, incluso después de la distancia, una motivación silenciosa para seguir adelante. A veces, las personas continúan formando parte de nuestros logros aun cuando ya no caminan a nuestro lado, y este proyecto también guarda parte de esa historia. P.M.

Finalmente, agradezco a mí mismo por no rendirme. Por haber encontrado fuerza en medio de los momentos más difíciles, por continuar y por demostrarme que los límites existen únicamente en nuestra mente. Este trabajo representa mucho más que una meta académica; representa resiliencia, crecimiento y la prueba de que siempre es posible levantarse y continuar.

Esteban Ayavaca

Dedicatoria

A Dios, ante todo, por el don de la vida, por la fortaleza para sostenerme en cada etapa de este camino y por permitirme llegar hasta este momento, cerrando con gratitud una etapa tan importante de mi formación profesional.

A mis padres, Klever Moisés Taipe y Teresa Isabel Olson, pilares fundamentales de mi vida. Ellos lucharon desde el inicio para que nunca me faltara nada en los estudios ni en lo cotidiano; confiaron en mí en cada paso, incluso cuando el camino se hizo difícil, y me sostuvieron con su ejemplo, su esfuerzo y su amor incondicional. Cada página de este trabajo lleva, de alguna manera, la huella de su sacrificio silencioso, de los valores que me inculcaron y de la confianza que depositaron en mí desde niño. Este logro es, en gran medida, el reflejo de todo lo que ellos sembraron en mi vida. Ustedes han sido el verdadero motor de todo este proceso, la fuerza incansable que me impulsó a no rendirme frente a ningún obstáculo y el motivo principal por el que hoy puedo ver este sueño hecho realidad.

A mi esposa, Valeria Katherine León, compañera de cada día y de cada sueño. Gracias por su paciencia infinita en las jornadas largas, por su amor que me dio calma en los momentos de cansancio y por creer en este proyecto incluso cuando todavía parecía lejano. Caminar a su lado le ha dado a este logro un sentido más profundo del que las palabras alcanzan a expresar.

A mis hijos, Klever Ariel y Jonnathan Moises Taipe, que son el motor de cada esfuerzo y la razón más profunda para seguir adelante. Que algún día comprendan que cada hora dedicada a este trabajo fue también para ustedes, para construir un futuro en el que puedan crecer con oportunidades y con el ejemplo de que con dedicación y constancia todo es posible.

A mis hermanos, por acompañarme a lo largo del camino, por estar presentes en los momentos importantes y por compartir conmigo la alegría de cada paso recorrido.

A todos ustedes, mis padres, mi familia, dedico con cariño este logro que también les pertenece.

Con todo mi cariño, Jonnathan Taipe

Agradecimiento

A mis padres, Klever Moisés y Teresa Isabel, por el respaldo incondicional que me brindaron durante toda mi etapa universitaria. Su apoyo constante fue la base que me permitió enfocarme en mis estudios y culminar esta carrera con éxito.

A mi tutora, la Arq. Ana Llerena, por su guía invaluable, su rigor académico y su tiempo. Gracias por las correcciones precisas a lo largo de este proceso y por orientarme con paciencia en cada fase del desarrollo y de las pruebas de esta investigación; su experiencia y apoyo fueron fundamentales para llevar a buen término este proyecto.

A mi compañero de tesis, Esteban Ayavaca, por el gran equipo que formamos. Ha sido un largo recorrido de trabajo y aprendizaje compartido durante toda la carrera, y me alegra que hayamos llegado juntos a esta meta.

A la Universidad del Azuay y a todos los docentes que contribuyeron a mi formación, por compartir sus conocimientos y brindarme las bases necesarias para mi futuro como arquitecto.

A mis amigos y compañeros de carrera, con quienes compartí maquetas, largas madrugadas de entregas y alegrías, por hacer de estos años una gran experiencia.

A todas las personas que, de una u otra forma, me brindaron su apoyo para que esta tesis sea una realidad.

Jonnathan Taipe



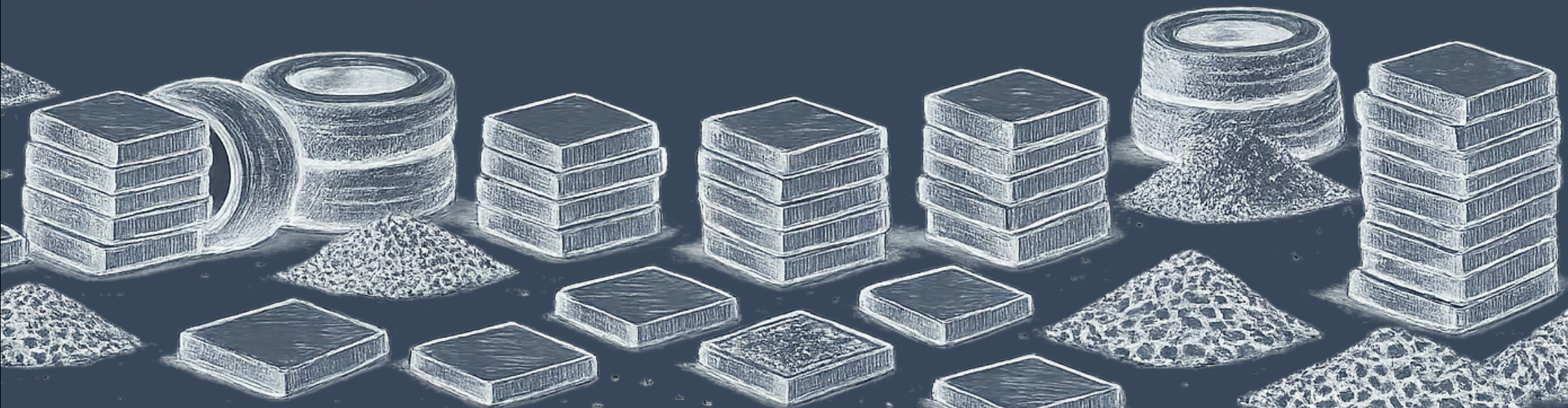
III

IV

V



ANTECEDENTES





Esta investigación analiza el uso de caucho reciclado proveniente de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) en baldosas de hormigón para espacios públicos de la zona climática continental lluviosa de Ecuador. El estudio responde a dos problemáticas principales: la acumulación inadecuada de NFU y los riesgos de deslizamiento en pavimentos húmedos. La metodología incluyó revisión bibliográfica, análisis normativo y trabajo de campo en Cuenca. Los resultados evidencian que la incorporación de entre 10 % y 20 % de caucho reciclado permite obtener resistencias adecuadas para aplicaciones no estructurales, además de representar una alternativa viable para el aprovechamiento de residuos generados en el país.

Palabras clave: hormigón reforzado con caucho, agregado reciclado, hormigón, neumático reciclado, pavimento exterior.

This research analyzes the use of recycled rubber obtained from End-of-Life Tires (ELTs) in concrete pavers for public spaces in Ecuador's rainy continental climate zone. The study addresses two main issues: the improper accumulation of ELTs and slip hazards on wet pavements. The methodology included a literature review, regulatory analysis, and fieldwork conducted in Cuenca. The results demonstrate that incorporating between 10% and 20% recycled rubber provides adequate strength for non-structural applications, while also representing a viable alternative for the recovery and reuse of waste generated in the country.

Keywords: rubber-reinforced concrete, recycled aggregate, concrete, recycled tire, outdoor pavement.

Ecuador genera anualmente millones de neumáticos fuera de uso que, en su mayoría, no cuentan con un destino de valorización material adecuado, acumulándose en basureros a cielo abierto o siendo incinerados de manera informal, con graves consecuencias ambientales y para la salud pública (Expreso, 2024). De forma paralela, los espacios públicos de las ciudades ecuatorianas ubicadas en la zona lluviosa continental presentan pavimentos que, bajo condiciones de precipitación, incrementan el riesgo de accidentes por deslizamiento y generan superficies de escasa amortiguación de impactos. En este mismo plano ambiental, otro factor de creciente relevancia es la elevada huella de carbono asociada a la fabricación de productos prefabricados de hormigón. La industria del cemento es responsable de aproximadamente entre el 7 y el 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono y constituye uno de los principales contribuyentes del sector de la construcción a las emisiones de gases de efecto invernadero (Andrew, 2018; IPCC, 2019). Las baldosas, adoquines y losetas

comercializadas para espacios públicos en el mercado ecuatoriano participan de este impacto sin que actualmente existan en el medio local alternativas que cuantifiquen ni declaren su huella de carbono bajo metodología normalizada, lo que dificulta la selección de materiales con criterios ambientales verificables. Este impacto a nivel de huella de carbono del sector hormigón se cruza con el problema del NFU planteado al inicio del capítulo: la disposición informal de neumáticos no solo genera contaminación directa, sino que representa un flujo de residuos que podría desviarse hacia la cadena productiva del hormigón para mitigar, simultáneamente, ambas problemáticas. Esa intersección define el espacio de la presente investigación. Esta análisis parte de la identificación de dos problemáticas convergentes: por un lado, la acumulación de residuos de neumáticos sin destino productivo; por otro, la necesidad de desarrollar materiales de construcción para espacios públicos que ofrezcan mejores condiciones de seguridad, durabilidad y sostenibilidad en entornos expuestos a precipitaciones. Se plantea, entonces, la

siguiente pregunta de investigación:

¿Es posible desarrollar una baldosa de hormigón con sustitución parcial de árido fino por caucho reciclado de neumáticos fuera de uso que cumpla con los parámetros mecánicos y de seguridad superficial requeridos para su aplicación en espacios públicos de la zona lluviosa continental del Ecuador?. La presente investigación se justifica desde tres dimensiones complementarias; desde una perspectiva ambiental, el aprovechamiento del caucho granulado proveniente de NFU como componente activo en la mezcla de hormigón representa una alternativa concreta de valorización material que contribuye a reducir la presión sobre los sistemas de disposición final de residuos sólidos en Ecuador, en línea con los principios de economía circular promovidos por el Ministerio del Ambiente (Ministerio del Ambiente, s.f.). En complemento, la incorporación parcial del caucho NFU responde a la necesidad de mitigar la huella de carbono generada por la producción del hormigón convencional, convirtiendo la evaluación de este impacto ambiental en un

factor clave para validar la sostenibilidad del producto. Desde una perspectiva técnica, diversas investigaciones han documentado que la incorporación de caucho reciclado en mezclas de hormigón mejora propiedades como la resistencia al desgaste por abrasión, la capacidad de absorción de energía y la ductilidad del material bajo cargas de impacto (Eldin y Senouci, 1994). Estas características son de gran relevancia en pavimentos para espacios públicos donde la seguridad peatonal es prioritaria, especialmente en entornos expuestos a precipitaciones constantes como los que caracterizan a la zona lluviosa continental ecuatoriana. Desde una perspectiva social, el desarrollo de un producto de construcción sostenible, fabricado con materiales de desecho de amplia disponibilidad local, responde a las necesidades de ciudades como Cuenca, donde la calidad y la seguridad de los espacios públicos inciden directamente en la calidad de vida de la ciudadanía.

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una baldosa de hormigón utilizando caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso como alternativa constructiva para espacio público.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

01

Identificar referentes de prefabricados de hormigón con caucho reciclado y caracterizar, a partir de su análisis, los requerimientos físico-mecánicos necesarios para el diseño de baldosas destinadas al espacio público.

02

Diseñar mezclas de hormigón que incorporen caucho reciclado para aplicaciones en espacio público.

03

Elaborar la baldosa de hormigón con residuo de caucho triturado.

04

Evaluar la baldosa frente a otros tipos de baldosas de igual aplicación, en el espacio público de la ciudad.

Hipótesis

La incorporación sistemática de agregados de caucho provenientes de neumáticos fuera de uso permite desarrollar baldosas prefabricadas de hormigón con propiedades adecuadas para su aplicación en pavimentos del espacio público.

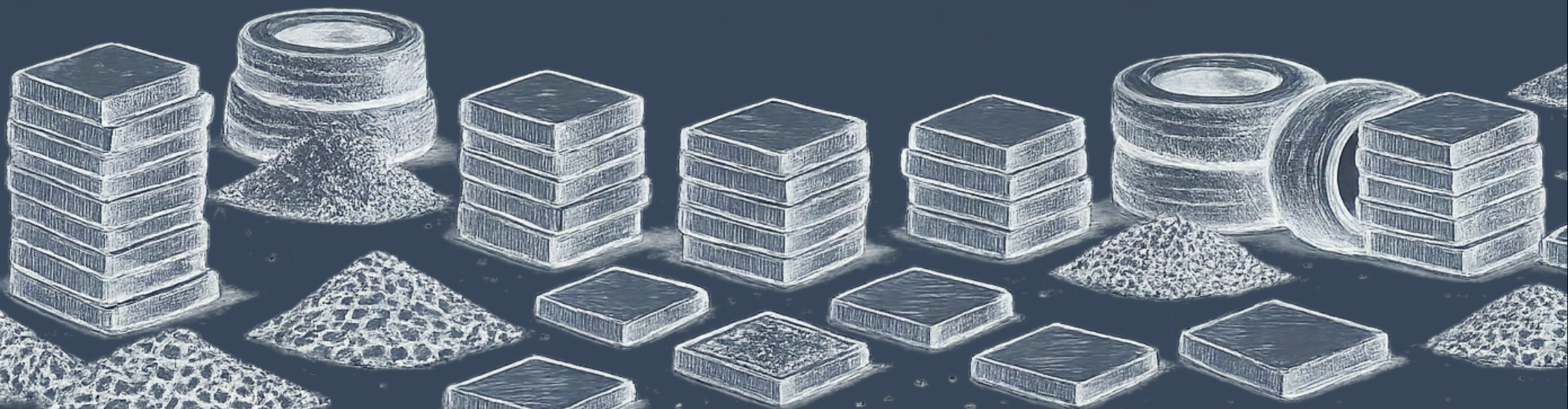
Alcance

La presente investigación abarca el diseño, elaboración y evaluación experimental de baldosas de hormigón con tres dosificaciones de caucho reciclado (0 %, 10 % y 20 % de sustitución volumétrica de árido fino), en el marco del Laboratorio de Arquitectura y Tecnología de la Universidad de Cuenca. Los ensayos se realizarán conforme a los protocolos de las normativas ASTM, INEN y UNE aplicables, con especímenes curados a los 28 días. La investigación se circunscribe a la zona lluviosa continental del Ecuador como contexto de aplicación y no contempla análisis de ciclo de vida, estudios de costo-beneficio ni implementación en campo. Los resultados obtenidos constituirán una base experimental que podrá ser complementada en futuras investigaciones con mayores porcentajes de sustitución o con el uso de aditivos.

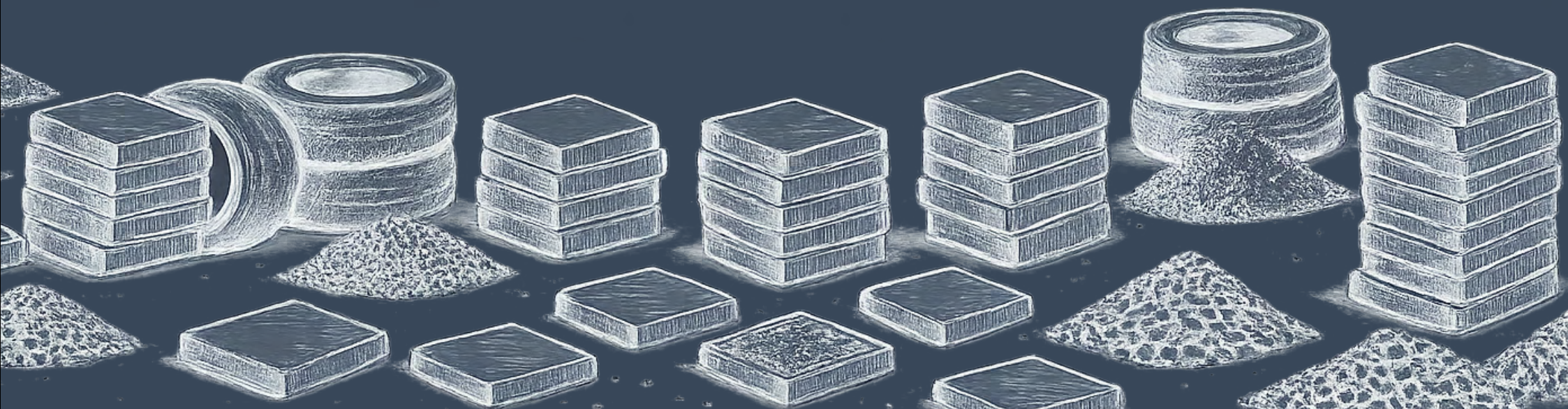
Realizar una revisión de la literatura científica sobre hormigón con caucho reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU) para aplicaciones no estructurales en espacios públicos, a partir de fuentes especializadas (Scopus, Web of Science, Google Scholar); en este proceso se analizarán las propiedades del NFU, los efectos del caucho granulado sobre las propiedades mecánicas del hormigón, los métodos de tratamiento superficial con hidróxido de sodio (NaOH) y los antecedentes de aplicación en baldosas y pavimentos peatonales. Simultáneamente, se identificará el marco normativo aplicable (UNE-EN 1339:2004, NTE INEN 872, ASTM C39, C78, C136) y se caracterizará la problemática de gestión de NFU en Ecuador, generando como resultado un fundamento teórico y normativo que orienta las decisiones del diseño experimental. A partir de ello, se diseñará el programa experimental para la elaboración de mezclas de hormigón con caucho reciclado para su aplicación en baldosas de espacio público, lo cual comprende la definición de variables independientes (porcentaje de sustitución: 0 %,

10 %, 20 %; y fracción granulométrica del caucho: T-8 y T-16), variables dependientes (resistencia a compresión, flexión, absorción de agua y valor PTV) y variables de control; además de la caracterización granulométrica del caucho triturado mediante ASTM C136, el cálculo de dosificaciones según ACI 211.1 para cinco mezclas experimentales y la definición del protocolo de pretratamiento del caucho con hidróxido de sodio al 10 %, obteniendo como resultado un plan experimental validado con proporciones de mezcla y plan de especímenes. Posteriormente, se elaborará la baldosa de hormigón prefabricada con residuo de caucho triturado en dos fases: una fase piloto que contempla la fabricación de tres probetas cilíndricas ($\varnothing 71 \times 142$ mm) con las fracciones T-8, T-16 y T-30, ensayadas a compresión a los 7 días para seleccionar las dos fracciones de mejor desempeño, y una fase principal que incluye la fabricación de 15 probetas cilíndricas (una por mezcla y por edad de ensayo: 7, 14 y 28 días) y 5 especímenes de baldosa ($300 \times 300 \times 50$ mm, una por mezcla), incorporando el proceso de

mezclado, compactación, curado húmedo a 28 días y el diseño de los moldes para baldosas; como resultado se obtendrán 23 especímenes fabricados y curados para ensayo. Finalmente, se evaluarán las baldosas de hormigón con caucho frente a los requisitos de la norma UNE-EN 1339:2004 y en comparación con la mezcla de control sin caucho (M-0), mediante la realización de ensayos de resistencia a la flexión (UNE - EN 1339:200 4 ANEXO F), absorción de agua (UNE-EN 1339 Anexo E) y resistencia al deslizamiento en superficie mojada (DIN 51130), complementados con los datos de compresión a 7, 14 y 28 días; los resultados serán analizados comparativamente entre las cinco mezclas con el fin de identificar la dosificación y fracción granulométrica óptimas para el espacio público de la zona climática continental lluviosa ecuatoriana, lo que permitirá determinar la baldosa de mejor desempeño técnico y realizar un análisis de viabilidad de implementación.



ESTADO DEL ARTE





El neumático es un componente estructuralmente complejo elaborado a partir de la combinación de más de 200 compuestos químicos. Según datos sistematizados por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas de España (CEDEX, s.f.), la composición porcentual típica de un neumático fuera de uso (NFU) incluye: caucho natural y sintético (entre el 50 % y el 60 %), negro de carbono (20–30 %), acero (entre el 14 % y el 15 %), material textil (5 %) y otros componentes como azufre, óxido de zinc, agentes vulcanizantes y aditivos químicos, aproximadamente el 12 % (Tabla 1). El caucho que compone los NFU es de naturaleza vulcanizada, lo que implica que sus cadenas poliméricas han sido entrecruzadas mediante azufre a temperaturas de entre 120 °C y 160 °C, proceso que le confiere rigidez, elasticidad y una elevada resistencia a la degradación física y química (CEDEX, s.f.). Esta característica es precisamente la que dificulta su biodegradación: los neumáticos permanecen en el entorno durante décadas sin descomponerse, acumulando riesgos sanitarios y ambientales. La magnitud de

la problemática es global. Eldin y Senouci (1994) señalaron que alrededor de mil millones de neumáticos alcanzan el fin de su vida útil cada año en el mundo. Thomas y Gupta (2016) confirmaron esta tendencia en su revisión sistemática. En Ecuador, el diario El Universo (2018) reportó que se desechan anualmente aproximadamente 2,4 millones de neumáticos, mientras que el periódico Expreso (2024) señaló que el 56 % de los NFU termina en vertederos o espacios al aire libre, contribuyendo a la contaminación del suelo, el agua y el aire.

Frente a este escenario, el Sistema Ecuatoriano de Gestión Integral de Neumáticos Usados (SEGINUS) reportó haber gestionado 1.278.845 neumáticos en el año 2023, cifra que representó un incremento del 20 % respecto al año anterior (SWI Swissinfo, 2024). La valorización material del caucho granulado —su incorporación como componente activo en mezclas de construcción— representa una de las vías de mayor potencial para dar escala a la solución de este problema ambiental (Siddique y Naik, 2004).

Componente del neumático y su función		
Componente	Porcentaje típico (%)	Función principal en el neumático
Caucho (natural + sintético)	50–60	Elasticidad, amortiguación y resistencia a la deformación
Negro de carbono (carbon black)	20–30	Refuerzo mecánico, pigmentación, resistencia a la abrasión y los UV
Acero (cordaje de alta resistencia)	14–15	Rigidez estructural de la carcasa (cinturones y talones)
Fibras textiles (nylon, rayón, poliéster)	5	Refuerzo de la carcasa, estabilidad dimensional
Azufre	1–2	Agente vulcanizante: entrecruzamiento de cadenas poliméricas
Óxido de zinc (ZnO)	1–2	Acelerador de vulcanización y antioxidante
Otros aditivos químicos (plastificantes, antiozonantes, acelerantes)	~12	Control de viscosidad, resistencia al envejecimiento y procesabilidad

Tabla 1. Componente del neumático y su función.

Nota. Los datos fueron tomados de Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas [CEDEX].

El caucho granulado, comúnmente denominado caucho triturado o crumb rubber en la literatura anglosajona, se obtiene mediante la trituración mecánica y/o criogénica de neumáticos fuera de uso, durante el cual se separa el caucho del acero de refuerzo y de los materiales textiles presentes en la carcasa del neumático (CEDEX, s.f.). El producto resultante es un árido de naturaleza elastomérica cuyas características físicas —en particular su granulometría, densidad aparente y forma de partícula— determinan en gran medida su comportamiento cuando es incorporado a una matriz cementante.

La granulometría del caucho reciclado es uno de los parámetros de mayor influencia sobre las propiedades del hormigón resultante. Eldin y Senouci (1993) realizaron pruebas comparativas empleando chips de goma de entre 19 y 38 mm y caucho molido de diámetro inferior a 1 mm, encontrando que el uso de partículas de mayor tamaño produce reducciones más pronunciadas en la resistencia a compresión. Sukontasukkul y Chaikaew (2006), en un estudio exploratorio sobre especímenes

de hormigón con caucho sin marco normativo de certificación, concluyeron que el tamaño de partícula y el porcentaje de sustitución interactúan en la determinación de la densidad y las propiedades superficiales de las mezclas, resultado coherente con lo documentado por Eldin y Senouci (1993) y Topçu (1995) (Tabla 2). Desde el punto de vista físico, el caucho granulado presenta una superficie no porosa y de naturaleza hidrofóbica, característica

derivada de su proceso de vulcanización (Segre y Joekes, 2000). Esta condición dificulta la adhesión entre la partícula de caucho y la pasta de cemento, explicando la reducción de resistencias mecánicas observada de manera consistente en la literatura. La identificación de este fenómeno en la zona de transición interfacial (ITZ) ha motivado el desarrollo de métodos de pretratamiento químico que se abordan en la sección 1.5 del presente capítulo.

Compilación de los rangos granulométricos			
Investigación / referente	Tipo de caucho	Rango granulométrico	Fracción sustituida
Eldin y Senouci (1993)	Chips de goma	19–38 mm	Árido grueso
Eldin y Senouci (1993)	Caucho molido	< 1 mm	Árido fino
Topçu (1995)	Caucho triturado	1–10 mm (variable)	Árido fino / grueso
Segre y Joekes (2000)	Caucho molido (polvo)	< 0,15 mm	Adición a pasta de cemento
Sukontasukkul y Chaikaew (2006) — Fracción gruesa	Caucho granulado	2,36–3,35 mm	Árido grueso
Sukontasukkul y Chaikaew (2006) — Fracción fina	Caucho granulado	< 2,36 mm	Árido fino
Si, R., Guo, S., y Dai, Q.	Caucho triturado	0,18–4,75 mm	Árido fino

Tabla 2. Compilación de los rangos granulométricos documentados en los principales estudios revisados en el estado del arte.

El hormigón es el material de construcción de mayor producción y uso en el mundo. Su composición básica —cemento Portland, agua, áridos finos y gruesos— le confiere versatilidad para ser diseñado y dosificado en función de requerimientos específicos de resistencia, durabilidad y acabado superficial (ACI Committee 318, 2019). En el contexto de los espacios públicos peatonales —plazas, aceras, parques y áreas de circulación—, los elementos prefabricados y las losas de hormigón son los componentes de pavimentación de mayor difusión en Ecuador y en la región andina, debido a su durabilidad, accesibilidad económica y facilidad de reposición en caso de deterioro (Ministerio de Obras Públicas del Ecuador [MOP], 2013).

El desempeño del hormigón como material de pavimentación peatonal depende de un conjunto de variables técnicas interrelacionadas que determinan su aptitud para el uso en exteriores. La resistencia a la compresión define la capacidad del elemento para soportar cargas verticales sin deformarse permanentemente. La resistencia a

la flexión es determinante para elementos que trabajan sobre apoyos discontinuos, como las baldosas prefabricadas sometidas al paso de peatones. La absorción de agua condiciona la durabilidad del elemento frente a ciclos de humedad y secado, especialmente en zonas de alta pluviosidad como la zona lluviosa continental ecuatoriana. La impermeabilidad superficial evalúa la capacidad del elemento para impedir el paso del agua a través de su cara vista bajo exposición prolongada a la lluvia. El coeficiente de restitución al impacto cuantifica la capacidad del material de absorber energía cinética ante impactos sobre la superficie, parámetro de especial relevancia para la seguridad peatonal en caídas accidentales. Finalmente, la resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas es la variable de mayor incidencia directa en la seguridad peatonal: una superficie segura en condiciones secas puede volverse peligrosa cuando está mojada (Thomas y Gupta, 2016; Roychand et al., 2020).

El acabado superficial del hormigón es una variable determinante para su desempeño antideslizante.

El hormigón escobillado aquel cuya superficie se texturiza arrastrando una escobilla sobre el concreto fresco presenta una rugosidad inicial muy buena, con coeficientes de fricción superiores a los del hormigón liso, lo que reduce considerablemente el riesgo de caídas en condiciones húmedas (ACI Committee 302, 2015). Sin embargo, esta textura superficial tiende a degradarse progresivamente con el uso continuado y la exposición ambiental, especialmente bajo precipitaciones intensas y tránsito peatonal frecuente, perdiendo gradualmente su efecto antideslizante a medida que transcurre su vida útil (ACI Committee 302, 2015). Esta limitación justifica la investigación de materiales cuya rugosidad sea inherente a su composición y no dependa de un acabado superficial perecedero.

1.3.1 Marco normativo para elementos de pavimentación peatonal

Cada tipo de elemento de pavimentación está regulado por normas técnicas específicas que

establecen los métodos de ensayo, los valores mínimos de aptitud y las clasificaciones de uso. La diversidad de normas aplicables en el mercado ecuatoriano entre nacionales, americanas y europeas dificulta la comparación directa de productos y pone de manifiesto la necesidad de adoptar un estándar de referencia claro para cada tipo de investigación.

NTE INEN 1483 — Baldosas de hormigón para uso peatonal: establece los requisitos de resistencia a compresión (mínimo 20 MPa) y absorción de agua (máximo 6 %) para baldosas de hormigón destinadas a uso peatonal en Ecuador. No incluye ensayos de resistencia a la flexión ni de deslizamiento como parámetros obligatorios.

NTE INEN 3040:2016 — Adoquines de hormigón: regula los adoquines para uso vial y peatonal en Ecuador, estableciendo requisitos de resistencia a la tracción indirecta (splitting, mínimo 3,6 MPa) y absorción de agua. Emplea métodos de ensayo diferentes a los de la UNE-EN 1339:2004, lo que impide la comparación directa entre adoquines y baldosas evaluados bajo distintas normas.

ASTM C936 — Standard Specification for Solid Concrete Interlocking Paving Units: norma norteamericana para bloques de pavimentación interlocking, que establece requisitos de resistencia a la compresión (mínimo 55 MPa) y absorción de agua (máximo 5 %). Se aplica principalmente en proyectos de infraestructura con especificaciones internacionales.

ASTM C140 — Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units: norma norteamericana para bloques de mampostería de hormigón, que incluye métodos de ensayo de compresión, absorción y resistencia a la flexión. Se utiliza como referencia para elementos estructurales y de cerramiento.

UNE-EN 1339:2004 — Baldosas de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo: norma europea adoptada en la presente investigación como marco de evaluación por ser la más completa y específica para baldosas prefabricadas de hormigón en espacios públicos peatonales. Establece clasificaciones de aptitud por clase (Clase 1, 2 y 3) en función de la resistencia a

la flexión, e incluye ensayos específicos de filtración superficial (permeabilidad), resistencia al deslizamiento (método DIN 51130) y desgaste por abrasión (método Böhme). No existe en Ecuador ninguna norma INEN equivalente a la UNE-EN 1339:2004 para este tipo específico de elemento, lo que refuerza la pertinencia de su adopción como referencia en esta investigación.

La Figura 1 compara los parámetros evaluados por cada norma, y la Figura 2 detalla los umbrales específicos establecidos por la UNE-EN 1339:2004 para los tres parámetros centrales de esta investigación.

Figura 1 *Parámetros evaluados por norma según tipo de elemento de pavimentación peatonal. Nota. La UNE-EN 1339:2004 es la única que contempla los seis parámetros de aptitud, incluyendo resistencia al deslizamiento y clasificación por clase de uso.*

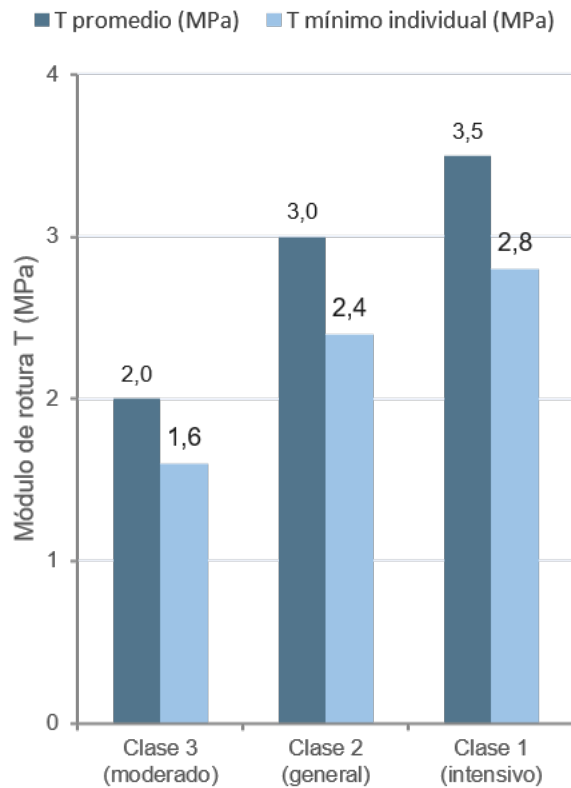
Elemento de pavimentación peatonal

	NTE INEN 1483 (Baldosa hormigón peatonal)	NTE INEN 3040:2016 (Adoquín hormigón)	UNE-EN 1339:2004 (Baldosa hormigón prefabricada)	ASTM C936 (Bloque interlocking)	ASTM C140 (Bloque mampostería)
Clasificación de aptitud	—	—	✓	—	—
Resistencia al desgaste/abrasión	—	○	✓	○	—
Resistencia al deslizamiento	—	—	✓	—	—
Absorción de agua	✓	✓	✓	✓	✓
Resistencia a flexión / tracción	○	✓	✓	—	✓
Resistencia a compresión	✓	✓	✓	✓	✓

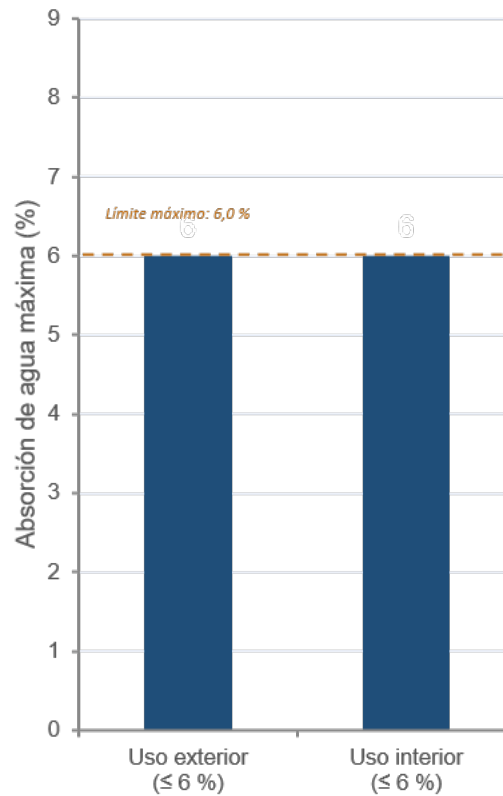
Norma adoptada en esta investigación

✓ Parámetro evaluado con umbral normativo
 ○ Evaluado sin umbral específico
 — No contemplado en la norma

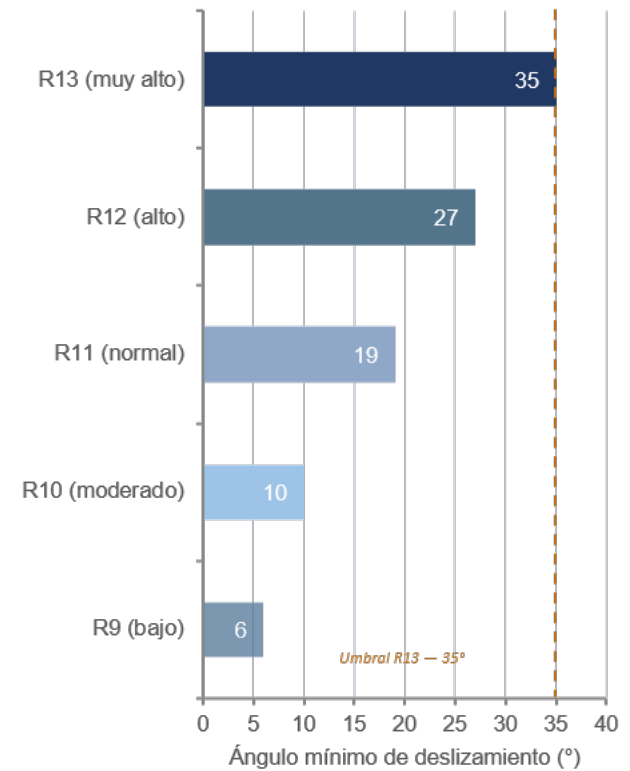
Clasificación por resistencia a la flexión



Limite de absorción de agua



Clasificación de resistencia al deslizamiento



La tabla 3 sintetiza las variables de aptitud para pavimentos peatonales, los métodos de ensayo correspondientes y los umbrales normativos aplicables, con especial énfasis en los parámetros evaluados bajo la UNE-EN 1339:2004.

Tabla 3 Variables de aptitud para pavimentos peatonales: métodos de ensayo y umbrales normativos.

Nota. Los umbrales corresponden a los valores mínimos o máximos establecidos por cada norma para uso peatonal en exteriores. El ensayo de desgaste Böhme no fue incluido en el programa experimental de esta investigación y se reconoce como limitación en el Capítulo 02. Tomado de UNE-EN 1339:2004; NTE INEN 1483 (2009); NTE INEN 3040:2016; ACI 302.1R-15; DIN 51130

Figura 2 Umbrales normativos de la UNE-EN 1339:2004 para baldosas prefabricadas de hormigón en espacio público peatonal: clasificación por resistencia a la flexión (izquierda), límite de absorción de agua (centro) y clasificación de resistencia al deslizamiento según DIN 51130 (derecha).

Variables de aptitud para pavimentos peatonales			
Variable de aptitud	Método de ensayo	Norma / referencia	Umbral o criterio
Resistencia a la flexión	Ensayo de carga en tres puntos sobre espécimen	UNE-EN 1339:2004, Anexo F; ACI 318	$\geq 3,5$ MPa (Clase 1) / $\geq 2,0$ MPa (Clase 3)
Resistencia a la compresión	Prensa de compresión sobre cilindro o cubo	ASTM C39; ASTM C140; NTE INEN 3040	Variable según norma y tipo de elemento
Absorción de agua	Inmersión y pesaje en estado seco y saturado	UNE-EN 1339:2004, Anexo E; ASTM C140	$\leq 6,0$ % (uso exterior, UNE-EN 1339)
Resistencia al deslizamiento	Péndulo de fricción (PTV) o rampa inclinada (DIN 51130)	DIN 51130; CEN/TS 16165; UNE-ENV 51130	Grupo R13 ($\geq 35^\circ$) para zonas de alta exposición a lluvia
Resistencia al desgaste por abrasión	Rueda de abrasión (Böhme) o disco abrasivo	UNE-EN 1339:2004, Anexo C; ASTM C944	≤ 23 cm ³ /50 cm ² (Böhme, UNE-EN 1339)
Impermeabilidad superficial (filtración)	Depósito de agua sobre cara vista 72 horas	UNE-EN 1339:2004, Anexo D	Nivel 0 (seco) a Nivel 4 (muchas gotas)

1.3.2 Materiales de pavimentación peatonal disponibles en el mercado ecuatoriano

El mercado ecuatoriano de la construcción ofrece diversas soluciones de pavimentación para espacios públicos peatonales, con distintas especificaciones técnicas, normativa aplicable y condiciones de uso recomendadas. Su conocimiento es relevante para contextualizar la formulación M-10-T8 dentro de la oferta existente y para identificar los nichos funcionales que no están cubiertos por los productos convencionales. Los adoquines de hormigón son el elemento prefabricado de mayor presencia en vías peatonales y vehiculares del Ecuador, producidos bajo la NTE INEN 3040:2016 y distribuidos a través de redes nacionales como Disensa. Su instalación en patrones entrelazados aporta estabilidad sin necesidad de mortero en juntas, facilitando la reposición de piezas. Las baldosas de hormigón prefabricadas se rigen por la NTE INEN 1483 y son ampliamente utilizadas en aceras, parques y

plazas urbanas. El hormigón escobillado in situ es frecuente en aceras y espacios de circulación por su economía y facilidad de ejecución. Como se señaló en la sección anterior, su rugosidad inicial es muy buena, pero se degrada con el uso y la exposición ambiental (ACI Committee 302, 2015). Los materiales de piedra natural andesita, granito se reservan para espacios patrimoniales, con alta durabilidad, pero baja rugosidad superficial en mojado. La tabla 4 resume las características técnicas de cada material.

1.3.3 Secciones constructivas para pavimentos peatonales

La correcta instalación de cualquier elemento de pavimentación peatonal requiere una sección constructiva por capas que distribuya adecuadamente las cargas hacia el suelo de fundación y garantice el drenaje del agua superficial. La elección de la sección constructiva influye directamente en el comportamiento a largo

plazo del pavimento: una base granular insuficiente o un asiento inadecuado pueden generar asentamientos diferenciales, fisuras o pérdida de alineación en los elementos prefabricados, comprometiendo tanto la funcionalidad como la seguridad peatonal. La figura 3 ilustra la sección constructiva típica para los tres principales sistemas de pavimentación peatonal utilizados en Ecuador —adoquín de hormigón, baldosa prefabricada y hormigón escobillado in situ—, y la Tabla 5 detalla las especificaciones de cada capa, de la fundación a la superficie.

Tabla 4 *Materiales de pavimentación peatonal disponibles en el mercado ecuatoriano: especificaciones técnicas y normativa*

Nota. La fila sombreada en verde corresponde a la baldosa desarrollada en la presente investigación. Fuentes: NTE INEN 3040:2016; NTE INEN 1483 (2009); ACI 302.1R-15; ASTM C936; UNE-EN 1341; UNE-EN 1339:2004.

Materiales de pavimentación peatonal disponibles en el mercado ecuatoriano					
Material	Dimensiones típicas	f'c mín. (MPa)	Absorción máx. (%)	Norma	Observaciones
Adoquín de hormigón	300×200×50 mm	35–40	≤ 6	NTE INEN 3040:2016	Uso vehicular y peatonal. Alta resistencia al desgaste y a la intemperie.
Baldosa de hormigón	300×300×40 mm	20–25	≤ 6	NTE INEN 1483	Uso peatonal. Facilidad de reposición. Acabado liso o texturizado.
Hormigón escobillado in situ	Losa (e ≥ 100 mm)	21–28	—	ACI 302.1R	Rugosidad inicial muy buena por textura de escobilla; se degrada progresivamente con el uso continuo y la lluvia.
Adoquín cerámico / arcilla cocida	200×100×50 mm	—	6–10	NTE INEN 650	Uso ornamental peatonal. Superficie pulida resulta resbaladiza en condiciones mojadas.
Piedra natural	Variable	—	< 1	UNE-EN 1341	Aplicaciones patrimoniales. Durabilidad muy alta; baja fricción en mojado.
Bloque interlocking (ASTM)	Variable	≥ 28	≤ 5	ASTM C936	Uso vehicular y peatonal intensivo. Norma norteamericana; frecuente en proyectos institucionales.
Baldosa M-10-T8 (esta investigación)	300×300×50 mm	18 (diseño)	≤ 6	UNE-EN 1339:2004	Rugosidad inherente y duradera por caucho. Absorción de impactos. Valorización NFU.

Sección constructiva de pavimento con adoquines de hormigón

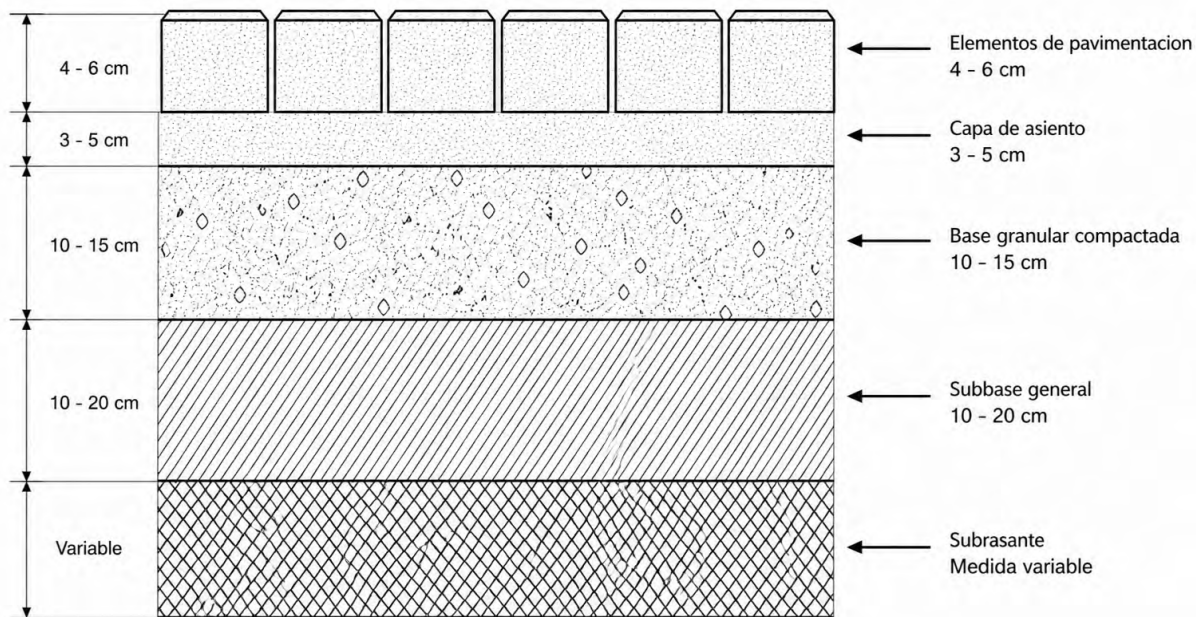


Figura 3 Sección constructiva de pavimento con adoquines de hormigón. Se muestran las capas estructurales (elementos de pavimentación, capa de asiento, base granular compactada, subbase granular y subrasante) con sus respectivos rangos de espesor. Nota. Imagen adaptada y editada mediante IA generativa (ChatGPT) a partir de una referencia obtenida de internet



Figura 4 Patrón de instalación de adoquín de hormigón bicapa. Tomado de Catálogo técnico de productos, Hormipisos Cía. Ltda., Ecuador.



Figura 5 Detalle de pavimento con baldosa de hormigón prefabricado. Tomado de Catálogo de soluciones para pisos y revestimientos, Disensa Ecuador.



Figura 6 Acabado superficial de piso en hormigón escobillado con juntas de dilatación. Tomado de Manual de especificaciones y acabados de concreto, Holcim Ecuador.

La zona continental lluviosa del Ecuador, donde las precipitaciones pueden superar los 700 mm anuales con eventos de lluvia frecuentes durante varios meses del año (INAMHI, 2023; Thomas & Gupta, 2016), impone condiciones de exposición permanente a la humedad que hacen de la resistencia al deslizamiento húmedo el parámetro de mayor relevancia técnica y de seguridad pública para los pavimentos peatonales. La investigación de materiales que combinen adecuadas propiedades mecánicas resistencia a la flexión, absorción de agua dentro de límites normativos, impermeabilidad superficial con una resistencia al deslizamiento húmedo superior a la del hormigón convencional constituye, por tanto, una necesidad técnica y de seguridad pública concreta para este entorno geográfico y climático (Thomas y Gupta, 2016; Roychand et al., 2020).

Especificaciones de capas				
Capa	Componente	Espesor	Material	Función
5 (sup.)	Elemento de pavimentación	4–6 cm	Baldosa / adoquín de hormigón	Capa de rodadura; soporta cargas peatonales y proporciona superficie segura.
4	Capa de asiento	3–5 cm	Arena lavada o mortero seco (1:6)	Nivela irregularidades y distribuye cargas uniformemente.
3	Base granular compactada	10–15 cm	Grava-arena bien gradada	Distribuye cargas hacia la subbase y proporciona drenaje.
2	Subbase granular	15–20 cm	Material granular estabilizado	Aporta capacidad portante y drena agua hacia los costados.
1 (inf.)	Subrasante	Variable	Suelo natural compactado (CBR \geq 6 %)	Suelo de fundación; define la capacidad de carga del sistema.

Tabla 5 Especificaciones de capas.

Nota. Los espesores son orientativos y deben ajustarse según la capacidad portante del suelo, la intensidad del tránsito peatonal y las condiciones climáticas locales. Para la zona lluviosa continental ecuatoriana se recomienda incorporar sistemas de drenaje lateral en la base granular para evitar la acumulación de agua bajo el pavimento. Adaptado de normas de diseño vial y construcción del Ministerio de Obras Públicas del Ecuador y especificaciones ACI 302.1R-15.

La investigación sobre hormigón con caucho reciclado se ha desarrollado durante más de tres décadas. A continuación, se presentan los resultados específicos obtenidos por los principales autores consultados, organizados por propiedad, con sus tablas de datos y gráficos de resultados. La Tabla 6 ofrece un resumen general de los productos desarrollados y los resultados principales; las subsecciones siguientes detallan los datos de cada estudio.

Productos y resultados obtenidos			
Autor / Año	Producto / espécimen desarrollado	Parámetros ensayados	Principales resultados obtenidos
Eldin y Senouci (1993)	Probetas cilíndricas con chips de caucho (19–38 mm) y caucho molido (< 1 mm) como sustituto de árido grueso y fino	Compresión; tensión; modo de falla	Reducción de f'c: hasta -85 % (chips) y -65 % (molido). Cambio de modo de falla: de frágil a dúctil en todos los casos.
Topçu (1995)	Probetas cilíndricas con caucho triturado en sustituciones del 15 % al 45 % del árido	Compresión; modo de falla; módulo de elasticidad	Mayor diámetro de partícula → mayor reducción de f'c. Comportamiento dúctil y plástico. Mayor energía absorbida antes de la rotura.
Segre y Joeke (2000)	Especímenes de pasta de cemento con caucho molido (< 0,15 mm) al 10 % + pretratamiento NaOH saturado 20 min	Adherencia caucho-cemento (SEM); abrasión; tenacidad	NaOH genera superficie rugosa → mejor anclaje mecánico. Pérdida por abrasión: -1,7 % (NaOH) vs. -4,0 % (sin tratar). Mejora significativa de tenacidad.
Sukontasukkul y Chaikaew (2006)	Especímenes de hormigón con caucho granulado en sustitución de árido, sin marco normativo de certificación ni pretratamiento del caucho	Compresión; absorción; índice de deslizamiento referencial; desgaste superficial aproximado	Estudio exploratorio sin clasificación normativa de aptitud. Documentó que la elasticidad superficial del caucho mejora el deslizamiento húmedo y que la absorción permanece en rangos funcionales a porcentajes moderados.
Güneysi, Gesoglu y Özturan (2004)	Probetas cilíndricas con caucho + humo de sílice en sustituciones del 5 % al 25 % de áridos	Compresión; tensión; módulo de elasticidad	Con 15 % caucho + humo de sílice → posible 40 MPa. Humo de sílice mitiga parcialmente la reducción de resistencia.

Tabla 6 Productos desarrollados y resultados obtenidos en investigaciones de referencia sobre hormigón con caucho reciclado

Nota. ITZ = zona de transición interfacial. NFU = neumático fuera de uso.

I 1.4 Hormigón con caucho reciclado: propiedades mecánicas y resultados de investigaciones de referencia

Si, Guo y Dai (2017)	Probetas de mortero y hormigón con caucho tratado con NaOH 10 % / 25 minutos en distintos porcentajes	Compresión (7 y 28 días); permeabilidad; penetración de cloruros; ciclos congelación-descongelación	Recuperación de hasta +18,6 % en f'c a 28 días vs. caucho sin tratar. Reducción de porosidad de la ITZ. Mejora de durabilidad general.
Chaikaew et al. (2019)	Especímenes de hormigón con caucho granulado + fibras de acero al 0,5 % y 1,0 % en volumen	Flexión; resistencia al deslizamiento; ductilidad	Fibras de acero recuperan parcialmente la resistencia a flexión. Deslizamiento y ductilidad se mantienen. Fabricación comparable al convencional.
Siddique y Naik (2004)	Revisión sistemática de múltiples estudios sobre hormigón con caucho de neumáticos (chips y molido)	Compresión; tensión; desgaste; absorción; módulo de elasticidad	Reducción universal y proporcional al % de sustitución y tamaño de partícula. Reducción de densidad. Viable para elementos no estructurales.
Roychand et al. (2020)	Revisión sistemática de > 150 investigaciones sobre hormigón con caucho NFU	Todas las propiedades mecánicas y de durabilidad	Reducción de f'c consistente (15-85 % según tamaño y %). Efectos positivos: ductilidad, tenacidad, deslizamiento. Viable para peatonales al 10-20 %.

Reducción de resistencia a compresión por porcentaje de caucho

Tipo de sustitución	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
Chips de caucho (árido grueso)	-25 %	-40 %	-55 %	-70 %	-85 %
Caucho molido (árido fino)	-15 %	-28 %	-40 %	-52 %	-65 %

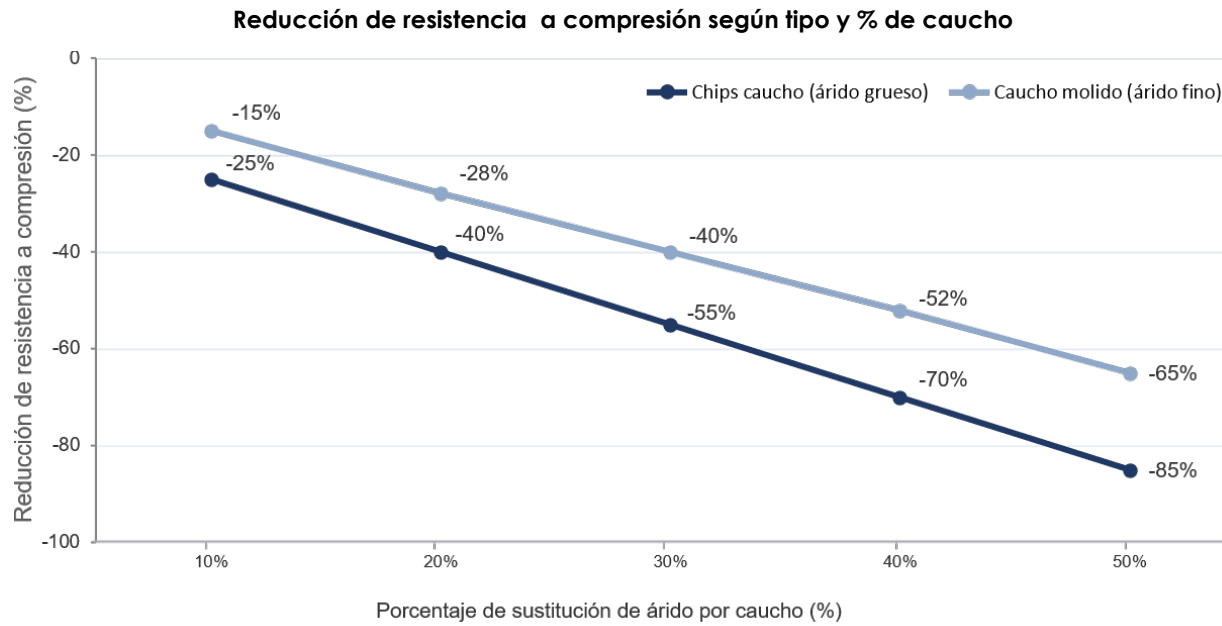
1.4.1 Resistencia a la compresión

La incorporación de partículas de caucho como sustituto parcial del árido produce, de manera consistente en la literatura especializada, una reducción de la resistencia a compresión con respecto al hormigón de control.

Eldin y Senouci (1993) documentaron esta reducción por primera vez de manera sistemática, encontrando que la sustitución del árido grueso con chips de caucho reducía la resistencia a compresión hasta en un 85 %, mientras que la sustitución del árido fino con caucho molido producía reducciones de hasta el 65 %. La Tabla 7 y la Figura 7 presentan los resultados específicos de este estudio.

Tabla 7 Reducción de resistencia a compresión según tipo y porcentaje de sustitución de caucho — Eldin y Senouci (1993)

Nota. Los valores negativos indican reducción porcentual respecto al hormigón control sin caucho. Fuente: Eldin y Senouci (1993). Elaboración propia con base en datos reportados por los autores.



Topçu (1995) confirmó estos resultados al estudiar sustituciones del 15 % al 45 %, destacando que la presencia de caucho transforma el modo de falla del hormigón de frágil a dúctil y plástico, con mayor capacidad de deformación antes de la rotura. La Tabla 8 y la Figura 8 presentan los resultados obtenidos.

Figura 7 Reducción de resistencia a compresión según tipo y porcentaje de sustitución de caucho. En base de Eldin y Senouci (1993).

Resistencia a compresión y tracción por sustitución de caucho				
Parámetro	0 % (control)	15 %	30 %	45 %
f'c cilindro (MPa)	30,0	17,5	12,0	8,5
f'c cubo (MPa)	36,0	20,0	14,0	9,5
Resistencia a tracción (MPa)	2,80	1,50	0,90	0,60
Reducción f'c cilindro (%)	—	-41,7 %	-60,0 %	-71,7 %

Tabla 8 Resistencia a compresión y tracción según porcentaje de sustitución de caucho — Topçu (1995).

Nota. Los especímenes con caucho presentaron falla dúctil en todos los porcentajes de sustitución. Fuente: Topçu (1995). En base de datos reportados por el autor.

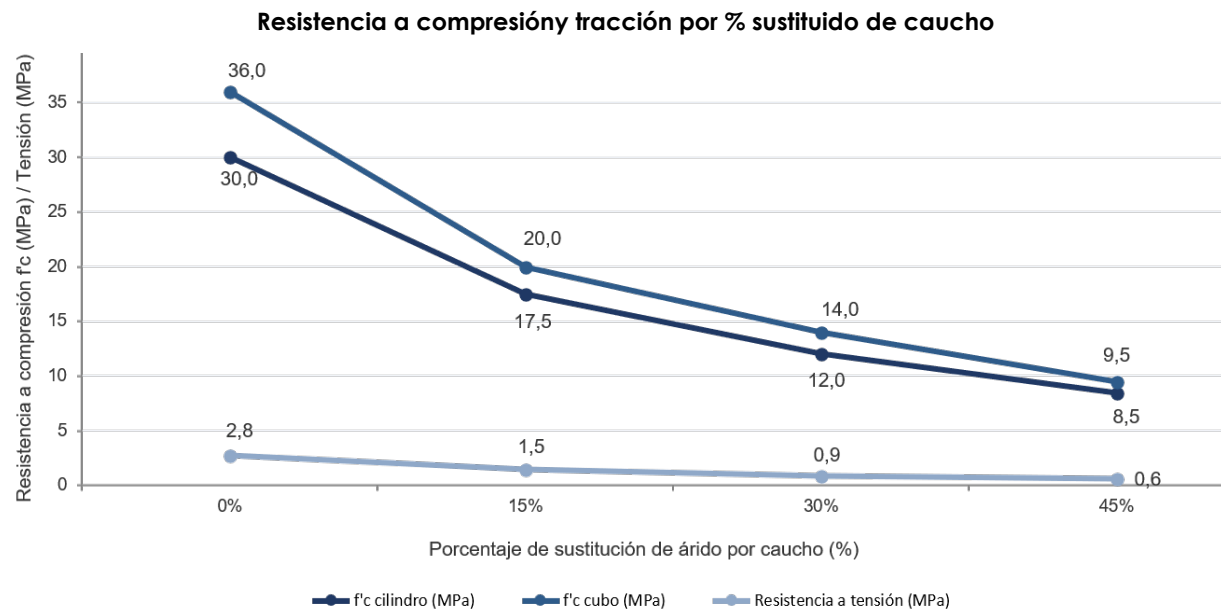


Figura 8 Resistencia a compresión (cilindro y cubo) y tracción según % de sustitución de caucho. En base de Topçu (1995).

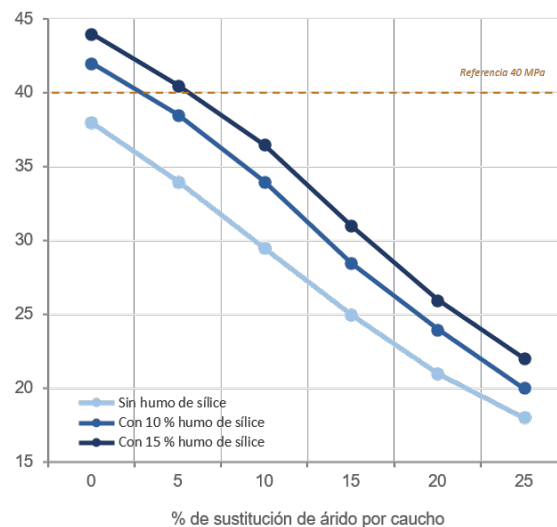
1.4 Hormigón con caucho reciclado: propiedades mecánicas y resultados de investigaciones de referencia

42

Güneyisi et al. (2004) demostraron que la incorporación de humo de sílice permite mitigar parcialmente la reducción de resistencia al mejorar la microestructura de la ITZ, siendo posible alcanzar 40 MPa con 15 % de caucho en combinación con adiciones puzolanas. La Tabla 9 y la Figura 9 presentan sus resultados.

Resistencia a compresión y módulo de elasticidad					
Mezcla	0 % caucho sin SF	15 % caucho sin SF	15 % caucho + 10 % SF	15 % caucho + 15 % SF	Reducción con 15 % SF
f'c 28d (MPa)	38,0	25,0	28,5	31,0	-18,4 %
Módulo elasticidad (MPa)	32 000	20 000	22 000	23 500	-26,6 %
Reducción f'c vs. control (%)	—	-34,2 %	-25,0 %	-18,4 %	—

F'c vs % de caucho y adición de humo de sílice



Módulo de elasticidad vs % de caucho

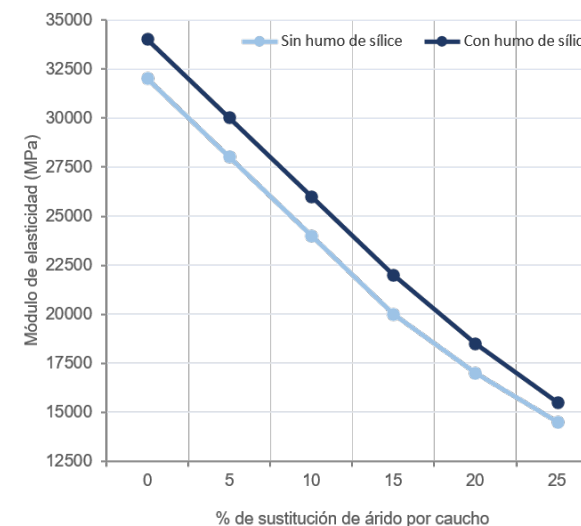


Tabla 9 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad con y sin humo de sílice — Güneyisi, Gesoglu y Özturan (2004)

Nota. SF = humo de sílice (silica fume). En base de Güneyisi et al. (2004).

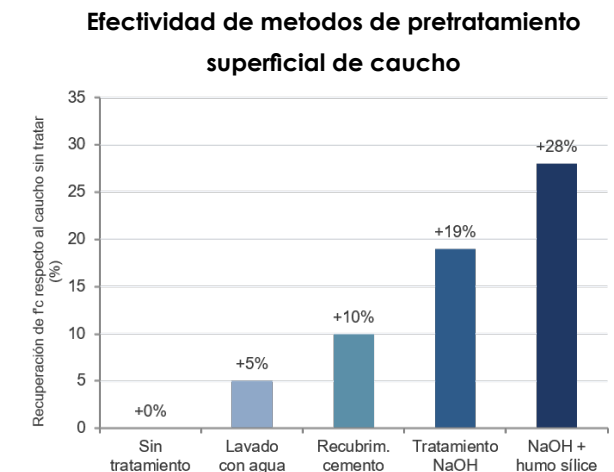
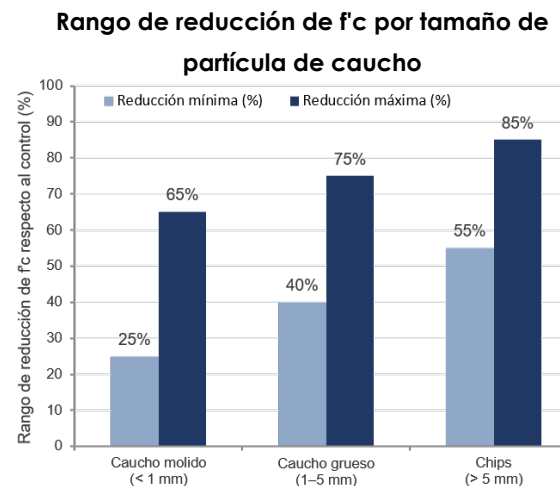
Figura 9 Resistencia a compresión y módulo de elasticidad según % de caucho y adición de humo de sílice. En base de Güneyisi, Gesoglu y Özturan (2004).

Siddique y Naik (2004) y Roychand et al. (2020), en sus revisiones sistemáticas de más de 150 investigaciones, confirmaron que la reducción de resistencia es proporcional al porcentaje de sustitución y al tamaño de partícula, con independencia del origen geográfico. La Figura 10 sintetiza los rangos documentados por Roychand et al. (2020) según el tamaño de partícula y la efectividad de los métodos de pretratamiento (Tabla 10).

Reducciones reportadas en ensayos realizados en probetas			
Investigación / referente	Tipo de caucho	% Sustitución	Reducción de f_c respecto al control
Eldin y Senouci (1993)	Chips (árido grueso)	Hasta 100%	Hasta -85 % en resistencia a compresión
Eldin y Senouci (1993)	Molido (árido fino)	Hasta 100%	Hasta -65 % en resistencia a compresión
Topçu (1995)	Triturado	15-45 %	Reducción proporcional al % y al tamaño de partícula; falla dúctil
Segre y Joeques (2000)	Molido con tratamiento NaOH	10 %	Reducción menor que con caucho sin tratar; mejora de tenacidad
Si et al. (2017)	Triturado con NaOH 10 %	20 %	Recuperación de hasta +19,86 % de f_c a 28 días vs. caucho sin tratar
Sukontasukkul y Chaikaew (2006)	Granulado	10-20 %	Reducción moderada; resistencias aceptables para uso peatonal

Tabla 10 Reducciones reportadas corresponden a ensayos realizados sobre probetas cilíndricas a 28 días de curado. Tomado de Eldin y Senouci (1993); Topçu (1995); Segre y Joeques (2000); Si et al. (2017); Sukontasukkul y Chaikaew (2006).

Figura 10 Síntesis de rangos de reducción de f_c por tamaño de partícula y efectividad de métodos de pretratamiento. En base en Roychand et al. (2020).



1.4.2 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión experimenta reducciones al incorporar caucho, proporcionalmente menores que en compresión. Eldin y Senouci (1994) cuantificaron una mejora de hasta el 100 % en el módulo de tenacidad respecto al hormigón convencional, evidenciando mayor capacidad de absorción de energía de fractura. Segre y Joeques (2000) corroboraron este comportamiento en mortero con un 10 % de caucho. Thomas y Gupta (2016) señalaron que la mejora en tenacidad hace del hormigón rubbizado un material especialmente adecuado para superficies peatonales sometidas a cargas cíclicas. Chaikaew et al. (2019) demostraron que la adición de fibras de acero al 0,5–1,0 % en volumen recupera parcialmente la resistencia a la flexión perdida por el caucho. La Tabla 11 y la Figura 11 presentan sus resultados.

Tabla 11 *Propiedades de especímenes de hormigón con caucho y fibras de acero — Chaikaew et al. (2019) Nota.* Las fibras de acero tienen ganchos en sus extremos. El % de caucho indica sustitución de árido fino. En base en Chaikaew et al. (2019).

Propiedades de especímenes de hormigón con caucho y fibras de acero					
Propiedad evaluada	Caucho 10 % sin fibras	+ 0,5 % fibras 35 mm	+ 1,0 % fibras 35 mm	+ 1,0 % fibras 65 mm	Mejora máx. vs. sin fibras
Módulo de rotura flexión (MPa)	2,80	3,40	4,10	4,30	+53,6 %
Absorción de agua (%)	5,8	6,1	6,3	6,4	+10,3 %
Resistencia al deslizamiento	+18 % vs. convencional	+17 %	+16 %	+15 %	Sin cambio significativo

Efecto de la adición de fibras de acero en bloques de hormigón con caucho

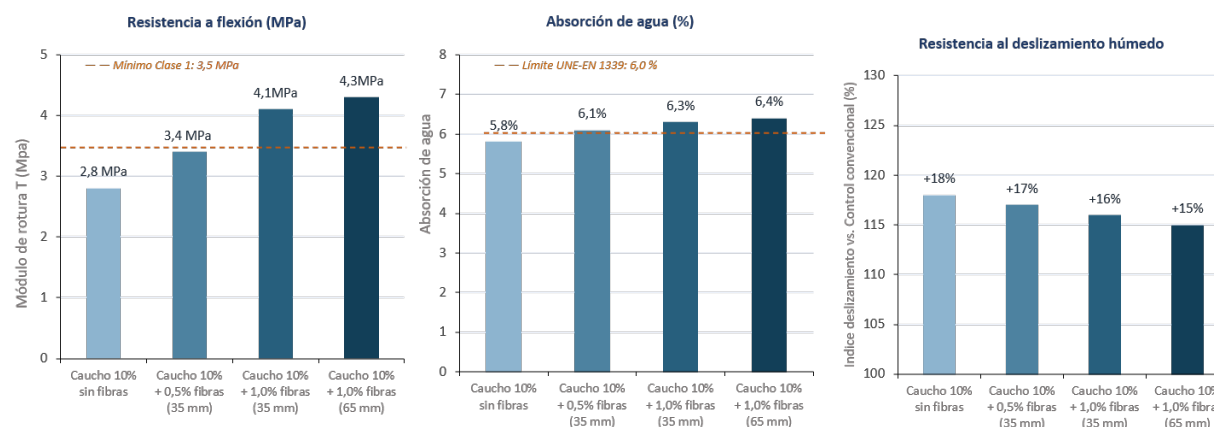


Figura 11 Efecto de la adición de fibras de acero en especímenes de hormigón con 10 % de caucho. En base de Chaikaew et al. (2019).

1.4.3 Resistencia al desgaste por abrasión

La resistencia al desgaste por abrasión muestra comportamientos diferenciados según el pretratamiento del caucho. Segre y Joekes (2000) reportaron pérdidas por abrasión de $-1,7\% \pm 0,4\%$ para caucho tratado con NaOH frente a $-4,0\% \pm 1,2\%$ para caucho sin tratar, demostrando que el pretratamiento mejora sustancialmente el comportamiento abrasivo. La Tabla 12 y la Figura 1.7 detallan sus resultados.

Tabla 12 Pérdida por abrasión y tenacidad de mortero con caucho molido — Segre y Joekes (2000)

Nota. Ensayo de abrasión: 600 ciclos. Tratamiento: NaOH en solución saturada, 20 min de inmersión. Basado en Segre y Joekes (2000).

Pérdida por abrasión y tenacidad de mortero con caucho molido			
Parámetro evaluado	Control (sin caucho)	Caucho 10 % sin tratamiento	Caucho 10 % NaOH saturado 20 min
Pérdida por abrasión (%. 600 ciclos)	—	$-4,0\% \pm 1,2\%$	$-1,7\% \pm 0,4\%$
Tenacidad relativa al control (%)	100 %	+45 %	+82 %
Adherencia caucho-cemento (SEM)	—	Superficie lisa — débil anclaje	Superficie rugosa y porosa — mayor anclaje

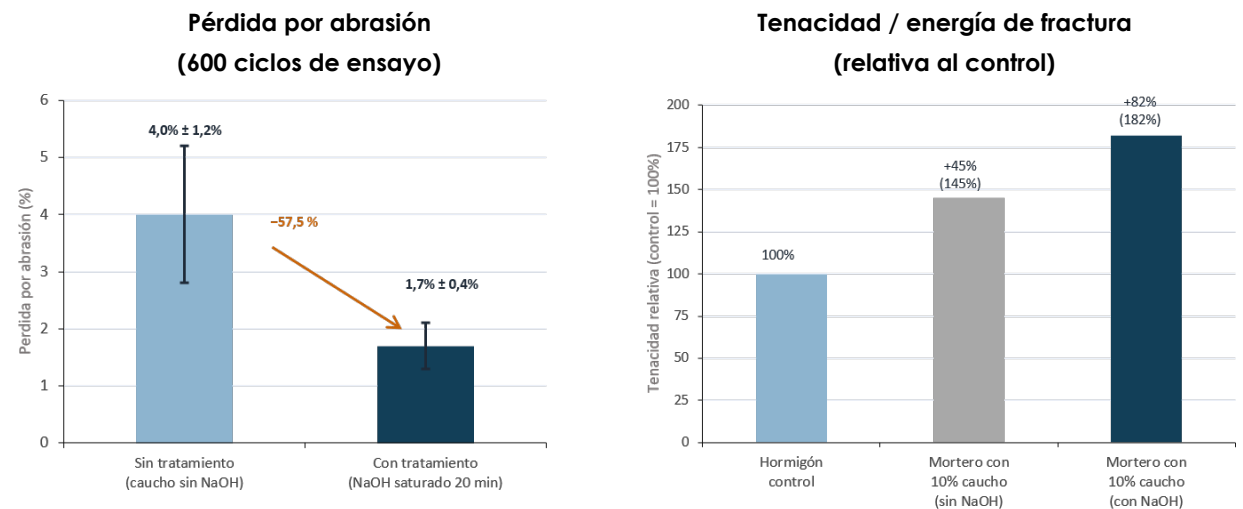


Figura 12 Pérdida por abrasión y tenacidad relativa de mortero con caucho tratado y sin tratar. En base en Segre y Joekes (2000).

Sukontasukkul y Chaikaew (2006), en su estudio exploratorio sobre especímenes de hormigón con caucho sin marco normativo de certificación, encontraron desempeño funcional en abrasión siempre que el porcentaje de sustitución no superara el 10–20 % de los áridos totales, resultado concordante con los rangos establecidos por Siddique y Naik (2004) en su revisión sistemática de la literatura.

1.4.4 Absorción de agua y antecedente exploratorio: alcance y limitaciones de Sukontasukkul y Chaikaew (2006)

La absorción de agua tiende a incrementarse con el contenido de caucho en la mezcla, como consecuencia del aumento de porosidad en la zona de transición interfacial entre las partículas de caucho hidrofóbico y la pasta de cemento. Topçu (1995) identificó que la superficie del caucho atrapa burbujas de aire durante el mezclado, generando vacíos internos que incrementan la permeabilidad. Siddique y Naik

(2004) corroboraron, en su revisión sistemática, que el control del porcentaje de sustitución es el factor determinante para mantener la absorción dentro de límites funcionales en aplicaciones exteriores. En el campo de especímenes de hormigón con caucho granulado, Sukontasukkul y Chaikaew (2006) constituyen el antecedente más temprano que exploró propiedades de deslizamiento y absorción en piezas de hormigón rubbizado. Los autores, del King Mongkut Institute of Technology de Bangkok (Tailandia), registraron que la absorción de agua se mantuvo por debajo del 6 % a porcentajes de sustitución de hasta el 20 %, y que la elasticidad superficial del caucho mejoró el deslizamiento húmedo respecto al control convencional. Sin embargo, este estudio presenta limitaciones metodológicas estructurales que impiden considerarlo un antecedente directo de la presente investigación. No se aplicó ningún marco normativo de certificación: los ensayos son exploratorios, sin umbrales de aptitud ni clasificación de uso. El caucho fue incorporado sin pretratamiento superficial, condición que la

literatura posterior en particular Segre y Joekes (2000) y Si et al. (2017) ha demostrado que es la causa principal de las mayores reducciones de resistencia. Las fracciones granulométricas empleadas corresponden a la clasificación de mallas ASTM, que no son directamente equivalentes a las fracciones T-8 y T-16 de la nomenclatura UNE-EN 933-2 utilizada en esta investigación. A estas diferencias metodológicas se suma una diferencia contextual fundamental: el estudio fue realizado en Bangkok bajo clima tropical húmedo (Köppen Aw), con materiales de origen tailandés. La extrapolación de sus resultados al contexto andino ecuatoriano donde la intensidad de lluvias, la temperatura, los áridos y el caucho NFU disponibles son completamente distintos no es posible sin una validación experimental propia. Finalmente, el estudio no aborda el vacío normativo existente en Ecuador respecto a baldosas de hormigón para uso peatonal, que es el eje central de la presente investigación. La Tabla 13 y las Figuras 13 y 14 detallan las diferencias entre el alcance del antecedente y el de esta tesis.

Análisis comparativo de alcance metodológico		
Dimensión de análisis	Sukontasukkul y Chaikaew (2006) — Antecedente exploratorio	Presente investigación (UDA, 2026) — Aporte diferenciado
Marco normativo aplicado	Ninguno. Ensayos exploratorios de laboratorio sin estándar de certificación ni umbrales de aptitud por clase de uso.	UNE-EN 1339:2004. Clasificación por clases (Clase 1 / Clase 3) con umbrales verificables y reconocidos internacionalmente.
Pretratamiento del caucho	Caucho granulado incorporado sin tratamiento superficial previo. La interfaz pasta-caucho no fue intervenida químicamente.	Pretratamiento con NaOH al 10% durante 25 minutos según protocolo de Si et al. (2017), comprobado mediante análisis SEM.
Fracciones granulométricas del caucho	Malla #6 (2,36–3,35 mm) y malla #20 (< 0,84 mm) según clasificación ASTM, sin equivalencia directa con nomenclatura europea.	Fracción T-8 (2,36–4,75 mm) y T-16 (1,18–2,36 mm) según nomenclatura UNE-EN 933-2, adoptada en la norma de ensayo aplicada.
Ensayos de durabilidad realizados	Compresión, desgaste superficial aproximado, absorción e índice de deslizamiento referencial sin norma específica.	Flexión UNE-EN 1339, filtración 72 h (Nivel 0–4), deslizamiento DIN 51130 (°, Grupo R), coeficiente de restitución al impacto $e = \sqrt{(h_i/h_o)}$.
Clasificación de aptitud	No se estableció clasificación de aptitud para uso peatonal. Los datos son valores absolutos sin umbral normativo de referencia.	Clasificación explícita en Clase 1 ($\geq 3,5$ MPa, tráfico intensivo) o Clase 3 ($\geq 2,0$ MPa, tráfico moderado) de la UNE-EN 1339:2004.
Contexto climático y geográfico	Bangkok, Tailandia. Clima tropical húmedo (Köppen Aw). Precipitación media anual $\sim 1\,400$ mm. Áridos y cemento de origen tailandés.	Cuenca, Ecuador. Zona lluviosa continental andina. Precipitación > 700 mm/año. Áridos, cemento Holcim IP y caucho NFU del mercado local.
Vacío normativo abordado	El estudio no identifica ni aborda ningún vacío normativo. No existe en Tailandia antecedente de problema normativo equivalente.	Documenta explícitamente la ausencia de norma INEN equivalente a la UNE-EN 1339:2004 en Ecuador como aporte al Sistema Ecuatoriano de Normalización.

Tabla 13 Análisis comparativo de alcance metodológico: Sukontasukkul y Chaikaew (2006) frente a presente investigación (UDA, 2026)

Nota. Las celdas sombreadas en verde en la columna derecha indican los aportes diferenciados de la presente investigación respecto al antecedente. En base en Sukontasukkul y Chaikaew (2006); Si et al. (2017); Segre y Joekes (2000); UNE-EN 1339:2004.

1.4 Hormigón con caucho reciclado: propiedades mecánicas y resultados de investigaciones de referencia

48

Alcance metodológico comparado: antecedente vs presente investigación

	Sukontasukkul y Chaikaew (2006, Tailandia)	Presente investigación (UDA, Cuenca — Ecuador, 2026)
Marco normativo certificable (UNE-EN 1339:2004)	×	✓
Pretratamiento químico del caucho (NaOH)	×	✓
Clasificación de aptitud por clase (Clase 1 / Clase 3)	×	✓
Ensayo de filtración (permeabilidad 72 h)	×	✓
Resistencia al deslizamiento DIN 51130 (*)	~	✓
Coefficiente de restitución al impacto ($e = \sqrt{h_i/h_0}$)	×	✓
Validación en zona lluviosa continental Ecuador	×	✓
Fraciones caucho normalizadas (T-8, T-16)	×	✓

- ✓ Incluido / Cumplido
- ~ Parcialmente abordado
- × No incluido / No evaluado

Figura 13 Mapa de alcance metodológico comparado. El antecedente de Sukontasukkul y Chaikaew (2006) no abordó los componentes normativos, de pretratamiento, de clasificación de aptitud ni de validación para el contexto ecuatoriano.

Comparación metodológica con el antecedente más próximo

Parámetros de diseño y contexto de investigación

Parámetro	Sukontasukkul y Chaikaew (2006)	Presente investigación (UDA 2026)
Norma aplicada	Ninguna (exploratorio)	UNE-EN 1339:2004
Pretrat. caucho	Ninguno	NaOH 10 % 25 minutos
Fracción granulom.	#6 y #20 mesh (ASTM)	T-8 y T-16 (UNE-EN 933)
Espesor baldosa	60 mm	50 mm
Zona climática	Tropical húmedo (Bangkok)	Lluvioso continental (Ecuador)

Cobertura de ensayos realizados

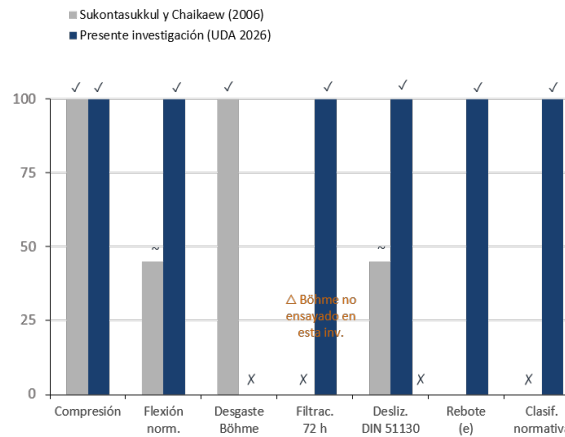


Figura 14 Diferencias en parámetros de diseño y cobertura de ensayos entre el antecedente y la presente investigación. La ausencia del ensayo de desgaste Böhme se reconoce como limitación en el Capítulo 02.

El principal problema técnico asociado a la incorporación de caucho granulado es la deficiente adherencia entre la superficie hidrofóbica del caucho y la pasta de cemento hidrofílica. Esta debilidad en la ITZ es la causa directa de las reducciones de resistencia documentadas en la sección anterior. Entre los métodos desarrollados lavado con agua, revestimiento con pasta de cemento, látex y soluciones alcalinas, el hidróxido de sodio (NaOH) ha sido ampliamente documentado como el de mayor eficacia y replicabilidad (Segre y Joeques, 2000; Si et al., 2017).

Segre y Joeques (2000) fueron los primeros en demostrar sistemáticamente que el tratamiento con hidróxido de sodio (NaOH) durante 25 minutos genera una superficie más rugosa y porosa en las partículas de caucho, aumentando el área de contacto y favoreciendo el anclaje mecánico con la matriz cementante.

Si et al. (2017) evaluaron el efecto del tratamiento sobre propiedades de durabilidad, demostrando que la solución al 10 % aplicada durante 25

minutos reduce la porosidad de la ITZ y mejora la resistencia al desgaste. Los autores concluyeron que el pretratamiento del caucho triturado con NaOH mejora la adherencia entre las partículas de caucho y la pasta de cemento mediante la modificación superficial del material, lo que

produce un incremento en las propiedades mecánicas y en la energía de fractura, además de mejorar la tenacidad y disminuir la porosidad del material (Si, Guo y Dai, 2017, p. 498). La Tabla 14 y la Figura 15 presentan los resultados específicos de este estudio.

Efecto del pretratamiento con NaOH al 10%					
Propiedad evaluada	Control (sin caucho)	15 % caucho sin tratar	15 % caucho NaOH 10 %	25 % caucho NaOH 10 %	Mejora NaOH vs. sin tratar
f'c 28d (MPa)	42,0	28,5	33,8	27,5	+18,6 %
Absorción de agua (%)	3,8	3,2	2,9	3,1	-9,4 %
RDM ciclos hielo-deshielo (%)	100	82	94	90	+14,6 %
Porosidad ITZ (relativa)	Referencia	Aumentada	Reducida significativamente		

Tabla 14 Efecto del pretratamiento con NaOH al 10 % / 25 minutos sobre propiedades de hormigón rubbizado.

Nota. RDM = factor de durabilidad relativo (módulo dinámico relativo). Los valores de f'c corresponden a probetas cilíndricas ensayadas a los 28 días. Basado en Si, Guo y Dai (2017).

Roychand et al. (2020) confirmaron que la eficacia varía en función de la concentración, el tiempo de inmersión y el tamaño de partículas, advirtiendo que concentraciones excesivas pueden degradar la superficie del caucho.

Definición del pretratamiento para la presente investigación. Con base en la evidencia revisada, se adoptó un pretratamiento con solución de NaOH al 10 % durante 25 minutos de inmersión para todas las dosificaciones de caucho (10 % y 20 %), en concordancia con el protocolo de Si et al. (2017), bajo condiciones replicables en el Laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca.

Resistencia a compresión, absorción y resistencia a ciclos de hielo y deshielo- Si, Guo y Dai (2017) Efecto del pretratamiento con NaOH al 10% / 25min sobre propiedades de hormigón rubbizado

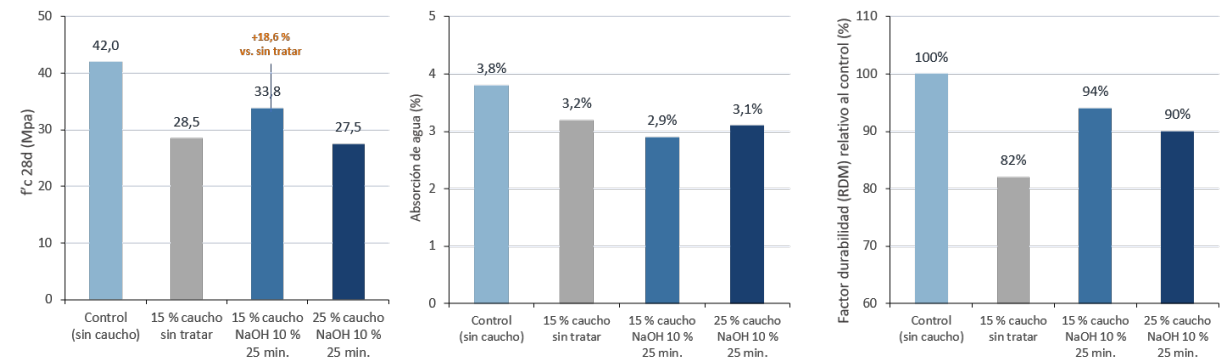


Figura 15 Efecto del pretratamiento con NaOH al 10 % / 25 minutos sobre resistencia a compresión, absorción de agua y durabilidad al hielo-deshielo. En base en Si, Guo y Dai (2017).

La resistencia al deslizamiento de un pavimento es la capacidad de su superficie de generar fricción suficiente para prevenir caídas de los peatones bajo condiciones de humedad. Este parámetro se mide mediante el valor PTV (Pendulum Test Value), obtenido con un péndulo de fricción según la norma CEN/TS 16165:2012, o mediante el ángulo de deslizamiento determinado con el método DIN 51130. Se considera segura una superficie con valores $PTV \geq 36$ en condiciones húmedas, umbral establecido por la norma UNE-ENV 12633.

En ensayos exploratorios sin aplicación de norma de certificación, Sukontasukkul y Chaikaew (2006) registraron que la incorporación de caucho en especímenes de hormigón mejoró los índices de deslizamiento húmedo respecto al control convencional, resultado que los autores atribuyeron a la elasticidad superficial del material elastomérico y al incremento de rugosidad generado por las partículas de caucho en la cara expuesta. Este hallazgo, aunque carente de clasificación normativa, es coherente con los fundamentos físicos de la fricción superficial

documentados por Thomas y Gupta (2016) y Roychand et al. (2020).

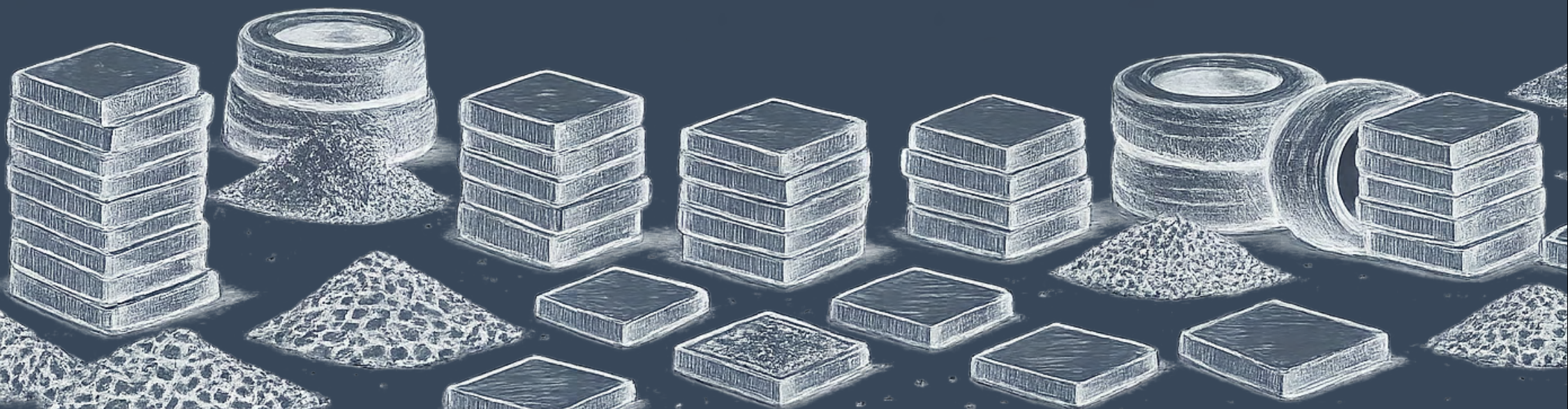
La textura superficial generada por partículas de caucho que afloran en la cara vista del elemento es especialmente relevante bajo precipitaciones de la intensidad característica de la zona lluviosa continental ecuatoriana, donde las precipitaciones pueden superar los 700 mm anuales. La cuantificación de este parámetro bajo el método DIN 51130 con clasificación en grupos R constituye uno de los ensayos centrales del programa experimental de esta investigación.

La revisión de la literatura desarrollada en las secciones precedentes permite establecer con claridad el lugar que ocupa la presente investigación dentro del conjunto de estudios sobre hormigón con caucho reciclado para pavimentación peatonal. Los estudios de Eldin y Senouci (1993, 1994), Topçu (1995) y Güneyisi et al. (2004) documentaron sistemáticamente las propiedades mecánicas del hormigón rubbizado mediante ensayos sobre probetas cilíndricas, estableciendo el comportamiento base del material y los rangos de reducción de resistencia asociados al porcentaje y tamaño de partícula de caucho. Estos trabajos proporcionan la fundamentación teórica de los resultados obtenidos en el Capítulo 04 de la presente investigación, pero no constituyen antecedentes de aplicación directa: sus especímenes son cilindros de laboratorio, no elementos de pavimentación certificables. Los estudios de Segre y Joekes (2000) y Si et al. (2017) aportaron el fundamento experimental del pretratamiento con hidróxido de sodio, demostrando que la intervención química de la superficie del caucho mejora significativamente

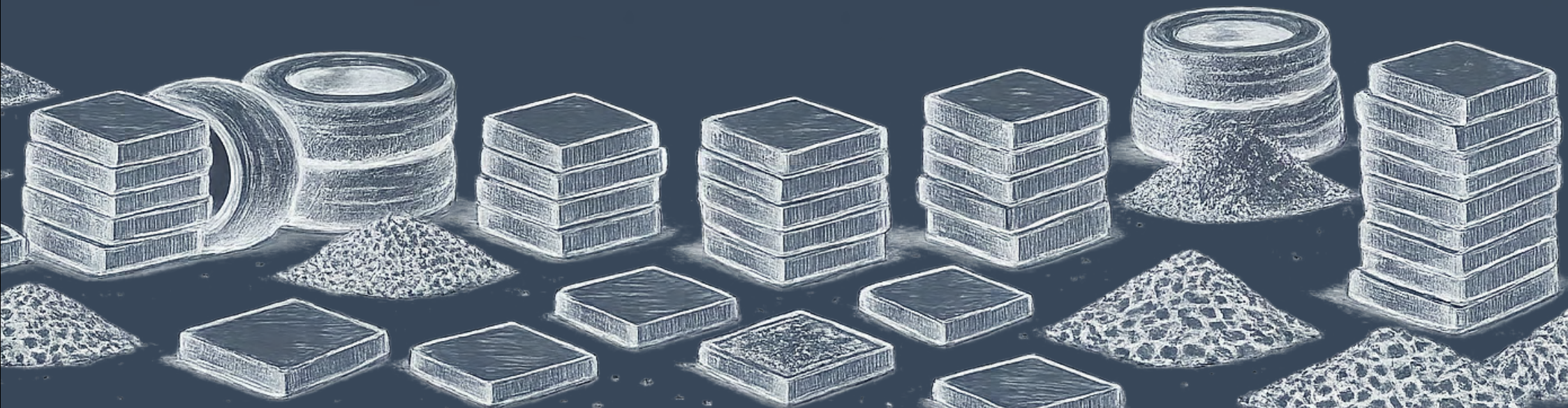
la adherencia con la pasta de cemento y las propiedades de durabilidad del hormigón resultante. El protocolo de NaOH al 10 % durante 25 minutos aplicado en el Capítulo 03 de esta investigación se basa directamente en los resultados de Si et al. (2017). Los trabajos de Siddique y Naik (2004), Thomas y Gupta (2016) y Roychand et al. (2020) constituyen revisiones sistemáticas que consolidan el conocimiento acumulado sobre el material y permiten contextualizar los resultados de esta investigación dentro del panorama global. Chaikaew et al. (2019) representaron un avance al incorporar fibras de acero en especímenes de hormigón con caucho, demostrando que la formulación puede mejorarse sin sacrificar las ventajas de ductilidad y resistencia al deslizamiento. El estudio de Sukontasukkul y Chaikaew (2006), analizado en detalle en la sección 1.4.4, es el único antecedente que exploró propiedades de deslizamiento y absorción en piezas de hormigón rubbizado. Sin embargo, como se expuso, sus limitaciones metodológicas ausencia de marco normativo, de pretratamiento del caucho y de clasificación de aptitud y la diferencia contextual

con el entorno ecuatoriano determinan que su papel sea el de un referente exploratorio, no el de un antecedente directo. La necesidad de producir una validación bajo norma internacional certificable, con materiales locales y en el contexto normativo ecuatoriano, es precisamente la justificación técnica que sostiene la presente tesis. En síntesis, ninguno de los estudios revisados ha realizado lo que esta investigación propone: la caracterización de una baldosa de hormigón con caucho NFU bajo la norma UNE-EN 1339:2004, con pretratamiento NaOH al 10% por 25 minutos, usando materiales del mercado local cuencano, destinada a la zona continental lluviosa ecuatoriana, documentando el vacío normativo existente en el Sistema Ecuatoriano de Normalización. Cada uno de estos elementos, considerado individualmente, cuenta con antecedentes en la literatura. Su combinación en un único programa experimental, orientado a resolver un problema técnico y normativo específico de Ecuador, constituye el aporte original de la presente tesis.

||



DISEÑO EXPERIMENTAL





En el contexto de esta tesis, la selección de normas estuvo condicionada por tres factores: (1) la inexistencia de normativa ecuatoriana específica para baldosas de hormigón destinadas a espacios públicos peatonales; (2) la necesidad de emplear estándares internacionales reconocidos y aplicados en proyectos similares; y (3) la disponibilidad de los equipos de ensayo en el Laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca. Respecto al primer punto, la revisión de normas técnicas ecuatorianas (NTE INEN) confirmó que Ecuador no dispone de una norma específica para baldosas de hormigón prefabricadas destinadas a espacios públicos exteriores. Las normas INEN existentes cubren hormigón estructural, bloques de mampostería y áridos para hormigón (NTE INEN 872, NTE INEN 1573). Sin embargo establecen requisitos para pavimentos peatonales prefabricados. Esta situación ha llevado a investigaciones similares a adoptar las normas europeas UNE-EN como referencia internacional dado que constituyen el sistema normativo más completo y ampliamente adoptado para este tipo de producto.

La norma de referencia central para esta investigación es la UNE-EN 1339:2004 Baldosas de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo, que define criterios de resistencia a la flexión, absorción de agua, coeficiente de restitución al impacto, filtración, y otras propiedades relevantes para el uso peatonal exterior. Complementariamente, para los ensayos de caracterización mecánica

del hormigón se aplican las normas NTE INEN 1573:2010 y ASTM C39 (resistencia a compresión). La caracterización del caucho granulado como árido se aplica la norma ASTM C136 (análisis granulométrico) y el marco conceptual de la NTE INEN 872:2011. La Tabla 15 presenta la matriz normativa completa con la aplicación específica de cada norma.

Matriz normativa del estudio experimental		
Norma	Título	Aplicación en el estudio
NTE INEN 1573:2010 / ASTM C39	Resistencia a la compresión de probetas cilíndricas	Selección de fracción granulométrica óptima (fase piloto) y caracterización comparativa de mezclas
UNE-EN 1339:2004 Anexo F	Resistencia a la flexión – Carga de rotura	Evaluación de capacidad de carga de las baldosas a 28 días
UNE-EN 1339:2004 Anexo E	Absorción de agua	Durabilidad superficial de baldosas para exteriores
DIN 51130 (plano inclinado)	Resistencia al deslizamiento – Grupo R (DIN 51130)	Evaluación de seguridad superficial en condiciones húmedas
CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES		
ASTM C136	Análisis granulométrico de áridos	Caracterización del caucho triturado y selección de fracciones granulométricas
NTE INEN 872:2011	Áridos para hormigón – Requisitos	Marco normativo para el tratamiento del caucho como árido

Tabla 15 Matriz normativa del estudio experimental. En base en UNE-EN 1339:2004; ASTM C39; DIN 51130; UNE-EN ISO 10545-5:1998; ASTM C136; ASTM C143; NTE INEN 872:2011; NTE INEN 1573:2010; NTE INEN 1578:2010.

El diseño experimental está estructurado en torno a dos variables independientes y seis variables dependientes, con variables de control que garantizan la comparabilidad entre las mezclas.

Variables independientes

Las variables independientes del estudio son dos: (1) el porcentaje de sustitución del árido fino por caucho granulado, con tres niveles: 0 %, 10 % y 20 % en masa; y (2) la fracción granulométrica del caucho, con dos niveles: fracción T-8 (retenida entre tamices #4 y #8, rango 2,36–4,75 mm) y fracción T-16 (retenida entre tamices #8 y #16, rango 1,18–2,36 mm). Estas dos fracciones fueron seleccionadas mediante una fase experimental piloto previa, descrita en la sección 2.6, en la que se compararon tres fracciones granulométricas posibles (T-8, T-16 y T-30) a la edad de 7 días. Los niveles adoptados son coherentes con los rangos documentados en la literatura: Eldin y Senouci (1993) trabajaron con fracciones entre 1 y 38 mm, y Sukontasukkul y Chaikaew (2006) emplearon

caucho fino menor a 2,36 mm, demostrando que el comportamiento del hormigón varía según la granulometría del caucho incorporado

Variables dependientes

a) Resistencia a la compresión (kg/cm^2): evaluada a los 7, 14 y 28 días de curado en probetas cilíndricas según NTE INEN 1573:2010 y ASTM C39. Si bien la norma UNE-EN 1339:2004 no establece la resistencia a compresión como requisito normativo para baldosas siendo la resistencia a la flexión el parámetro determinante, la medición en probetas cilíndricas fue necesaria en esta investigación por dos razones metodológicas: primero, permitió la selección objetiva de las fracciones granulométricas óptimas en la fase piloto, comparando los resultados de tres opciones antes de comprometer recursos en la fabricación de baldosas; y segundo, proporciona datos comparativos con la literatura científica sobre hormigón con caucho, toda ella basada en ensayos de compresión, lo que enriquece el

análisis de resultados y contextualiza los hallazgos.

b) Resistencia a la flexión — Módulo de rotura T (MPa): evaluada a 28 días en especímenes de baldosa según la UNE-EN 1339:2004 Anexo F. Constituye el ensayo principal requerido por la normativa para baldosas de pavimentación, dado que el modo de falla predominante en el uso real es la flexión por carga concentrada.

c) Absorción de agua (%): determinada a 28 días en especímenes de baldosa según la UNE-EN 1339:2004 Anexo E. Permite evaluar la permeabilidad de la matriz cementante con caucho y comparar con el límite normativo (≤ 6 % para uso exterior).

d) Resistencia al deslizamiento — Grupo R (DIN 51130): determinado a 28 días en especímenes de baldosa mediante el método del plano inclinado según DIN 51130. Se registra el ángulo de inclinación al que un bloque deslizante con suela de cuero comienza a desplazarse sobre la

superficie mojada; los resultados se clasifican en grupos R9 a R13. Parámetro crítico para el uso en zonas lluviosas.

e) Filtración superficial (método adaptado): evaluada a 28 días en especímenes de baldosa. Mediante una bandeja de aluminio con perforación central sellada con silicona sobre la cara vista de la baldosa, se verificó si el agua penetraba a través del espesor bajo carga estática de agua de 20 mm durante 24 horas, verificado sobre una probeta a los 30 días posteriores, simulando condiciones de acumulación por lluvia intensa. Complementa el ensayo de absorción con una valoración funcional de la estanqueidad de cada mezcla.

f) Coeficiente de restitución al impacto — Rebote (UNE-EN ISO 10545-5:1998): determinado a 28 días en especímenes de baldosa mediante caída libre de esfera de acero de 120 g (25 mm de diámetro) desde una altura de 100 cm ($h_0 = 1,00$ m) sobre la cara vista de la baldosa apoyada en superficie firme. Se registró la altura máxima del primer rebote

(h_1) y se calculó el coeficiente de restitución $e = \sqrt{h_1/h_0}$. Se realizaron 5 caídas por espécimen y se promedió el valor de e . Las baldosas con mayor contenido de caucho presentaron valores e más bajos, indicando mayor absorción de energía de impacto.

Variables de control

Para garantizar que las diferencias observadas entre las mezclas sean exclusivamente atribuibles a las variables independientes, se mantuvieron constantes: tipo y dosificación de cemento (Portland IP de marca Holcim, 260 g por cilindro), relación agua/cemento de 0,40 ($a/c = 0,40$, constante en todas las mezclas), tipo y origen del árido grueso (ripio 3/4", 770 g por cilindro), procedimiento de mezcla y compactación, condiciones y período de curado (curado húmedo a 15–25 °C durante 28 días), y pretratamiento del caucho con solución de hidróxido de sodio al 10 % durante 25 minutos para todas las dosificaciones con caucho.

Cemento

Se empleó cemento Portland Puzolánico tipo IP, de producción nacional, el más utilizado en la construcción ecuatoriana por su adecuado equilibrio entre resistencia y costo. La norma de referencia es la NTE INEN 490, que regula los requisitos de composición y resistencia para cementos combinados. El cemento IP presenta resistencias características a 28 días compatibles con el objetivo de diseño de $f'c = 18$ MPa establecido para este estudio, valor apropiado para aplicaciones peatonales no estructurales y coherente con los niveles reportados en la literatura especializada (Sukontasukkul y Chaikaew, 2006; Eldin y Senouci, 1993).

Áridos

Los áridos utilizados arena fina y ripio de 3/4" provienen de las canteras de la provincia del Azuay. El ripio presenta un tamaño máximo nominal (TMN) de 19 mm (3/4"), adecuado para cilindros

de diámetro 71 mm y baldosas de espesor 50 mm, verificando que el TMN no supere 1/3 del menor lado del elemento ni 1/5 del diámetro del molde, condición que se cumple al ser el TMN inferior a 23 mm. La arena es natural, con granulometría determinada previo al diseño de mezclas.

Caucho granulado reciclado

El caucho granulado empleado en esta investigación proviene de la trituración mecánica de neumáticos fuera de uso (NFU). Su granulometría fue determinada en el Laboratorio de suelos de la Universidad de Cuenca mediante tamizado por vía seca según ASTM C136, con una muestra de 600 g secada en estufa a 110 ± 5 °C durante 24 horas. Los resultados se presentan en la Tabla 2.2.

El análisis granulométrico confirmó que el caucho triturado presenta una distribución concentrada entre los tamices #8 y #16, con el 46,36 % del material en el rango 1,18–2,36 mm. El D50 es aproximadamente 2,30 mm y la pérdida fue del 0,37 %, dentro del rango aceptable por ASTM C136

(< 2 %). A partir de estos datos, se identificaron tres fracciones candidatas: la fracción T-8 (retenida entre #4 y #8, rango 2,36–4,75 mm), la fracción T-16 (retenida entre #8 y #16, rango 1,18–2,36 mm) y la fracción T-30 (retenida entre #16 y #30, rango 0,60–1,18 mm). La selección entre estas fracciones se realizó mediante la fase piloto descrita en la sección 2.6. (Tabla 16)

Análisis granulométrico del caucho granulado reciclado					
Tamiz ASTM	Abertura (mm)	Peso parcial (g)	Peso acumulado (g)	% Retenido acumulado	% Que pasa
Peso inicial: 600,00 g					
#4	4,75	12,60	12,60	2,10	97,90
#8	2,36	276,50	289,10	48,18	51,82
#16	1,18	153,22	442,32	73,72	26,28
#30	0,60	92,66	534,98	89,16	10,84
#50	0,30	57,38	592,36	98,73	1,27
#100	0,15	22,51	597,59	99,60	0,40
#200	0,075	2,72	597,79	99,63	0,37
Pérdida (pan)	—	0,20	—	—	—

Tabla 16 Análisis granulométrico del caucho granulado reciclado (ASTM C136). Laboratorio de suelos, Universidad de Cuenca, 2025.

El diseño de las mezclas de hormigón se realizó siguiendo los principios del método ACI 211.1 Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, que proporciona un procedimiento sistemático para determinar las proporciones óptimas de los materiales en función de la resistencia objetivo y las características de los áridos disponibles. Este método es el más empleado en la investigación sobre hormigón con caucho reciclado (Eldin y Senouci, 1993; Si et al., 2017).

La resistencia característica de diseño fue establecida en $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$ a 28 días para la mezcla de control, valor apropiado para pavimentos peatonales no estructurales y consistente con los resultados documentados en investigaciones de referencia. Las dosificaciones fueron calculadas para probetas cilíndricas de 71 mm de diámetro \times 142 mm de altura (relación $h/d = 2:1$), con área de sección transversal de $39,59 \text{ cm}^2$.

Las cinco mezclas experimentales se designan como: M-0 (control, 0 % caucho), M-10-T8 (10

% caucho fracción T-8), M-20-T8 (20 % caucho fracción T-8), M-10-T16 (10 % caucho fracción T-16) y M-20-T16 (20 % caucho fracción T-16). En todas las mezclas con caucho, la sustitución se realizó en masa: el porcentaje correspondiente de la masa de arena fue reemplazado por una masa

equivalente de caucho granulado pretratado, siguiendo el procedimiento de Sukontasukkul y Chaikaew (2006) y Segre y Joeques (2000). El ripio se mantuvo constante en 770 g por cilindro en las cinco mezclas. La Tabla 17 presenta las proporciones por cilindro y los materiales totales.

Dosificaciones de las cinco mezclas experimentales por cilindro					
Material	M-0 (0 % caucho)	M-10-T8 (10 % caucho T-8)	M-20-T8 (20 % caucho T-8)	M-10-T16 (10 % caucho T-16)	M-20-T16 (20 % caucho T-16)
Cemento (g)	260	260	260	260	260
Agua (ml) *	104	104	104	104	104
Relación a/c *	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Arena (g)	550	495	440	495	440
Caucho (g)	—	55 (T-8)	110 (T-8)	55 (T-16)	110 (T-16)
Ripio 3/4" (g)	770	770	770	770	770

Tabla 17 Dosificaciones de las cinco mezclas experimentales por cilindro. Diseño de mezclas, Laboratorio de suelos Universidad de Cuenca, 2025.

Como se fundamentó en el Capítulo 01 (sección 1.5), el caucho granulado sin tratamiento presenta una superficie hidrofóbica que limita la adherencia con la pasta de cemento. Con el propósito de mitigar este efecto, se aplica un pretratamiento con solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 10 %, 100 g de hidróxido de sodio por litro de agua durante 25 minutos de inmersión. Este protocolo está respaldado por Segre y Joekes (2000), quienes demostraron mediante microscopía electrónica de barrido que el hidróxido de sodio genera una superficie más rugosa y porosa en el caucho, mejorando el anclaje mecánico con la matriz cementante, y por Si et al. (2017), quienes reportaron mejoras en las propiedades mecánicas y reducción de la porosidad en la zona de transición interfacial.

Medida de seguridad esencial: el hidróxido de sodio es corrosivo ($\text{pH} > 13$ en solución). Todo el procedimiento se realiza con guantes de nitrilo y gafas de protección. La solución se prepara añadiendo el hidróxido de sodio sólido al agua nunca al revés, ya que la reacción de disolución

es exotérmica y la adición inversa puede provocar salpicaduras peligrosas. El procedimiento de pretratamiento consta de cuatro etapas: (1) preparación de la solución de hidróxido de sodio al 10 % en masa (100 g añadidos a 1000 ml de agua con agitación hasta disolución completa); (2) inmersión del caucho granulado durante 25 minutos a temperatura ambiente; (3) lavado exhaustivo con agua potable hasta verificar pH neutro en el agua de escurrimiento; y (4) secado al

ambiente durante 24 horas hasta peso constante. Este tratamiento se aplica a la totalidad del caucho de las fracciones T-8 y T-16 antes de su incorporación a las mezclas.

La Tabla 18 presenta los resultados reportados en investigaciones de referencia sobre el efecto del pretratamiento con hidróxido de sodio en las propiedades del hormigón con caucho, como marco comparativo para los resultados obtenidos en esta investigación.

Pretratamiento con hidróxido de sodio en hormigón con caucho				
Referencia	Concentración / tiempo	% caucho	Efecto principal documentado	Relevancia para este estudio
Segre y Joekes (2000)	Saturada / 20 min	10 %	Superficie más rugosa y porosa; mejora de adherencia caucho-cemento; reducción de pérdida por abrasión	Fundamento del pretratamiento; referente para la mejora de la ITZ
Si et al. (2017)	10 % en masa / 25 minutos	20 %	Recuperación de +19,86 % en f'c a 28 días vs. caucho sin tratar; reducción de porosidad de la ITZ	Protocolo adoptado en esta investigación
Roychand et al. (2020)	Variable	Variable	La eficacia varía con concentración, tiempo e inmersión y tamaño de partícula; exceso puede degradar la superficie	Justifica el uso de concentración moderada (10 %) y tiempo controlado

Tabla 18 Resultados de pretratamiento con hidróxido de sodio en hormigón con caucho — estudios de referencia.

El programa experimental se desarrolló en dos fases secuenciales. La primera fase, de carácter piloto, tuvo como objetivo seleccionar las fracciones granulométricas del caucho más adecuadas para el hormigón. La segunda fase, principal, fabricó y ensayó los especímenes definitivos con las fracciones seleccionadas. La Tabla 2.6 resume la totalidad de especímenes fabricados.

2.6.1 Fase piloto — Selección de fracción granulométrica

El análisis granulométrico del caucho (sección 2.3.3) identificó tres fracciones con representación significativa en la distribución: T-8 (retenida entre tamices #4 y #8, rango 2,36–4,75 mm), T-16 (retenida entre #8 y #16, rango 1,18–2,36 mm) y T-30 (retenida entre #16 y #30, rango 0,60–1,18 mm). Con el objetivo de determinar cuál o cuáles de estas fracciones producían el mejor desempeño resistente al ser incorporadas en la mezcla de hormigón, se diseñó una fase piloto de verificación experimental previa a la fabricación de los especímenes definitivos.

Se elaboraron tres probetas cilíndricas piloto (\emptyset 71 × 142 mm), una por cada fracción candidata, todas con la misma dosificación base (mezcla al 20 % de sustitución en masa de arena) y el mismo pretratamiento con hidróxido de sodio, de modo que la única variable diferenciadora fuera el tamaño de partícula del caucho. Los tres cilindros fueron ensayados a compresión a los 7 días de curado conforme a ASTM C39. Los resultados — presentados en detalle en el Capítulo 04, sección 4.1 arrojaron resistencias de 28,1 kg/cm² para T-8, 22,1 kg/cm² para T-16 y 16,4 kg/cm² para T-30. La fracción T-30, con una reducción del 41,7 % respecto a T-8, fue descartada por su desempeño significativamente inferior. Las fracciones T-8 y T-16 fueron seleccionadas para la fase principal, configurando las cinco mezclas definitivas con los dos niveles de sustitución definidos en la sección 2.4 (10 % y 20 %).

2.6.2 Fase principal — Especímenes de caracterización

Con las fracciones seleccionadas, se fabricaron

las cinco mezclas definitivas (M-0, M-10-T8, M-20-T8, M-10-T16, M-20-T16). Para cada mezcla se elaboraron tres probetas cilíndricas (\emptyset 71 × 142 mm), una destinada a cada edad de ensayo: 7, 14 y 28 días. El total de cilindros en esta fase fue de 15 (5 mezclas × 3 edades × 1 réplica). Adicionalmente, se fabricaron cinco especímenes de baldosa (300 × 300 × 50 mm), uno por cada mezcla, destinados a los ensayos de resistencia a la flexión, absorción de agua, resistencia al deslizamiento, filtración y coeficiente de restitución al impacto a los 28 días. Las probetas cilíndricas se fabricaron en moldes cilíndricos según NTE INEN 3124, llenadas en dos capas iguales de aproximadamente 71 mm cada una, compactando cada capa con 25 golpes de varilla de \emptyset 16 mm y 10 a 15 golpes laterales al molde con mazo de goma. Los especímenes de baldosa se fabricaron en moldes de madera contrachapada contruidos para esta investigación y se compactaron mediante golpes con mazo de goma. Todos los especímenes de una misma mezcla se fabricaron en una única jornada. (Tabla 19)

Especímenes por fase, mezcla, dimensiones y tipo de ensayo						
Fase	Espécimen	dim.	Mezcla / Fracción	cant.	Edad ensayo	ensy.
FASE 1 — PILOTO: Selección de fracción granulométrica óptima						
Piloto	Prob. cilíndrica — T-8	Ø 71×142 mm	M-10 con caucho T-8	1	7 días	compresión
Piloto	Prob. cilíndrica — T-16	Ø 71×142 mm	M-10 con caucho T-16	1	7 días	
Piloto	Prob. cilíndrica — T-30	Ø 71×142 mm	M-10 con caucho T-30	1	7 días	
Subtotal Fase 1: 3 probetas piloto — Fracciones seleccionadas: T-8 y T-16						
FASE 2 — PRINCIPAL: Caracterización de las cinco mezclas definitivas						
Principal	Prob. cilíndrica — M-0	Ø 71×142 mm	M-0 (control)	3	7, 14 y 28 días	compresión
Principal	Prob. cilíndrica — M-10-T8	Ø 71×142 mm	M-10 caucho T-8	3	7, 14 y 28 días	
Principal	Prob. cilíndrica — M-20-T8	Ø 71×142 mm	M-20 caucho T-8	3	7, 14 y 28 días	
Principal	Prob. cilíndrica — M-10-T16	Ø 71×142 mm	M-10 caucho T-16	3	7, 14 y 28 días	
Principal	Prob. cilíndrica — M-20-T16	Ø 71×142 mm	M-20 caucho T-16	3	7, 14 y 28 días	
Subtotal cilindros Fase 2: 15 probetas (1 por edad × 3 edades × 5 mezclas)						
FASE 2 — Especímenes de baldosa para ensayos normativos						
Principal	Baldosa — M-0	300×300×50 mm	M-0 (control)	1	28 días	Flexión Absorción PTV
Principal	Baldosa — M-10-T8	300×300×50 mm	M-10 caucho T-8	1	28 días	
Principal	Baldosa — M-20-T8	300×300×50 mm	M-20 caucho T-8	1	28 días	
Principal	Baldosa — M-10-T16	300×300×50 mm	M-10 caucho T-16	1	28 días	
Principal	Baldosa — M-20-T16	300×300×50 mm	M-20 caucho T-16	1	28 días	
Subtotal baldosas: 5 especímenes (1 por mezcla)						
TOTAL, GENERAL: 3 piloto + 15 cilindros + 5 baldosas = 23 especímenes						

Tabla 19 Plan de especímenes por fase, mezcla, dimensiones y tipo de ensayo.

El curado garantiza las condiciones de humedad y temperatura necesarias para el desarrollo completo de las reacciones de hidratación del cemento, de acuerdo con los procedimientos normalizados por la NTE INEN 3124 y la ASTM C192. El período de curado adoptado como horizonte principal de evaluación es de 28 días, en coherencia con los estudios de referencia (Eldin y Senouci, 1993; Si et al., 2017).

Todos los especímenes siguieron el mismo protocolo: durante las primeras 24 horas permanecieron en sus moldes, cubiertos con plástico polietileno para prevenir la evaporación superficial, a temperatura de 15–25 °C. Transcurridas las 24 horas se desmoldaron con cuidado y se sumergieron en tanques de curado con agua. Los cilindros se extrajeron del curado en la fecha de su ensayo correspondiente (7, 14 o 28 días). Las baldosas permanecieron en curado húmedo hasta los 28 días, fecha en que se comenzaron con los ensayos de deslizamiento, rebote, filtración, flexión, y absorción.



Figura 16 Ejemplo de curado de especímenes de hormigón en condiciones de humedad controlada, posterior al desmoldeo.

Nota. Tomado de Incidencias del contenido de agua en la trabajabilidad, resistencia a la compresión y durabilidad del concreto, por Carlos Mauricio Bedoya Montoya

A continuación, se describe el protocolo específico aplicado en cada uno de los ensayos realizados sobre los especímenes cilíndricos y de baldosa. Cada protocolo especifica la norma de referencia, el procedimiento, los parámetros medidos y la forma de cálculo de los resultados.

2.8.1 Asentamiento del hormigón fresco

El asentamiento se determinó inmediatamente después del mezclado de cada dosificación, antes del llenado de los moldes, empleando el cono de Abrams estándar (diámetro inferior 200 mm, superior 100 mm, altura 300 mm) según ASTM C143. El hormigón se depositó en tres capas con 25 golpes de varilla cada una. El objetivo fue un asentamiento de 75–100 mm, coherente con una mezcla de consistencia plástica adecuada para el llenado de moldes cilíndricos y de baldosa.

2.8.2 Resistencia a la compresión

Los cilindros se ensayaron a velocidad de carga

de 0,25 MPa/s ($\pm 0,05$ MPa/s) según ASTM C39, utilizando la prensa Shimadzu del Laboratorio de la Universidad de Cuenca. La resistencia se calculó como $f'c = F / A$, donde F es la carga de rotura en kN y $A = 39,59$ cm² es el área de la sección transversal ($\pi \times 3,55^2$). Se reportan los resultados individuales de los tres cilindros piloto (7 días) y de los 15 cilindros de la fase principal, con sus respectivas edades de ensayo. Los resultados se expresan en kg/cm².

2.8.3 Resistencia al deslizamiento

La resistencia al deslizamiento se determinó mediante el método del plano inclinado según DIN 51130. Sobre la superficie mojada de cada baldosa se colocó un bloque deslizante con suela de cuero; se inclinó la plataforma lentamente (~ 1 – 2° /s) hasta que el bloque inició el desplazamiento, registrando el ángulo con inclinómetro digital (aplicación Clinometer+). Se realizaron 5 repeticiones por espécimen y se calculó el promedio. Los resultados se clasifican en grupos R9 a R13 según la tabla de la

DIN 51130; el mínimo aceptable para uso peatonal en exteriores es R11 ($> 19^\circ$).

2.8.4 Coeficiente de restitución al impacto

El coeficiente de restitución al impacto se determinó según el principio de la UNE-EN ISO 10545-5:1998. Una esfera de acero de 120 g (25 mm de diámetro) se soltó en caída libre desde $h_0 = 100$ cm (1,00 m) sobre la cara vista de la baldosa apoyada en superficie firme. Se registró la altura máxima del primer rebote (h_1) con cinta métrica y se calculó:

$$e = \sqrt{h_1 / h_0}$$

Se realizaron 5 caídas por espécimen y se promedió el valor de e. Un coeficiente e menor indica mayor absorción de energía de impacto por parte del material, lo que es deseable para reducir el daño en caídas de peatones sobre la superficie.

2.8.5 Filtración superficial

La filtración superficial se determinó mediante

un método adaptado al principio de la UNE-EN 12467:2013. Una bandeja de aluminio con perforación central en un área de 200 × 200 mm se selló con silicona sobre la cara vista de la baldosa seca; se cargó con agua hasta una columna de 20 mm y se observó la cara inferior a las 24, 48 y 72 horas, registrando fotográficamente la presencia o ausencia de humedad, manchas o goteo. Verificando nuevamente sobre espécimen dejado 30 días de prueba. Este ensayo complementa la absorción con una valoración funcional de la estanqueidad del material ante condiciones sostenidas de lluvia.

2.8.6 Resistencia a la flexión — Módulo de rotura

Los especímenes de baldosa se ensayaron a los 28 días en la prensa Shimadzu del Laboratorio de la Universidad de Cuenca, según la UNE-EN 1339:2004 Anexo F. Previo al ensayo, cada baldosa se acondiciono descartando 20 mm del perímetro de la baldosa, se cortó en franjas de aproximadamente 87 × 260 × 50 mm. Las franjas

se colocaron sobre dos puntos de apoyo lineales separados 210 mm (luz de ensayo), y la carga se aplicó en el punto central de la luz mediante un rodillo de carga único, a velocidad constante hasta la rotura.

El módulo de rotura se calculó con la expresión establecida por la UNE-EN 1339:2004 para carga central:

$$T = (1,5 \times F \times L) / (b \times d^2)$$

donde T es el módulo de rotura (MPa), F es la carga de rotura (N), L es la luz de ensayo (210 mm), b es el ancho medio de la franja (mm) y d es el espesor medio (mm). La norma UNE-EN 1339:2004 Anexo F, establece una carga de rotura mínima para la Clase 1 ($\geq 3,5$ MPa en promedio e $\geq 2,8$ MPa en valor individual).

2.8.7 Absorción de agua

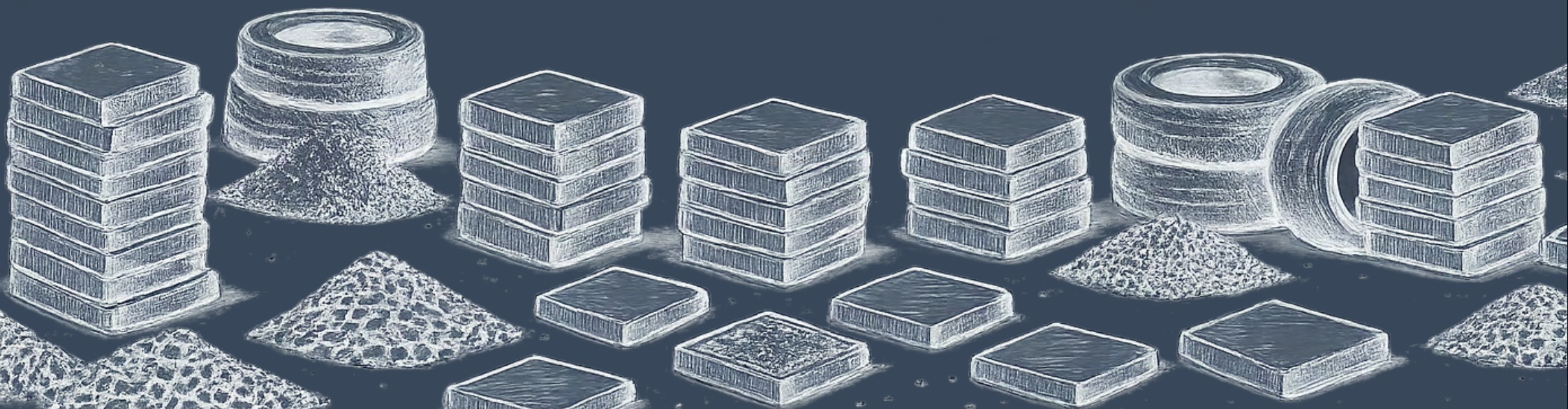
Las baldosas se secaron en horno a 105 ± 5 °C hasta peso constante (m_s), se registró su peso en seco y luego se sumergieron en agua a 20 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante, se pesó cada

fragmento y se calculó la diferencia de peso en porcentaje según UNE-EN 1339:2004 Anexo E. El ensayo se realizó sobre los fragmentos obtenidos tras el ensayo de flexión. La absorción se calculó como:

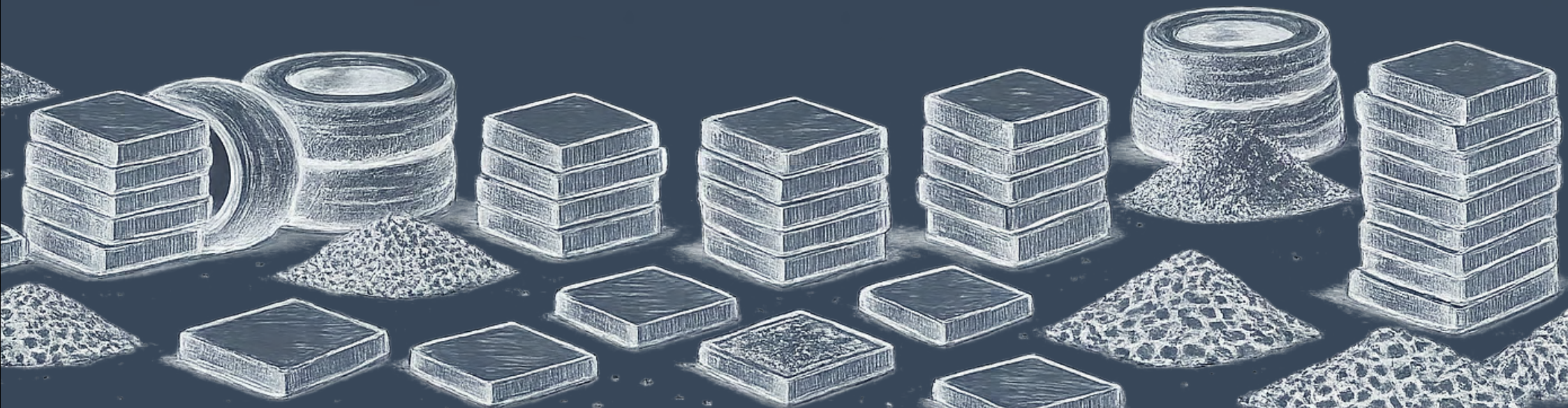
$$A = [(m_{sat} - m_s) / m_s] \times 100$$

El límite normativo aplicable es ≤ 6 % para uso exterior.

III



ELABORACIÓN DE LA BALDOSA





El caucho granulado empleado en esta investigación proviene de la trituración mecánica de neumáticos fuera de uso (NFU) recolectados en establecimientos dedicados a la venta, mantenimiento y reencauche de neumáticos ubicados en el sector del Parque Industrial de Cuenca, específicamente en la zona de la Av. Octavio Chacón. Entre estos establecimientos opera Continental Tire Andina, reconocida empresa productora de neumáticos bajo marcas como General Tire, cuya actividad genera de manera constante una importante cantidad de NFU en la ciudad. Los neumáticos recolectados fueron enviados a trituración mecánica en ProCaucho (Gestor y Productor Artesanal, Panamericana Sur Km 1, sector Narancay, Cuenca), empresa local dedicada a la gestión y procesamiento artesanal de caucho reciclado. El material resultante fue sometido a análisis granulométrico y a un proceso de selección de fracciones en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de Cuenca, donde se dispone de tamizadora mecánica y

juego completo de tamices ASTM. El tamizaje se realizó con la torre de tamices montada en la tamizadora mecánica, utilizando los tamices #4 (4,75 mm), #8 (2,36 mm), #16 (1,18 mm) y #30 (0,60 mm) ordenados de mayor a menor abertura. Tras la agitación mecánica, el material quedó separado en fracciones retenidas entre tamices consecutivos. Se identificaron tres fracciones candidatas: T-8 (retenida entre #4 y #8, rango 2,36–4,75 mm), T-16 (retenida entre #8 y #16, rango 1,18–2,36 mm) y T-30 (retenida entre #16 y #30, rango 0,60–1,18 mm). Las tres fracciones presentaron coloración negra intensa, característica del negro de carbono incorporado en la vulcanización del caucho (CEDEX, s.f.).

Se observó que la fracción T-8 presenta partículas de forma alargada e irregular, con alta proporción de fibras textiles provenientes de la carcasa del neumático, mientras que la fracción T-16 muestra una granulometría más uniforme y predominantemente esférica. La fracción T-30 es la más fina y presenta mayor superficie específica.

Estas diferencias morfológicas son relevantes porque condicionan la adherencia con la pasta de cemento y la trabajabilidad de la mezcla (Segre y Joekes, 2000).



Figura 17 Tamizadora mecánica con tamices #8, #16 y #30 montados. Laboratorio de Mecánica de Suelos, Universidad de Cuenca.



Figura 18 Tamices #8, #16 y #30 apilados.

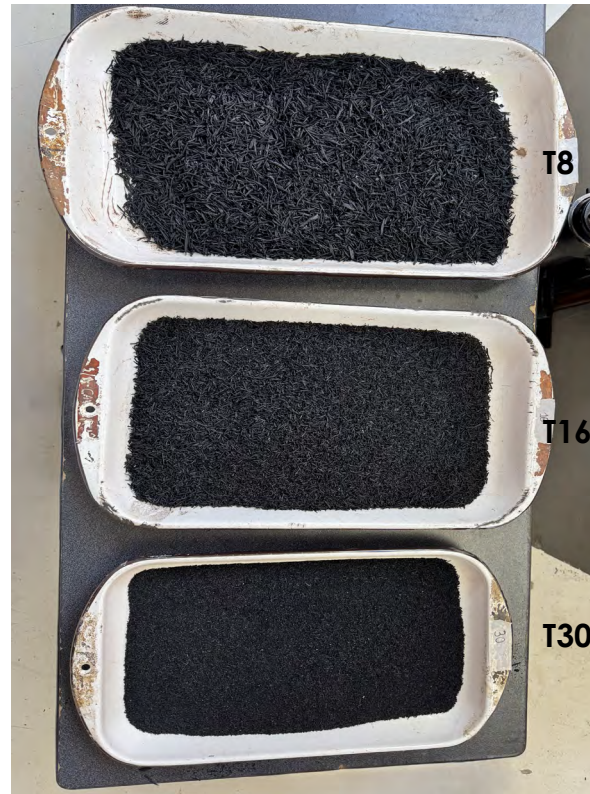


Figura 19 Tres bandejas con las fracciones T-8 (superior), T-16 (media) y T-30 (inferior) obtenidas tras el tamizaje.



Figura 20 Fracción T-8.

Tras el tamizaje, las tres fracciones fueron sometidas al pretratamiento superficial con solución de hidróxido de sodio al 10 %, cuyo fundamento teórico fue establecido en el Capítulo 01 (sección 1.5) y cuyo protocolo fue definido en el Capítulo 02 (sección 2.5). El objetivo del tratamiento es modificar la superficie hidrófoba del caucho vulcanizado para mejorar su adherencia con la pasta de cemento, mediante la generación de rugosidad superficial que favorece el anclaje mecánico (Segre y Joekes, 2000, p. 1422).

3.2.1 Preparación de la solución

Se preparó la solución de hidróxido de sodio al 10 % (100 g de soda cáustica en 900 ml de agua) conforme al protocolo de seguridad descrito en la sección 2.5 del Capítulo 02, añadiendo el sólido al agua con guantes de nitrilo y gafas de protección.

3.2.2 Inmersión, lavado y secado

Cada una de las tres fracciones granulométricas

fue sumergida por separado en la solución de hidróxido de sodio durante 25 minutos, en recipientes plásticos independientes para evitar contaminación cruzada entre fracciones. Transcurrido el tiempo de inmersión, el caucho fue extraído y lavado exhaustivamente con agua corriente hasta verificar que el agua de escurrimiento alcanzaba pH neutro, eliminando así los residuos de hidróxido que pudieran interferir con la hidratación del cemento. Finalmente, las fracciones tratadas fueron extendidas sobre papel periódico y secadas al ambiente durante 24 horas hasta alcanzar peso constante.



Figura 21 Pesaje de 100 g de hidróxido de sodio en balanza digital.



Figura 22 Solución de hidróxido de sodio al 10 % preparada y diluida, lista para el proceso de inmersión.



Figura 23 Tres fracciones del caucho granulado sumergidas en solución de hidróxido de sodio al 10 % durante 25 minutos.



Figura 24 Caucho granulado extendido sobre papel para secado al ambiente durante 24 horas previo a su incorporación a las mezclas.

Una vez seco el caucho tratado, se procedió al pesaje individual de todos los componentes de cada dosificación en balanza digital de precisión (± 1 g), siguiendo las cantidades establecidas en la Tabla 17 del Capítulo 02. Esta etapa es crítica para garantizar la exactitud de las proporciones de mezcla, especialmente para las cantidades pequeñas de caucho (55 g y 110 g) que corresponden al 10 % y 20 % de sustitución respectivamente.

Los materiales pesados por cilindro fueron: cemento Portland IP marca Holcim 260 g, agua 104 ml (relación a/c = 0,40), ripio 3/4" 770 g, arena variable según dosificación (550 g, 495 g o 440 g) y caucho tratado variable (0 g, 55 g o 110 g). Cada componente fue pesado y dispuesto en recipientes separados e identificados con la dosificación correspondiente antes de iniciar el mezclado.

Las proporciones de cada mezcla fueron determinadas mediante el método de diseño ACI 211.1, adoptado como procedimiento de referencia en el Capítulo 02 para la dosificación de mezclas de hormigón de uso no estructural;



Figura 25 Pesaje de cemento Portland IP (260 g).



Figura 26 Pesaje de arena (440 g corresponde a la dosificación M-20).



Figura 27 Pesaje de ripio 3/4" (770 g).



Figura 28 Pesaje de caucho granulado tratado (110 g para la dosificación al 20 %).

la conformidad granulométrica de los áridos se verificó conforme a ASTM C33. La Tabla 20 resume las cantidades correspondientes a cada una de las cinco mezclas experimentales.

Tabla 20 Dosificaciones de las cinco mezclas experimentales por cilindro ($\varnothing 71 \times 142$ mm)

Nota. La sustitución de arena por caucho se realizó en masa según el porcentaje indicado. El ripio se mantuvo constante en todas las mezclas. Proporciones determinadas según ACI 211.1; conformidad granulométrica de áridos verificada según ASTM C33. Tomado de la tabla 17, Capítulo 02 — Laboratorio de Arquitectura y Tecnología, Universidad del Azuay (2025).

Dosificaciones de las cinco mezclas experimentales por cilindro					
Material	M-0 (0 %)	M-10-T8 (10 % T-8)	M-20-T8 (20 % T-8)	M-10-T16 (10 % T-16)	M-20-T16 (20 % T-16)
Cemento Portland IP (g)	260	260	260	260	260
Agua (ml)	104	104	104	104	104
Relación a/c	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Arena (g)	550	495	440	495	440
Caucho T-8 (g)	—	55	110	—	—
Caucho T-16 (g)	—	—	—	55	110
Ripio 3/4" (g)	770	770	770	770	770



Figura 29 Moldes cilíndricos de PVC ($\varnothing 71 \times 142$ mm) para las fundiciones de la fase principal.



Figura 30 Componentes del molde (base de plywood y marco lateral con tiras de madera).

3.4.1 Moldes cilíndricos

Para la fabricación de los especímenes cilíndricos ($\varnothing 71 \times 142$ mm) se utilizaron moldes de tubería PVC cortados a la longitud requerida. Los moldes fueron lubricados interiormente con aceite desmoldante previo a cada fundición para facilitar el desmolde sin dañar los especímenes. La utilización de moldes de PVC es una práctica habitual en laboratorios con volúmenes pequeños de producción y ha sido documentada en investigaciones de hormigón a escala reducida (Sukontasukkul y Chaikaew, 2006).

3.4.2 Moldes para baldosas (cofres)

Los moldes para los especímenes de baldosa fueron diseñados y fabricados específicamente para esta investigación, dado que no existen moldes comerciales de esas dimensiones en el laboratorio. Las dimensiones de diseño adoptadas fueron $300 \times 300 \times 50$ mm (largo \times ancho \times espesor). El espesor de 50 mm (5 cm) responde directamente a los requisitos dimensionales establecidos en la UNE-

EN 1339:2004 Baldosas de hormigón, cuya sección 4 establece que el espesor nominal mínimo para baldosas de hormigón destinadas a uso peatonal en exteriores es de 50 mm. Este espesor mínimo garantiza la capacidad de la baldosa para soportar las cargas de servicio sin que la rotura por flexión se produzca a cargas inferiores a las exigidas por las clases T ($\geq 3,0$ kN·m) y U ($\geq 3,6$ kN·m) de la norma. El valor de 50 mm es también el espesor empleado en los estudios de referencia de esta investigación: Sukontasukkul y Chaikaew (2006) utilizaron especímenes de 40 mm en bloques peatonales bajo carga controlada de laboratorio, mientras que para aplicaciones en espacios públicos abiertos el espesor de 50 mm es el mínimo recomendado por la normativa europea.

Cada molde consta de dos componentes ensamblables: una base de plywood de 18 mm y un marco lateral también de plywood de 18 mm, reforzado exteriormente con tiras de madera maciza de 6×4 cm atornilladas en los cuatro vértices.

El sistema de ensamble mediante tornillos permite

el desmolde por desatornillado progresivo sin someter a los especímenes a esfuerzos de impacto que pudieran generar fisuras. La superficie interior de cada molde fue lubricada con aceite antes de cada fundición para facilitar el desmolde.



Figura 31 Molde ensamblado y listo para recibir la mezcla de hormigón.

Previo a la fabricación de los especímenes definitivos, se realizó una fase piloto con el objetivo de identificar cuáles de las tres fracciones granulométricas disponibles (T-8, T-16 y T-30) producían el mejor desempeño en el hormigón. Para ello se fabricaron tres probetas cilíndricas, una por cada fracción, utilizando la misma dosificación al 20 % de caucho en las tres, de manera que la única variable fuera el tamaño de partícula del caucho. Los tres cilindros fueron ensayados a compresión a los 7 días de curado.

3.5.1 Proceso de mezclado

El mezclado se realizó manualmente en un recipiente de plástico de capacidad aproximada de 15 litros. El procedimiento seguido en cada mezcla fue: (1) mezcla en seco del ripio con el cemento durante 30 segundos hasta homogeneización visual; (2) incorporación de la arena y del caucho tratado de la fracción correspondiente y mezcla durante 1 minuto; (3) adición gradual del agua durante 3 a 4 minutos hasta obtener una mezcla homogénea. Se

observó que, incluso al 20 %, el caucho se distribuía de manera uniforme en la masa, aunque la mezcla presentaba una consistencia notablemente más seca que la de control sin caucho

3.5.2 Compactación y marcado

El llenado de los moldes cilíndricos se realizó en dos capas iguales de aproximadamente 71 mm de altura. Cada capa fue compactada con 25 golpes de varilla de compactación de \varnothing 16 mm distribuidos uniformemente en la sección, complementados con 10 a 15 golpes laterales al molde con mazo de goma para liberar el aire atrapado en la interfaz caucho-pasta. Tras enrasar la superficie superior, cada cilindro fue marcado con etiqueta que indicaba la dosificación y la dosificación correspondiente.

Los tres cilindros piloto fueron cubiertos con plástico polietileno durante las primeras 24 horas y posteriormente sumergidos en tina de curado con agua hasta la edad de ensayo de 7 días. Los resultados del ensayo de compresión a 7

días determinaron que las fracciones T-8 y T-16 presentaban los mejores valores de resistencia, por lo que la fracción T-30 fue descartada para la fase principal. Esta decisión está respaldada por la literatura: Eldin y Senouci (1993) y Sukontasukkul y Chaikaew (2006) documentaron que partículas de mayor tamaño generan interfases menos críticas que las partículas muy finas, cuya mayor superficie específica incrementa la porosidad de la zona de transición.



Figura 32 Mezclado manual de la dosificación piloto en recipiente de plástico.



Figura 33 Compactación de la mezcla en el molde cilíndrico con varilla de \varnothing 16 mm.

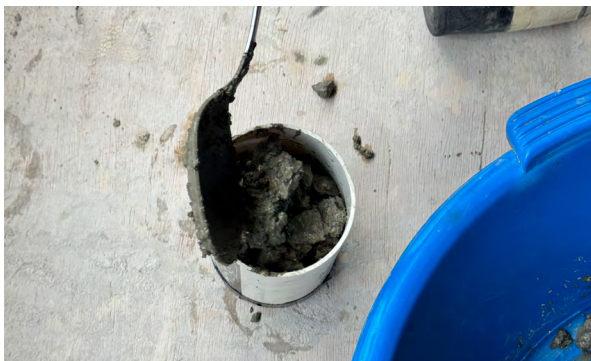


Figura 35 Llenado del molde cilíndrico con la mezcla fresca.



Figura 36 Compactación de la mezcla en el molde cilíndrico con varilla de \varnothing 16 mm.



Figura 34 Los tres cilindros piloto desmoldados a las 24 horas de fabricación. De izquierda a derecha: fracción T-8 (2,36–4,75 mm), fracción T-16 (1,18–2,36 mm) y fracción T-30 (0,60–1,18 mm). Se aprecia la diferencia de textura superficial: la fracción T-8 (derecha) presenta mayor porosidad superficial visible, mientras que T-16 y T-30 muestran una matriz más compacta.

Se fabricaron la totalidad de los especímenes de la fase principal: 15 probetas cilíndricas y 5 especímenes de baldosa correspondientes a las cinco mezclas definitivas (M-0, M-10-T8, M-20-T8, M-10-T16, M-20-T16). Todos los especímenes de la fase principal fueron fabricados en una única jornada de trabajo para garantizar condiciones de curado idénticas entre mezclas.

3.6.1 Mezclado de las cinco dosificaciones

El procedimiento de mezclado fue idéntico al de la fase piloto. Para cada una de las cinco mezclas se preparó un lote independiente en el recipiente plástico, siguiendo el orden: mezcla en seco de ripio y cemento → incorporación de arena y caucho (para M-10 y M-20) → adición gradual de agua. Se observó una diferencia visual clara en la consistencia de las mezclas: la mezcla M-0 (control sin caucho) presentó la mayor plasticidad, mientras que las mezclas M-10 y M-20 —tanto con T-8 como con T-16— mostraron una consistencia progresivamente más seca a medida que aumentaba el porcentaje de caucho. Esta reducción de trabajabilidad con el incremento

de caucho es coherente con lo reportado por Topçu (1995) y se atribuye a la menor densidad del caucho y a su superficie no absorbente, que altera la distribución del agua libre en la mezcla. El color de todas las mezclas se mantuvo uniforme, con el tono gris característico del cemento Portland, sin alteración apreciable por la presencia del caucho.

3.6.2 Fabricación de especímenes cilíndricos

Los 15 cilindros de la fase principal (3 cilindros × 5 mezclas) fueron fabricados con el mismo procedimiento de la fase piloto: llenado en dos capas, 25 golpes de varilla por capa y golpes laterales con mazo de goma. Cada cilindro fue etiquetado indicando la mezcla, la fracción granulométrica y la edad de ensayo prevista (7, 14 o 28 días), así como la fecha de fabricación.

3.6.3 Fabricación de especímenes de baldosa

Los cinco especímenes de baldosa (300 × 300 × 50 mm) fueron fabricados uno por cada mezcla definitiva (M-0, M-10-T8, M-20-T8, M-10-T16, M-20-T16). El espesor de 50 mm (5 cm) coincide

con el mínimo establecido por la UNE-EN 1339:2004 sección 4 para baldosas de uso peatonal en exteriores. El molde fue lubricado antes de cada uso y desmontado entre baldosa y baldosa para su limpieza. La mezcla fresca fue depositada en el molde en una sola capa y compactada mediante golpes con mazo de goma sobre la superficie y a los laterales del cofre, complementados con varillado perimetral para asegurar el llenado de las esquinas. La superficie superior de cada baldosa fue enrasada con llana metálica hasta obtener una superficie plana y homogénea.



Figura 37 9 de los 15 cilindros de la fase principal recién fabricados, etiquetados y dispuestos para el curado inicial.



Figura 38 Mezclado manual de una dosificación de la fase principal en recipiente plástico de 15 litros. Se observa la distribución del ripio, cemento y arena antes de la adición del agua.



Figura 39 Compactación de los cilindros de la fase principal con mazo de goma y varilla.



Figura 40 Llenado del molde de madera (cofre) con la mezcla fresca de hormigón con caucho.

Inmediatamente después de la fundición y el enrasado, todos los especímenes tanto cilindros como baldosas fueron sumergidos en agua para prevenir la evaporación superficial del agua de la mezcla durante el tiempo de curado. Esta etapa es crítica para evitar la retracción plástica del hormigón fresco y la formación de micro fisuras superficiales que comprometerían la integridad de los especímenes. Transcurridas las 24 horas, los especímenes fueron desmoldados y transferidos al sistema de curado húmedo. Los cilindros fueron sumergidos en una tina plástica con agua limpia, donde permanecieron hasta la fecha de su respectivo ensayo (7, 14 o 28 días de curado). Las baldosas también fueron sumergidas en tina con agua y permanecieron en curado húmedo hasta los 28 días, fecha programada para los ensayos de absorción, deslizamiento y flexión. Esta metodología de curado húmedo en agua es coherente con la empleada por los referentes de esta investigación (Eldin y Senouci, 1993; Si et al., 2017) y garantiza las condiciones de hidratación completa del cemento.



Figura 41 Baldosas sumergidas en agua para curado húmedo hasta los 28 días.



Figura 42 Cilindros sumergidos en tina plástica para curado húmedo. Se observan las etiquetas de identificación en la cara superior de cada espécimen, indicando la dosificación y la fecha de fabricación.

El desmolde de todos los especímenes se realizó a las 24 horas de la fundición sin presentar ningún inconveniente. Los cilindros de PVC se retiraron por deslizamiento del molde sin necesidad de herramientas. Los cofres de madera fueron desmontados desatornillando los cuatro tornillos laterales, lo que permitió separar el marco de la base y liberar la baldosa sin aplicar golpes ni palancas que pudieran dañar las aristas.

Ningún espécimen —ni cilindro ni baldosa— presentó fisuras, desprendimientos, huecos superficiales ni deformaciones al ser desmoldado. Las superficies superiores de las baldosas mostraron una textura rugosa irregular producida por la presencia superficial de las partículas de caucho, que quedan parcialmente expuestas en la cara de enrasado. Esta textura natural es relevante para el comportamiento al deslizamiento del pavimento en condiciones húmedas, dado que las partículas de caucho en superficie actúan como elemento de fricción adicional, conforme a los mecanismos descritos por Sukontasukkul y Chaikaew (2006).



Figura 43 Vista superior de los especímenes de baldosa desmoldados. Se aprecia la textura de la superficie generada por las partículas de caucho expuestas.



Figura 44 Detalle de la superficie de una baldosa con caucho fracción T-8. Las fibras y partículas de caucho expuestas en la cara superior generan una textura rugosa.

Figura 45 Vista lateral de un espécimen de baldosa mostrando el espesor de diseño de 50 mm (5 cm), valor mínimo establecido por la UNE-EN 1339:2004 para uso peatonal en exteriores.

Se completaron los ensayos de compresión de la totalidad de los 15 cilindros de la fase principal, correspondientes a las tres edades de evaluación: 7, 14 y 28 días. Los cinco especímenes de baldosa fueron igualmente ensayados una vez concluido el período de curado húmedo de 28 días, sometiéndose a los ensayos de deslizamiento, coeficiente de restitución al impacto, filtración, resistencia a la flexión y absorción de agua. Los resultados completos de todos los ensayos se presentan y analizan en el Capítulo 04.

El ensayo de compresión se realizó en la prensa universal Shimadzu (modelo CON-SETO 2000X) del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de Cuenca. Pevio al ensayo, cada cilindro fue pesado en balanza de precisión para registrar su masa y calcular la densidad del espécimen. La carga fue aplicada a velocidad controlada de 0,25 MPa/s hasta la rotura, registrando la carga máxima en kN. La resistencia a compresión se calculó como $f'c = F/A$, donde $A = 39.59 \text{ cm}^2$ corresponde al área de la sección transversal de los cilindros de $\varnothing 71 \text{ mm}$.



Figura 46 Pesaje de los cilindros en balanza de precisión previo al ensayo de compresión para registro de masa y cálculo de densidad. Se muestra un cilindro a modo representativo.

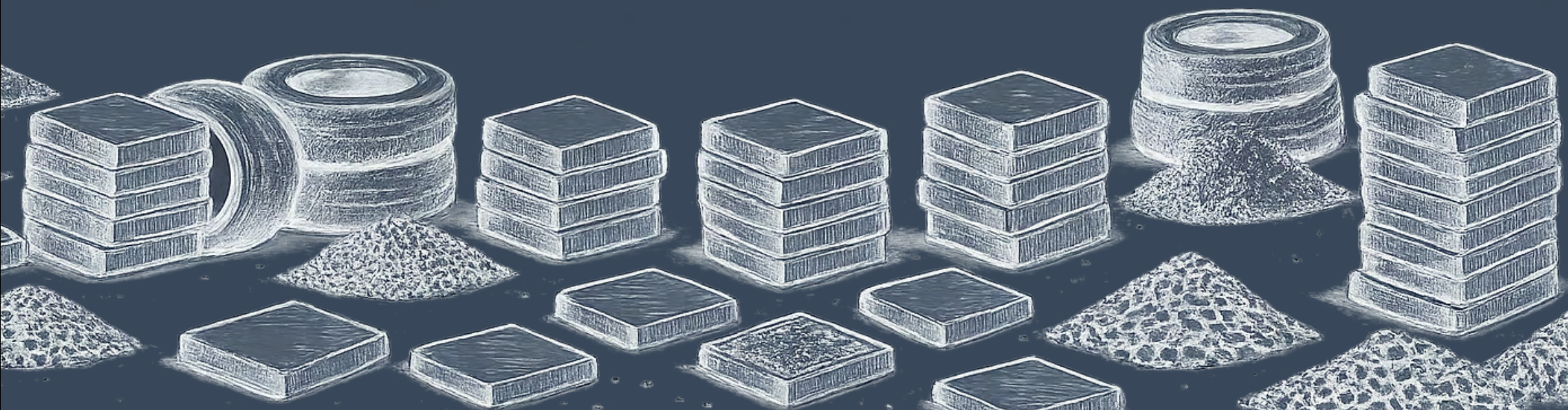


Figura 47 Ensayo de resistencia a la compresión en prensa universal Shimadzu (CON-SETO 2000X). Se observa el cilindro posicionado entre las placas de carga.

IV



RESULTADOS





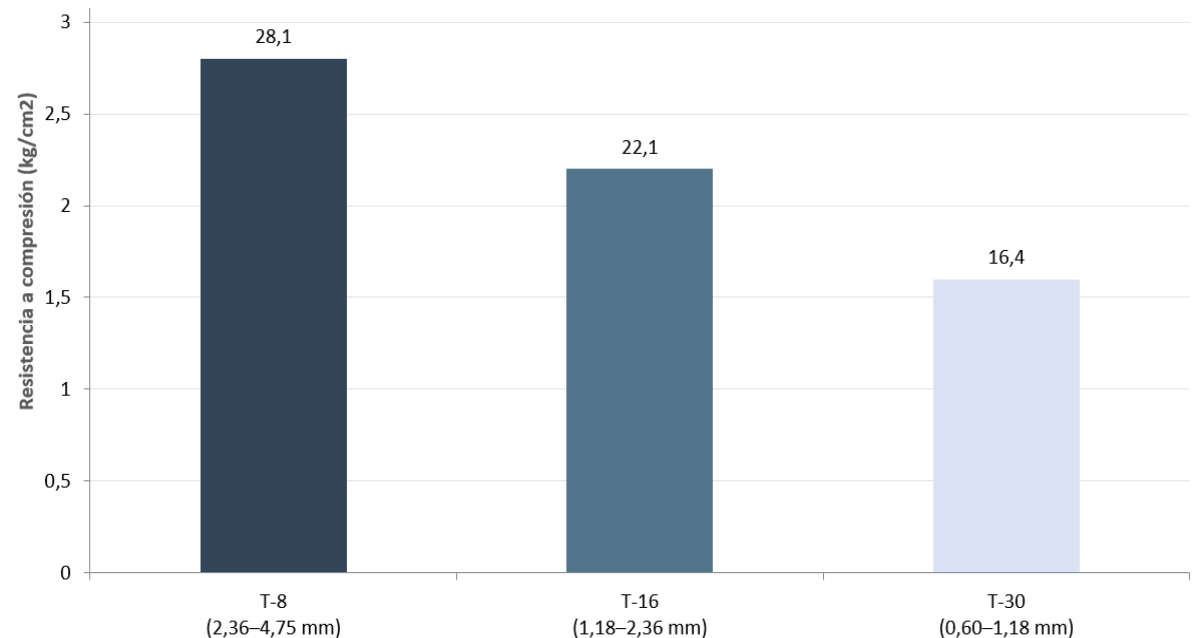
El presente capítulo expone y analiza la totalidad de los resultados obtenidos en el programa experimental de esta investigación. La exposición se organiza en cuatro bloques: los resultados de la fase piloto que determinaron la selección de las fracciones granulométricas T-8 y T-16; los resultados de resistencia a compresión de la fase principal a 7, 14 y 28 días de curado; los cinco ensayos de caracterización sobre especímenes de baldosa de la Fase I (deslizamiento, rebote, impermeabilidad al agua, resistencia a flexión y absorción de agua); y los ensayos de la Fase II sobre baldosas con tratamiento superficial de caucho por termofusión. Todos los ensayos de resistencia a compresión fueron realizados bajo la norma ASTM C39 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Facultad de

Tabla 21 Resistencia a compresión a 7 días – Fase piloto. $f'_c = F/A$, donde F = carga de rotura (N) y $A = 38,5 \text{ cm}^2$ (área transversal de cilindro $\varnothing 71 \text{ mm}$).

Figura 48 Resistencia a compresión a 7 días por fracción granulométrica del caucho (fase piloto, 20 % de sustitución).

Resistencia a compresión a 7 días							
Espécimen	D (cm)	H (cm)	H/D	Área (cm ²)	F máx. (kN)	f'c (kg/cm ²)	f'c (MPa)
#8 / 20%	7.1	14.2	2.03	38.5	10.61	28.1	2.76
#16 / 20%	7.1	14.2	2.00	38.5	8.34	22.1	2.17
#30 / 20%	7.1	14.2	2.03	38.5	6.19	16.4	1.61

Resistencia a compresión a 7 días por fracción granulométrica



Ingeniería de la Universidad de Cuenca, con prensa marca Shimadzu modelo Concreto 2000X y velocidad de carga controlada de 0,25 MPa/s, tal como fue establecido en el protocolo del Capítulo 02 (sección 2.8.2).

La fase piloto tuvo como objetivo identificar cuál o cuáles de las tres fracciones granulométricas del caucho T-8 (2,36–4,75 mm), T-16 (1,18–2,36 mm) y T-30 (0,60–1,18 mm) producían el mejor desempeño resistente cuando se incorporaban al 20 % en sustitución de arena. Los tres cilindros (\varnothing 71 × 142 mm) fueron ensayados a compresión a los 7 días de curado, conforme al Informe de Laboratorio N.º 1 (Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca, 2026).

4.1.1 Análisis y justificación de la selección

Los resultados confirman una jerarquía clara entre las tres fracciones. La fracción T-8 obtuvo la mayor resistencia (28,1 kg/cm²), seguida por T-16 (22,1 kg/cm²) y T-30 (16,4 kg/cm²). La fracción T-30,

con una reducción del 41,7 % respecto a T-8, fue descartada para la fase principal.

Este comportamiento es coherente con los mecanismos documentados en la literatura. Eldin y Senouci (1993) y Sukontasukkul y Chaikaew (2006) señalan que las partículas de mayor tamaño generan interfases pasta-caucho con menor porosidad que las partículas finas, ya que estas últimas presentan mayor superficie específica, lo que incrementa la cantidad de agua libre retenida en la zona de transición interfacial (ZTI) y produce una mayor porosidad local. Adicionalmente, la fracción T-30 contiene una elevada proporción de polvo de caucho y partículas de morfología predominantemente cúbica que dificultan el anclaje mecánico con la pasta de cemento (Segre y Joekes, 2000).

En consecuencia, las fracciones T-8 y T-16 fueron seleccionadas para la fase principal, configurando las cinco mezclas definitivas del diseño experimental (M-0, M-10-T8, M-20-T8, M-10-T16 y M-20-T16).

Resistencia a compresión - fase principal					
Mezcla	Espécimen	Elaboración	7 días	14 días	28 días
			kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²
M-0	0%	24/01/2026	128.2	163.8	182.2
M-10-T8	#8 / 10%	24/01/2026	41.4	53.0	59.2
M-20-T8	#8 / 20%	24/01/2026	27.7	34.4	38.2
M-10-T16	#16 / 10%	24/01/2026	35.7	46.1	52.1
M-20-T16	#16 / 20%	24/01/2026	21.9	28.0	32.1

Tabla 22 Resistencia a compresión – Fase principal Fuente: Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca. Ensayo ASTM C39.

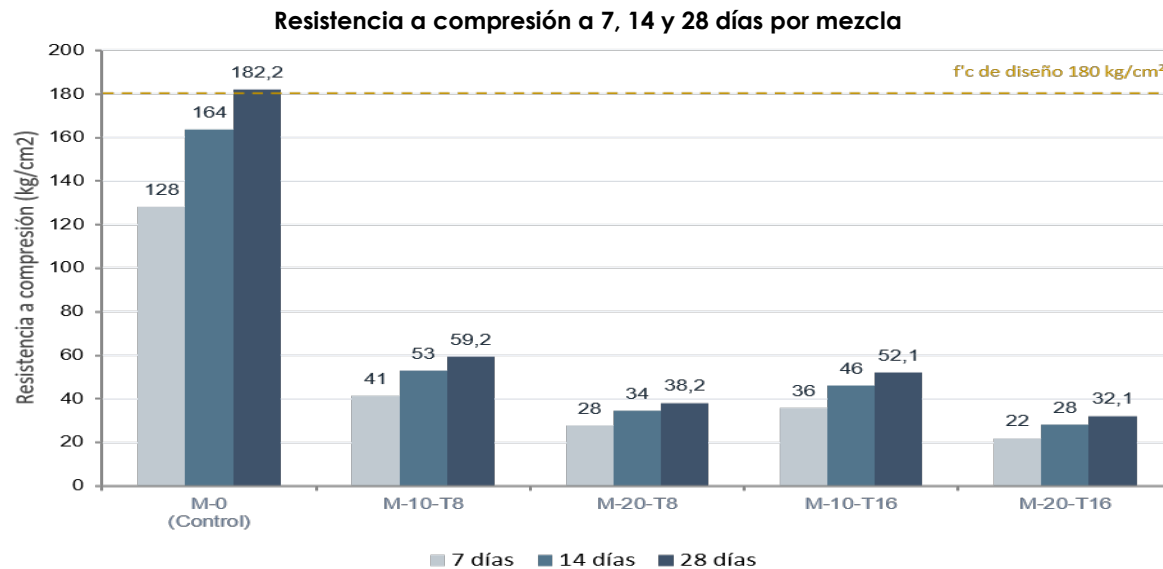


Figura 49 Resistencia a compresión a 7, 14 y 28 días por mezcla (fase principal). La línea punteada indica el f'_c de diseño de 180 kg/cm².

4.2.2 Efecto del porcentaje de sustitución

Los resultados muestran una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de caucho y la resistencia a compresión, tendencia que se mantiene consistente a las tres edades de ensayo. La mezcla control M-0 supera ampliamente a todas las mezclas con caucho: a 14 días registra 163,8 kg/cm², mientras que las mezclas con caucho oscilan entre 28,0 kg/cm² (M-20-T16) y 53,0 kg/cm² (M-10-T8). Esta reducción era esperada y está documentada de manera sistemática en la literatura científica sobre hormigón con caucho reciclado. Topçu (1995) y Eldin y Senouci (1993) coinciden en que la reducción de resistencia a compresión en mezclas con caucho se debe a tres mecanismos concurrentes: (1) la baja rigidez del caucho respecto al árido que sustituye, lo que reduce la capacidad de transferencia de carga en la matriz; (2) la débil adherencia interfacial pasta-caucho, incluso tras el tratamiento con NaOH; y (3) la mayor porosidad de la mezcla asociada al aire ocluido en la zona de transición

interfacial. El tratamiento con NaOH al 10 % mejora parcialmente el mecanismo (2), pero no elimina la reducción de resistencia inherente al material elastomérico (Segre y Joekes, 2000; Si et al., 2017).

4.2.3 Efecto de la fracción granulométrica

Al comparar mezclas de igual porcentaje de caucho con distinta fracción, la fracción T-8 supera consistentemente a T-16 en las tres edades de ensayo. A 14 días, M-10-T8 obtiene 53,0 kg/cm² frente a 46,1 kg/cm² de M-10-T16 (diferencia del 15,0 %); y M-20-T8 alcanza 34,4 kg/cm² frente a 28,0 kg/cm² de M-20-T16 (diferencia del 22,5 %). Este resultado confirma lo observado en la fase piloto y es consistente con lo reportado por Sukontasukkul y Chaikaew (2006): partículas de mayor tamaño generan una menor superficie específica por unidad de masa, lo que reduce la extensión de la ZTI débil y produce una pasta de cemento hidratada con menor porosidad total.

4.2.4 Evolución temporal de la resistencia

Todas las mezclas incrementan su resistencia de manera continua a lo largo de las tres edades de ensayo, confirmando un proceso de hidratación activo del cemento Portland IP. El incremento total (7 a 28 días) más elevado se registra en M-20-T16 (+46,6 %) y M-10-T16 (+45,9 %), mientras que el menor corresponde a M-20-T8 (+37,9 %). La mezcla control M-0 muestra un incremento total del 42,1 %. El ritmo de ganancia de resistencia decrece con la edad: el incremento 7→14 días oscila entre 24,2 % y 29,1 %, mientras que el de 14→28 días es más moderado, entre 11,0 % y 14,6 %. Destaca que las mezclas con caucho presentan incrementos porcentuales similares o superiores a M-0, lo que sugiere que la presencia del caucho no retarda el proceso de hidratación del cemento, en concordancia con Si et al. (2017).

4.2.5 Comparación con la resistencia de diseño y con referentes

La resistencia de diseño establecida en el Capítulo 02 fue $f'c = 180 \text{ kg/cm}^2$, valor de referencia

habitual para hormigones de uso no estructural en pavimentos ligeros (NTE INEN 1573). La mezcla control M-0 alcanzó 182,2 kg/cm² a los 28 días, valor que supera el umbral de diseño. Las mezclas con caucho no alcanzan la resistencia de diseño, resultado esperado y respaldado por todos los referentes consultados; su evaluación de aptitud para espacios públicos no se basa en la resistencia a compresión sino en los parámetros normativos de la UNE-EN 1339:2004: resistencia a flexión, absorción de agua, filtración superficial, resistencia al deslizamiento (grupo R DIN 51130) y coeficiente de restitución al impacto.

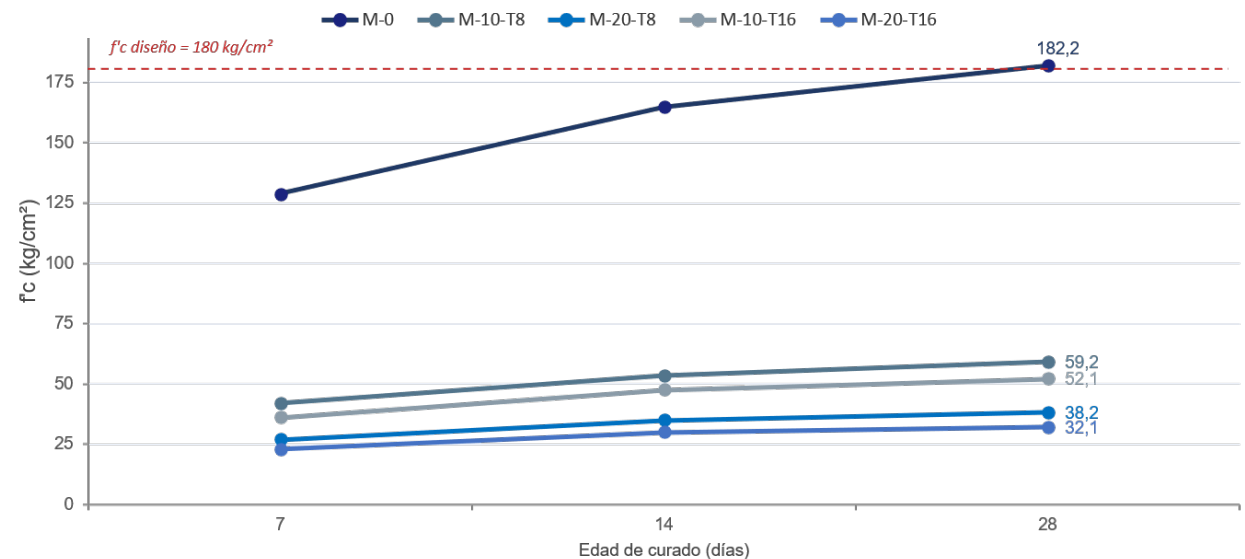
A modo de contextualización, los valores obtenidos a 28 días son comparables con los reportados en investigaciones similares. Sukontasukkul y Chaikaew (2006) obtuvieron resistencias de 35–73 kg/cm² para mezclas con 10–20 % de caucho en bloques

Tabla 23 Incremento de resistencia entre 7 y 28 días por mezcla.

Figura 50 Evolución de la resistencia a compresión con la edad de curado para las cinco mezclas.

Incremento de resistencia entre 7 y 28 días por mezcla					
Mezcla	f'c 7d (kg/cm ²)	f'c 14d (kg/cm ²)	f'c 28d (kg/cm ²)	Incremento 7→28d (kg/cm ²)	Incremento (%)
M-0	128.2	163.8	182.2	+54.0	+42.1%
M-10-T8	41.4	53	59.2	+17.8	+43.0%
M-20-T8	27.7	34.4	38.2	+10.5	+37.9%
M-10-T16	35.7	46.1	52.1	+16.4	+45.9%
M-20-T16	21.9	28.0	32.1	+10.2	+46.6%

Evolución de la resistencia a compresión con la edad de curado para las cinco mezclas



peatonales; Topçu (1995) reportó reducciones del 50–65 % a 20 % de sustitución; y Eldin y Senouci (1993) documentaron reducciones del 40–65 % para sustitución parcial de árido fino. Los resultados de esta investigación con reducciones del 67,5 % al 82,4 % a 28 días se encuentran dentro del rango documentado en la literatura internacional.

Reducción porcentual de resistencia a 28 días respecto a M-0						
Mezcla	f'c 7d (kg/cm ²)	Reducción 7d (%)	f'c 14d (kg/cm ²)	Reducción 14d (%)	f'c 28d (kg/cm ²)	Reducción 28d (%)
M-10-T8	41.4	-67.7%	53.0	-67.6%	59.2	-67.5%
M-20-T8	27.7	-78.4%	34.4	-79.0%	38.2	-79.0%
M-10-T16	35.7	-72.2%	46.1	-71.8%	52.1	-71.4%
M-20-T16	21.9	-82.9%	28.0	-82.9%	32.1	-82.4%

Reducción porcentual de la resistencia a compresión a 28 días de las mezclas respecto a la mezcla control M-0

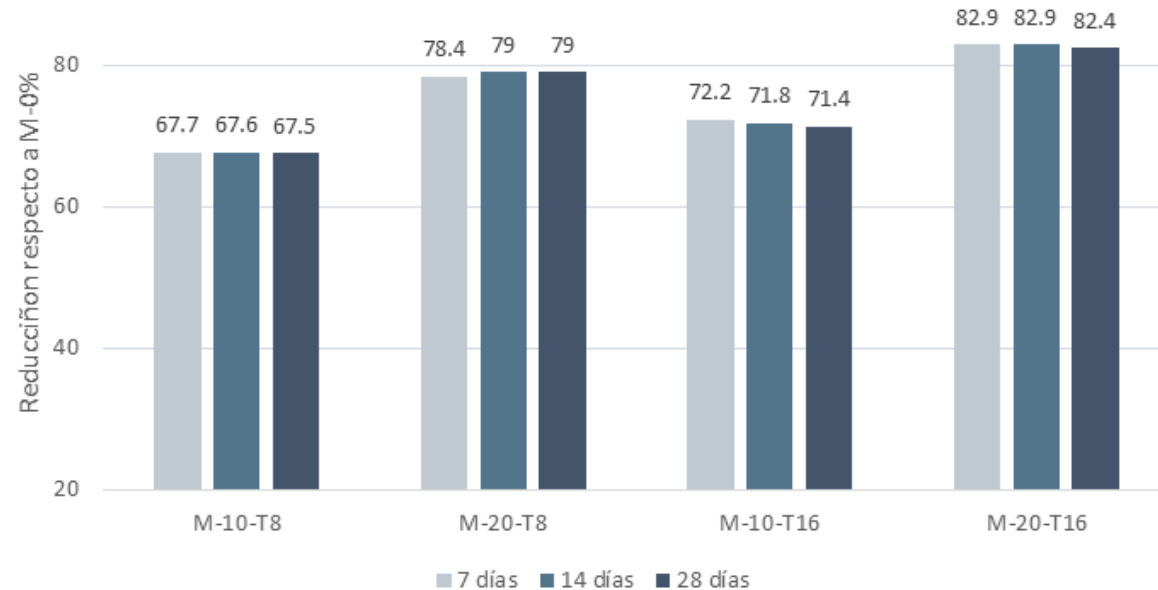


Tabla 24 Reducción porcentual de resistencia a 28 días respecto a M-0.

Figura 51 Reducción porcentual de la resistencia a compresión a 28 días de las mezclas con caucho respecto a la mezcla control M-0.

Los ensayos de caracterización sobre los especímenes de baldosa se realizaron a los 53 días de curado. Las cinco mezclas corresponden a la fase principal. El orden de ejecución fue: deslizamiento, rebote, impermeabilidad al agua, resistencia a flexión y absorción de agua.

4.3.1 Resistencia al deslizamiento

El ensayo se realizó mediante el método del plano inclinado, basado en el principio de la norma DIN 51130. Se registró el ángulo al que un bloque deslizante de madera con suela de cuero comenzó a desplazarse sobre la baldosa mojada, con cinco mediciones por baldosa empleando la aplicación Clinometer+ en teléfono celular.

Tabla 25 Método DIN 51130. Superficie mojada con agua corriente. Todas las series clasifican en R13 (máximo).

Figura 52 Ángulo promedio de deslizamiento por serie (°). Todas las series clasifican en R13.

Método DIN 51130 - Superficie mojada con agua							
Baldosa	Med.1 (°)	Med.2 (°)	Med.3 (°)	Med.4 (°)	Med.5 (°)	Prom. (°)	Grupo R
T-8 / 0% (control)	35	32	35	39	37	35,6°	R13
T-8 / 10%	42	44	40	44	44	42,8°	R13
T-8 / 20%	43	44	38	40	38	40,6°	R13
T-16 / 10%	41	40	38	39	41	39,8°	R13
T-16 / 20%	38	37	39	39	41	38,8°	R13
Mínimo normativo	—	—	—	—	—	> 35°	R11 mín.

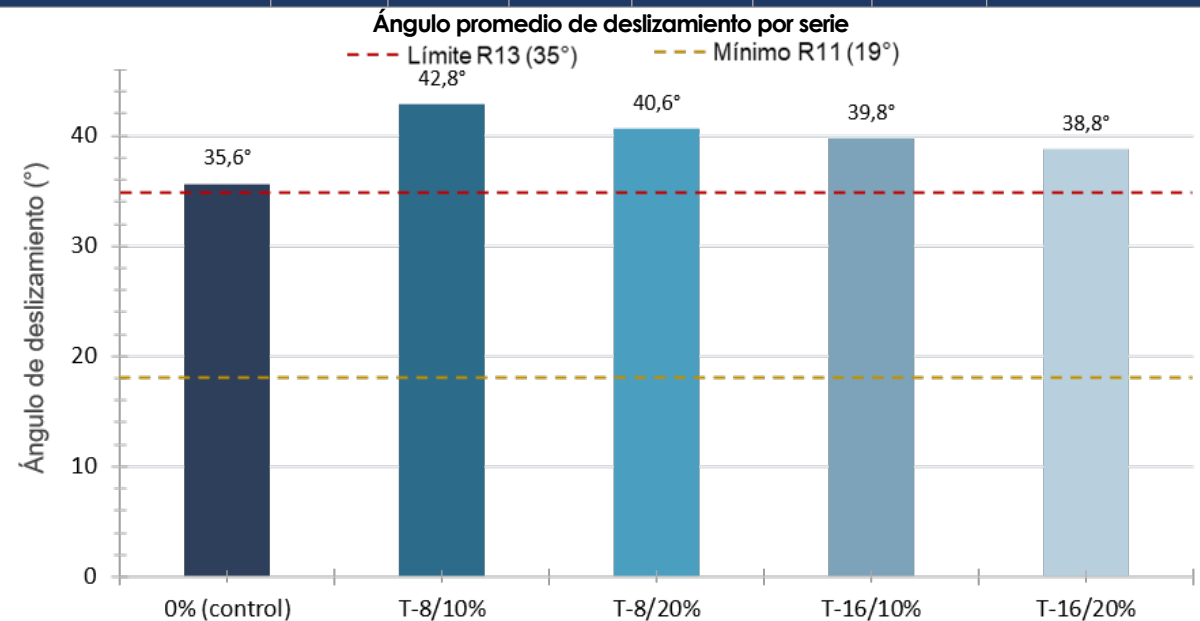




Figura 53 Materiales utilizados para ensayo. Plancha de madera 60x80cm.



Figura 54 Bloque de madera y suela de cuero.

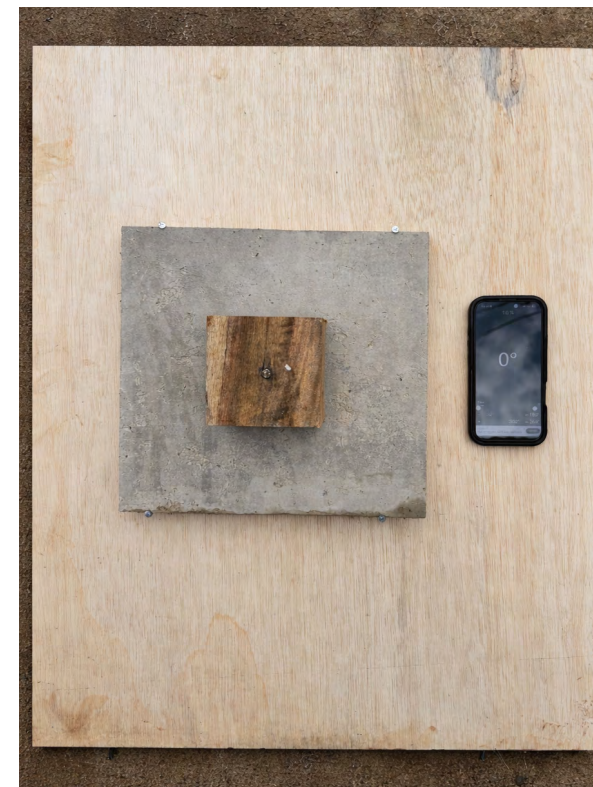


Figura 55 Montaje del ensayo: baldosa sobre plataforma, bloque centrado y nivel inicial en 0°.



Figura 56 Humedecido previo de la baldosa con rociador de agua y nivel inicial en 0°.



Figura 57 Registro del ángulo de deslizamiento durante el ensayo (38° visible en pantalla).

Todas las series alcanzaron la clasificación R13, la categoría máxima de la escala DIN 51130, superando el mínimo de R11 requerido. La incorporación de caucho mejoró el resultado en todas las series respecto al control, con incrementos de 3,2° (T-16/20 %) hasta 7,2° (T-8/10 %). La serie T-8/10 % registró el mejor desempeño con 42,8°, equivalente al 20,2 % de mejora respecto al control. Este efecto se explica por la modificación de la microestructura superficial que introducen las partículas de caucho, incrementando la rugosidad efectiva de la cara vista en condiciones húmedas (Lacsina et al., 2024).

4.3.2 Coeficiente de restitución al impacto (rebote)

El ensayo se realizó mediante caída libre de una esfera de acero de 120 g desde $h_0 = 100$ cm sobre la cara vista de la baldosa, registrando la altura del primer rebote h_1 . El coeficiente de restitución se calculó como $e = \sqrt{h_1 / h_0}$. Se realizaron cinco caídas por baldosa. Método basado en el principio de la norma UNE-EN ISO 10545-5:1998.

Tabla 26 Coeficiente de restitución de impacto - Fase I ($h_0=100$ cm) Nota. $e = \sqrt{h_1/h_0}$. Las series con caucho registran $e < 0,41$, inferior al control ($e = 0,406$), confirmando mayor absorción de energía de impacto.

Figura 58 Coeficiente de restitución "e" promedio por serie. A menor "e", mayor absorción de energía de impacto.

Coeficiente de restitución al impacto - Fase I ($h_0=100$ cm)							
Baldosa	h_1^1 (cm)	h_1^2 (cm)	h_1^3 (cm)	h_1^4 (cm)	h_1^5 (cm)	h_1 prom. (cm)	e promedio (cm)
T-8 / 0% (control)	17	16,2	15	18,5	16	16,5	0,406
T-8 / 10%	10,2	8,5	11,5	7,5	7	8,9	0,298
T-8 / 20%	9,5	11	12	9,5	10	10,4	0,322
T-16 / 10%	8,5	9,5	13,5	10	12,3	10,8	0,327
T-16 / 20%	7	9,5	9	12	9,3	9,4	0,305

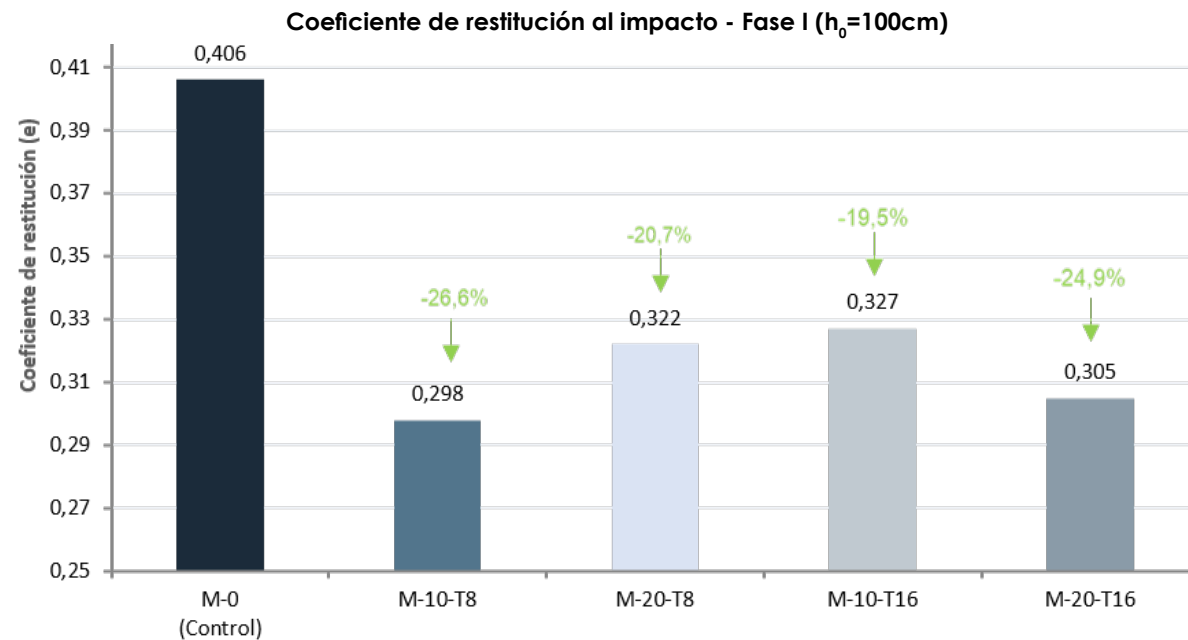




Figura 59 Esfera de acero de 25 mm y 120 g en balanza.



Figura 60 Medición de la altura de rebote con cinta métrica sobre baldosa.

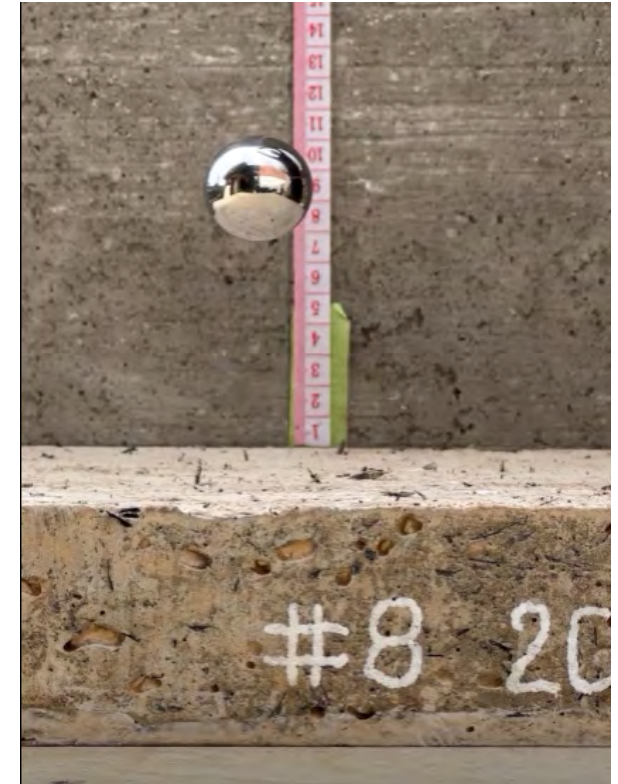


Figura 61 Medición del rebote en baldosas #8-20 %, control con cinta métrica vertical.



Figura 62 Medición del rebote en baldosas #16-20 %, control con cinta métrica vertical.



Figura 63 Medición del rebote en baldosas 0%, control con cinta métrica vertical.

El control registró $e = 0,406$, el valor más alto, coherente con la mayor rigidez del hormigón convencional. Todas las series con caucho presentaron coeficientes inferiores: la reducción oscila entre 19,5 % (T-16/10 %) y 26,7 % (T-8/10 %), siendo T-8/10 % la de mejor desempeño con $e = 0,298$. Este comportamiento confirma que la incorporación de caucho mejora la absorción de energía de impacto, efecto relevante para la seguridad peatonal en espacios públicos.

4.3.3 Impermeabilidad al agua (filtración)

El ensayo se realizó con base en el principio de la columna hidrostática estática de la norma UNE-EN 12467:2013, adaptado para baldosas de hormigón. Se colocó una bandeja de aluminio con recorte de 200×200 mm sellada con silicona sobre la cara vista, con 20 mm de agua durante 24 horas. La cara inferior se inspeccionó a las 24, 48 y 72 horas comprobando que no existía humedad en la superficie de las 5 muestras, por esta razón se decide dejar una de las baldosas por un tiempo de 30 días y observar el comportamiento de la baldosa.

Tabla 27 Escala: 0 (Seco) – 4 (Muchas gotas). Criterio de aceptación: sin formación de gotas (UNE-EN 12467:2013).

Resultados del ensayo de impermeabilidad al agua — Fase I						
Baldosa	Hora inicio	24 h	48 h	72 h	Estado cara inf. (0–4)	¿Gotas?
T-8 / 0% (control)	13h00	13h00	13h00	13h00	0 — Seco	NO
T-8 / 10%	13h00	13h00	13h00	13h00	0 — Seco	NO
T-8 / 20%	13h00	13h00	13h00	13h00	0 — Seco	NO
T-16 / 10%	13h00	13h00	13h00	13h00	0 — Seco	NO
T-16 / 20%	13h00	13h00	13h00	13h00	0 — Seco	NO



Figura 64 Baldosa elevada para poder observar la cara inferior sin modificar su posición.



Figura 65 Bandeja de aluminio con recorte de 200×200 mm sellada con silicona.



Figura 66 20 mm de agua en contacto directo con la cara superficial de la baldosa. Se deja reposar por 24h



Figura 68 Verificación del papel absorbente completamente seco y vista sin humedad



Figura 67 Verificación de la cara inferior con papel absorbente



Figura 69 Cara inferior de la baldosa totalmente seca



Figura 70 Se coloca un espejo para tener una mejor visibilidad



Todas las baldosas obtuvieron el nivel 0 (Seco) en las tres observaciones. La incorporación de caucho en los porcentajes ensayados no genera canales de permeabilidad continua a través del espesor de 50 mm. Este resultado es de gran relevancia para el uso en espacios públicos de la zona lluviosa continental del Ecuador, donde la resistencia a la penetración de agua bajo lluvia intensa es un requisito funcional crítico.

Figura 71 Vista de la cara inferior de la baldosa.

4.3.4 Resistencia a flexión y carga de rotura

El ensayo se realizó en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la UCuenca con prensa Shimadzu Concreto 2000x a 0,25 MPa/s, siguiendo el Anexo F de la UNE-EN 1339:2004. Se cortó el perímetro de 20 mm de cada baldosa, el núcleo (260×260 mm) se dividió en tres franjas de ≈87 mm. Distancia entre apoyos: L = 210 mm. Las franjas se preconditionaron 24 h en agua. Fórmula: $T = (3PL) / (2bt^2)$. Los valores en kg/cm² del informe de laboratorio se convirtieron a MPa multiplicando por 0,0981.

Tabla 28 Resistencia a flexion - Fase I (Mpa; 1 kg/cm² = 0,0981 MPa). Ensayo realizado el 18/03/2026. Tomado de Ing. Luis Ortega, Laboratorio UCuenca.

Figura 72 Módulo de flexión T (MPa) promedio por serie. Las líneas indican los mínimos de la Clase 1 (promedio 3,5 MPa; individual 2,8 MPa).

Resistencia a flexión — Fase I (MPa; 1 kg/cm ² = 0,0981 MPa)							
Serie	F-1 (MPa)	F-2 (MPa)	F-3 (MPa)	T prom. (MPa)	T mín. (MPa)	T ≥ 3,5?	T ind. ≥ 2,8?
T-8 / 0% (control)	10,71	12,41	11,90	11,67	10,71	Sí	Sí
T-8 / 10%	4,35	4,97	4,30	4,54	4,30	Sí	Sí
T-8 / 20%	3,50	3,87	3,49	3,62	3,49	Sí	Sí
T-16 / 10%	4,06	3,64	3,74	3,81	3,64	Sí	Sí
T-16 / 20%	2,90	2,11	2,48	2,50	2,11	No	No
Mínimo Clase 1	—	—	—	≥ 3,5	≥ 2,8	—	—

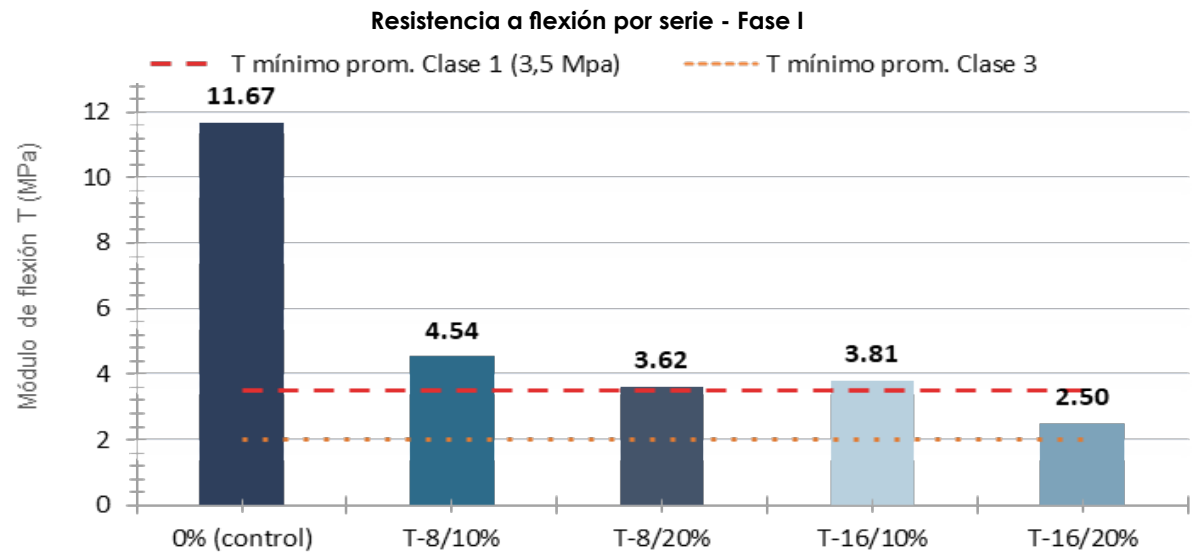




Figura 73 Baldosa marcada según el patrón de corte.



Figura 74 Patrón de corte para ensayo a flexión.



Figura 75 Las cinco series de especímenes de flexión identificadas (0% control, #8-10%, #8-20%, #16-10%, #16-20%)



Figura 76 Colocación de la franja en la prensa con los rodillos de apoyo y lámina de compresión.



Figura 77 Franja post-rotura mostrando la grieta en el tercio central.



Figura 78 Franja de hormigón de control rotura completa.



Cuatro de las cinco series cumplen la Clase 1 de la UNE-EN 1339:2004 (T promedio $\geq 3,5$ MPa; T individual $\geq 2,8$ MPa): M-0, M-10-T8, M-20-T8 y M-10-T16. La serie M-20-T16 no cumple, con T promedio de 2,50 MPa. Este incumplimiento define un límite experimental: la combinación fracción T-16 con 20 % de sustitución no es apta para pavimentos peatonales bajo la UNE-EN 1339:2004. La serie T-8/10 % es la de mejor desempeño con 4,54 MPa, un 29,7 % por encima del mínimo.

Figura 79 Grieta de rotura, fibras de caucho actúan como refuerzo.

4.3.5 Absorción de agua

El ensayo se realizó sobre fragmentos del ensayo de flexión, siguiendo el Anexo E de la UNE-EN 1339:2004. Los fragmentos se secaron en horno a (105 ± 5) °C hasta masa constante (m_{seco}), se sumergieron en agua a temperatura ambiente y se pesaron cada 24 horas hasta masa constante húmeda. La absorción se calculó como $A = [(m_{\text{hum_final}} - m_{\text{seco}}) / m_{\text{seco}}] \times 100$. Se evaluaron tres fragmentos por baldosa.

Tabla 29 Absorción de agua - Fase I. m_{seco} = masa seca al horno; m_{sat} = masa húmeda final. Masas en kg.

Figura 80 Absorción de agua A (%) promedio por serie. Todas cumplen el límite máximo del 6 %.

Absorción de agua — Fase I (UNE-EN 1339:2004 Anexo E)								
Baldosa	m_{seco} F1 (kg)	m_{sat} F1 (kg)	m_{seco} F2 (kg)	m_{sat} F2 (kg)	m_{seco} F3 (kg)	m_{sat} F3 (kg)	A prom. (%)	¿A ≤ 6 %?
T-8 / 0% (control)	1,31	1,33	1,23	1,25	1,31	1,33	1,56	Sí
T-8 / 10%	1,36	1,40	1,23	1,27	1,05	1,09	3,33	Sí
T-8 / 20%	1,12	1,15	1,11	1,15	1,10	1,12	2,70	Sí
T-16 / 10%	1,20	1,24	1,12	1,16	1,20	1,24	3,41	Sí
T-16 / 20%	1,11	1,14	1,06	1,10	1,04	1,08	3,44	Sí
Límite normativo	—	—	—	—	—	—	≤ 6 %	—

Absorción de agua por serie - Fase I

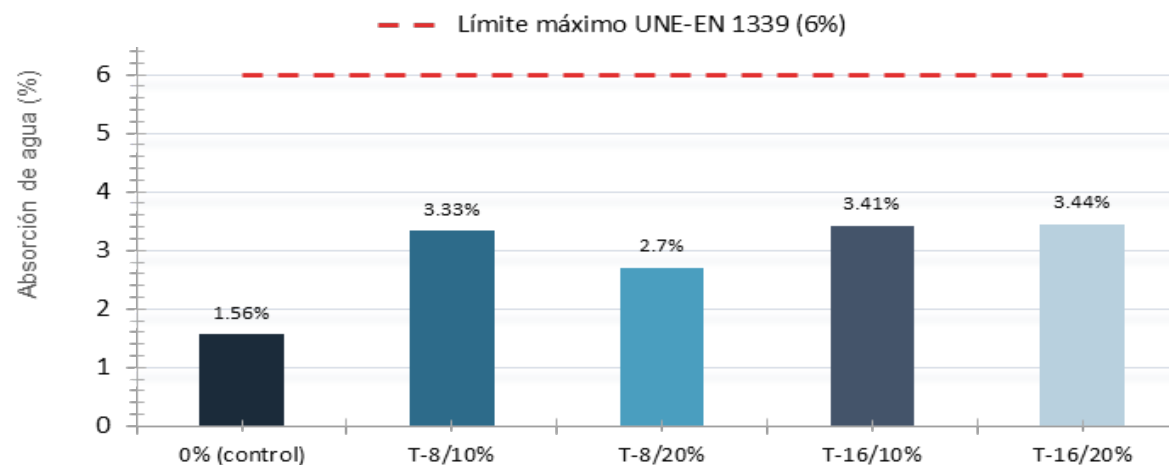




Figura 81 Fragmentos de ensayo a flexión colocados en el horno de laboratorio de la Universidad del Cuenca para su secado.

Figura 82 Horno de laboratorio de la Universidad de Cuenca utilizado para el secado de fragmentos a 110 °C.

Figura 83 Pesaje de fragmentos tamiz #8 al 20%, identificados en balanza digital previo a sumergirlos en recipiente para la inmersión.

Figura 84 Pesaje de fragmentos tamiz #16 al 20%, identificados en balanza digital previo a sumergirlos en recipiente para la inmersión.



Figura 85 Fragmentos sumergidos en recipiente para la inmersión.



Todas las series presentan absorción inferior al 6 %, cumpliendo la UNE-EN 1339:2004. El control registra la menor absorción (1,56 %); los valores con caucho oscilan entre 2,70% y 3,44%, atribuidos al incremento de porosidad de la mezcla documentado en la literatura, que en todos los casos se mantiene bien por debajo del límite normativo.

Figura 86 Pesaje de fragmentos tamiz #8 al 20%, en estado saturado previo al cálculo de absorción.



Figura 87 Pesaje de fragmentos tamiz #16 al 20%, en estado saturado previo al cálculo de absorción.

4.3.6 Síntesis comparativa — Fase I

Cuatro de las cinco mezclas cumplen todos los parámetros normativos. La formulación M-10-T8 destaca como la de mejor desempeño global: mayor ángulo de deslizamiento (42,8°), menor coeficiente de restitución ($e = 0,298$), mayor módulo de flexión con caucho (4,54 MPa) y absorción moderada (3,33 %).

Tabla 30 Síntesis de resultados de caracterización - Fase I.
Nota. ✓ = cumple; x = no cumple. El rebote no tiene umbral normativo de aceptación.

Síntesis de resultados de caracterización — Fase I						
Ensayo / Norma	M-0 (control)	M-10-T8	M-20-T8	M-10-T16	M-20-T16	Criterio normativo
Deslizamiento — DIN 51130	35,6° R13	42,8° R13 ✓	40,6° R13 ✓	39,8° R13 ✓	38,8° R13 ✓	≥ R11 (>19°)
Rebote — ISO 10545-5	$e = 0,406$	$e = 0,298$	$e = 0,322$	$e = 0,327$	$e = 0,305$	— (comparativo)
Filtración — UNE-EN 12467	Nivel 0 ✓	Nivel 0 ✓	Nivel 0 ✓	Nivel 0 ✓	Nivel 0 ✓	Sin gotas
Flexión — UNE-EN 1339	11,67 MPa ✓	4,54 MPa ✓	3,62 MPa ✓	3,81 MPa ✓	2,50 MPa x	≥ 3,5 MPa (Clase 1)
Absorción — UNE-EN 1339	1,56 % ✓	3,33 % ✓	2,70 % ✓	3,41 % ✓	3,44 % ✓	≤ 6 %
CUMPLIMIENTO GENERAL	✓ Cumple	✓ Cumple	✓ Cumple	✓ Cumple	No cumple (solo flexión)	4 de 5 series

Mapa de cumplimiento normativo por serie y ensayo					
	M-0 Control	M-10-T8	M-20-T8	M-10-T16	M-20-T16
Deslizamiento DIN 51130	R13 ✓	R13 ✓	R13 ✓	R13 ✓	R13 ✓
Rebote ISO 10545-5	e=0,406 ✓	e=0,298 ✓	e=0,322 ✓	e=0,327 ✓	e=0,305 ✓
Filtración UNE-EN 12467	Niv.0 ✓	Niv.0 ✓	Niv.0 ✓	Niv.0 ✓	Niv.0 ✓
Flexión UNE-EN 1339	11,67 ✓	4,54 ✓	3,62 ✓	3,81 ✓	2,50 (Clase 3)
Absorción UNE-EN 1339	1,56% ✓	3,33% ✓	2,70% ✓	3,41% ✓	3,44% ✓

Tabla 31 Mapa de cumplimiento normativo por serie y ensayo — Fase I. Verde = cumple; rojo = no cumple.

A partir de los resultados de la Fase I, la tutoría propuso una segunda fase experimental centrada en la aplicación de una capa de caucho reciclado sobre la cara vista de la baldosa mediante termofusión. A diferencia de la Fase I, donde el caucho actúa como componente interno de la mezcla, en la Fase II el caucho funciona como elemento de recubrimiento superficial independiente.

4.4.1 Proceso de fabricación

El proceso consistió en: limpiar la cara vista de la baldosa seca con brocha; aplicar imprimante epoxídico Sikadur® 32 Primer para garantizar la adherencia interfacial caucho-hormigón; posicionar el marco del molde elevado al espesor deseado como encofrado de confinamiento; depositar caucho reciclado triturado; calentar con pistola de calor hasta textura plástica; y compactar con presión moderada con plancha de madera repitiendo ciclos hasta que el caucho no cedió más.



Figura 88 Limpieza con brocha de la cara vista de la baldosa seca.



Figura 89 Aplicación de imprimante epoxídico Sikadur 32 primer.

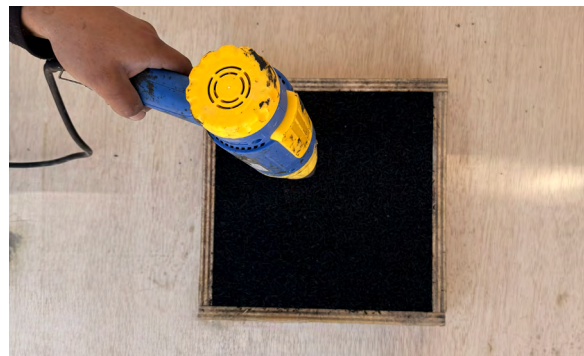


Figura 90 Calentamiento con pistola de calor hasta obtener una textura plástica.



Figura 91 Capa de caucho totalmente compactada.

Figura 92 Vista superior de las baldosas con tratamiento superficial de caucho reciclado mostrando la textura homogénea y compacta de la capa de caucho en los cuatro espesores ensayados.



Figura 93 Vista lateral de baldosa BT-05 con capa de caucho superficial, mostrando la unión hormigón-caucho.



4.4.2 Estabilidad de la capa por espesor

Tabla 32 Evaluación por inspección visual y tracción manual. Espesor óptimo: 5 – 15 mm.

Estabilidad de la capa de caucho por termofusión según espesor				
Espesor (mm)	Vol. caucho (cm ³)	Compactación	Adhesión	Resultado
5	750	Buena — uniforme	Sin desprendimiento	Estable
10	1500	Buena — uniforme	Sin desprendimiento	Estable
15	2250	Regular	Sin desprendimiento	Estable
20	3000	Deficiente	Desprendimiento generalizado	Inestable
25	3750	Deficiente	Desprendimiento generalizado	Inestable



Figura 94 Vista superior de la baldosa BT-0,5 con la capa de caucho compactado.



Figura 95 Sección transversal de baldosas con capa de caucho, espesor 25 mm y 20 mm, mostrando la interfaz hormigón-caucho.



Figura 96 Sección transversal de baldosas con capa de caucho, espesor 15 mm y 10 mm, mostrando la interfaz hormigón-caucho.

Los espesores de 5, 10 y 15 mm produjeron capas estables. La pérdida de adhesión a mayores espesores se atribuye a que el calor de la pistola no penetra uniformemente hasta la interfaz caucho-hormigón y al mayor peso de la capa, que supera la resistencia de adhesión del sistema.

4.4.3 Ensayos de deslizamiento y rebote sobre baldosas tratadas

Se realizaron ensayos de deslizamiento sobre la baldosa BT-0,5, representativa de las capas estables, y de rebote sobre los cuatro espesores fabricados.

Tabla 33 Deslizamiento - Fase II (BT-0,5). Mismo método que Fase I (DIN 51130 adaptado). Cara de ensayo: capa de caucho compactado.

Tabla 34 Rebote - Fase II ($h_0 = 100$ cm). $e = \sqrt{h_1/h_0}$. Cara de ensayo: capa de caucho compactado.

Deslizamiento — Fase II (BT-0,5)							
Baldosa	Med.1 (°)	Med.2 (°)	Med.3 (°)	Med.4 (°)	Med.5 (°)	Prom. (°)	Grupo R
BT-0,5	39	36	39	37	37	37,6°	R13
M-0 control Fase I (ref.)	35	32	35	39	37	35,6°	R13

Rebote — Fase II ($h_0 = 100$ cm)								
Baldosa	h_1^1 (cm)	h_1^2 (cm)	h_1^3 (cm)	h_1^4 (cm)	h_1^5 (cm)	h_1 prom. (cm)	e prom.	Estabilidad
BT-0,5	26	21,5	20	24,5	26,5	23,7	0,487	Estable
BT-1,0	19	18,5	19,5	19	20	19,2	0,438	Estable
BT-1,5	28	28	26,5	28	28,5	27,8	0,527	Límite
BT-2,0	23	23	22,5	23	22	22,7	0,476	Inestable
M-0 ctrl. Fase I (ref.)	17	16,2	15	18,5	16	16,5	0,406	—



Figura 97 Ensayo de deslizamiento sobre baldosa BT-0,5: bloque sobre la superficie de caucho y registro de 0°.

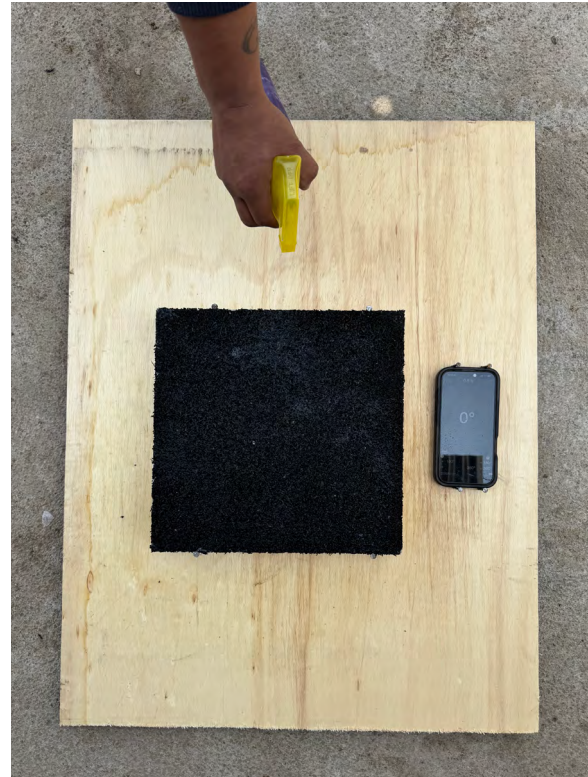


Figura 98 Humedecido de la capa superficial de la baldosa previo ensayo de deslizamiento sobre BT-0,5.



Figura 99 Ensayo de deslizamiento sobre baldosa BT-0,5: bloque sobre la superficie de caucho y registro de 36° en teléfono celular.

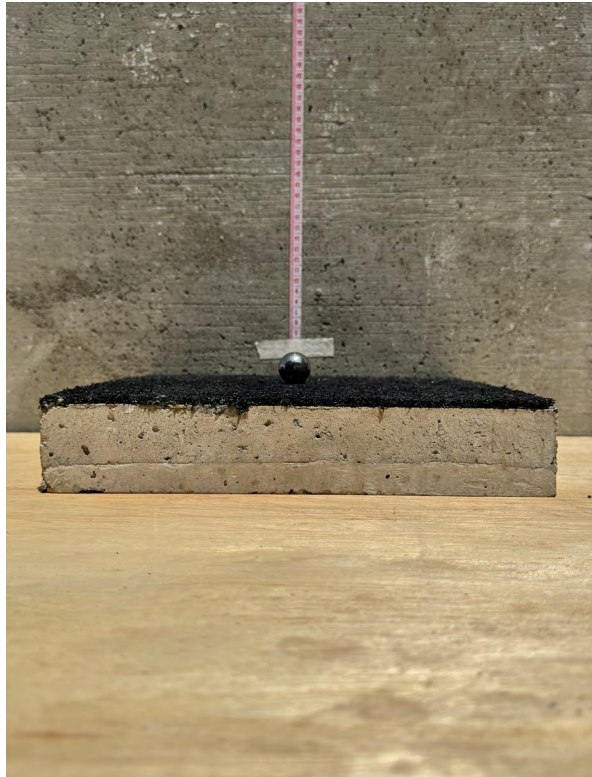


Figura 100 Medición de la altura de rebote con cinta métrica sobre baldosa.



Figura 101 Medición de la altura de rebote con cinta métrica sobre baldosa.

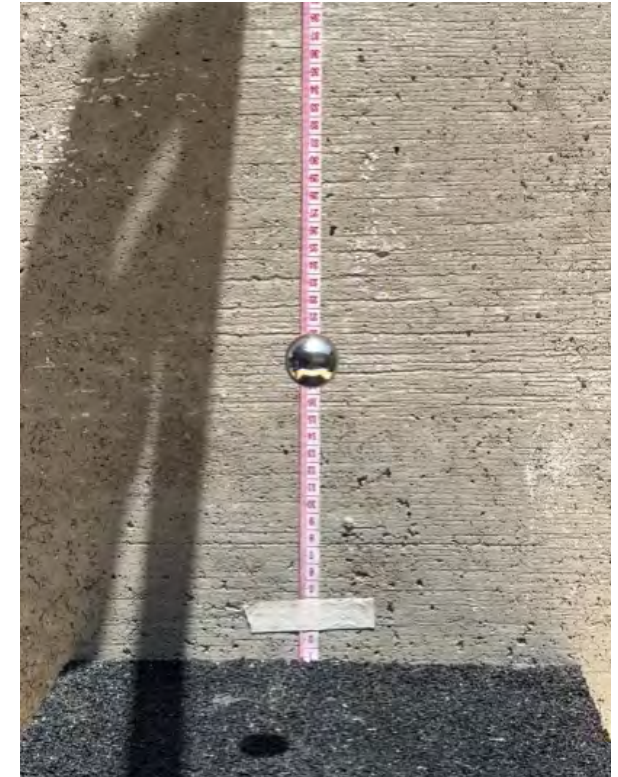


Figura 102 Ensayo de rebote sobre baldosa con capa superficial de caucho: medición de la altura de rebote con cinta métrica.

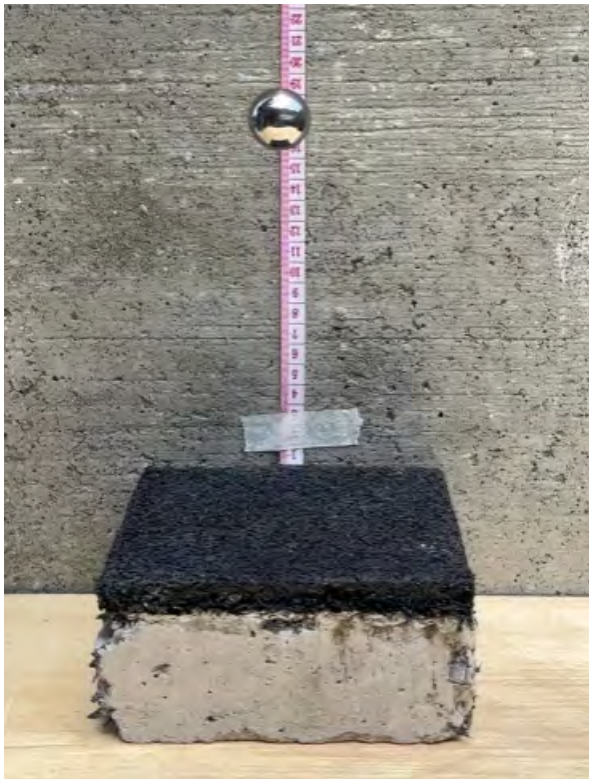


Figura 103 Ensayo de rebote sobre baldosa con capa superficial de caucho: medición de la altura de rebote con cinta métrica.

Ángulo de deslizamiento (°) entre los diferentes especímenes

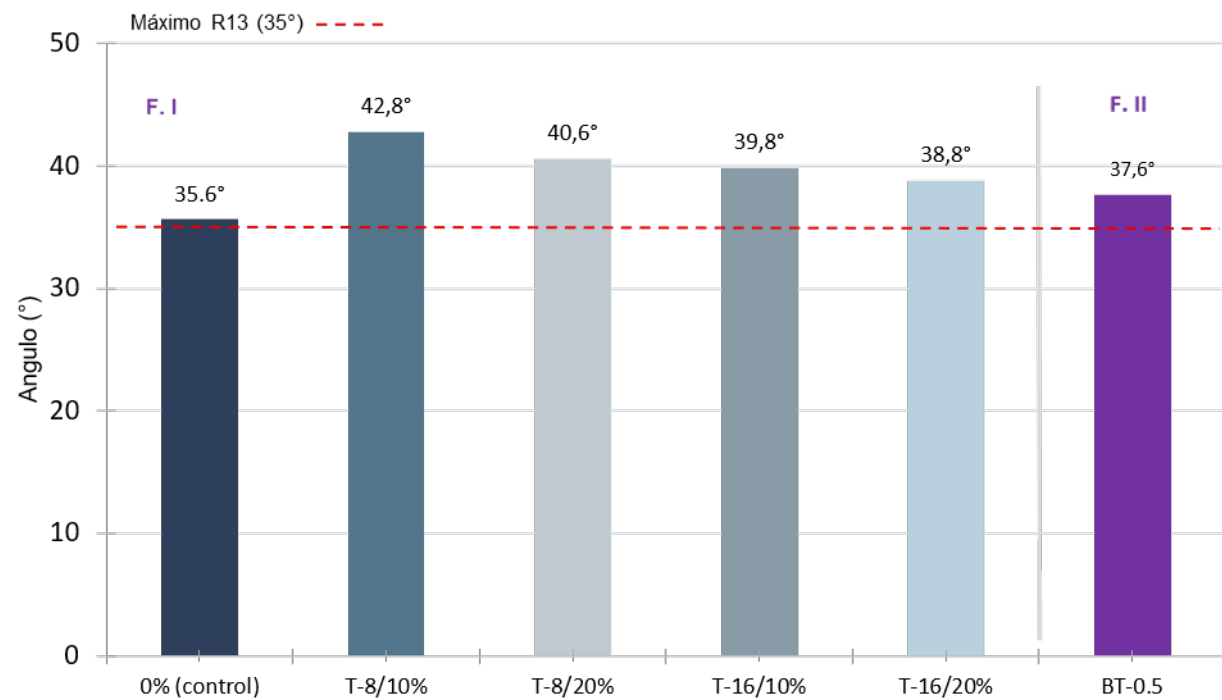
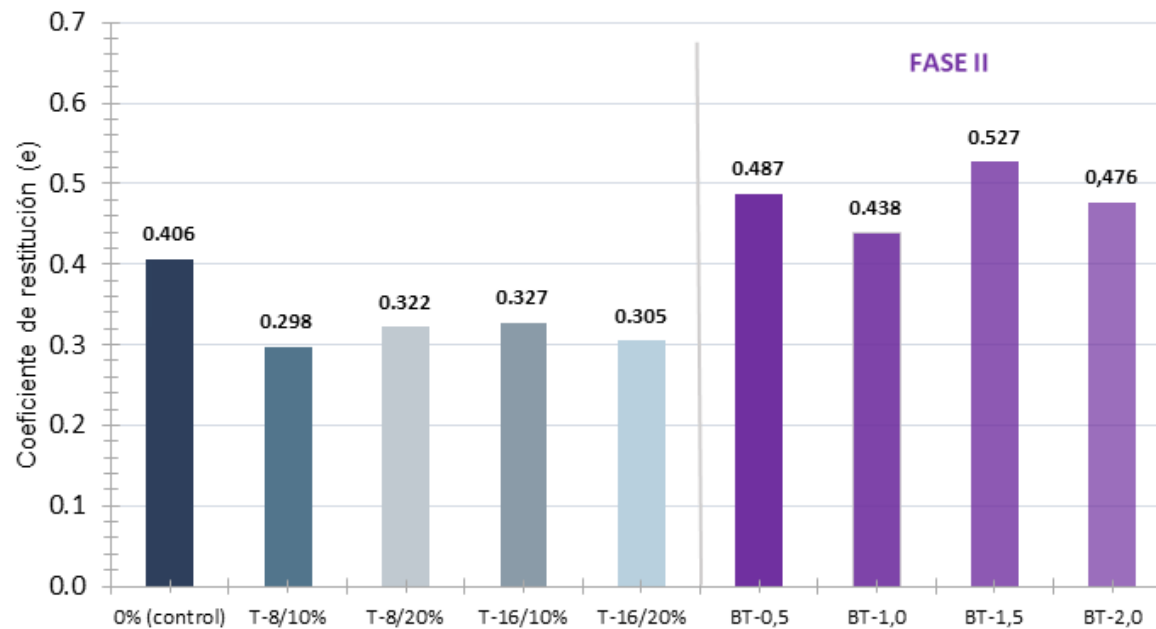


Figura 104 Ángulo de deslizamiento entre los diferentes especímenes

Coefficiente de restitución al impacto por serie — Fase II
($h_0 = 100$ cm)



La baldosa BT-0,5 clasifica en R13 en deslizamiento ($37,6^\circ$), igual que las series de Fase I. En rebote, BT-0,5 ($e = 0,487$) y BT-1,0 ($e = 0,438$) son superiores al control ($e = 0,406$) pero mayores que las series de Fase I con caucho en mezcla (0,298–0,327). Esto se atribuye a que la compactación del proceso de termofusión reduce la elasticidad natural del caucho. Ambas series son superiores al control en deslizamiento y representan una alternativa viable de recubrimiento superficial.

Figura 105 Comparativo de resultados de deslizamiento (izquierda) y coeficiente de restitución (derecha) entre Fase I y Fase II.

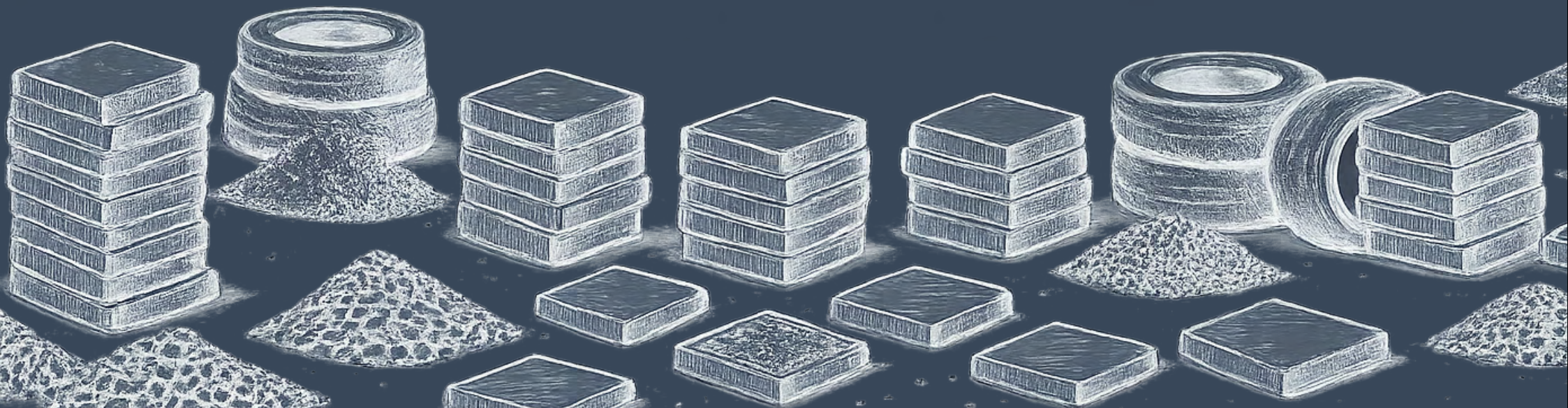
Los resultados del programa experimental confirman que la incorporación de caucho reciclado de neumáticos produce reducciones significativas en la resistencia a compresión (67,5 %-82,4 % a 28 días), resultado esperado y concordante con la literatura internacional. Sin embargo, cuatro de las cinco mezclas cumplen todos los parámetros funcionales de la UNE-EN 1339:2004: resistencia al deslizamiento R13, impermeabilidad nivel 0, resistencia a flexión $\geq 3,5$ MPa y absorción ≤ 6 %. La mezcla T-16/20 % queda fuera del rango apto únicamente por incumplimiento de la resistencia a flexión, lo que define el límite experimental de la combinación granulometría-porcentaje.

La Fase II demuestra que el tratamiento superficial por termofusión es técnicamente viable en espesores de 0,5 y 1,0 cm, produce baldosas con clasificación R13 en deslizamiento y ofrece una alternativa complementaria para mejorar las propiedades superficiales de fricción sobre una base de hormigón convencional.

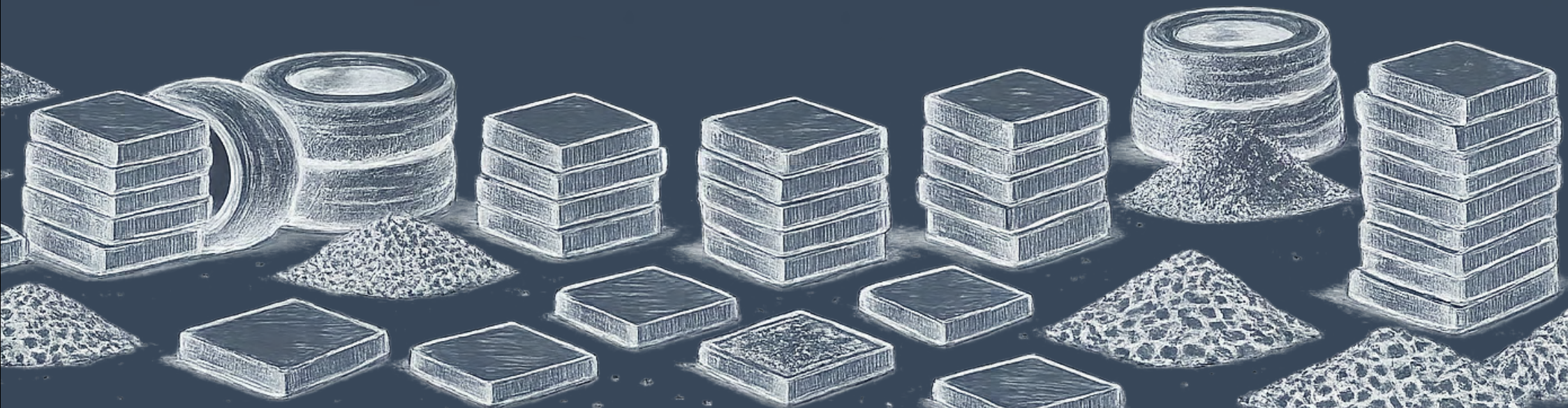
La fracción T-8 al 10 % de sustitución emerge como la formulación de mayor aptitud técnica

global, con el mejor desempeño simultáneo en deslizamiento (42,8°), rebote ($e = 0,298$), flexión (4,54 MPa) y absorción (3,33 %). Estos resultados respaldan la viabilidad técnica del uso de caucho reciclado de neumáticos como sustituto parcial del agregado fino en baldosas para espacios públicos de la zona lluviosa continental del Ecuador.

V



ANÁLISIS Y EVALUACIÓN





El presente análisis contextualiza la formulación M-10-T8 dentro del universo de materiales utilizados para pavimento peatonal en el mercado ecuatoriano. Se comparan siete materiales seleccionados por tres criterios: (a) aplicación equivalente al uso peatonal en espacio público exterior; (b) disponibilidad comprobada en el mercado de Cuenca; y (c) representatividad tipológica del conjunto.

Se incluye la baldosa Piedra & Piedra (Arq. Felipe Piedra, Cuenca) como material adicional, reconocido en el medio local por su presencia en proyectos institucionales y académicos de la ciudad. De igual manera, se integra andesita martelinada adoptada para la renovación del Parque Calderón (febrero 2026). Los valores de M-0 y M-10-T8 provienen de resultados experimentales propios (Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca, 2026); los de los demás materiales, de las fuentes documentadas en los Anexos.

5.1.1 Tabla comparativa

Tabla comparativa								
CRITERIO	M-0 Control	Adoquín hormigón (Hormipisos)	Andesita busardeada (La Roca)	Andesita martelinada (P. Calderón)	Porcelanato exterior (Graiman TEKSTONE)	Loseta hidráulica (Hormipisos Vintage)	Baldosa Piedra & Piedra (Arq. Piedra)	M-10-T8 Caucho-hormigón (presente inv.)
BLOQUE 1 — IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO								
Material base	Cemento + áridos	Hormigón vibro prensado bicapa	Roca ígnea volcánica natural	Roca ígnea volcánica (acabado martelinado)	Pasta cerámica cocida ≥ 1200 °C	Cemento pigmentado + áridos finos	Hormigón alta resist. + capa gravilla/granillo lavado	Hormigón + 10 % caucho NFU (T-8)
Dimensiones (mm)	300×300	300×300	300×300	300–600 ×300–600	595×595	200–400 ×200–400	400×400 (estándar)	300×300
Espesor (mm)	50	60	80	60–80	~10	20–25	30–40	50
Norma de referencia	UNE-EN 1339:2004	NTE INEN 3040:2016	UNE-EN 1341	UNE-EN 1341	ISO 10545	Sin norma específica	Sin norma específica	UNE-EN 1339:2004
Fabricante / origen	Tesis UDA Cuenca	Hormipisos Cía. Ltda. Cuenca	Fáb. Orellana La Roca Cuenca	Canteras C. Histórico Cuenca	Graiman Cía. Ltda. Ecuador	Hormipisos Cía. Ltda. Cuenca	Piedra & Piedra Arq. F. Piedra Cuenca	Tesis UDA Cuenca
BLOQUE 2 — PARÁMETROS TÉCNICOS								
Resist. flexión (MPa)	11,67 ✓ Clase 1	N.A. ¹	30,0 ² ✓	30,0 ² ✓	N.D.	N.D.	N.D.	4,54 ✓ Clase 1
Tracción indirecta	N.A. ¹	$\geq 3,6$ ✓ (INEN 3040)	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.A. ¹
Absorción de agua (%)	1,56 ✓	$\leq 6,0$ ✓ (req.)	0,22 ² ✓	0,22 ² ✓	<0,5 ✓ Grupo Bla	N.D.	< 6,0 †	3,33 ✓
Resist. deslizamiento	35,6° R13 ✓	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	Clase 3 †	42,8° R13 ✓
Coef. restitución (e)	0,406 (referencia)	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,298 (–26,6 %)

Impermeabilidad	Nivel 0 ✓	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	Nivel 0 ✓
Resist. compresión 28d (kg/cm ²)	182,2	≥ 400 ³	≈ 1 754 ²	≈ 1 754 ²	N.D.	N.D.	210–280 (declarado)	59,2
Cumplimiento normativo	✓ Clase 1 UNE-EN 1339	✓ NTE INEN 3040	✓ ref. bibl. ²	✓ ref. bibl. ²	✓ ISO 10545	Sin certif.	Sin norma específica	✓ Clase 1 UNE-EN 1339
BLOQUE 3 — CRITERIOS CUALITATIVOS								
Uso recomendado	Peatonal esp. público	Peatonal y vehicular	Peatonal patrimonial	Peatonal patrimonial C. Histórico	Peatonal comercial e institucional	Peatonal decorativo	Peatonal institucion. y aceras	Peatonal esp. público zona lluviosa
Disponibilidad	Producción experimental	Alta — planta Hormipisos	Media Cuenca	Media — obra pública patrimonial	Alta — distr. nacionales	Media — bajo pedido	Media — Cuenca Piedra & Piedra	Producción experimental
Contenido reciclado	No	No	No	No	No	No	No	Sí — 10% caucho NFU
Mantenimiento	Bajo	Bajo	Bajo-medio	Bajo-medio	Bajo	Alto	Bajo — sellador hidrófugo	Bajo
Precio de venta (USD/m ²)	—	\$15,00	\$55,00	\$65,00	\$45,00	\$70,00	\$24,00	\$16,87 (APU-01, experimental)

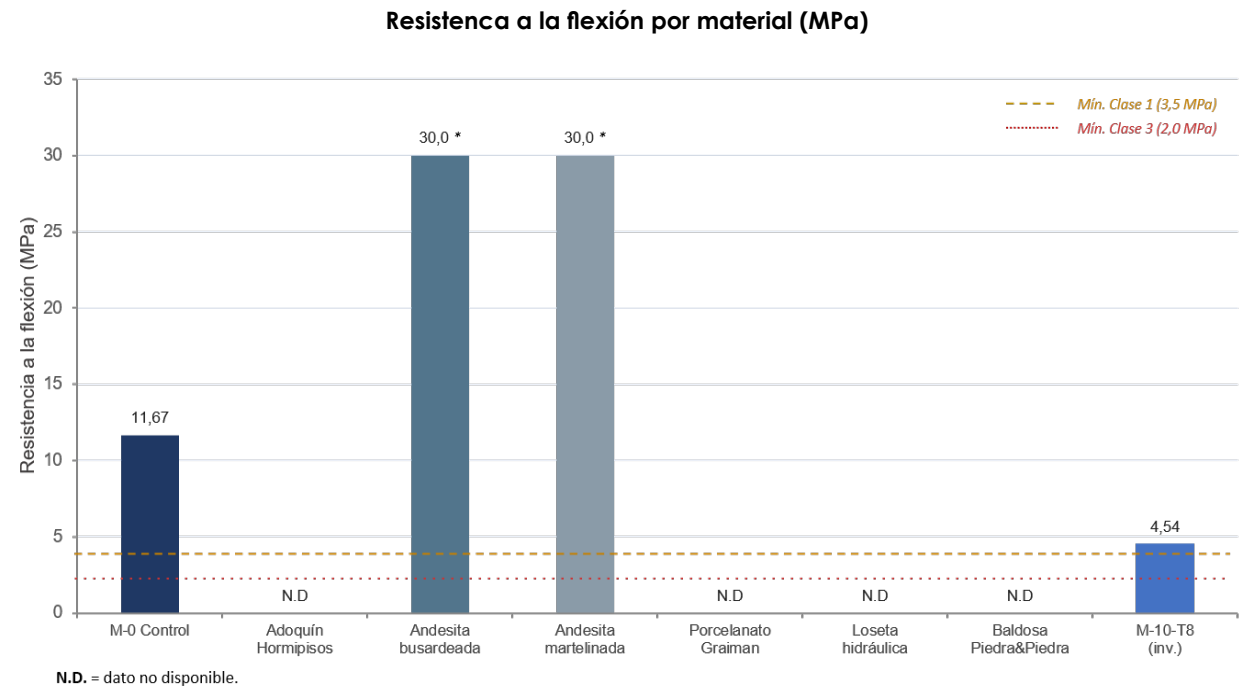
5.1.2 Análisis comparativo por parámetro

5.1.2.1 Resistencia a la flexión

M-10-T8 alcanza 4,54 MPa, superando en 29,7 % el mínimo de Clase 1 (3,5 MPa) de la UNE-EN 1339:2004. La baldosa Piedra & Piedra no cuenta con datos de flexión verificados bajo norma; su resistencia a la compresión declarada de 210–280 kg/cm² (f'c de diseño) permite inferir un desempeño adecuado para uso peatonal, aunque sin clasificación normativa formal.

Tabla 35 Análisis comparativo de siete materiales para pavimento peatonal en espacio público — Cuenca, Ecuador, 2026
 Nota. N.D. = dato no disponible públicamente. N.A. = no aplica al método de ensayo. ¹ La NTE INEN 3040:2016 evalúa por tracción indirecta (splitting), no por flexión. Métodos no intercambiables. ² Cuello Orozco et al. (2020). DOI: 10.17081/invinno.8.1.3579. Datos de andesita martelinada = misma roca con diferente acabado. ³ Requisito mínimo NTE INEN 3040:2016; no corresponde a ensayo de fabricante específico. † Dato declarado por fabricante sin respaldo de ensayo verificado bajo norma específica. Precios corresponden al precio de venta al público verificado en distribuidores de Cuenca, primer trimestre 2026.

Figura 106 Resistencia a la flexión por material (MPa).
 M-10-T8: ensayo propio UNE-EN 1339:2004. Andesita: Cuello Orozco et al. (2020), UNE-EN 1341.



5.1.2.2 Absorción de agua

M-10-T8 registra 3,33 %, dentro del límite de 6 % de la UNE-EN 1339:2004. La baldosa Piedra & Piedra declara absorción menor a 6 %, cumpliendo el umbral, aunque sin ensayo certificado bajo norma específica.

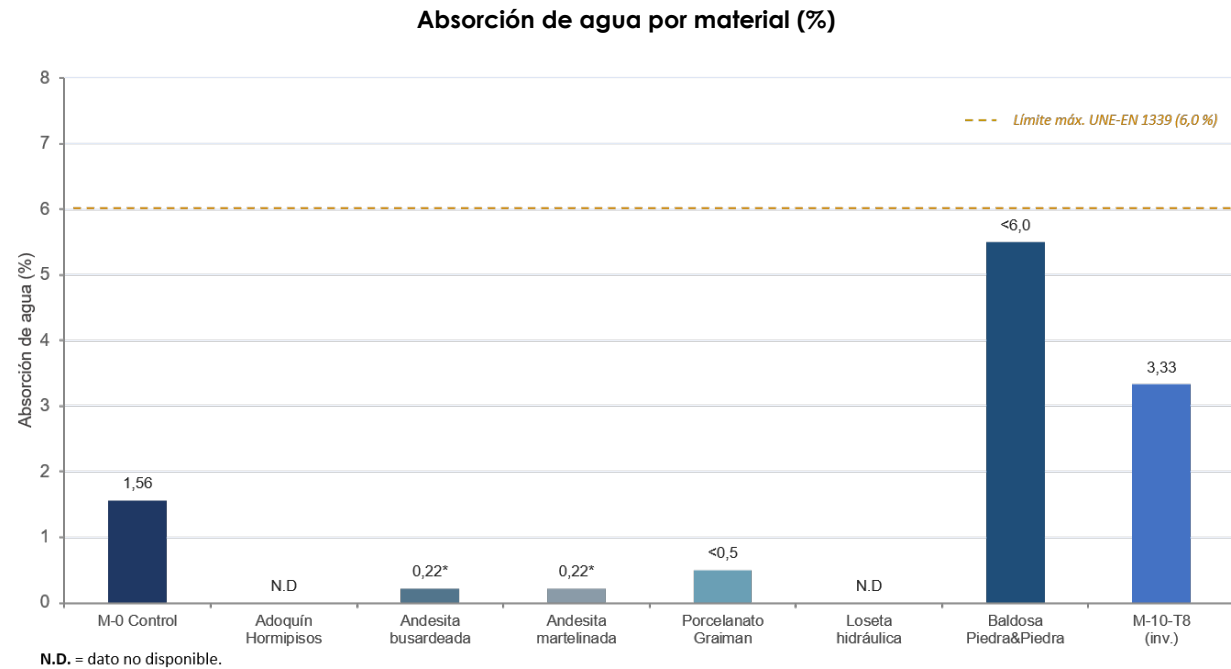


Figura 107 Absorción de agua por material (%). Límite máximo UNE-EN 1339:2004: 6,0.

5.1.2.3 Resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas

M-10-T8 registra 42,8° (R13), con una mejora del 20,2% sobre M-0 (35,6°). La baldosa Piedra & Piedra declara Clase 3 de resistencia al deslizamiento, lo que corresponde a una categoría alta de seguridad antideslizante; sin embargo, no se dispone de valor angular verificado bajo DIN 51130 para ese material.

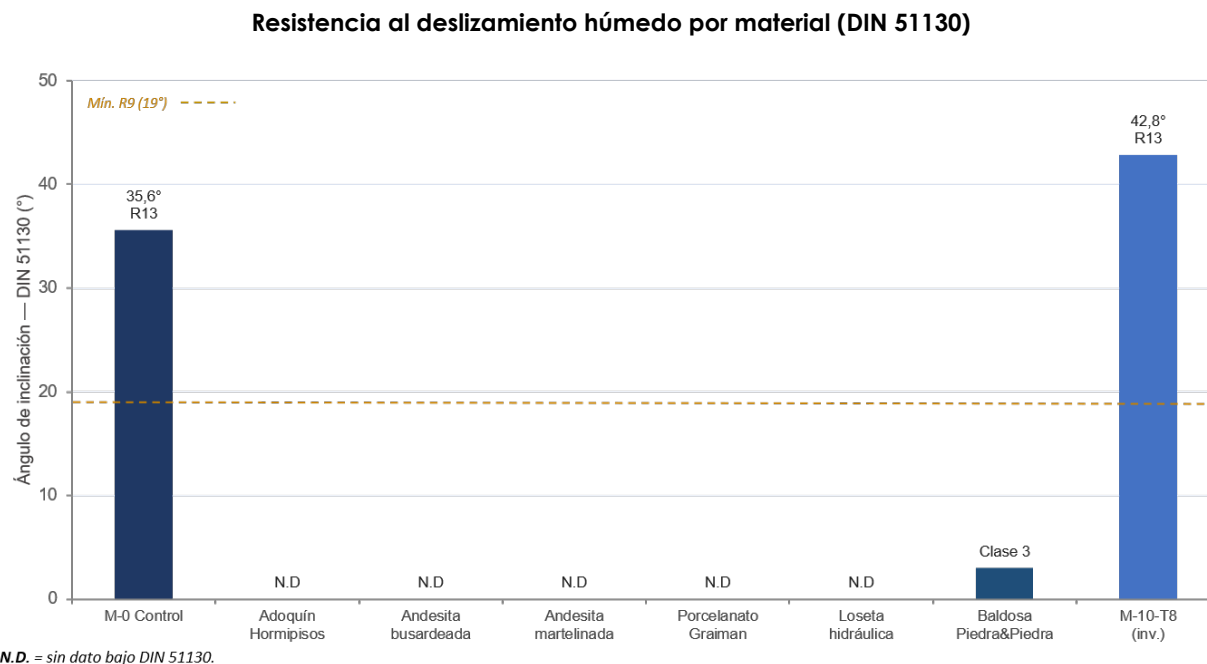


Figura 108 Resistencia al deslizamiento en superficie mojada (DIN 51130). Solo M-0 y M-10-T8 cuentan con valor angular verificado.

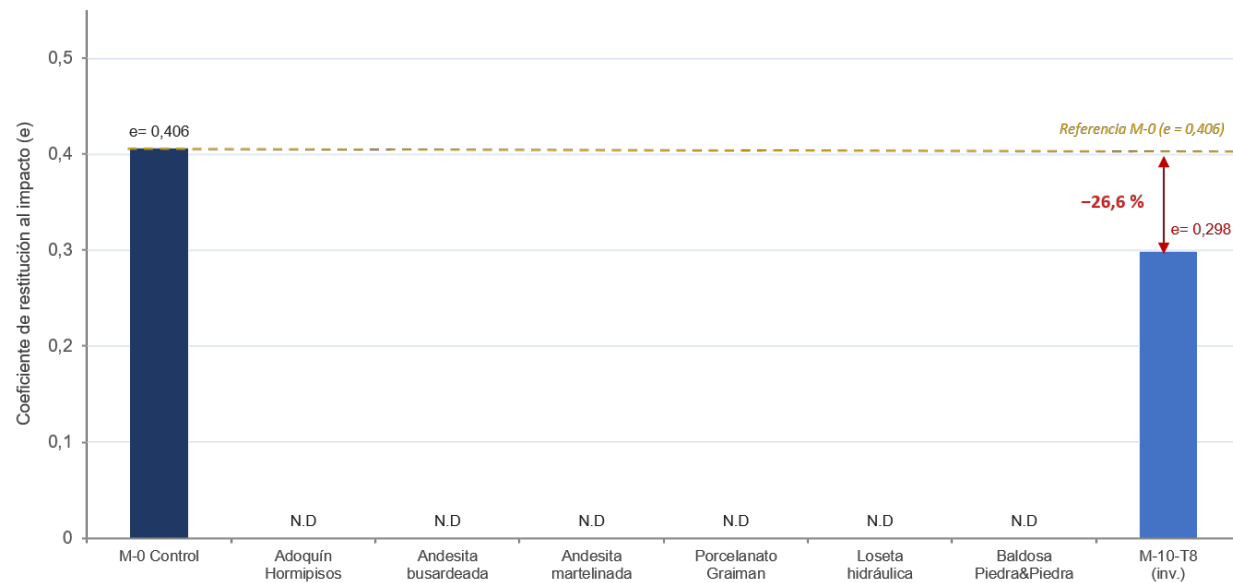
5.1.2.4 Coeficiente de restitución al impacto

M-10-T8 registra $e = 0,298$, una reducción del 26,6 % respecto a M-0 ($e = 0,406$). Esta propiedad no es evaluada por las normas de ninguno de los materiales del mercado ecuatoriano, incluyendo la baldosa Piedra & Piedra.

5.1.2.5 Posicionamiento de la baldosa Piedra & Piedra

La baldosa Piedra & Piedra es un material de pavimento peatonal consolidado en el mercado de Cuenca, especialmente valorado en proyectos institucionales. Frente a M-10-T8, presenta formato diferente (40×40 cm vs. 30×30 cm), precio de venta de \$24,00/m² frente al costo experimental de \$16,87/m², y declara resistencia al deslizamiento Clase 3 sin valor angular verificado. A diferencia de M-10-T8, no incorpora material reciclado y carece

Coeficiente de restitución al impacto (e)



N.D. = Dato no disponible.

Figura 109 Coeficiente de restitución al impacto (e) por material. Menor e = mayor absorción de energía de impacto. La línea de referencia indica el valor de M-0.

de datos de filtración e impacto. Ambos productos tienen aplicación en espacio público peatonal, aunque M-10-T8 ofrece datos técnicos completos bajo norma internacional.

5.1.2.6 Posicionamiento de la andesita martelinada

La andesita martelinada es el material de referencia institucional para el espacio público patrimonial de Cuenca. Frente a M-10-T8 ofrece mayor resistencia a la flexión (30 MPa vs. 4,54 MPa) y menor absorción (0,22 % vs. 3,33 %), pero su precio de venta (\$65,00/m²) es sustancialmente mayor, no incorpora contenido reciclado y no dispone de datos de deslizamiento húmedo verificados bajo DIN 51130.

5.1.3 Marco normativo comparado

Cada material se rige por una norma distinta, lo que imposibilita la comparación directa de todos

Tabla 36 Mapa de cumplimiento y atributos verificados por material.

los parámetros. El adoquín es el único con norma ecuatoriana específica (NTE INEN 3040:2016). Las andesitas aplican UNE-EN 1341; el porcelanato, ISO 10545; la loseta hidráulica y la baldosa Piedra & Piedra carecen de norma vigente en

Ecuador. No existe norma INEN equivalente a la UNE-EN 1339:2004 para baldosas de hormigón prefabricadas del tipo aquí investigado.

5.1.4 Mapa de cumplimiento y posicionamiento

Mapa de cumplimiento y atributos verificados por material

	Flexión normativa	Absorción normativa	Desliz. húmedo	Rebote impacto	Filtración 72h	Precio mercado	Contenido reciclado	Dato norma disp.
M-0 Control	✓	✓	✓	✓	✓	N.D.	N.D.	✓
Adoquín Hormipisos	✓	✓	N.D.	N.D.	N.D.	✓	N.D.	✓
Andesita busardeada	✓	✓	N.D.	N.D.	N.D.	✓	N.D.	N.D.
Andesita martelinada	✓	✓	N.D.	N.D.	N.D.	✓	N.D.	N.D.
Porcelanato Graiman	✓	✓	N.D.	N.D.	N.D.	✓	N.D.	✓
Loseta hidráulica	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	✓	N.D.	X
Baldosa Piedra&Piedra	✓	✓	✓	N.D.	N.D.	✓	N.D.	N.D.
M-10-T8 (inv.)	✓	✓	✓	✓	✓	N.D.	✓	✓

✓ Cumple / verificado

N.D. = No disponible – por tratarse de formulaciones experimentales sin precio comercial vigente

X Sin certificación

5.1.5 Síntesis y posicionamiento de M-10-T8

La formulación M-10-T8 no compite en el mismo nicho funcional que ninguno de los productos establecidos en el mercado. Cumple los requisitos de la Clase 1 de la UNE-EN 1339:2004 e introduce simultáneamente tres atributos que los materiales tradicionales no ofrecen de manera conjunta: (1) resistencia al deslizamiento húmedo de 42,8° (R13, +20,2 % sobre el control); (2) absorción de energía de impacto de $e = 0,298$ (-26,6 % respecto a M-0); y (3) incorporación de caucho NFU como componente reciclado.

En comparación con la baldosa Piedra & Piedra, M-10-T8 ofrece datos técnicos completos verificados bajo norma internacional, contenido de material reciclado y mayor resistencia al deslizamiento húmedo verificada. El precio experimental de \$16,87/m² es inferior al precio de venta de la baldosa Piedra & Piedra (\$24,00/m²), que hace que el costo de M-10-T8 sea competitivo.

La evaluación económica de la baldosa M-10-T8 se desarrolla en dos niveles. En primer lugar, se calcula el costo de materiales directos por m², que corresponde a los insumos físicos de la pieza, mostrados en la tabla. En segundo lugar, se elaboran Análisis de Precios Unitarios (APUS) en formato estándar ecuatoriano que incorporan mano de obra, equipos, encofrado, transporte e indirectos. Los jornales utilizados corresponden a los valores reales del mercado de Cuenca 2026: Albañil D2 \$4,39/h, Peón E2 \$4,34/h, Maestro Mayor C1 \$4,87/h y Operador de equipo liviano \$4,39/h. Los valores corresponden a la Estructura Ocupacional Sectorial N° 16 — Rama de la Construcción, publicada por el Ministerio del Trabajo del Ecuador, vigente para el año 2026 (Acuerdo Ministerial MDT-202X-XXX). Los precios de áridos se obtienen de los precios de volqueta del mercado: arena \$170,00/volqueta de 8 m³ = \$21,25/m³; ripio \$180,00/volqueta de 8 m³ = \$22,50/m³. Los

Tabla 37 Costo de materiales por m² de baldosa M-10-T8 — APU de elaboración, Cuenca, Ecuador, 2026
Nota. Los % del CD se calculan sobre el Costo Directo Total del APU de elaboración (\$14,30/m²).

rendimientos corresponden al proceso de fabricación artesanal registrado en el Capítulo 3.

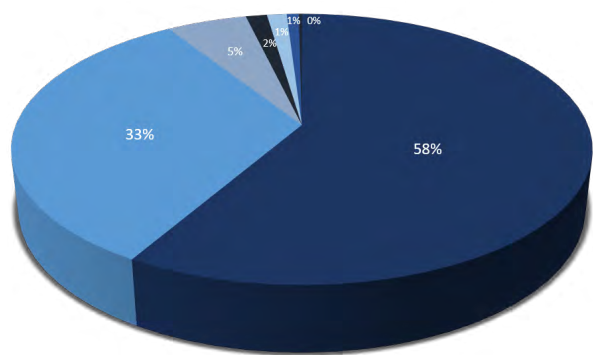
5.2.1 Costo de materiales directos por m²

La Tabla 37 detalla los materiales del APU de elaboración por metro cuadrado de baldosa M-10-T8 (300×300×50 mm), con cantidades, precios unitarios y costos por m². Se incluye el encofrado (tríplex 18 mm,

amortizado a 4 usos) y los tornillos. Los porcentajes se expresan sobre el Costo Directo Total del APU (\$14,30/m²). Los precios corresponden a cotizaciones verificadas en proveedores de Cuenca durante el primer trimestre de 2026: ferreterías locales de la ciudad (cemento Portland IP Holcim, encofrado tríplex y tornillos), Áridos y Agregados del Sur (arena de río y ripio triturado), ProCaucho y Continental Tire Andina (caucho NFU), y La Casa del Químico ALQUIMIA (hidróxido de sodio).

Costo material directo por m ²						
MATERIAL	ud.	CANTIDAD (por m ²)	P. UNITARIO (USD)	TOTAL (USD/m ²)	% del CD	OBSERVACIONES
Cemento Portland IP Holcim	saco	0,0578	\$0,159	\$0,01	0,07 %	Holcim IP — Cuenca 2026
Arena de río lavada	m ³	0,0035	\$21,25	\$0,07	0,49 %	Volqueta 8 m ³ / \$170,00
Ripio triturado 3/4"	m ³	0,0053	\$22,50	\$0,12	0,84 %	Volqueta 8 m ³ / \$180,00
Caucho NFU fracción T-8 (ProCaucho)	kg	1,2222	\$0,109	\$0,13	0,91 %	ProCaucho / Continental Tire Andina
Hidróxido de sodio NaOH (4 usos)	kg	0,3000	\$10,00	\$3,00	20,98 %	Pretratamiento superficial caucho
Agua	m ³	0,0092	\$0,60	\$0,01	0,07 %	Red pública
Encofrado (4 usos) — Tríplex 18 mm	m ²	0,3600	\$14,89	\$5,36	37,48 %	Amortizado a 4 usos / molde
Tornillos negros 1½" (12/molde, 4 usos)	u	36,0000	\$0,0135	\$0,49	3,43 %	Ensamble del molde
SUBTOTAL MATERIALES (por m² de baldosa M-10-T8)						\$9,19 / m²

Composición porcentual del costo de materiales por m²



- Encofrado — Tríplex 18 mm (4 usos) — \$5.36/m²
- Caucho NFU fracción T-8 (ProCaucho) — \$0.13/m²
- Cemento Portland IP Holcim + Agua — \$0.02/m²
- NaOH — Pretratamiento caucho (4 usos) — \$3.00/m²
- Tornillos negros 1½" (4 usos) — \$0.49/m²
- Ripio triturado ¾" — \$0.12/m²
- Arena de río lavada — \$0.07/m²
- NaOH — Pretratamiento caucho (4 usos) — \$3.00/m²
- Ripio triturado ¾" — \$0.12/m²

Figura 110 Composición del costo de materiales por m² — APU de elaboración M-10-T8. El encofrado (tríplex 18 mm) representa el 37,48% y el NaOH el 20,98% del Costo Directo Total.

Desglose del costo directo de fabricación

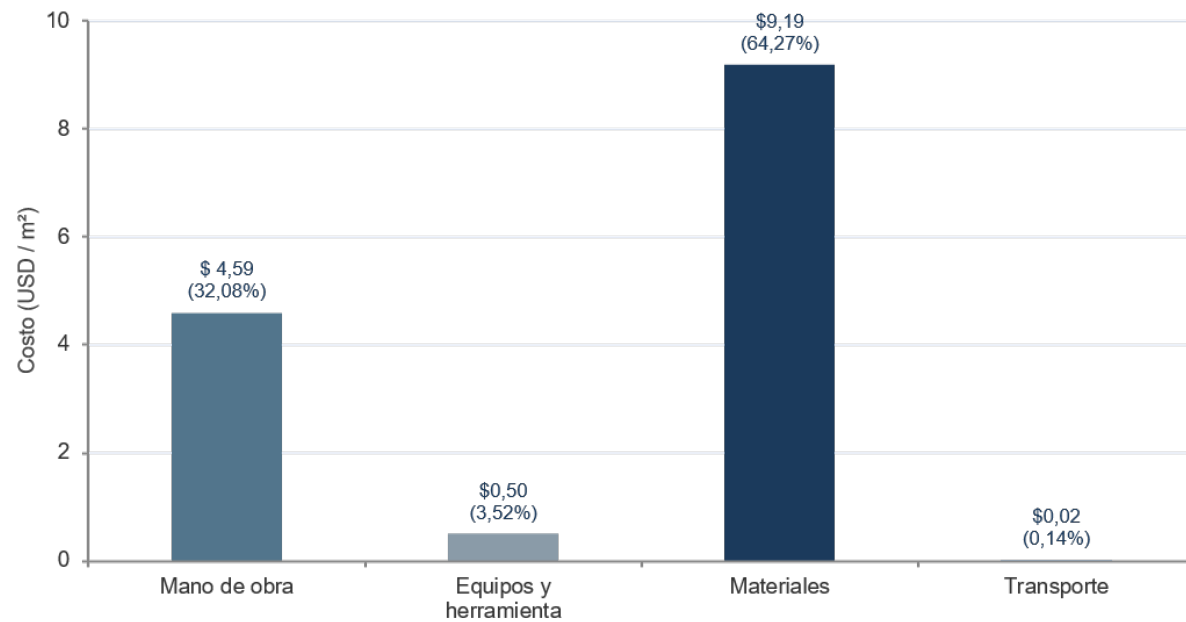


Figura 111 Desglose del costo directo APU de elaboración por componente. APU de elaboración M-10-T8 (CD = \$14,30 / m²).

5.2.2 APU de elaboración — Costo de fabricación por m²

El APU de elaboración integra mano de obra, equipos, materiales, transporte e indirectos para obtener el costo de fabricación completo por m² de baldosa M-10-T8. El rendimiento de fabricación (0,15 m²/h) fue registrado en el Capítulo 3. La Tabla 38 presenta el resumen por componente.

5.2.3 APUs de instalación — Costos por solución constructiva

Los APUs de instalación incorporan el costo completo de la baldosa M-10-T8 (\$16,87/m²) dentro del bloque de materiales E, dado que el costo por m² de pavimento terminado debe incluir el material que lo compone. Se elaboraron dos APUs, uno por cada solución constructiva. Los costos indirectos de instalación corresponden al 20% sobre los costos directos. Los APUs completos se presentan en el Anexo de este capítulo.

Costo de fabricación por m ²			
COMPONENTE — APU DE ELABORACIÓN M-10-T8	Subtotal (USD/m ²)	% del CD	Referencia
Mano de obra	\$4,59	32,08 %	Albañil D2 + Peón E2 + Operador eq. liviano
Equipos y herramienta	\$0,50	3,52 %	Herramienta menor + Concretera 1 saco
Materiales	\$9,19	64,27 %	Ver Tabla 37
Transporte	\$0,02	0,14 %	Acarreo de material — 5 km
TOTAL, COSTOS DIRECTOS (CD)	\$14,30	100 %	—
Costos indirectos 18 %	\$2,57		
VALOR DEL APU — ELABORACIÓN M-10-T8 / m²	\$16,87 / m²		

Costos por solución constructiva				
APU	DESCRIPCIÓN / SOLUCIÓN	CD (USD/m ²)	Incl. 20 % (USD/m ²)	VALOR TOTAL (USD/m ²)
02	Sol.1 — Cama de arena lavada 5 cm (nueva construcción, CBR ≥ 6%) Incluye baldosa M-10-T8 (\$16,87/m ²) + arena cama nivelante e=5 cm + sello de juntas	\$27,12	\$5,42	\$32,54
03	Sol.2 — Mortero seco 1:3 sobre losa de hormigón existente, e = 1–2 cm Incluye baldosa M-10-T8 (\$16,87/m ²) + mortero seco 1:3 e=2 cm (incl. transporte)	\$31,27	\$6,25	\$37,53

Tabla 38 Resumen APU de elaboración por m²: Fabricación de baldosa M-10-T8 (300×300×50 mm) — metodología 30/70

Nota. Jornales reales Cuenca 2026: Albañil \$4,39/h · Peón \$4,34/h. Sin maestro mayor en APU de fabricación. Concretera 1 saco: \$25,00/día ÷ 8h = \$3,125/h. Transporte solo del cemento: 0,4624 sacos × 5 km × \$0,08/saco/km = \$0,185/m². El APU de elaboración completo se presenta en los Anexos del Capítulo.

Costo total por m² según solución constructiva

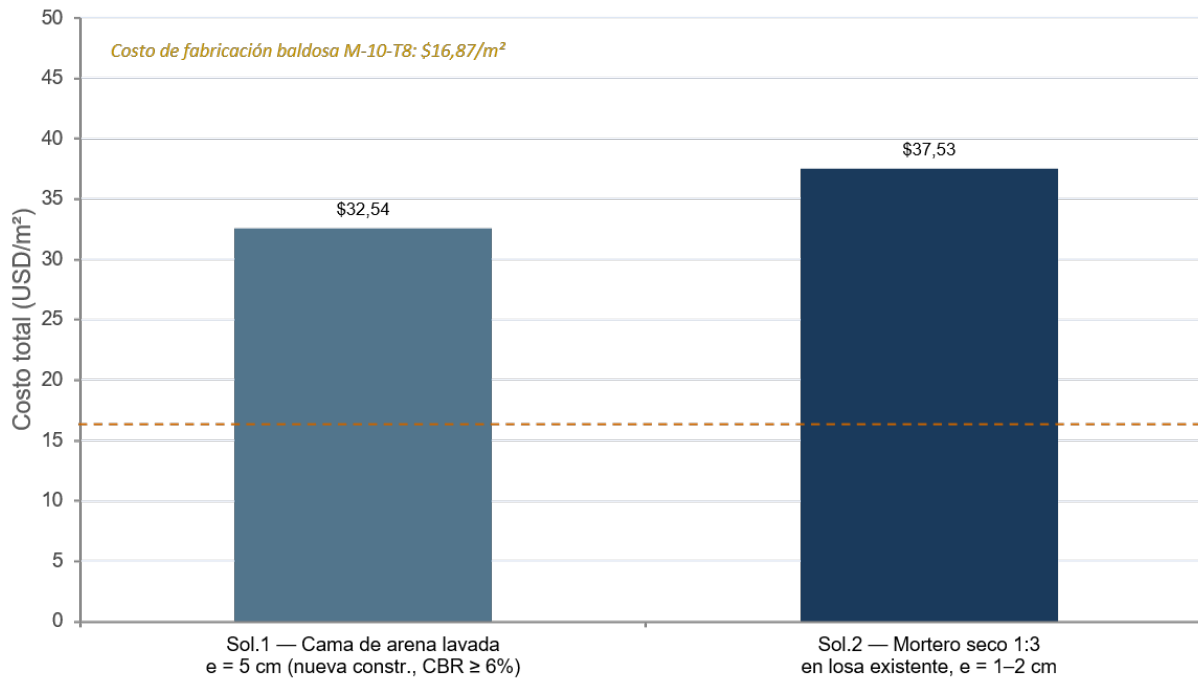


Tabla 39 Resumen APU de instalación de baldosa M-10-T8 — dos soluciones constructivas, incluye costo de fabricación. InterPro, Cuenca 2026. Nota. Ambos APUs de instalación incluyen el costo completo de la baldosa M-10-T8 (\$16,87/m²) en el bloque de materiales. Transporte de baldosas: : 1 m²/km × \$0,20 × 5 km = \$1,00/m². Costos indirectos del 20% sobre costos directos.,59/h (Sol.1), plancha compactadora \$4,64/h (Sol.3 y Sol.4). APUs completos en el Anexo de este capítulo.

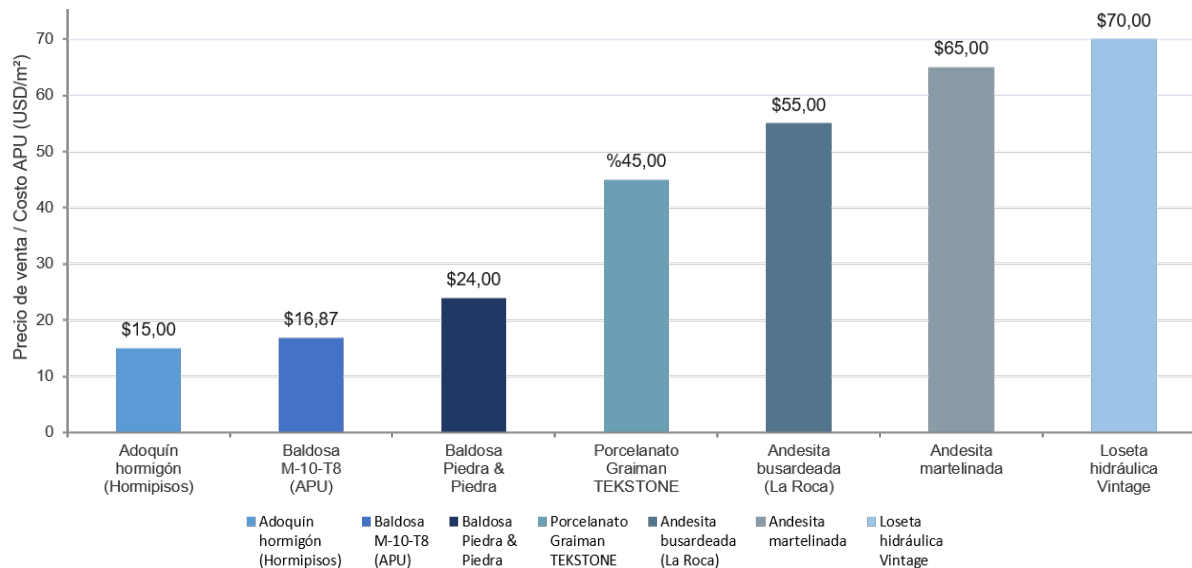
Figura 112 Costo total por m² según solución constructiva, incluyendo fabricación de baldosa M-10-T8. Sol.1 = \$32,54/m² (cama arena lavada 5 cm); Sol.2 = \$37,53/m² (mortero seco e=1-2 cm). Línea naranja = costo de fabricación (\$16,87/m²).

5.2.4 Comparación de precios con materiales del mercado

La Tabla 40 presenta el precio de venta al público por metro cuadrado de los siete materiales del análisis comparativo (sección 5.1), comparado con el costo APU de elaboración de M-10-T8. Es importante precisar que los precios de mercado de los materiales comparados son precios de venta al público que ya incluyen todos los costos del fabricante y su margen comercial del fabricante, mientras que el APU de elaboración de M-10-T8 es un costo de producción experimental en laboratorio, sin margen comercial.

Tabla 40 Precio de venta por m² — materiales del mercado y M-10-T8 — Cuenca, Ecuador, 2026
 Nota. Precios verificados en distribuidores de Cuenca, primer trimestre 2026. Se presenta el precio de venta al público como valor único de referencia. Tomado de Hormipisos / Disensa Ecuador (2026); La Roca / Fábrica Orellana (2026); Petra Internacional (2026); Graitman Cía. Ltda. (2026); Piedra & Piedra Cuenca (2026).

Comparación de precios con materiales del mercado			
MATERIAL	Precio de venta (USD/m ²)	Fabricante / Distribuidor	Observaciones
Adoquín hormigón (Hormipisos)	\$15,00	Hormipisos / Disensa Cuenca	Precio venta al público, Cuenca 2026
Andesita busardeada (La Roca)	\$55,00	Fáb. Orellana / La Roca Cuenca	Precio máximo según espesor y acabado
Andesita martelinada (P. Calderón / C. Histórico)	\$65,00	Canteras / Petra Internacional	Material obra pública patrimonial 2026
Porcelanato exterior (Graitman TEKSTONE)	\$45,00	Graitman — distribuidores nacionales	Requiere adhesivo especializado
Loseta hidráulica Vintage (Hormipisos)	\$70,00	Hormipisos Cía. Ltda. Cuenca	Precio máximo, alta variabilidad por diseño
Baldosa Piedra & Piedra (Arq. F. Piedra)	\$24,00	Piedra & Piedra — Cuenca	Baldosa hormigón arquitectónico granillo lavado 40×40 cm
Baldosa M-10-T8 (presente investigación)	\$16,87 / m ² (APU de elaboración, costo de producción experimental en laboratorio, sin margen comercial — no precio de venta al mercado)		

Comparación precio de venta por m² - materiales del mercado vs M-10-T8

5.2.5 Análisis y posicionamiento económico

Sobre el costo de fabricación. El valor de \$16,87/m² posiciona a M-10-T8 por encima del adoquín de hormigón Hormipisos (\$15,00/m²) en apenas \$1,87/m², y por debajo de todos los demás materiales analizados, incluida la baldosa Piedra & Piedra (\$24,00/m²). En producción industrial mecanizada, con moldes metálicos de mayor durabilidad y

reutilización de la solución de NaOH, el costo se reduciría significativamente.

Sobre el APU de elaboración de fabricación experimental. Los costos varían entre \$31,74/m² (Sol.1, cama de arena lavada) y \$43,03/m² (Sol.3, material de mejoramiento). Frente a materiales del mercado como la andesita busardeada (\$55,00/m²) o la loseta hidráulica (\$70,00/m²), cuyo precio

no incluye instalación, M-10-T8 instalada resulta ampliamente competitiva.

Sobre el posicionamiento de mercado. La solución Sol.1 (\$32,54/m²) es la más económica y adecuada para espacios públicos de nueva construcción con CBR ≥ 6%, contexto frecuente en los proyectos de regeneración urbana del cantón Cuenca. La solución Sol.2 (\$37,53/m²) corresponde a intervenciones de rehabilitación sobre losa existente. El componente de mayor incidencia en ambos APUs de instalación es la propia baldosa M-10-T8 (\$16,87/m²), que representa entre el 45% y el 52% del costo total.

Síntesis. M-10-T8 presenta competitividad en costo de materiales directos y un costo de producción experimental en laboratorio, sin margen comercial comparable al rango del mercado local. La ruta hacia la competitividad plena en precio de venta requiere mecanización de la producción y reutilización de la solución de NaOH entre lotes, factores que no dependen de la formulación sino de la inversión en equipamiento industrial.

La presente sección desarrolla las condiciones técnicas de instalación de la baldosa M-10-T8 en el espacio público peatonal, con especial atención a las situaciones constructivas que requieren soluciones específicas: juntas entre piezas, elementos de confinamiento, encuentros con pavimentos existentes, cambios de nivel, rampas de accesibilidad y sistemas de drenaje pluvial. Todos los detalles se desarrollan con referencia a las normas técnicas ecuatorianas e internacionales aplicables.

5.3.1 Sistema de juntas

La instalación de la baldosa M-10-T8 contempla dos tipos de juntas: la junta de colocación entre piezas adyacentes, y la junta de dilatación que absorbe los movimientos diferenciales del pavimento por temperatura y cargas.

Junta de colocación (3–5 mm):

- El ancho de la junta de colocación entre baldosas adyacentes debe ser de 3 a 5 mm, mantenido uniformemente mediante separadores de plástico

durante la instalación.

- El relleno de la junta se realiza con arena fina seca (sin finos plásticos), extendida sobre el pavimento terminado y barrida para que penetre en las juntas. Se completa con una pasada de compactador de placa para asentar.
- La arena de sello actúa como elemento de trabazón entre piezas y permite el paso de agua al sustrato sin crear presión de poros.

Junta de dilatación (10–15 mm, cada 4–5 m):

- Se disponen juntas de dilatación transversales y longitudinales cada 4 a 5 m de longitud de pavimento para absorber movimientos térmicos.
- El relleno es un perfil de polietileno expandido con sellador de poliuretano en la parte superior, que garantiza impermeabilidad sin restringir el movimiento.
- Las juntas de dilatación deben coincidir con las juntas estructurales del sustrato cuando este es una losa de hormigón.

Notas Generales

- Las juntas permiten absorber movimientos por contracción, dilatación, y cambios térmicos.

- Utilizar arena fina y seca para el sellado de juntas de colocación y borde.
- La junta de dilatación debe ser continua y atravesar toda la capa de acabado
- Profundidad mínima de sello en juntas: 10-15 mm.

Figura 113 Comparación de precio de venta por m² entre materiales del mercado y M-10-T8. El costo APU de elaboración de M-10-T8 (\$16,87/m²) es referencial experimental; no corresponde a un precio de venta al mercado.

Sistema de juntas - Baldosa M- 10-T8

(b) Junta de colocación
2-3 mm con arena de sello

(c) Junta de dilatación
Espacio libre cada 4-5 m

(a) Detalle de borde y
sello de junta

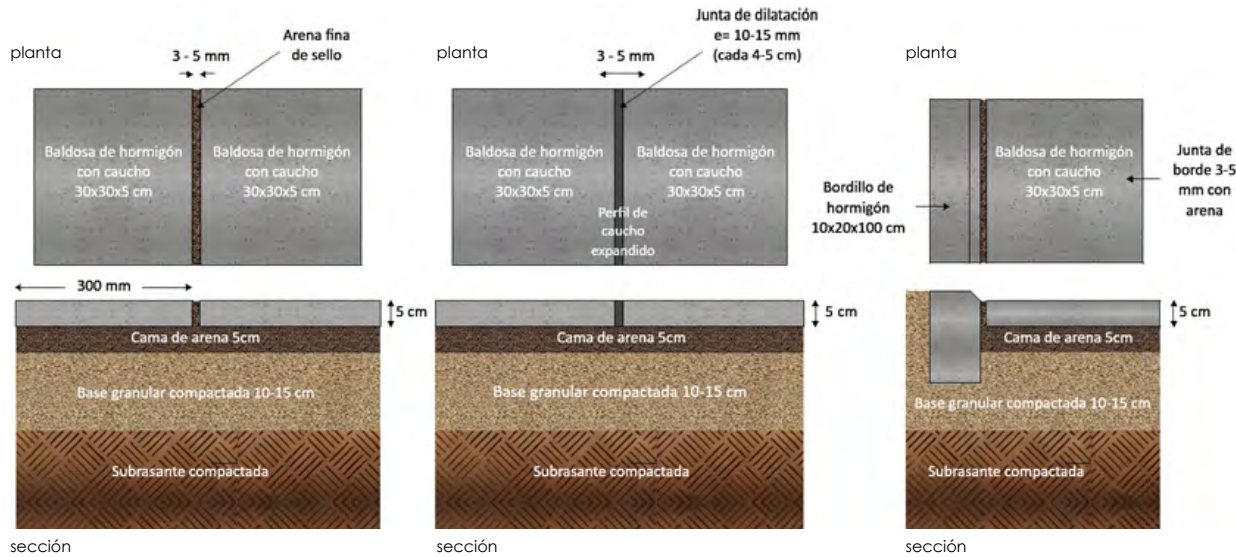


Figura 114 Sistema de juntas de la baldosa M-10-T8: (a) junta de colocación 3-5 mm con arena de sello; (b) junta de dilatación con perfil de polietileno expandido; (c) detalle de encuentro con bordillo.

5.3.2 Elementos de confinamiento lateral

El confinamiento lateral es fundamental para mantener la estabilidad del pavimento prefabricado y evitar el desplazamiento de las piezas.

Con bordillo de hormigón (solución estándar):

- El bordillo de hormigón prefabricado o moldeado in situ de sección mínima 10x20x100cm, fabricado con $f'c \geq 18$ MPa, actúa como elemento de confinamiento rígido que impide el desplazamiento lateral del pavimento.
- El bordillo se instala y cura antes de la colocación de la base granular y la baldosa, dejando el nivel de acabado superior al nivel de la cara vista de la baldosa.
- La junta entre la baldosa y el bordillo es de 3-5 mm con arena de sello, igual que las juntas entre piezas.

NOTAS GENERALES:

- Los bordes laterales deben estar firmemente

confinados para evitar desplazamiento.

- Asegurar pendientes transversales mínimas 1-2 % para el drenaje de agua lluvia.
- Cumplir con la normativa local vigente y requisitos de accesibilidad (NTE INEN 2245:2016).

5.3.3 Encuentros con pavimento existente y cambios de nivel

En intervenciones de rehabilitación o ampliación de pavimento, la baldosa M-10-T8 puede encontrarse con superficies de pavimento existente (losa de hormigón, asfalto, adoquín) y con cambios de nivel. Cada situación requiere un tratamiento diferenciado.

Encuentro con losa de hormigón existente:

- Se dispone una junta de dilatación de 10–15 mm con una profundidad máxima de 30 cm entre la baldosa y la losa existente, rellena con perfil de polietileno expandido y sellador de poliuretano.

Figura 115 Elementos de confinamiento lateral: (a) con bordillo de hormigón 20x20 cm; (b) borde libre con base granular sobresaliente compactada.

- La cama de arena se inicia a partir del borde de la losa. Si la losa tiene nivel distinto a la baldosa, se ajusta el espesor de la cama de arena.
- No se debe apoyar directamente la baldosa sobre el borde de la losa sin junta: la diferencia de rigidez genera fisuras en la baldosa por movimiento diferencial.

Cambio de nivel > 15 cm:

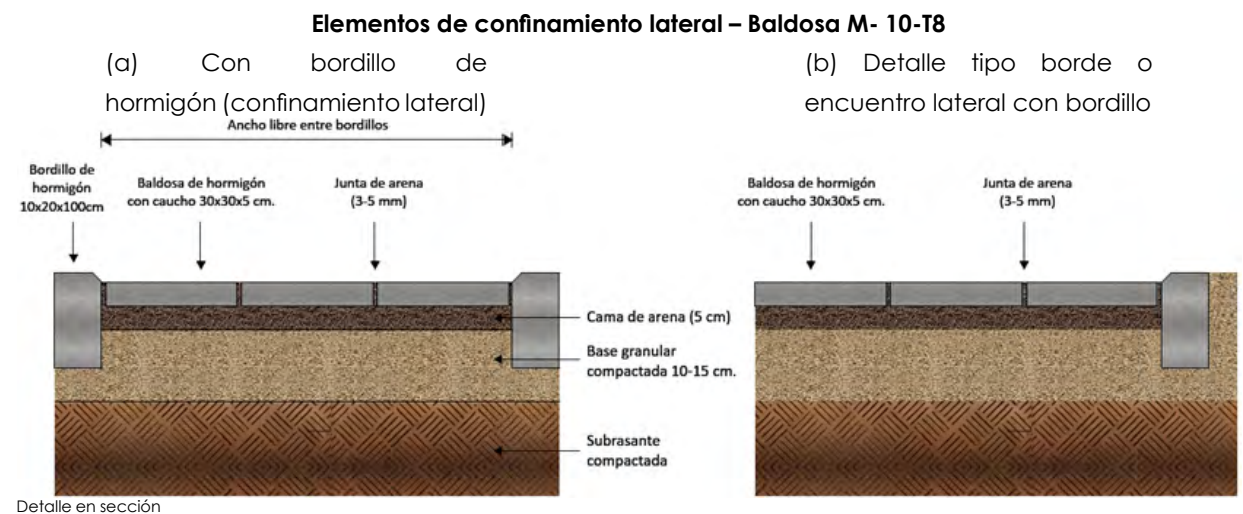
- Los cambios de nivel superiores a 15 cm requieren un escalón de hormigón $f'c \geq 21$ MPa,

con profundidad mínima de 30 cm, que sirva de transición entre los dos niveles.

- La baldosa del nivel inferior apoya sobre la base y cama de arena habitual; la del nivel superior también. El escalón de hormigón actúa como confinamiento lateral simultáneo de ambos paños.

NOTAS GENERALES:

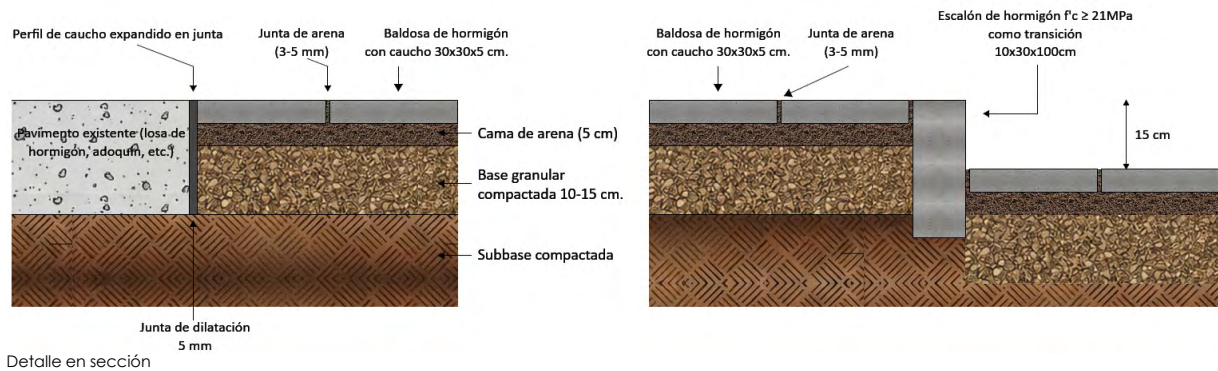
- Asegurar que todos los bordes de las baldosas estén firmemente confinados.
- Mantener juntas limpias y libres de material para



Encuentros con pavimento existente y cambios de nivel – Baldosa M- 10-T8

(a) Encuentro baldosa – losa existente (junta de dilatación)

(b) Cambio de nivel ≥ 15 cm (escalón de hormigón)



Detalle en sección

NOTA:

La junta de dilatación debe mantenerse libre de materiales rígidos y sellarse con material flexible

NOTA:

Diferencias de nivel ≥ 15 cm deben resolverse con escalón de hormigón con una profundidad mínima de 30 cm para garantizar estabilidad y durabilidad

permitir movimiento y drenaje.

- Cumplir con la normativa local vigente y requisitos de accesibilidad (NTE INEN 2245:2016).
- Verificar pendientes y niveles para evitar acumulación de agua.

5.3.3b Aplicación en gradas exteriores

La baldosa M-10-T8 puede utilizarse en dos situaciones distintas de gradas exteriores en espacios públicos peatonales. La primera corresponde al revestimiento de gradas existentes, donde la baldosa se aplica en la huella (superficie horizontal de cada peldaño) y en la contrahuella (superficie vertical) sobre la estructura de hormigón ya construida. La segunda corresponde a la conformación de gradas nuevas sobre terreno natural, donde la contrahuella se resuelve mediante un bordillo de hormigón que actúa como elemento de confinamiento del material

Figura 116 Encuentros y cambios de nivel: (a) junta de dilatación entre baldosa y losa existente; (b) cambio de nivel > 15 cm con escalón de hormigón.

de mejoramiento compactado, y la huella se construye con la baldosa M-10-T8 asentada sobre una cama de arena nivelante. En ambas situaciones, la clasificación R13 de la baldosa la convierte en una de las superficies con mayor adherencia en condiciones húmedas del conjunto analizado, propiedad especialmente relevante en gradas expuestas a lluvia en la zona continental ecuatoriana.

Los parámetros dimensionales se rigen por la NTE INEN 2245:2016 — Accesibilidad al Medio Físico. La relación entre huella y contrahuella debe cumplir: $2h + H = 60$ a 64 cm, donde h = contrahuella y H = huella.

NOTAS GENERALES:

- Todas las capas granulares deben estar compactadas según especificaciones del proyecto.
- Asegurar pendiente mínima 1% hacia sistema de drenaje para evacuación de aguas lluvia.
- Verificar dimensiones y relación de gradas según

Figura 117 Aplicación de la baldosa M-10-t8 en gradas exteriores

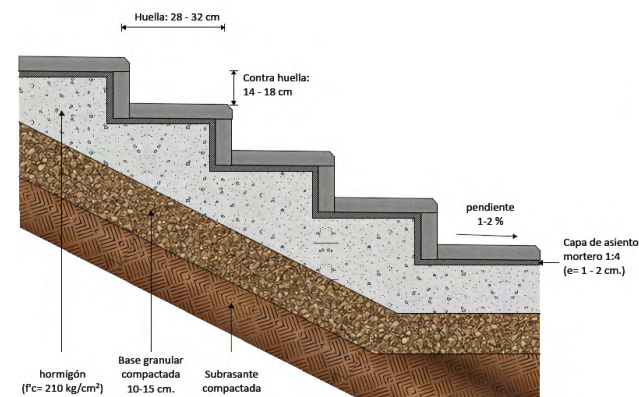
NTE INEN 2245:2016 ($2h + H = 60 - 64$ cm.)

- Corte en seco + disco para hormigón.
- Nariz de peldaño: biselar o redondear al borde frontal con amoladora.
- Juntas entre baldosas como revestimiento de

Aplicación de la baldosa M-10-T8 en gradas exteriores

(a) Sección longitudinal de revestimiento de grada exterior existente

Ancho mínimo 1.20 m



NTE INEN 2245:2016:

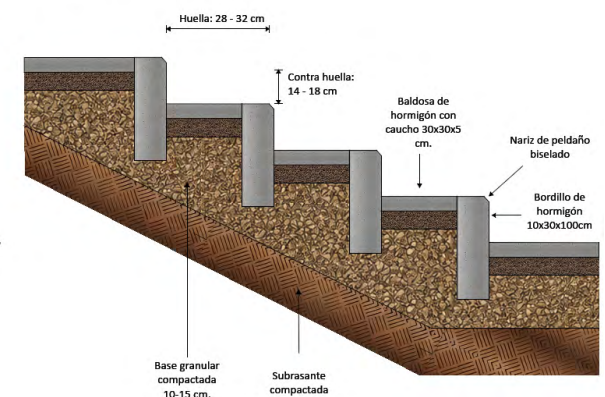
- Huella mínima 28 cm.
- Contrahuella 14 - 18 cm.
- Relación: $2h + H = 60 - 64$ cm.
- Ancho mínimo tramo: 1.20 m
- Nariz del peldaño: arista biselada o redondeada.

grada existente se debe realizar con mortero de cemento con arena fina (1:1)

- Juntas entre baldosas como revestimiento de grada conformadas con material de mejoramiento deben sellarse con arena fina y seca.

(b) Sección longitudinal de conformación de gradas sobre material de mejoramiento

Ancho mínimo 1.20 m



Corte de baldosas:

- La contrahuella debe resolverse con bordillo de hormigón con profundidad mínima de 30 cm.
- Nariz de peldaño: biselar o redondear al borde frontal con amoladora.

Dimensiones según NTE INEN 2245:2016

- Huella mínima: 28 cm (recomendado 30–32 cm en espacios públicos de alta concurrencia).
 - Contrahuella: 14–18 cm (recomendado 15–17 cm). Debe ser constante en todo el tramo.
 - Relación de comodidad: $2h + H = 60\text{--}64$ cm. Ejemplo: $h = 16$ cm, $H = 30$ cm $\rightarrow 62$ cm ✓
 - Ancho mínimo del tramo: 1,20 m. Deseable 1,50 m en espacios de concurrencia masiva.
- Secuencia constructiva—Solución 1: Revestimiento de grada existente (de abajo hacia arriba):
- Estructura de hormigón de la escalera existente: verificar integridad estructural y limpiar la superficie.
 - Cama de asiento con mortero de cemento y arena 1:4
 - Baldosa M-10-T8 en huella: asentada con mazo de goma sobre la cama de asiento, cortada a la medida exacta con amoladora en seco.
 - Baldosa M-10-T8 en contrahuella: cortada a la altura exacta de la contrahuella y fijada con mortero de cemento 1:4.
 - Nariz del peldaño: arista frontal biselada o

redondeada con amoladora para eliminar cantos vivos.

- Junta horizontal huella–contrahuella: sellador flexible de poliuretano, 3–5 mm.
 - Junta vertical entre baldosas de huella: arena fina seca, 3–5 mm.
- Secuencia constructiva — Solución 2: Conformación de grada nueva sobre terreno natural (de abajo hacia arriba):
- Terreno natural compactado al 95 % del Proctor Modificado.
 - Material de mejoramiento compactado por capas de máximo 15 cm, hasta alcanzar el nivel de cada peldaño.
 - Bordillo de hormigón $f'c \geq 21$ MPa como contrahuella: actúa simultáneamente como elemento de confinamiento del material de mejoramiento y como frente vertical del peldaño. Dimensiones mínimas: ancho 10 cm, altura mínima 30 cm.
 - Cama de arena lavada nivelada sobre cada huella: espesor 5 cm.
 - Baldosa M-10-T8 en huella: asentada con mazo

de goma sobre la cama de arena, cortada a la medida exacta con amoladora en seco.

- Nariz del peldaño: arista frontal de la baldosa biselada o redondeada con amoladora.
 - Junta entre baldosa y bordillo de hormigón: sello de arena fina seca 3–5 mm.
 - Junta vertical entre baldosas de huella: arena fina seca, 3–5 mm.
- Pasamanos (NTE INEN 2245:2016):
- Obligatorios en ambos lados. Altura: 0,90 m y 0,70 m desde la nariz del peldaño. Prolongación horizontal mínima de 30 cm al inicio y final del tramo.
- Corte y perforación de baldosas en obra:
- Usar corte seco con amoladora y disco de hormigón.
 - ✓ Distancias mínimas al borde para perforación de anclaje de pasamanos: $\varnothing 4$ mm $\geq 1,0$ cm; $\varnothing 8$ mm $\geq 1,5$ cm; $\varnothing 12$ mm $\geq 2,0$ cm (ver sección 5.4).

5.3.4 Rampas de accesibilidad universal

La clasificación R13 de la baldosa M-10-T8 (42,8°

en DIN 51130, condición húmeda) la convierte en el material del conjunto analizado con mayor resistencia al deslizamiento verificada en condiciones de lluvia. Esta propiedad la hace especialmente adecuada para rampas de accesibilidad universal en la zona lluviosa continental ecuatoriana, donde la seguridad en superficie mojada es crítica. La NTE INEN 2245:2016 — Accesibilidad al Medio Físico. Rampas fijas — establece los parámetros de diseño aplicables en Ecuador. La baldosa M-10-T8 cumple con todos los requisitos técnicos de la norma para superficies de rampas exteriores.

NOTAS GENERALES:

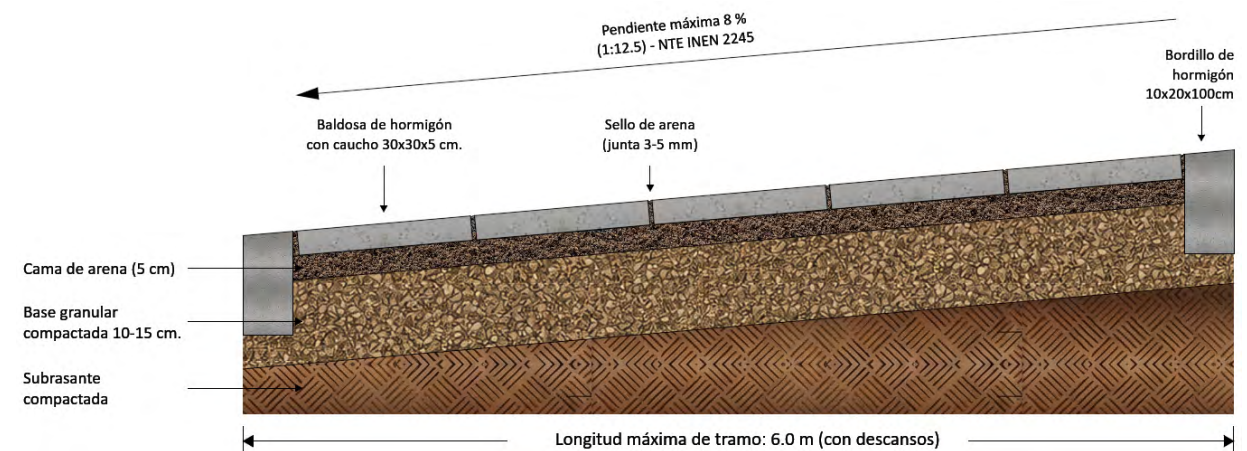
- Todas las capas granulares deben estar compactadas según especificaciones del proyecto.

Figura 118 Rampas de accesibilidad: (a) sección longitudinal con pendiente 8 % máximo según NTE INEN 2245:2016; (b) tabla de clasificación de pendientes vs. seguridad de la superficie M-10-T8 clasificación R13. En base en NTE INEN 2245:2016 y resultados experimentales DIN 51130.

- Utilizar sello de arena para impedir el deslizamiento de la baldosa.
- Verificar longitud de tramos y descansos conforme a NTE INEN 2245:2016.

- Materiales y ejecución conforme a normativa vigente.

Aplicación de la baldosa M-10-T8 en gradas exteriores



Bordillo de confinamiento:

- Se debe colocar bordillos de confinamiento de hormigón tanto en los bordes como en los laterales.

Descansos:

- Los tramos de rampa deben tener longitud máxima de 6.0 m.
- Cada tramo debe terminar en un descanso horizontal de mínimo 1.20 m de longitud.

Parámetros de diseño — NTE INEN 2245:2016:

- Pendiente longitudinal máxima: 8 % (1:12,5) para rampas de uso general. Hasta 10 % en tramos cortos con descanso. Excepcionalmente hasta 12 % en espacios existentes con restricciones físicas.
- Ancho libre mínimo: 1,20 m. Deseable 1,50 m para circulación simultánea de dos sillas de ruedas.
- Longitud máxima sin descanso: 6,0 m. Al final de cada tramo se dispone una plataforma de descanso de dimensiones mínimas 1,50 × 1,50 m.
- Barandas: obligatorias en ambos lados a 0,90 m y 0,70 m de altura desde el nivel de la superficie, con

continuación horizontal de 30 cm en los extremos.

- Señalización: franja podo táctil de alerta (superficie de puntos en relieve) de 60 cm de ancho al inicio y final de la rampa.

Compatibilidad de M-10-T8 con rampas:

- La clasificación R13 (42,8°) en condición húmeda garantiza que la baldosa es segura para rampas de hasta 12 % de pendiente, superando el máximo normativo de 8 % con amplio margen.
- La textura superficial de la cara vista, generada por la micro-rugosidad del caucho NFU aflorante,

proporciona la resistencia al deslizamiento en condición húmeda sin necesidad de tratamiento adicional.

- Se recomienda orientar el sentido de colocación de las baldosas con la junta transversal perpendicular a la dirección de la rampa, para que las juntas actúen como micro-resaltos de retención adicional.

Nota:

La baldosa M- 10- T8 (R13 – 42.8°) cumple con los requisitos de resistencia al deslizamiento para rampas accesibles (hasta 8%) según NTE INEN 2245:2016

Tabla 41 Rampas de accesibilidad: (a) sección longitudinal con pendiente 8 % máximo según NTE INEN 2245:2016; (b) tabla de clasificación de pendientes vs. seguridad de la superficie M-10-T8 clasificación R13. Fuente: elaboración propia con base en NTE INEN 2245:2016 y resultados experimentales DIN 51130.

Clasificación de pendiente vs. Resistencia al deslizamiento			
Pendiente (%)	Clasificación	R13 M- 10- T8	Norma
≤ 2 %	Plano – acera	✓ Seguro	Cualquier norma
2 – 5 %	Suave - sendero	✓ Seguro	Exterior estándar
5 – 8 %	Rampa accesible	✓ Seguro	NTE INEN 2245
8 – 10 %	Rampa máxima con descanso	✓ Seguro	NTE INEN 2245 (c/des.)
10 – 12 %	Uso excepción. Tramos cortos	✓ Seguro	Con barandas
> 12 %	No recomendado rampa accesible	X no seguro	Fuera de norma de acceso

5.3.5 Canales de agua lluvia y drenaje superficial

El nivel de impermeabilidad superficial de la baldosa M-10-T8 (Nivel 0 en el ensayo de filtración a 72 h) implica que el agua de lluvia no penetra a través de la pieza, sino que escurre por la superficie. Por ello, el diseño del pavimento debe contemplar pendientes mínimas de drenaje hacia canales o sumideros para evitar acumulación de agua.

NOTAS GENERALES:

- Todas las capas granulares deben estar compactadas según especificaciones del proyecto.
- Asegurar pendiente mínima hacia soluciones de sistema de drenaje para evacuación de aguas lluvia.
- Utilizar sello de arena para impedir el deslizamiento de la baldosa.
- Las rejillas y canales deben instalarse al ras del pavimento para garantizar accesibilidad y seguridad.
- Materiales y ejecución conforme a normativa.

Pendientes de evacuación:

- La pendiente transversal mínima del pavimento debe ser 1,0–2,0 % para garantizar la evacuación eficiente del agua de lluvia hacia el canal o borde de drenaje.
- En espacios amplios (plazas, parques), se recomienda pendiente del 1,5 % hacia sumideros centrales o perimetrales dispuestos cada 15–20 m.

Canal lineal prefabricado:

- El canal de agua lluvia se integra al pavimento como una franja de drenaje de 15–20 cm de ancho, con profundidad de 10–15 cm, protegida con rejilla desmontable metálica o de polímero reforzado.
- La junta entre la baldosa y el canal debe ser de 2–3 mm con arena de sello o sellador flexible que permita la dilatación diferencial.
- El canal debe tener una pendiente longitudinal mínima del 1,0 % hacia el punto de descarga o conexión con la red de alcantarillado pluvial.

Sumidero puntual:

- El sumidero puntual se ubica en el punto más bajo del pavimento. Las baldosas adyacentes al sumidero se cortan con sierra de diamante en húmedo para ajustar la geometría.
- El sumidero debe estar al mismo nivel que la cara vista de la baldosa para evitar acumulación de agua en los bordes. Se recomienda sumideros con rejilla anti atrapamiento según NTE INEN.

5.3.6 Tabla de condiciones constructivas — Resumen

Soluciones de drenaje pluvial. Baldosa M-10-T8

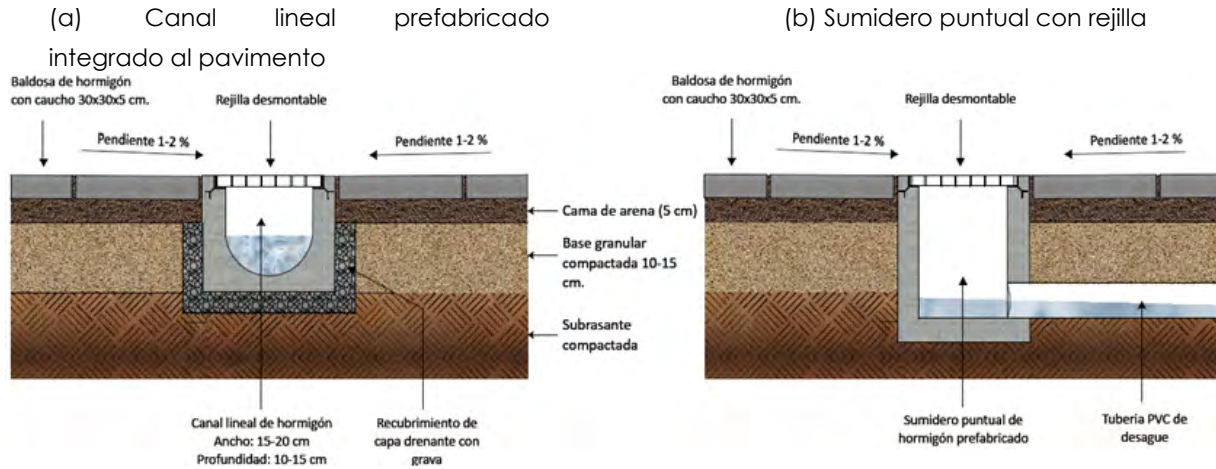


Figura 119 Soluciones de drenaje pluvial: (a) canal lineal prefabricado con rejilla desmontable integrado al pavimento; (b) sumidero puntual con rejilla en punto bajo.

Condiciones constructivas				
DETALLE CONSTRUCTIVO	Parámetro	Valor recomendado	Norma / ref.	Observación
Junta de colocación	Ancho de junta	2-3 mm	UNE-EN 1339:2004	Relleno con arena fina seca
Junta de dilatación	Ancho / Separación	10-15 mm / cada 4-5 m	ACI 360R / práctica	Perfil de polietileno expandido
Pendiente transversal mínima	Para evacuación de agua	1,0-2,0 %	NTE INEN 2245:2016	Hacia borde libre o sumidero
Cama de arena nivelante	Espesor	3-5 cm (APU-02/04/05)	UNE-EN 1339:2004	Arena lavada, sin finos plásticos

Tabla 42 Condiciones constructivas de instalación de la baldosa M-10-T8. *Nota.* Fuentes normativas basadas en UNE-EN 1339:2004 — Baldosas de hormigón; NTE INEN 2245:2016 — Accesibilidad al Medio Físico: Rampas fijas; MTOP — Manual de Especificaciones Generales para Construcción de Caminos y Puentes (pavimentos peatonales); ANDECE (2014) — Guía Técnica de Pavimentos con Adoquines de Hormigón.

Compactación cama de arena	Método	Mazo de goma o compactador de placa	ANDECE guía adoquines	No usar vibración directa sobre baldosa
Base granular	CBR mínimo / Espesor	CBR \geq 30% / 10–20 cm	MTOP — especific. peatonal	Compactar al 95 % Proctor Mod.
Rampa de accesibilidad	Pendiente máxima	8 % (1:12,5) — 10 % con descanso	NTE INEN 2245:2016	R13 seguro hasta 12 % en húmedo
Rampa de accesibilidad	Ancho mínimo libre	1,20 m	NTE INEN 2245:2016	Con baranda a 0,90 m y 0,70 m de altura
Rampa de accesibilidad	Longitud máxima sin descanso	6,0 m	NTE INEN 2245:2016	Descanso mínimo 1,50x1,50 m
Bordillo de confinamiento	Sección mínima	20x20 cm	Práctica constructiva	Hormigón f'c \geq 18 MPa
Cambio de nivel \leq 2 cm	Solución	Chaflán o bisel en borde de pieza	NTE INEN 2245:2016	Sin escalón brusco accesible
Cambio de nivel $>$ 2 cm	Solución	Escalón de hormigón f'c \geq 21 MPa	Práctica constructiva	Ancho escalón \geq 30 cm
Canal de agua lluvia	Pendiente mínima canal	1,0 %	Hidráulica pluvial	Canal prefabricado o sumidero puntual

5.3.7 Normas de seguridad y equipo de protección personal (EPP)

La fabricación e instalación de la baldosa M-10-T8 involucra el manejo de hormigón fresco, hidróxido de sodio (NaOH) en solución al 10 %, caucho granulado y herramienta de obra. El siguiente protocolo de EPP es obligatorio para todos los operarios durante el proceso de producción e instalación, de acuerdo con las normas de seguridad y salud ocupacional ecuatorianas.

NOTA — Baldosa con capa superficial de caucho termo fusionado (BT):

La variante con capa superficial de caucho termo fusionado (Fase II de la investigación) contempla una capa de 0,5–1,0 cm de espesor aplicada sobre la cara vista de la baldosa M-10-T8 mediante el proceso de termofusión con imprimación Sikadur® 32 Primer. Las condiciones de instalación de esta variante son equivalentes a las de la baldosa M-10-T8 estándar, con la siguiente diferencia en el

Normas de seguridad y equipo de protección personal			
ELEMENTO	DESCRIPCIÓN	APLICACIÓN	NORMA DE REFERENCIA
Casco de seguridad	Casco dieléctrico clase E — color blanco (jefe de obra)	Fabricación y colocación en obra	NTE INEN-ISO 3873:2013
Guantes de trabajo	Guantes de cuero o látex antideslizantes — resistentes a abrasión	Fabricación, mezcla de mortero y colocación	NTE INEN 1837:2014
Calzado de seguridad	Botas con punteras de acero y suela antideslizante	Todo el proceso de fabricación e instalación	NTE INEN 1926:2014
Gafas de protección	Gafas de seguridad panorámicas — resistentes a impacto	Fabricación, corte y compactación	NTE INEN-ISO 16321:2010
Mascarilla respiratoria	Mascarilla FFP2/N95 — protección contra polvo de hormigón y caucho	Mezcla de NaOH, caucho y hormigón; corte con amoladora	NTE INEN-ISO 16900:2018
Protección auditiva	Tapones auditivos NRR \geq 25 dB o orejeras NRR \geq 30 dB	Uso de concretera, amoladora y compactadora vibrante	NTE INEN-ISO 4869:2010
Guantes NaOH	Guantes de nitrilo largo — resistentes a álcalis hasta 10 % (2400)	Pretratamiento del caucho con NaOH 10 %	OSHA 29 CFR 1910.138 / INEN
Chaleco de alta visibilidad	Chaleco reflectante clase 2 — colores flúor	Instalación en espacio público	NTE INEN 2825:2013

sistema de juntas: dado que la capa de caucho superficial es flexible, la junta entre baldosas BT puede rellenarse con caucho granulado compactado en lugar de arena de sello, generando una junta continua del mismo material que la superficie. Esta variante se encuentra en fase experimental y su inclusión en la ficha técnica queda condicionada a la aprobación de la tutora de tesis.

Tabla 43 Equipo de Protección Personal (EPP) requerido — Fabricación e instalación de baldosa M-10-T8. Nota. El NaOH al 10 % es un álcali fuerte que puede causar quemaduras químicas en piel y ojos. Su manejo requiere guantes de nitrilo largos, gafas panorámicas y lavado inmediato con agua abundante en caso de contacto. La zona de pretratamiento debe estar ventilada. Fuentes: NTE INEN 2266:2013 — Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos; Reglamento del Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo (Decisión 584 CAN).

La presente sección documenta los ensayos de mecanización realizados sobre la baldosa M-10-T8, con el objetivo de establecer las condiciones seguras para las operaciones más habituales en obra: perforaciones, clavado y corte. Adicionalmente se presentan las medidas reales obtenidas con pie de rey sobre la baldosa de entrega, que permiten determinar las tolerancias dimensionales del proceso de producción experimental y la junta de colocación apropiada.

5.4.1 Perforaciones con broca para hormigón

Se realizaron perforaciones con brocas de tres diámetros (4, 8 y 12 mm), a tres distancias distintas del borde en cada caso, con tres repeticiones por distancia. El equipo utilizado fue un taladro eléctrico con broca de hormigón de marca calibrada, sin percusión, a velocidad media constante y profundidad de perforación de 3 cm. La distancia al borde se midió desde el centro de la perforación hasta la arista más próxima de la baldosa.

Perforación con broca para hormigón						
Ø broca	Distancia borde (cm)	Repeticiones (n=3)			Resultado	Distancia segura
Ø 4 mm	0,5	ROTURA	ROTURA	ROTURA	✗ Rotura	≥ 1,0 cm
	1,0	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	
	1,5	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	
Ø 8 mm	1,0	ROTURA	ROTURA	ROTURA	✗ Rotura	≥ 1,5 cm
	1,5	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	
	2,0	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	
Ø 12 mm	1,5	ROTURA	ROTURA	ROTURA	✗ Rotura	≥ 2,0 cm
	2,0	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	
	2,5	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	

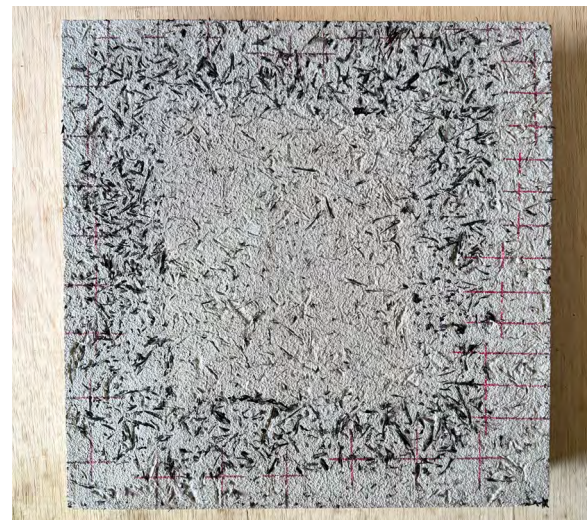




Tabla 44 Resultados de perforaciones por broca de hormigón —Baldosa M-10-T8} Nota. $n = 3$ repeticiones por distancia. BIEN = pieza sin trizaduras ni desprendimientos. ROTURA = fractura o trizadura que compromete la integridad de la arista. La distancia segura es el mínimo verificado con resultado BIEN en las 3 repeticiones.

Figura 120 Marcación de cuadrícula en superficie de la baldosa para definir puntos y distancias de perforación.

Figura 121 Perforación con broca de 4 mm a distancia insuficiente al borde (muestra #8)

Figura 122 Posicionamiento del taladro en el canto lateral de la baldosa a distancia crítica (muestra #8, M-20-T8)

Figura 123 Perforación con broca de 8 mm en zona cercana al borde con inicio de fisura

Figura 124 Rotura del borde por perforación a distancia insuficiente (astillamiento)

Figura 125 Perforación exitosa con broca de 12 mm a la distancia segura verificada

Figura 126 Retiro de fragmento de hormigón desprendido en zona de rotura del borde

Figura 127 Inserción de tornillo en perforación exitosa a la distancia adecuada

Figura 128 Vista lateral del tornillo correctamente anclado en perforación exitosa

Regla de perforación segura

La distancia mínima al borde depende directamente del diámetro de la broca: una broca de \varnothing 4 mm requiere al menos 1,0 cm; una de \varnothing 8 mm, al menos 1,5 cm; y una de \varnothing 12 mm, al menos 2,0 cm. Por fuera de estos límites la pieza resiste sin trizaduras en el 100 % de las repeticiones ensayadas. Dentro de los límites, se producen roturas sistemáticas en el borde.

5.4.2 Clavado con clavo de acero

Se ensayó el clavado con clavos de acero de 2" y 2½" a cuatro distancias distintas del borde, con tres repeticiones por distancia. El proceso fue el habitual en obra: martillo de carpintero, golpe progresivo, sin soporte en la cara inferior de la pieza.

Comportamiento al clavado

Figura 129 Vista cenital de la baldosa con el conjunto de perforaciones realizadas



Clavado con clave de acero					
Distancia borde (cm)	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Resultado	Observación
1,0	ROTURA	ROTURA	ROTURA	✗ Rotura	Fractura total del borde — clavo no penetra
2,0	ROTURA	ROTURA	ROTURA	✗ Rotura	Fractura y trizadura — borde comprometido
3,0	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	Clavo penetra sin trizaduras — distancia mínima segura
4,0	BIEN	BIEN	BIEN	✓ Bien	Penetración estable — comportamiento óptimo

La baldosa M-10-T8 no acepta clavado directo a menos de 3,0 cm del borde. A 1,0 y 2,0 cm se produce fractura del borde en todos los ensayos. A partir de 3,0 cm el clavo penetra sin trizaduras. Sin embargo, no se recomienda el clavado como método de fijación para elementos instalados sobre la baldosa (mobiliario, semáforos, postes de señalización), ya que la fijación directa concentra cargas puntuales que pueden comprometer la pieza a largo plazo. Ver sección 5.4.4.

Corte con amoladora y sierra de mesa					
Tipo de corte	Bordes	Fisuras	Caucho	Observaciones	Recomendación
Seco — disco amoladora	Limpio	Ninguna	Íntegro	Corte rápido; genera polvo (usar mascarilla N95)	✓ RECOMENDADO con EPP (mascarilla + gafas)
Húmedo — sierra de mesa	Limpio	Ninguna	Quemado — hebras salidas	Muy lento; el caucho resiste el disco y lo quema; sin polvo	✗ NO RECOMENDADO — el caucho daña el disco y quema las hebras superficiales

5.4.3 Corte con amoladora y sierra de mesa

Tabla 45 Resultados de clavado con clavo de acero 2" y 2½" — Baldosa M-10-T8. Nota. n = 3 repeticiones por distancia. Clavos de acero de 2" (50 mm) y 2½" (65 mm). Ambos diámetros produjeron resultados equivalentes.

Tabla 46 Resultados de corte con amoladora (seco) y sierra de mesa (húmedo) — Baldosa M-10-T8. Nota. n = 2 réplicas por modalidad. Los bordes fueron inspeccionados visualmente con lupa de mano. El comportamiento del caucho en el corte húmedo — quemado y hebras salidas — es atribuible a la resistencia elástica de las partículas de caucho NFU al corte por fricción con agua, que genera calor local suficiente para degradar superficialmente el polímero.

Se realizaron cortes en dos modalidades: corte seco con amoladora y disco de hormigón estándar, y corte húmedo con sierra de mesa de diamante. Cada modalidad se ejecutó en dos pasadas independientes (dos réplicas). Se evaluaron: calidad del borde, presencia de fisuras, comportamiento del caucho NFU en la línea de corte, y condiciones operativas del proceso.

Conclusión de corte

El corte seco con amoladora es el método recomendado para la baldosa M-10-T8. Produce bordes limpios sin fisuras y el caucho permanece íntegro en el plano de corte. La única precaución es el polvo generado (partículas de caucho y hormigón), por lo que el uso de mascarilla N95 y gafas panorámicas es obligatorio. El corte húmedo con sierra de mesa no es recomendable: la resistencia del caucho NFU al disco de diamante en condiciones húmedas produce quemado del caucho en la línea de corte y daño acelerado al disco.

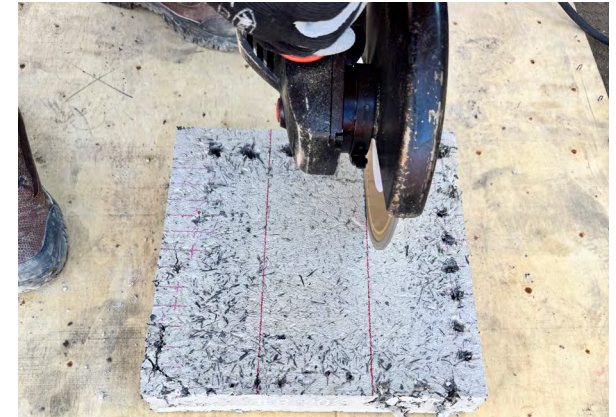




Figura 130 Amoladora angular con disco diamantado utilizada en el ensayo de corte seco

Figura 131 Corte seco con amoladora sobre la superficie de la baldosa, vista cenital



Figura 132 Operación de corte seco con amoladora en posición lateral, generando polvo

Figura 133 Bordes resultantes del corte seco: tres franjas con superficie irregular

5.4.4 Fijación de elementos sobre la baldosa — Dado de hormigón

Para la instalación de mobiliario urbano, señalización y equipamiento que requiera anclaje al pavimento (semáforos, postes de señalización, juegos infantiles, bancas fijas, ciclo-parqueaderos), no se recomienda anclar directamente sobre la baldosa M-10-T8. La concentración de cargas puntuales de arranque puede generar fractura o desprendimiento de la pieza con el tiempo, especialmente en los bordes. La solución técnica correcta es la instalación de un dado de hormigón in situ con $f'c \geq 21$ MPa, con dimensiones mínimas de 30×30 cm en planta y profundidad según la carga del elemento a anclar (mínimo 40 cm bajo la subrasante). El dado se construye antes de la colocación de las baldosas, dejando expuesto el perno de anclaje. Las baldosas se cortan con amoladora para ajustarse al perímetro del dado.

Figura 134 Posicionamiento de la pieza en sierra de mesa para el ensayo de corte húmedo

Figura 135 Bordes resultantes del corte húmedo: tres piezas con superficie lisa y regular

.y se instalan alrededor de este, manteniendo la junta estándar de 3–5 mm.

5.4.5 Mediciones dimensionales con calibrador pie de rey

Se realizaron mediciones con calibrador pie de rey digital sobre una baldosa M-10-T8 de la serie de producción para determinar las dimensiones reales y las tolerancias resultantes del proceso de fabricación experimental. El largo y el ancho se midieron en tres posiciones distintas de la pieza; el espesor en dos posiciones por cada una de las cuatro caras (8 mediciones totales).

Tabla 47 Mediciones dimensionales con calibrador pie de rey — Baldosa M-10-T8
Nota. Mediciones realizadas con calibrador pie de rey. Valores expresados en mm. La nomenclatura 'Cara 1 a 4' corresponde a las cuatro caras laterales del espesor de la baldosa.

Figura 136 Medición del largo de la baldosa M-10-T8 con calibrador pie de rey digital

Figura 137 Medición del largo de la baldosa M-10-T8 con calibrador pie de rey digital

Mediciones dimensionales con pie de rey						
Dimensión	Medición 1	Medición 2	Medición 3 / 4	Promedio	Rango real	Tolerancia vs. nominal
Largo (nom. 300 mm)	296,5	298,0	296,0	296,8	296–298 mm	–4,0 / –2,0 mm vs. 300 mm nominal
Ancho (nom. 300 mm)	297,0	298,0	296,0	297,0	296–298 mm	–4,0 / –2,0 mm vs. 300 mm nominal
Espesor — Cara 1 (nom. 50 mm)	51,6	51,5	—	51,6		
Espesor — Cara 2 (nom. 50 mm)	52,0	51,0	—	51,5		
Espesor — Cara 3 (nom. 50 mm)	50,8	51,4	—	51,1		
Espesor — Cara 4 (nom. 50 mm)	51,0	51,4	—	51,2		
ESPESOR TOTAL	Todas las caras			51,3 mm	50,8–52,0 mm	+0,8 / +2,0 mm vs. 50 mm nominal



Tolerancias dimensionales y juntas de colocación					
Dimensión	Nominal (mm)	Real mín. (mm)	Real máx. (mm)	Promedio (mm)	Junta recomendada
Largo	300	296,0	298,0	296,8	3–5 mm
Ancho	300	296,0	298,0	297,0	
Espesor	50	50,8	52,0	51,3	No aplica a junta

Resumen de mecanizaciones y condiciones de operabilidad			
Operación	Condición segura	Condición de riesgo	Instrucción técnica
Perforación Ø 4 mm	≥ 1,0 cm del borde	< 0,5 cm del borde → rotura	Usar broca de hormigón a velocidad media, sin percusión. Distancia mínima al borde: 1,0 cm
Perforación Ø 8 mm	≥ 1,5 cm del borde	≤ 1,0 cm del borde → rotura	Distancia mínima al borde: 1,5 cm. Velocidad constante, sin golpes.
Perforación Ø 12 mm	≥ 2,0 cm del borde	≤ 1,5 cm del borde → rotura	Distancia mínima al borde: 2,0 cm. Broca SDS o con percusión leve sobre la zona central.
Clavado — clavo acero 2" y 2½"	≥ 3,0 cm del borde	≤ 2,0 cm del borde → rotura	No se recomienda el clavado directo. Si es indispensable, distancia mínima: 3,0 cm, golpes suaves y graduales.

5.4.6 Tolerancias dimensionales y junta de colocación

Las dimensiones medidas evidencian que el proceso de producción experimental genera baldosas ligeramente inferiores al nominal de 300 mm en largo y ancho, con una desviación promedio de -3,1 mm y un rango de variación de 2,0 mm entre piezas. En espesor, las piezas presentan una desviación positiva promedio de +1,3 mm respecto al nominal de 50 mm, con un rango de 1,2 mm entre mediciones.

Estas variaciones dimensionales son características de la producción manual en molde de madera y son aceptables para el uso peatonal. La junta de colocación recomendada es de 3 a 5 mm, que absorbe la variación dimensional entre piezas (2,0 mm de rango) y agrega el margen de alineación para montaje manual.

Tabla 48 Tolerancias dimensionales y junta recomendada — Baldosa M-10-T8.
Nota. La junta de 3–5 mm se refiere al ancho del espacio libre entre piezas adyacentes en la instalación. Este espacio se rellena con arena fina seca de sello según lo descrito en la sección 5.3.1

Corte con amoladora (seco)	Recomendado — bordes limpios	Genera polvo de caucho y hormigón	RECOMENDADO. Usar mascarilla N95 y gafas panorámicas obligatoriamente. Disco para hormigón estándar.
Corte húmedo — sierra de mesa	Sin polvo	Caucho resiste al disco, quema caucho y disco	NO RECOMENDADO. El caucho NFU genera resistencia al disco de diamante en húmedo, produciendo quemado del material y daño al equipo.
Fijación de mobiliario urbano	Dado de hormigón $f'c \geq 21$ MPa bajo la baldosa	Atornillar/clavar directamente en baldosa	Para semáforos, postes, juegos infantiles y anclajes de carga: instalar dado de hormigón previo, nunca anclar directamente sobre la baldosa.

Tabla 49 Guía de mecanizaciones y condiciones de operabilidad — Baldosa M-10-T8. Nota. Todas las condiciones indicadas como seguras fueron verificadas experimentalmente con $n = 3$ repeticiones independientes. EPP obligatorio en todas las operaciones: guantes, calzado de seguridad, gafas panorámicas. Adicionalmente mascarilla N95 para corte seco con amoladora.

La industria del cemento es responsable de aproximadamente el 7 al 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono y constituye uno de los principales contribuyentes ambientales del sector de la construcción (Andrew, 2018; IPCC, 2019). Este impacto a nivel de huella de carbono del sector hormigón se cruza con el problema del NFU planteado al inicio del capítulo: la disposición informal de neumáticos no solo genera contaminación directa, sino que representa un flujo de residuos que podría desviarse hacia la cadena productiva del hormigón para mitigar, simultáneamente, ambas problemáticas. En este contexto, el aporte ambiental de un producto constructivo no puede sustentarse únicamente en argumentos cualitativos de valorización de residuos: requiere una cuantificación rigurosa de su huella de carbono bajo marcos normativos internacionalmente reconocidos.

La presente sección responde directamente a una pregunta operativa de la investigación: ¿cuántos kilogramos de dióxido de carbono equivalente se evitan al sustituir parcialmente el árido fino por

caucho NFU en la baldosa M-10-T8 respecto a una baldosa de hormigón convencional? La respuesta cuantitativa permite trasladar el argumento ambiental cualitativo de la tesis a una evidencia técnica defendible, comparable con otros productos del mercado y verificable bajo norma internacional.

5.5.1 Marco metodológico

El cálculo de huella de carbono se desarrolló siguiendo los principios establecidos por la norma ISO 14067:2018 — Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Las características metodológicas del análisis son las siguientes:

- Alcance: cradle-to-gate (de la cuna a la puerta de planta). Incluye la extracción de materias primas, su transporte hasta la planta de fabricación y el proceso de elaboración de la baldosa hasta su salida como producto terminado. No se incorporan las fases de instalación, uso y fin de vida.
- Unidad funcional: kilogramos de CO₂ equivalente (kg CO₂eq) por metro cuadrado de baldosa

colocada, considerando 11,11 unidades de 300×300×50 mm por m². De forma complementaria se reporta el resultado por baldosa individual en la sección 5.5.6.

- Potencial de calentamiento global: valores de GWP a 100 años (GWP₁₀₀) según IPCC (2019), 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Este es el horizonte temporal estándar para reportes corporativos y de producto en el ámbito de la construcción.
- Tratamiento del caucho NFU: se aplica el principio de cut-off para las emisiones del neumático original (asignadas al ciclo de uso vehicular previo) y se contabilizan únicamente las emisiones de procesamiento y granulación. Adicionalmente, se aplica expansión del sistema para incorporar el crédito por valorización del residuo, según lo permitido por ISO 14067 § 6.4.5 para estudios comparativos en los que una de las alternativas modifica la gestión final de un flujo de residuos. La justificación detallada de este crédito se desarrolla en el Anexo 5.C.
- Energía de producción experimental: los procesos

de mezclado y compactación se realizaron de forma manual en la fase experimental, por lo que el aporte energético directo de fabricación se considera no representativo dentro del balance global, debido a la escala experimental del proceso. Un escalamiento industrial añadiría un aporte adicional por mezcladora y vibroprensa que no se incluye en este análisis.

Procedimiento de cálculo (calculadora de huella de carbono)

Operacionalmente, el cálculo se implementó como una hoja estructurada de tipo calculadora de huella de carbono, que aplica de forma sistemática la fórmula general: $HC = \sum_i (M_i \times FE_i)$. Donde HC es la huella de carbono total expresada en kg CO₂eq por unidad funcional, M_i es la masa o cantidad del material o proceso i por unidad funcional, y FE_i es el factor de emisión correspondiente. Esta estructura corresponde al enfoque activity-based emission accounting

descrito en las directrices IPCC (2019) Volumen 1 Capítulo 8, y constituye el principio operativo de las calculadoras de huella de carbono utilizadas tanto en estudios académicos como en herramientas institucionales (GHG Protocol, OpenLCA, calculadoras nacionales de inventarios de gases de efecto invernadero). En el presente trabajo el procedimiento se aplica de forma paralela a las mezclas M-0 y M-10-T8, y la diferencia entre ambos resultados constituye la reducción de huella de carbono atribuible a la incorporación del caucho NFU. La memoria detallada del cálculo, mostrando cada multiplicación, se presenta en el Anexo 5.A. Los factores de emisión se obtuvieron siguiendo una jerarquía de fuentes: en primer lugar, datos del contexto ecuatoriano cuando estuvieron disponibles; en segundo lugar, la base de datos ICE (Inventory of Carbon and Energy) de la Universidad de Bath (Hammond y Jones, 2019), ampliamente citada en la literatura de análisis de ciclo de vida de productos constructivos; y como respaldo, los valores por defecto de IPCC (2019) y la base Ecoinvent v3.8 para procesos químicos específicos.

5.5.2 Inventario de ciclo de vida

La Tabla 50 presenta las cantidades de cada material por m² de baldosa, calculadas a partir de las dosificaciones experimentales documentadas en el Capítulo 2 y la ficha técnica del producto. La única diferencia entre M-0 y M-10-T8 corresponde a la sustitución de 4,89 kg de árido fino por 4,89 kg de caucho NFU procesado, y a la incorporación de 1,00 kg de NaOH para el pretratamiento del caucho. Los demás insumos (cemento, ripio y agua) mantienen cantidades idénticas en ambas mezclas, condición que permite aislar el efecto neto del caucho sobre la huella de carbono.

Tabla 50 Inventario de ciclo de vida por m² de baldosa — Comparación M-0 vs M-10-T8. Cantidades obtenidas a partir de la dosificación experimental escalada (factor 11,11 baldosas/m²). En base en la ficha técnica del Capítulo 5 y datos operativos del laboratorio.

Inventario de ciclo de vida			
Material	M-0	M-10-T8	Unidad
Cemento Portland IP Holcim	23,12	23,12	kg
Arena de río lavada	48,91	44,02	kg
Ripio triturado 3/4"	68,47	68,47	kg
Caucho NFU fracción T-8	0,00	4,89	kg
Agua	9,24	9,24	L
NaOH (pretratamiento)	0,00	1,00	kg
Masa total	149,74	150,74	kg

Factores de emisión aplicados		
Material / proceso	FE	Fuente
Cemento Portland IP	0,62 kg CO ₂ eq/kg	ICE Database v3.0 — CEM IP/A-P (11-35 % puzolana)
Arena lavada	0,0048 kg CO ₂ eq/kg	ICE Database v3.0 — áridos naturales
Ripio triturado	0,0052 kg CO ₂ eq/kg	ICE Database v3.0 — árido triturado
Agua potable	0,000344 kg CO ₂ eq/L	ICE Database v3.0 — agua de red
Caucho NFU procesado	0,21 kg CO ₂ eq/kg	Sienkiewicz et al. (2017) — granulación NFU
NaOH (sosa cáustica)	1,12 kg CO ₂ eq/kg	Ecoinvent v3.8 — proceso cloro-álcali
Transporte camión	0,10 kg CO ₂ eq/t km	IPCC (2019) Vol. 2 Cap. 3 — camión mediano
Crédito por valorización del NFU	1,00 kg CO ₂ eq/kg	Valor conservador para escenario de quema/vertido informal (Cap. 1)

5.5.3 Factores de emisión aplicados

La Tabla 51 presenta los factores de emisión aplicados a cada material o proceso, así como su fuente documental. El valor para cemento Portland IP se ajusta a su composición típica con sustitución por puzolanas (CEM IP/A-P, 11-35 % de puzolana), por lo que es inferior al del cemento Portland puro (CEM I, $\approx 0,90$ kg CO₂eq/kg). Para el caucho NFU se contabilizan únicamente las emisiones de granulación (0,21 kg CO₂eq/kg), descartando las emisiones de fabricación del neumático original bajo el principio de cut-off. El crédito por valorización del NFU adopta un valor conservador de 1,00 kg CO₂eq/kg, sustentado en el escenario habitual de quema a cielo abierto y vertido informal documentado para el Ecuador en el Capítulo 1. La justificación de cada factor se presenta en el Anexo 5.B.

Tabla 51 Factores de emisión y fuentes documentales utilizadas en el cálculo. En base en Hammond y Jones (2019), Sienkiewicz et al. (2017), Ecoinvent v3.8 e IPCC (2019).

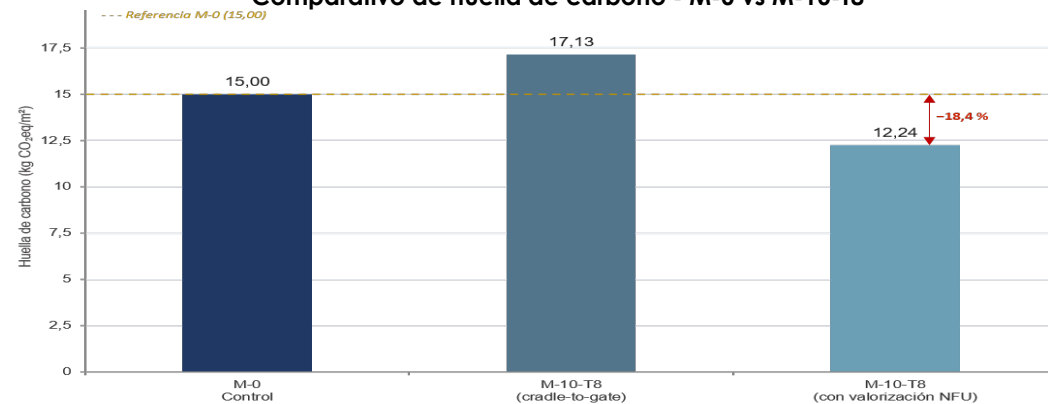
5.5.4 Resultados de huella de carbono

Aplicando los factores de emisión de la Tabla 51 a las cantidades inventariadas en la Tabla 50, se obtienen las emisiones de gases de efecto invernadero por componente de cada mezcla. La Tabla 52 desglosa el cálculo completo, incluyendo el subtotal cradle-to-gate de cada mezcla y la huella neta final de M-10-T8 tras aplicar el crédito por valorización del NFU.

El cemento Portland IP es el componente que domina las emisiones en ambas mezclas, representando aproximadamente el 95,5 % de la huella de carbono cradle-to-gate de M-0 y el 83,7 % de la de M-10-T8 antes de aplicar el crédito por valorización. Esta predominancia es coherente con la literatura internacional, donde el cemento se identifica de manera consistente como el principal responsable del impacto ambiental del hormigón (Andrew, 2018; Habert et al., 2020). Como las dosificaciones de cemento son idénticas en M-0 y M-10-T8, esta componente del impacto se mantiene constante entre las dos mezclas.

Resultados de huella de carbono		
Componente	M-0 (kg CO ₂ eq/m ²)	M-10-T8 (kg CO ₂ eq/m ²)
Cemento	14,334	14,334
Arena	0,235	0,211
Ripio	0,356	0,356
Caucho NFU (procesamiento)	0,000	1,027
Agua	0,003	0,003
NaOH (pretratamiento)	0,000	1,120
Transporte (< 5 km)	0,075	0,075
Subtotal cradle-to-gate	15,003	17,126
Crédito por valorización del NFU	0,000	-4,890
HUELLA DE CARBONO NETA	15,003	12,236

Comparativo de huella de carbono - M-0 vs M-10-T8



El cemento Portland IP es el componente que domina las emisiones en ambas mezclas, representando aproximadamente el 95,5 % de la huella de carbono cradle-to-gate de M-0 y el 83,7 % de la de M-10-T8 antes de aplicar el crédito por valorización. Esta predominancia es coherente con la literatura internacional, donde el cemento se identifica de manera consistente como el principal responsable del impacto ambiental del hormigón (Andrew, 2018; Habert et al., 2020). Como las dosificaciones de cemento son idénticas en M-0 y M-10-T8, esta componente del impacto se mantiene constante entre las dos mezclas.

Tabla 52 Huella de carbono desglosada por componente y resultado neto — Comparación M-0 vs M-10-T8. Todos los valores en kg CO₂eq por m² de baldosa colocada.

Figura 138 Comparativo de huella de carbono entre M-0 y M-10-T8. La barra central corresponde al resultado cradle-to-gate sin crédito ambiental; la barra de la derecha incorpora el crédito por valorización del NFU desviado de la disposición informal.

Contribuciones a la diferencia M-0 frente M-10-T8

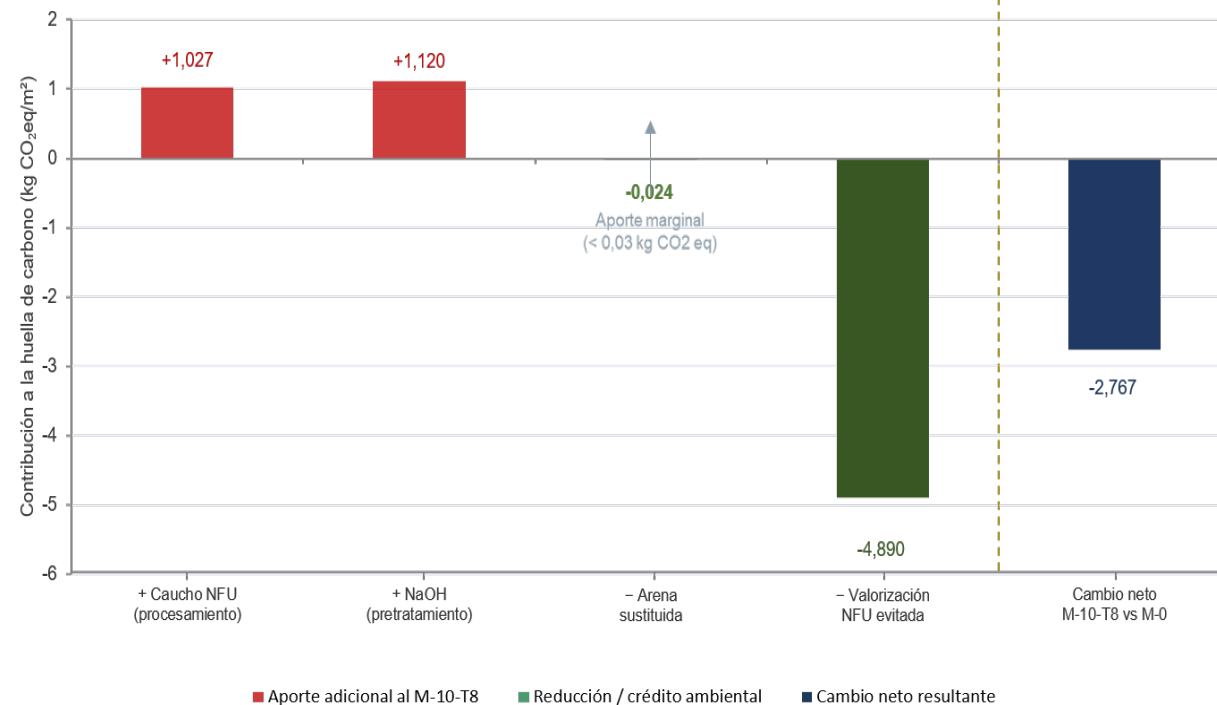


Figura 139 Contribuciones a la diferencia M-0 → M-10-T8. Las barras rojas indican aportes adicionales al M-10-T8 (caucho NFU y NaOH); las verdes, reducciones y créditos ambientales (arena sustituida y valorización del NFU evitada). La barra final (azul) muestra el cambio neto resultante.

La sustitución del 10 % del árido fino por caucho NFU introduce dos contribuciones adicionales en M-10-T8: las emisiones del proceso de granulación del NFU (1,027 kg CO₂eq/m²) y las del pretratamiento con NaOH al 10 % (1,120 kg CO₂eq/m²). Sumadas, representan un incremento de 2,147 kg CO₂eq/m² sobre el control. Sin embargo, este incremento es ampliamente compensado por el crédito asociado a la valorización del residuo: cada metro cuadrado de baldosa M-10-T8 incorpora 4,89 kg de NFU que de otra forma seguirían el patrón habitual de disposición en el Ecuador, donde la quema a cielo abierto y el vertido informal generan emisiones documentadas tanto de CO₂ como de contaminantes secundarios. La Figura ___ muestra la descomposición completa del balance.

5.5.5 Análisis y discusión

El cálculo se realizó con el escenario más conservador en cuanto al uso de NaOH: 1,00 kg por m² de baldosa sin reutilización entre lotes, condición correspondiente a la fase experimental

tal como se ejecutó en el laboratorio. En producción industrial, la solución de NaOH puede filtrarse y reutilizarse en ciclos sucesivos, aspecto ya señalado en la sección 5.2.5 como vía hacia la competitividad económica. Una reutilización de cinco ciclos reduciría el aporte del NaOH de 1,120 a 0,224 kg CO₂eq/m², con lo que la huella neta estimada de M-10-T8 descendería a 11,340 kg CO₂eq/m², equivalente a una reducción estimada del 24,4 % frente al control. La reducción adoptada (18,4 %) constituye, por tanto, un valor conservador que se mantendría incluso bajo las condiciones operativas menos favorables.

Es relevante señalar también que el alcance cradle-to-gate excluye las fases de instalación, uso y fin de vida del producto. La inclusión de estas etapas podría modificar el resultado tanto en sentido favorable —por la mayor durabilidad asociada al desempeño mecánico y antideslizante de M-10-T8 documentado en el Capítulo 4— como desfavorable, dependiendo de las condiciones de uso y el escenario de disposición final del pavimento. Este nivel de análisis (cradle-to-grave)

se considera fuera del alcance de la presente investigación, pero se propone como línea complementaria.

Una observación metodológica para futuras investigaciones es que, dado que el cemento concentra entre el 84 % y el 96 % de las emisiones cradle-to-gate, las estrategias para profundizar la reducción ambiental de la baldosa deberían orientarse hacia la sustitución parcial del cemento por adiciones de bajo carbono (cenizas volantes, escoria granulada o cementos mixtos del tipo CEM IV-V), más que hacia un mayor porcentaje de caucho, cuyo aporte ambiental es principalmente indirecto, vía valorización del residuo, y no se incrementa proporcionalmente con el porcentaje de sustitución.

Limitaciones metodológicas

Conviene precisar dos limitaciones metodológicas que enmarcan la interpretación de los resultados. En primer lugar, varios de los factores de emisión empleados provienen de bases de datos

internacionales (ICE Database, Ecoinvent, IPCC), ante la disponibilidad limitada de información específica del contexto ecuatoriano para los insumos analizados —cemento Holcim IP, áridos locales y caucho NFU procesado—. Cuando se publiquen factores ecuatorianos verificables para estos materiales, sería recomendable actualizar el cálculo a efectos de refinar la precisión local del resultado. En segundo lugar, el alcance cradle-to-gate adoptado acota el balance a las etapas de extracción de materias primas, transporte a planta y fabricación; modificaciones en el alcance (inclusión de instalación, uso y fin de vida) o en los supuestos metodológicos podrían alterar los valores finales reportados. Los resultados, por tanto, deben interpretarse dentro de los límites del sistema y los criterios definidos para esta investigación.

5.5.6 Síntesis ambiental y aporte de la investigación

La huella de carbono estimada de la baldosa M-10-T8 es de 12,236 kg CO₂eq/m², frente a 15,003 kg CO₂eq/m² de la mezcla de control M-0.

Expresado por unidad individual, cada baldosa de 300×300×50 mm presenta una huella de 1,101 kg CO₂eq, frente a 1,350 kg CO₂eq de la baldosa de control: una reducción de 0,249 kg CO₂eq por pieza producida. La reducción estimada del 18,4 %, bajo los supuestos metodológicos adoptados, se origina en la combinación de dos factores: la sustitución parcial de árido fino virgen por caucho reciclado y, principalmente, la desviación del NFU desde su escenario habitual de disposición informal hacia su valorización como insumo de construcción.

Expresado en términos de escala de aplicación, la ejecución de un proyecto de espacio público peatonal de 1.000 m² con baldosa M-10-T8 evita la emisión de aproximadamente 2,77 toneladas de CO₂ equivalente y desvía cerca de 4.890 kg de NFU del flujo de residuos sólidos urbanos, equivalentes a unos 611 neumáticos de turismo de tamaño estándar. Estas cifras constituyen el respaldo cuantitativo que sustenta el argumento de aporte ambiental de la baldosa M-10-T8 e integran la propuesta dentro de los principios de

economía circular promovidos por el Ministerio del Ambiente del Ecuador.

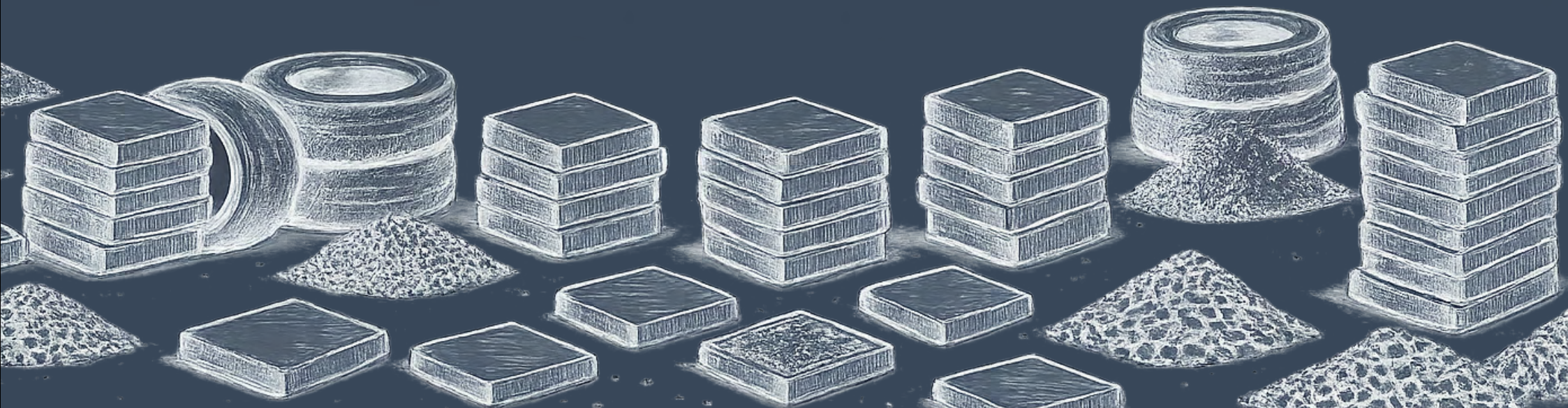
Adicionalmente, la valorización del NFU como insumo de construcción genera co-beneficios ambientales que no fueron contabilizados directamente en el cálculo numérico pero que refuerzan la solidez del argumento: reducción de la demanda de árido fino virgen, con su correspondiente impacto extractivo sobre cauces y canteras locales; disminución de la contaminación atmosférica y del suelo asociada a la quema informal de neumáticos en zonas periurbanas; y reducción del volumen de residuos sólidos no peligrosos que el municipio debe gestionar. Cada uno de estos co-beneficios contribuye al objetivo general de la tesis: ofrecer al espacio público ecuatoriano un material constructivo técnicamente válido bajo norma internacional y simultáneamente más responsable desde el punto de vista ambiental.

En síntesis, el presente análisis permite afirmar con respaldo numérico que la baldosa M-10-T8 contribuye de forma medible a la reducción de

la huella de carbono del pavimento peatonal, cuantificada en aproximadamente un 18,4 % bajo los supuestos metodológicos adoptados (ISO 14067:2018, alcance cradle-to-gate, factores de emisión de las bases citadas en la sección 5.5.3). Este valor completa, en el plano ambiental, la valoración integral de la formulación, junto con su desempeño técnico bajo UNE-EN 1339:2004 (Capítulo 4), su posicionamiento económico competitivo (sección 5.2) y su aptitud para soluciones constructivas peatonales en la zona lluviosa continental ecuatoriana (sección 5.3).



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES





Las conclusiones se presentan en correspondencia con cada objetivo específico y culminan con la conclusión del objetivo general. Cada hallazgo se enuncia de forma puntual, como afirmación derivada del trabajo experimental y del análisis comparativo desarrollado en los capítulos anteriores.

Conclusión 1 — Identificación de referentes y requerimientos físico-mecánicos

- El pretratamiento del caucho con hidróxido de sodio (NaOH) al 10 % durante 25 minutos, según el protocolo de Segre y Joekeis (2000), es aplicable y reproducible con los recursos del laboratorio local; las cinco series elaboradas bajo este protocolo cumplieron con los ensayos de desempeño previstos en UNE-EN 1339:2004.
- La norma UNE-EN 1339:2004 es aplicable y suficiente para evaluar el desempeño mecánico y superficial de baldosas prefabricadas de hormigón en el contexto ecuatoriano.
- Ecuador no dispone de una norma técnica nacional (NTE INEN) que regule las

baldosas prefabricadas de hormigón para espacio público; este vacío normativo constituye uno de los hallazgos de la investigación.

Conclusión 2 — Diseño de mezclas de hormigón con caucho reciclado

- La fracción de caucho retenida en tamiz #30 (T-30) es granulométricamente incompatible con la arena de referencia y no permite formular mezclas trabajables.
- Las fracciones T-8 y T-16 son granulométricamente compatibles con la arena de referencia y permitieron formular mezclas trabajables y homogéneas.
- La granulometría del caucho reciclado es una variable determinante del diseño de mezclas: partículas muy finas son inviábiles y la compatibilidad con el árido fino se alcanza en el rango de las fracciones T-8 y T-16.

Conclusión 3 — Elaboración de la baldosa de hormigón con caucho triturado

- La producción de la baldosa con caucho NFU es replicable con materiales e insumos disponibles en la industria local de Cuenca — cemento Holcim IP y caucho de ProCaucho y Continental Tire Andina— sin tecnología especializada de difícil acceso.
- El protocolo de pretratamiento, mezclado, compactación por vibración y curado de 28 días es suficiente para obtener especímenes homogéneos aptos para ensayos normativos.
- El recubrimiento superficial por termofusión, evaluado en Fase II, mejora el acabado de la baldosa sin alterar su composición estructural.

Conclusión 4 — Evaluación de la baldosa prefabricada frente a productos del mercado

- La formulación M-10-T8 cumple simultáneamente con la Clase 1 en compresión y flexión bajo UNE-EN 1339:2004 y con la clasificación antideslizante R13 (42,8°) bajo DIN 51130 en superficie húmeda.
- La formulación M-20-T16 no cumple con la Clase 1 en flexión y se clasifica como Clase 3, no apta

para tráfico peatonal intensivo.

- La proporción de sustitución y el tamaño de partícula del caucho son variables limitantes del desempeño mecánico: incrementos simultáneos en ambas comprometen el cumplimiento de Clase 1.
- M-10-T8 reduce en 26,6 % el coeficiente de restitución al impacto respecto a la mezcla de control, mejorando la capacidad del pavimento de absorber energía bajo cargas de impacto.
- M-10-T8 es técnicamente competitiva frente a los cinco materiales de referencia del mercado cuencano, con un costo directo de materiales comparable al de soluciones convencionales.
- La huella de carbono estimada de M-10-T8 es 18,4 % menor a la de la mezcla de control M-0, bajo metodología ISO 14067:2018 con alcance cradle-to-gate; el beneficio se origina principalmente en la valorización del caucho NFU desviado de la disposición informal.

Conclusión general

La investigación demuestra que es posible desarrollar una baldosa prefabricada de hormigón con caucho reciclado de neumáticos fuera de uso que cumple simultáneamente los requisitos técnicos para uso en espacio público peatonal (Clase I UNE-EN 1339:2004, R13 DIN 51130), presenta un costo directo de materiales competitivo frente al mercado local y reduce su huella de carbono frente a una baldosa convencional. La formulación M-10-T8 constituye una alternativa constructiva técnica, económica y ambientalmente viable para el contexto ecuatoriano, así como un insumo experimental directo para una futura norma nacional sobre baldosas prefabricadas de hormigón.

A partir de los hallazgos de la investigación y de las limitaciones identificadas en el proceso, se formulan las siguientes recomendaciones para futuras líneas de trabajo. Cada recomendación se vincula directamente a las conclusiones presentadas.

1. Evaluación comparativa con y sin pretratamiento NaOH

La presente investigación aplicó el protocolo de Segre y Joeke (2017) como invariante en todas las series elaboradas. Se recomienda que futuras investigaciones desarrollen series comparativas con y sin pretratamiento alcalino, para cuantificar empíricamente el aporte específico del tratamiento sobre la adherencia caucho-matriz y el desempeño mecánico resultante.

2. Exploración de tasas de sustitución intermedias

La investigación trabajó con sustituciones del 10 % y 20 %. Se recomienda explorar valores intermedios —5 % y 15 %— para identificar con mayor precisión el umbral de sustitución óptimo y determinar si la fracción T-16 puede alcanzar Clase 1 en proporción inferior al 20 %.

3. Incorporación de refuerzo de fibras en combinación con el caucho

La pérdida de resistencia a la flexión asociada a mayores proporciones de caucho limita el rango viable de sustitución. Se recomienda investigar la incorporación de fibras —polipropileno, acero o vidrio álcali-resistente— como estrategia para compensar esta pérdida y ampliar el rango de sustitución sin comprometer la Clase 1.

4. Sustitución parcial del cemento por adiciones de bajo carbono

El cemento concentra entre el 84 % y el 96 % de las emisiones cradle-to-gate de la baldosa. Se recomienda explorar la sustitución parcial del cemento Portland por cenizas volantes, escoria granulada de alto horno o cementos mixtos del tipo CEM IV-V, como estrategia para profundizar la reducción de la huella de carbono más allá del aporte ya logrado por la valorización del NFU.

5. Ampliación del análisis de ciclo de vida a alcance cradle-to-grave

La sección 5.5 cuantifica la huella de carbono bajo alcance cradle-to-gate. Se recomienda extender el análisis incluyendo las fases de instalación, uso y fin de vida del pavimento, para evaluar el desempeño ambiental integral del producto a lo largo de toda su vida útil.

6. Evaluación de durabilidad bajo condiciones de servicio

Los ensayos realizados caracterizan el producto a los 28 días. Se recomienda incorporar ensayos de desgaste por abrasión, resistencia a ciclos de humedecimiento-secado, punzonamiento bajo carga peatonal sostenida y envejecimiento acelerado por exposición UV, especialmente considerando la fracción orgánica (caucho) presente en la mezcla.

7. Estudio de factibilidad para producción a escala industrial

La replicabilidad del proceso fue confirmada en laboratorio. Se recomienda un estudio de prefactibilidad que incluya mano de obra, maquinaria, logística de acopio de caucho y

estrategias de comercialización, para determinar la viabilidad económica del producto a escala industrial y su potencial de inserción en el mercado constructor regional.

8. Implementación piloto en espacio público real

La validación del producto se realizó en condiciones de laboratorio. Se recomienda desarrollar un proyecto piloto en un área representativa de espacio público en Cuenca, en coordinación con el GAD Municipal, para evaluar el comportamiento real bajo uso, carga dinámica, exposición climática y mantenimiento.

9. Diversificación de acabados estéticos

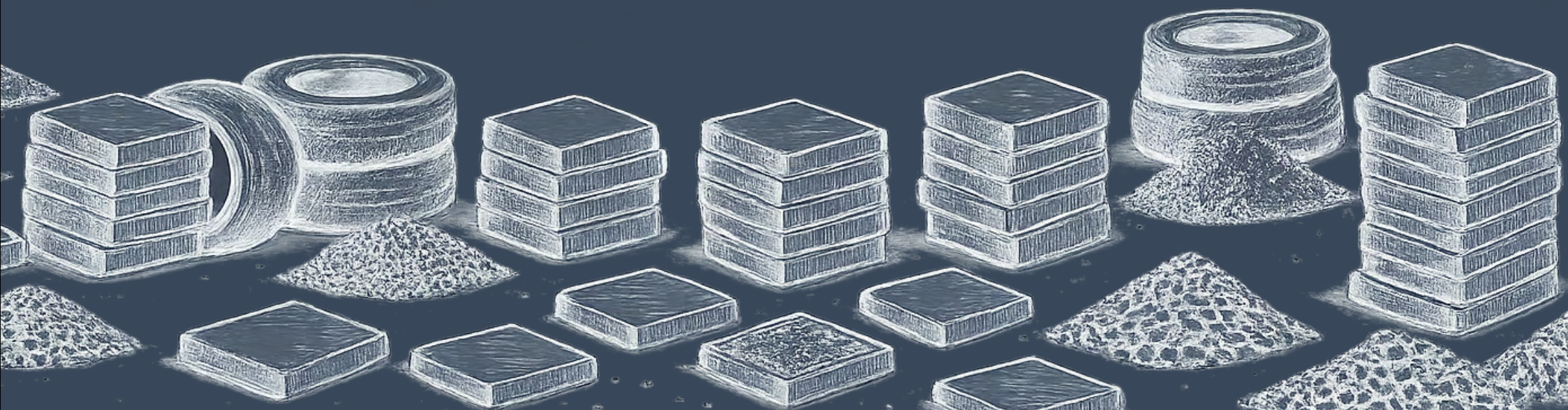
El recubrimiento por termofusión mostró ser viable como acabado complementario. Se recomienda explorar acabados alternativos —incorporación de pigmentos en la mezcla, tratamientos superficiales con áridos de color o reciclados, y texturizado mediante moldes con relieve— para ampliar el catálogo visual del producto y evaluar incidencia sobre propiedades funcionales.

10. Desarrollo de normativa nacional para baldosas prefabricadas

(NTE INEN). La investigación confirmó el vacío normativo en Ecuador. Se recomienda que los resultados sean puestos a consideración del INEN y del sector construcción como insumo técnico para iniciar el proceso de elaboración de una norma NTE que regule las baldosas prefabricadas de hormigón para espacio público, tomando como referencia la UNE-EN 1339:2004.



REFERENCIAS





- ACI Committee 302. (2015). *ACI 302.1R-15: Guide to concrete floor and slab construction*. American Concrete Institute.
- American Concrete Institute. (s.f.). *ACI 360R: Guide to design of slabs-on-ground*.
- American Concrete Institute. (2016). *ACI 211.1-91 Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*.
- Andrew, R. M. (2018). Global CO₂ emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Asociación Española de Normalización. (s.f.). *UNE-EN 1341: Baldosas de piedra natural para uso peatonal exterior*.
- Asociación Española de Normalización. (2004). *UNE-EN 1339:2004 Baldosas de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*.
- Asociación Nacional de la Industria del Prefabricado de Hormigón. (2014). *Guía técnica de pavimentos con adoquines de hormigón*.
- ASTM International. (s.f.). *ASTM C595: Standard specification for blended hydraulic cements*.
- ASTM International. (2019). *ASTM C136/C136M-19 Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM International. (2020). *ASTM C143/C143M-20 Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete*. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-20
- ASTM International. (2021). *ASTM C39/C39M-21 Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-21
- ASTM International. (2022). *ASTM C78/C78M-22 Standard test method for flexural strength of concrete (using simple beam with third-point loading)*. https://doi.org/10.1520/C0078_C0078M-22
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (s.f.). *Neumáticos fuera de uso: propiedades*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana de España. <https://www.cedexmateriales.es>
- Chaikaew, C., Sukontasukkul, P., Chaisakulkiet, U., Sata, V., y Chindaprasirt, P. (2019). Properties of concrete pedestrian blocks containing crumb rubber from recycle waste tyres reinforced with steel fibres. *Case Studies in Construction Materials*, 11, e00270. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2019.e00270>
- Comunidad Andina. (s.f.). *Reglamento del Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo (Decisión 584 CAN)*.
- Cuello Orozco, A. P., Rojas Martínez, E. E., Lascarro Navarro, F. D., y Manco Jaraba, D. C. (2020). Determinación del uso de la andesita de la Formación Guatapurí en la industria cerámica. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 8(1), 202–213. <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3579>
- Deutsches Institut für Normung. (s.f.). *DIN 51130: Testing of floor coverings — Determination of the anti-slip property*.

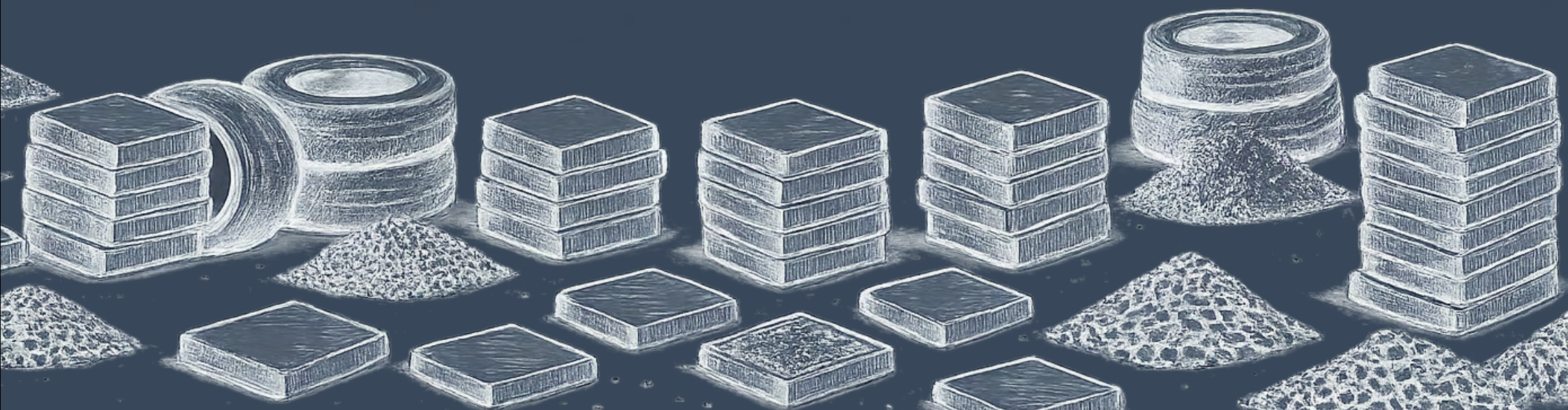
- Ecoinvent. (2021). *Ecoinvent Database v3.8*. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.
- Eldin, N. N., y Senouci, A. B. (1993). Rubber-tire particles as concrete aggregate. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 5(4), 478–496. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1993\)5:4\(478\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1993)5:4(478))
- Eldin, N. N., y Senouci, A. B. (1994). Measurement and prediction of the strength of rubberized concrete. *Cement and Concrete Composites*, 16(4), 287–298. [https://doi.org/10.1016/0958-9465\(94\)90041-8](https://doi.org/10.1016/0958-9465(94)90041-8)
- El Mercurio. (3 de febrero de 2026). *Cambio de piso del Parque Calderón se ejecutará en cuatro etapas*. <https://elmercurio.com.ec>
- El Universo. (3 de junio de 2018). *2,4 millones de neumáticos se desechan cada año en Ecuador*. <https://www.eluniverso.com>
- Expreso. (23 de junio de 2024). *En Ecuador, el 56 % de las llantas fuera de uso avanza a la contaminación*. <https://www.expreso.ec>
- Fábrica Orellana / La Roca Cuenca. (2026). *Catálogo de precios y productos* [Referencia comercial].
- Graiman Cía. Ltda. (2024). *Catálogo técnico TEKSTONE — Porcelanato técnico para espacios de alto tráfico*. <https://www.graiman.com>
- Güneyisi, E., Gesoglu, M., y Özturan, T. (2004). Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 34(12), 2309–2317. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.04.005>
- Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., y Scrivener, K. L. (2020). Environmental impacts and decarbonisation strategies in the cement and concrete industries. *Nature Reviews Earth & Environment*, 1(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>
- Hammond, G., y Jones, C. (2019). *Inventory of Carbon & Energy (ICE) Database v3.0*. University of Bath.
- Hormipisos Cía. Ltda. (2026). *Línea Vintage — Loseta Hidráulica / Adoquines de hormigón*. <https://www.hormipisos.com>
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (s.f.). *NTE INEN 490: Cemento hidráulico. Requisitos*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2010a). *NTE INEN 1573:2010. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2010b). *NTE INEN-ISO 4869:2010: Protectores auditivos*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2010c). *NTE INEN-ISO 16321:2010: Protección ocular y facial para uso laboral*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2011). *NTE INEN 872:2011. Áridos para hormigón. Requisitos*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2013a). *NTE INEN 2266:2013: Transporte, almacenamiento y manejo de materiales peligrosos*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2013b). *NTE INEN 2825:2013: Ropa de advertencia de alta visibilidad*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2013c). *NTE INEN-ISO*

- 3873:2013: *Cascos de seguridad industrial*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2014a). *NTE INEN 1837:2014: Guantes de protección*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2014b). *NTE INEN 1926:2014: Calzado de seguridad*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2016a). *NTE INEN 2245:2016: Accesibilidad al medio físico. Rampas fijas*.
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2016b). *NTE INEN 3040:2016: Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*. https://vipresa.com.ec/wp-content/uploads/2019/02/nte_inen_3040.pdf
- Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización. (2018). *NTE INEN-ISO 16900:2018: Dispositivos de protección respiratoria*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2019). *2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories* (Vol. 1–5).
- Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca. (23 de enero de 2026). *Informe de resistencia a compresión de cilindros de hormigón — Fase piloto*.
- Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca. (3 de febrero de 2026). *Informe de resistencia a compresión de cilindros de hormigón — 7 días*.
- Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca. (9 de febrero de 2026). *Informe de resistencia a compresión de cilindros de hormigón — 14 días*.
- Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca. (18 de marzo de 2026a). *Informe de resistencia a compresión de cilindros de hormigón — 28 días*.
- Laboratorio de Geotecnia y Materiales, Universidad de Cuenca. (18 de marzo de 2026b). *Informe de resistencia a flexión de baldosas a 3 puntos*.
- Lacsina, J. K., Ladera, M. J., Pradez, P. S., y Franco, K. (2024). The advantages of using crumbled motorcycle tires as an additive in making outdoor tiles. *Ascendens Asia Journal of Multidisciplinary Research Abstracts*, 7(1). <https://ojs.aaresearchindex.com/index.php/AAJMRA/article/view/17951>
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas. (s.f.). *Manual de especificaciones generales para construcción de caminos y puentes*.
- Occupational Safety and Health Administration. (s.f.). *OSHA 29 CFR 1910.138: Hand protection*.
- Organización Internacional de Normalización. (s.f.). *ISO 10545: Ceramic tiles*.
- Organización Internacional de Normalización. (2006). *ISO 14040:2006 — Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework*.
- Organización Internacional de Normalización. (2018). *ISO 14067:2018 — Greenhouse gases. Carbon footprint of products. Requirements and guidelines for quantification*.
- Petra Internacional. (2026). *Catálogo de andesitas*. <https://www.petrainternacional.com>

- Piedra & Piedra. (2026). *Baldosas de hormigón arquitectónico* [Referencia comercial].
- Roychand, R., Gravina, R. J., Zhuge, Y., Ma, X., Yousf, O., y Mills, J. E. (2020). A comprehensive review on the mechanical properties of waste tire rubber concrete. *Construction and Building Materials*, 237, 117651. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117651>
- Segre, N., y Joekes, I. (2000). Use of tire rubber particles as addition to cement paste. *Cement and Concrete Research*, 30(9), 1421–1425. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00373-2](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00373-2)
- Si, R., Guo, S., y Dai, Q. (2017). Durability performance of rubberized mortar and concrete with NaOH-solution treated rubber particles. *Construction and Building Materials*, 153, 496–505. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.085>
- Siddique, R., y Naik, T. R. (2004). Properties of concrete containing scrap-tire rubber — an overview. *Waste Management*, 24(6), 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.01.006>
- Sienkiewicz, M., Janik, H., Borzędowska-Labuda, K., y Kucińska-Lipka, J. (2017). Environmentally friendly polymer-rubber composites obtained from waste tyres: A review. *Journal of Cleaner Production*, 147, 560–571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.121>
- Sika Ecuador. (2024). *Sikadur® 32 Primer — Ficha técnica del producto* [Ficha técnica]. <https://ecu.sika.com/es/productos/repair/anchoring/sikadur-32-primer.html>
- Sukontasukkul, P., y Chaikaew, C. (2006). Properties of concrete pedestrian block mixed with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 20(7), 450–457. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.040>
- SWI Swissinfo. (17 de junio de 2024). *Más de 1,2 millones de neumáticos reciclados en 2023 en Ecuador*. <https://www.swissinfo.ch>
- Thomas, B. S., y Gupta, R. C. (2016). A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323–1333. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.092>
- Topçu, İ. B. (1995). The properties of rubberized concrete. *Cement and Concrete Research*, 25(2), 304–310. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00016-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00016-7)



ANEXOS





ANEXO 1

Informes ensayos Universidad de Cuenca

ANEXO 2

Fuentes de datos para análisis comparativo

ANEXO A — Adoquín de hormigón: NTE INEN 3040:2016

Referencia:

Instituto Nacional Ecuatoriano de Normalización [INEN]. (2016). *NTE INEN 3040:2016: Adoquines de hormigón. Requisitos y métodos de ensayo*. Quito: INEN. https://vipresa.com.ec/wp-content/uploads/2019/02/nte_inen_3040.pdf

Justificación:

Requisitos mínimos obligatorios de la norma. Cualquier adoquín comercializado en Ecuador bajo esta norma debe cumplirlos.

ANEXO B — Andesita busardeada y martelinada: Cuello Orozco et al. (2020)

Referencia:

Cuello Orozco, A. P., Rojas Martínez, E. E., Lascarro Navarro, F. D., y Manco Jaraba, D. C. (2020). Determinación del uso de la andesita de la Formación Guatapuri en la industria cerámica. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 8(1), 202–213. <https://doi.org/10.17081/invinno.8.1.3579>

Justificación:

Flexión (30 MPa), compresión (172 MPa) y absorción (0,22 %) son propiedades de la roca andesita, independientes del acabado superficial. La andesita martelinada es el mismo material con diferente textura.

Fuente andesita martelinada Cuenca:

El Mercurio (2026, 3 de febrero). Cambio de piso del Parque Calderón se ejecutará en cuatro etapas. <https://elmercurio.com.ec>

ANEXO C — Porcelanato exterior Graiman TEKSTONE: Catálogo técnico (2024)

Referencia:

Graiman Cía. Ltda. (2024). *Catálogo técnico TEKSTONE — Porcelanato técnico para espacios de alto tráfico*. Cuenca: Graiman. <https://www.graiman.com>

Nota:

Graiman no publica ficha técnica con valores numéricos de ensayo de libre acceso. Los datos provienen de la clasificación normativa declarada en el catálogo (Grupo Bia, ISO 10545).

ANEXO D — Loseta hidráulica Vintage: Hormipisos Cía. Ltda.

Referencia:

Hormipisos Cía. Ltda. (2026). *Línea Vintage — Loseta Hidráulica*. Cuenca: Hormipisos. <https://www.hormipisos.com>

Justificación de N.D.:

La loseta hidráulica no cuenta con ficha técnica pública con datos de ensayo verificados. Esta ausencia evidencia la falta de estandarización en el segmento de losetas hidráulicas del mercado ecuatoriano.

ANEXO E — Baldosa Piedra & Piedra: Arq. Felipe Piedra — Cuenca

Descripción del producto:

La baldosa Piedra & Piedra es un prefabricado de hormigón arquitectónico con capa superficial de gravilla o granillo natural lavado, fabricada artesanalmente por la empresa Piedra & Piedra bajo la dirección del Arq. Felipe Piedra en Cuenca. Es conocida en el medio local como baldosa de granillo o granito lavado.

Características técnicas declaradas por fabricante:

Dimensiones: 40×40 cm (estándar) y 60×40 cm. Espesor: 3–4 cm. Base: hormigón de alta resistencia f'c 210–280 kg/cm². Capa vista: mezcla de cemento con granillo o gravilla natural (mármol triturado, canto rodado fino o piedra local), acabado lavado al ácido o agua a presión. Resistencia al deslizamiento declarada: Clase 3. Absorción: < 6 %.

Precio de venta:

\$24,00/m² (formato 40×40 cm). Verificado en Cuenca, primer trimestre 2026.

Justificación de datos N.D.:

La baldosa Piedra & Piedra no cuenta con ficha técnica publicada ni ensayos certificados bajo norma internacional. Los datos declarados provienen del fabricante sin respaldo de ensayo verificado. No existe norma INEN específica para este tipo de baldosa.

ANEXO F — Precios de venta — Cuenca, primer trimestre 2026

Adoquín de hormigón (Hormipisos): \$15,00/m². Fuente: Hormipisos Cía. Ltda. / Disensa Ecuador (2026).

Andesita busardeada (La Roca): \$55,00/m². Fuente: Fábrica Orellana / La Roca Cuenca (2026).

Andesita martelinada: \$65,00/m². Fuente: Petra Internacional (2026). <https://www.petrainternacional.com>

Porcelanato exterior Graiman TEKSTONE: \$45,00/m². Fuente: Graiman Cía. Ltda. — distribuidores nacionales (2026).

Loseta hidráulica Hormipisos Vintage: \$70,00/m². Fuente: Hormipisos Cía. Ltda. (2026).

Baldosa Piedra & Piedra (Arq. F. Piedra): \$24,00/m² (formato 40×40 cm). Fuente: Piedra & Piedra, Cuenca (2026).

Nota metodológica: Se presenta el precio de venta al público como valor único de referencia para la comparación, que es el precio que paga el cliente final en el mercado. El precio de M-10-T8 (\$16,87/m²) corresponde al APU-01 en producción experimental y es el costo total de fabricación, no un precio de venta al mercado.

NOTA SOBRE LOS DATOS N.D. (NO DISPONIBLE) EN LA TABLA 5.1

Los datos N.D. corresponden a ensayos que los fabricantes no publican, que no son requeridos por sus normas respectivas, o que no han sido realizados bajo método estandarizado para el mercado ecuatoriano. En particular, **ningún fabricante del mercado ecuatoriano reporta resistencia al deslizamiento húmedo bajo DIN**

51130. El único valor verificado de todo el conjunto es el de M-10-T8 (42,8°, R13), obtenido en la presente investigación.

ANEXO 3

APUs baldosa

RESUMEN — ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

APU	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT	VALOR (USD)
Elab 1m2	Baldosa de hormigón con caucho NFU M-10-T8 (300×300×50 mm)	m2	1	16.87
Inst. Sol 1	Sum. e instalación Sol.1 — Sobre cama de arena lavada 3-5 cm (nueva construcción, CBR ≥ 6%). Incluye costo m ² de baldosa. Preparación de cama, colocación, sello de juntas y compactación.	m2	1	32.54
Inst. Sol 2	Sum. e instalación Sol.2 — Sobre mortero seco 1:3 en losa de hormigón existente, e = 3-4 cm. Incluye costo m ² de baldosa.	m2	1	37.53

Análisis de Precios Unitarios
Código: M-10-1B-F

Descripción: Baldosa de hormigón con caucho NFU M-10-1B (300×300×50 mm)

Unidad: m²

5/21/2026

COSTOS DIRECTOS

Equipo y herramienta						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total
	Herramienta menor	Hora	1.00000	0.23	0.15000	0.03
	Concretera 1 saco	Día	1.00000	3.13	0.15000	0.47
Subtotal de Equipo:						0.50
						3.52%

Materiales

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Total	%
	Cemento Portland IP Holcim	saco	0.0578	0.159	0.01	0.07%
	Arena de río lavada	m ³	0.0035	21.25	0.07	0.49%
	Ripio triturado 3/4"	m ³	0.0053	22.5	0.12	0.84%
	Caucho NFU fracción T-8 (PT)	kg	1.2222	0.109	0.13	0.91%
	Hidróxido de sodio NaOH (4)	kg	0.3000	10	3.00	20.98%
	Agua	m ³	0.0092	0.6	0.01	0.07%
	Encofrado (4 usos) -Triplex 18	m ²	0.3600	14.89	5.36	37.48%
	Tornillos negros 1/2" (12/mold)	u	36.0000	0.0135	0.49	3.43%
Subtotal de Materiales:						9.19
						64.27%

Transporte

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total	%
	Transporte cemento	saco.km	0.05778	0.08	5.00	0.02	0.14%
Subtotal de Transporte:						0.02	
						0.14%	

Mano de Obra

Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%
	Albañil D2	2.00	4.39	0.15000	1.32	9.23%
	Peón E2	3.00	4.34	0.15000	1.95	13.64%
	Operador de equipo liviano	2.00	4.39	0.15000	1.32	9.21%
Subtotal de Mano de Obra:						4.59
						32.08%

Costo Directo Total:

14.30

COSTOS INDIRECTOS

18 %

2.57

Precio Unitario Total

16.87

Son: DIECISEIS 87/100 U.S.D.



Análisis de Precios Unitarios

Código: M-10-T8-F
Descripción: Sum. e instalación Sol.1 — Sobre cama de arena lavada 5 cm (nueva construcción, CBR ≥ 6%). Incluye costo m² de baldosa. Preparación de cama, colocación, sello de juntas y compactación.
Unidad: m²

5/21/2026

COSTOS DIRECTOS

Equipo y herramienta						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total
	Herramienta menor	Hora	1.00000	0.36	0.40000	0.14
	Amoladora	Hora	1.00000	0.50	0.40000	0.20
	Vibroapisonador, potencia 4.80HP	hora	1.00000	0.59	0.40000	0.24
				Subtotal de Equipo:		0.58
						2.14%

Materiales						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Total	%
	Baldosa M-10-T8	m ²	1.0000	16.87	16.87	62.21%
	Arena lavada - cama nivelante e = 5 cm	m ³	0.0702	21.25	1.49	5.49%
				Subtotal de Materiales:	18.36	67.71%

Transporte						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total
	Baldosas	m ² /km	1.00000	0.20	5.00	1.00
				Subtotal de Transporte:		1.00
						3.69%

Mano de Obra						
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%
	Maestro Mayor C1	1.00	4.87	0.04000	0.19	0.70%
	Albañil D2	1.00	4.39	0.40000	1.76	6.49%
	Peón E2	2.00	4.34	0.40000	3.47	12.80%
	Operador de equipo liviano	1.00	4.39	0.40000	1.76	6.48%
				Subtotal de Mano de Obra:	7.18	26.46%

Costo Directo Total: 27.12

COSTOS INDIRECTOS	
Precio Unitario Total	5.42
	20 %
Precio Unitario Total	32.54

Son: TREINTA Y DOS CON 54/100 U.S.D.

Análisis de Precios Unitarios

Código: M-10-T8-F

Descrip.: Sum. e instalación Sol.2 — Sobre mortero seco 1:3 en losa de hormigón existente, e = 1-2 cm. Incluye costo m² de baldosa.

Unidad: m²

5/21/2026

COSTOS DIRECTOS

Equipo y herramienta						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Rendim.	Total
	Herramienta menor	Hora	1.00000	0.49	0.40000	0.20
	Amoladora	Hora	1.00000	0.50	0.40000	0.20
	Concretera 1 sacco	Día	1.00000	3.13	0.40000	1.25
Subtotal de Equipo:						1.65
						5.27%

Materiales						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	Total	%
	Baldosa M-10-T8	m ²	1.0000	16.87	16.87	53.75%
	Mortero seco 1:3 e= 2 cm. Incluye transporte	m ³	0.0200	95.87	1.92	6.14%
Subtotal de Materiales:						18.79
						60.09%

Transporte						
Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Tarifa/U	Distancia	Total
	Baldosas	m ² /km	1.00000	0.20	5.00	1.00
Subtotal de Transporte:						1.00
						3.20%

Mano de Obra						
Código	Descripción	Número	S.R.H.	Rendim.	Total	%
	Maestro Mayor C1	1.00	4.39	0.05500	0.24	0.77%
	Albanil D2	1.00	4.39	0.55000	2.41	7.71%
	Peón E2	2.00	4.34	0.55000	4.77	15.25%
	Operador de equipo liviano	1.00	4.39	0.55000	2.41	7.72%
Subtotal de Mano de Obra:						9.83
						31.45%

Costo Directo Total: 31.27

COSTOS INDIRECTOS

Precio Unitario Total	20 %	6.25
		37.53

Son: TREINTA Y SIETE CON 53/100 U.S.D.

ANEXO 4

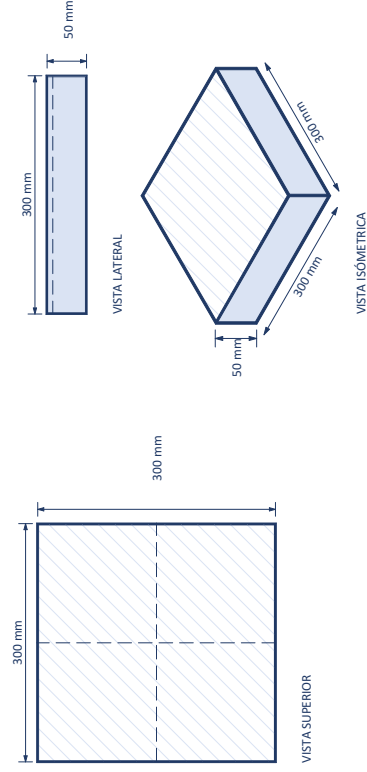
Ficha técnica

FICHA TÉCNICA

Baldosa de hormigón con caucho reciclado de NFU

UNIVERSIDAD
DEL AZUAY

DIAGRAMA DE DIMENSIONES Y VISTAS DEL PRODUCTO



DATOS NOMINALES	
Largo (L)	300 mm
Ancho (A)	300 mm
Espesor (e)	50 mm
Peso aprox. / unidad	10,8 kg
Unidades / m ²	11,11 u.
Densidad aparente	2.400 kg/m ³
Peso / m ²	120 kg/m ²
Norma de clasificación	UNE-EN 1339:2004
Clasificación de aptitud	Clase 1

Formulación: M-10-T8

01 IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO

Parámetro	Descripción
Denominación	Baldosa de hormigón con caucho NFU
Código	M-10-T8
Norma de ensayo	UNE-EN 1339:2004
Fecha de ensayo	Enero – marzo 2026
Dimensiones nominales	300 x 300 x 50 mm (Tolerancias: L = 296-298 mm; A = 296-298 mm; e = 50,8-52,0 mm; junta recomendada: 3-5 mm)
Densidad aparente	≈ 2.400 kg/m ³ (peso de 10.8 kg por unidad)
Peso aprox. por m ²	≈ 120 kg/m ² (11,11 unidades/m ²)
Clasificación de aptitud	Clase 1 — Tráfico peatonal intensivo
Laboratorio de ensayo	Geotecnia y Materiales — Univ. de Cuenca



02 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS — RESULTADOS DE ENSAYO

Parámetro	Valor obtenido	Norma / Clasificación
Dimensiones nominales	300 x 300 x 50 mm	UNE-EN 1339:2004
Resistencia a la flexión — T promedio	4,54 MPa	Clase 1 (≥ 3,5 MPa) ✓
Resistencia a la flexión — T individual mínima	4,30 MPa	Clase 1 (≥ 2,8 MPa) ✓

Absorción de agua	3,33 %	≤ 6,0 % ✓ UNE-EN 1339:2004
Impermeabilidad superficial	Nivel 0 (seco)	Ensayo 72 h — UNE-EN 1339:2004 ✓
Resistencia al deslizamiento húmedo	42,8° — Grupo R13	DIN 51130 — máxima categoría ✓
Coef. de restitución al impacto (e)	0,298	-26,6 % vs. hormigón convencional
Resistencia a compresión 28d (f _c)	59,2 kg/cm ²	≥ 18 MPa (objetivo de diseño) ✓
Contenido de caucho NFU	10 % del árido fino en masa	Fracción T-8 (2,36–4,75 mm)
Pretratamiento del caucho	NaOH 10 % / 25 minutos	Protocolo Si et al. (2017)

Nota. Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca (2026) bajo los protocolos de la UNE-EN 1339:2004. Los valores f_c y absorción provienen del Informe de Laboratorio N.º 4 (28 días).

03 COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA (por baldosa 300 x 300 x 50 mm)

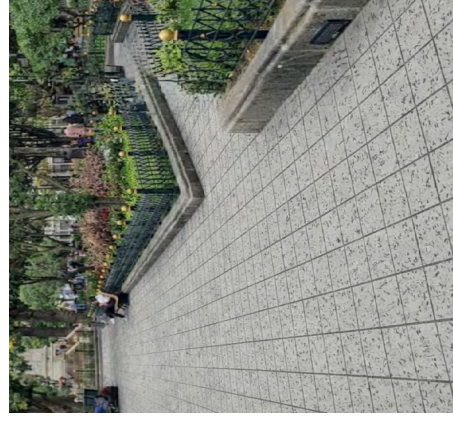
Material	Cantidad / baldosa	Proporción	Norma
Cemento Portland IP Holcim	2 081 g	—	NTE INEN 490
Arena de río lavada	3 962 g	Árido fino	ASTM C33
Ripio triturado 3/4"	6 163 g	Árido grueso	ASTM C33
Caucho NFU fracción T-8	440 g (10 % del árido fino)	Sustituto árido fino	—
Agua	832 ml	a/c = 0,40	ACI 211.1
NaOH — pretratamiento caucho	Solución 10 % / 25 minutos	—	Si et al. (2017)

Nota. Proporciones determinadas mediante el método de diseño de mezcla ACI 211.1. Conformidad granulométrica de áridos verificada conforme a ASTM C33. El caucho se incorpora en sustitución del árido fino sin afectar la dosificación de cemento ni la relación a/c.

04 USOS RECOMENDADOS Y APTITUD DE APLICACIÓN

La baldosa M-10-T8 está diseñada para uso en espacios públicos peatonales exteriores de la zona lluviosa continental ecuatoriana. Sus propiedades de resistencia al deslizamiento en condiciones húmedas (R13) y absorción de energía de impacto (e = 0,298) la hacen especialmente adecuada para entornos de alta exposición al agua y zonas de vulnerabilidad peatonal.

Aplicación recomendada	Descripción	Aptitud
Aceras y senderos peatonales	Circulación peatonal cotidiana en zonas lluviosas continentales	Alta ✓
Plazas y parques urbanos	Áreas de permanencia y recreación con exposición permanente a lluvia	Alta ✓
Accesos a inst. educativas	Zonas de alta concentración peatonal con niños y adultos mayores	Alta ✓
Espacios de inclusión universal	Rutas accesibles, rampas y cruces peatonales adaptados	Alta ✓
Zonas exteriores comerciales	Terrazas, accesos y patios con tráfico peatonal intensivo	Alta ✓
Espacios de recreación	Interiores de alta humedad (piscinas, vestuarios, deportivos)	Alta ✓

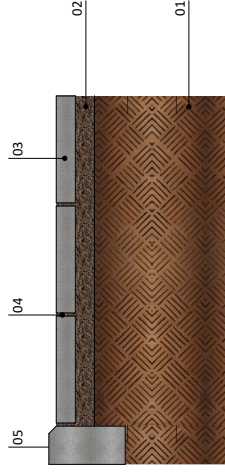


* En ambientes con presencia de cloro u otros productos químicos agresivos, se recomienda un estudio previo de compatibilidad. No apta para tráfico vehicular.

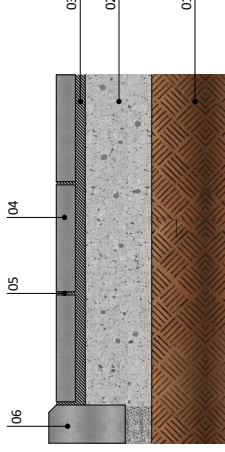
05 SOLUCIONES DE INSTALACIÓN SOBRE DISTINTOS SUSTRATOS

La baldosa M-10-T8 puede instalarse sobre cuatro tipos de sustratos, cubriendo tanto proyectos de nueva construcción como intervenciones de rehabilitación de pavimentos existentes. Todas las soluciones contemplan la aplicación de arena de sello en las juntas (2-3 mm) y la compactación final con bandeja vibrante. La Figura ilustra las secciones constructivas de cada solución.

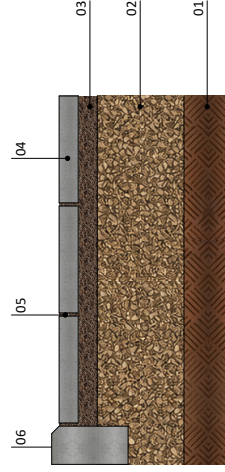
Solución 1. Sobre cama de arena fina



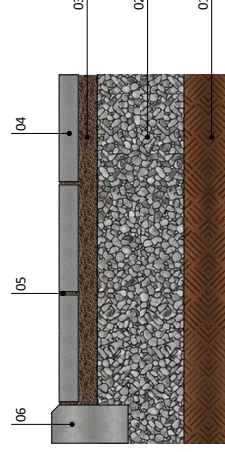
Solución 2. Sobre losa de hormigón existente



Solución 3. Sobre material de mejoramiento



Solución 4. Sobre base granular compactada



Solución. 1

Cama de arena

Aplicación: Nueva construcción sobre suelo estable (CBR \geq 6 %).

01. Subrasante compactada al 95 % Proctor Modificado - CBR \geq 6 % · espesor: variable
02. Cama de arena lavada, tendida y nivelada · sin compactar · espesor: 5 cm
03. Baldosa M-10-T8 asentada con mazo de goma · espesor nominal: 50 mm
04. Junta de colocación rellena con arena fina seca · ancho: 3-5 mm · compactar con bandeja vibrante
05. Bordillo prefabricado de hormigón para confinamiento · 10x30x100 cm · respaldo de hormigón

Proceso: limpiar y compactar subrasante → nivelar cama de arena → colocar baldosas → vibrar → rellenar juntas

Solución. 2

Sobre losa de hormigón existente




Aplicación: Renovación o rehabilitación de pavimento peatonal con losa de hormigón existente en buen estado estructural.

01. Subrasante compactada al 95 % Proctor Modificado - CBR \geq 6 % · espesor: variable
02. Losa de hormigón existente - $f'c \geq 18$ MPa · sin fisuras estructurales activas
03. Capa de asiento de mortero seco cemento: arena 1:3 · tendido seco · espesor: 2-3 cm · extendido y nivelado
04. Baldosa M-10-T8 asentada con mazo de goma · cara inferior humedecida antes de colocar · espesor nominal: 50 mm
05. Junta de colocación con mortero de cemento y arena fina 1:1 · ancho: 3-5 mm · curado húmedo 24 h
06. Bordillo prefabricado de hormigón para confinamiento · 10x30x100 cm · respaldo de hormigón

Proceso: limpiar y humedecer superficie de losa → extender mortero seco 1:3 y nivelar → humedecer cara inferior de baldosa → asentar con mazo → rellenar juntas → mantener húmedo 24 h. La relación cemento: arena 1:3 en volumen garantiza adherencia adecuada para una pieza de 50 mm de espesor.

<p>Solución 3 Sobre material de mejoramiento</p>	<p>Aplicación: Zonas con suelo de baja capacidad portante (CBR < 6 %) que requieren estabilización previa antes de la instalación del pavimento.</p> <p>01. Subrasante pobre - CBR < 6 % · verificar con ensayo Proctor + CBR in situ</p> <p>02. Material de mejoramiento (lastre/grava triturada), por capas - 95 % PM · capas ≤ 15 cm · espesor total: 20-30 cm · CBR ≥ 20 %</p> <p>03. Cama de arena lavada, tendida y nivelada - sin compactar · espesor: 5 cm</p> <p>04. Baldosa M-10-T8 asentada con mazo de goma - espesor nominal: 50 mm</p> <p>05. Junta de colocación rellena con arena fina seca - ancho: 3-5 mm · compactar con bandeja vibrante</p> <p>06. Bordillo prefabricado de hormigón para confinamiento - 10x30x100 cm · respaldo de hormigón</p> <p>Proceso: realizar ensayo de suelo previo → excavar y reemplazar suelo deficiente → compactar mejoramiento por capas → verificar CBR → continuar con sección estándar.</p>
<p>Solución 4 Base granular</p>	<p>Aplicación: Aceras, senderos y espacios de parque en nueva construcción sobre subrasante estable. Solución simplificada cuando no se requiere subbase.</p> <p>01. Subrasante compactada al 95 % Proctor Modificado - CBR ≥ 6 % - espesor: variable</p> <p>02. Base granular fina compactada - CBR ≥ 30 % · espesor: 20-40 cm verificar estudio de suelos</p> <p>03. Cama de arena lavada, tendida y nivelada - sin compactar · espesor: 5 cm</p> <p>04. Baldosa M-10-T8 asentada con mazo de goma - espesor nominal: 50 mm</p> <p>05. Junta de colocación rellena con arena fina seca - ancho: 3-5 mm · compactar con bandeja vibrante</p> <p>07. Bordillo prefabricado de hormigón para confinamiento - 10x30x100 cm · respaldo de hormigón</p> <p>Proceso: compactar subrasante → extender base granular en capas ≤ 10 cm → compactar → nivelar cama de arena → colocar baldosas con cuñas de plástico → vibrar → retirar cuñas → rellenar juntas</p>

06 PROPIEDADES DESTACADAS Y VENTAJAS DIFERENCIALES

 Seguridad peatonal	 Sostenibilidad ambiental	 Desempeño técnico
<ul style="list-style-type: none"> R13 en DIN 51130: mayor deslizamiento húmedo del conjunto analizado (42,8°, +20,2 % vs. hormigón convencional). Absorción de impacto: e = 0,298 — reducción del 26,6 % respecto al control — menor fuerza transmitida en caídas. Nivel 0 de filtración: impermeabilidad superficial comprobada a 72 h. 	<ul style="list-style-type: none"> Valorización NFU: cada m² de baldosa utiliza ≈ 4,9 kg de caucho de neumático fuera de uso (≈ 0,16 neumáticos/m²). Economía circular: contribuye a la gestión de los ≈ 2,4 millones de NFU que se desechan anualmente en Ecuador. Sin impacto económico significativo: el caucho representa solo el 4,8 % del costo total del material. 	<ul style="list-style-type: none"> Clase 1 UNE-EN 1339:2004: cumplimiento normativo completo en flexión, absorción e impermeabilidad. Resistencia a la flexión: 4,54 MPa promedio — 29,7 % por encima del mínimo de Clase 1. Bajo mantenimiento: no requiere sellado ni impermeabilización periódica. Limpieza con agua a presión.

07 MANTENIMIENTO Y DURABILIDAD

Tipo de mantenimiento	Frecuencia y procedimiento recomendado
Limpieza superficial	Periódica — agua a presión moderada o escoba. No requiere productos químicos especiales.
Revisión de juntas	Anual — reposición de arena de sello en juntas deterioradas o desplazadas.
Reposición de piezas	Bajo demanda — la instalación en seco sobre cama de arena permite levantar y reponer piezas individuales sin romper el pavimento adyacente.
Vida útil estimada	≥ 20 años con mantenimiento adecuado, equivalente a la del hormigón convencional en exteriores (ACI 318, 2019).

08 NORMAS DE SEGURIDAD - EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL (EPP)

EPP	Descripción y aplicación	Aplicación	NORMA
Casco de seguridad	Clase E - dieléctrico	Fabricación y colocación	NTE INEN-ISO 3873
Gautes de protección	Cuero / latex antideslizante - resistente a la abrasión	Mezcla, colocación y fabricación	NTE INEN 1837
Calzado de seguridad	Puntas de acero + suela antideslizante	Todo el proceso	NTE INEN 1926
Gafas de protección	Panorámicas - Resistentes a impactos	Corte, compactación	NTE INEN-ISO 16321
Mascarilla de protección respiratoria	FFP2 / N95 - polvo y caucho	Corte con amoladora	NTE INEN-ISO 16900
Protección auditiva	NRR \geq 25 dB (tapones) o NRR \geq 30 dB (orejeras)	Cortes, compactación	NTE INEN-ISO 4869
Chaleco reflectivo	Clase 2 - colores flúor	Todo el proceso	NTE INEN 2825

Nota. Fuentes: NTE INEN 2266:2013 - Transporte y manejo de materiales peligrosos; Decisión 584 CAN - Instrumento Andino de Seguridad y Salud en el Trabajo. El uso de mascarilla N95 es obligatorio específicamente para el corte seco con amoladora y la mezcla con caucho NFU (partículas de caucho en suspensión).

09 GUÍA DE MECANIZACIONES Y OPERABILIDAD

La siguiente guía establece las condiciones seguras verificadas experimentalmente ($n = 3$ repeticiones por distancia) para las operaciones mecánicas más frecuentes en obra con la baldosa M-10-T8. Todos los valores de distancia mínima al borde corresponden a la distancia medida desde el centro de la perforación/clavo hasta la arista más próxima de la pieza.

OPERACIÓN	CONDICIÓN SEGURA	CONDICIÓN DE RIESGO	INSTRUCCIÓN TÉCNICA
Perforación \varnothing 4 mm	≥ 1.0 cm del borde	< 0.5 cm \rightarrow ROTURA	Broca para hormigón, vel. media, sin percusión. Dist. mín. al borde: 1,0 cm
Perforación \varnothing 8 mm	≥ 1.5 cm del borde	$\leq 1,0$ cm \rightarrow ROTURA	Distancia mínima al borde: 1,5 cm. Velocidad constante.
Perforación \varnothing 12 mm	≥ 2.0 cm del borde	$\leq 1,5$ cm \rightarrow ROTURA	Distancia mínima al borde: 2,0 cm.
Clavo de acero 2" / 2.1/2"	≥ 3.0 cm del borde	$\leq 2,0$ cm \rightarrow ROTURA	No se recomienda clavado directo: distancia mín. 3,0 cm, golpes graduales.
Corte seco - amoladora	\checkmark Recomendado	Genera polvo \rightarrow usar EPP	Disco para hormigón estándar. Bordes limpios, caucho íntegro. OBLIGATORIO: mascarilla N95 + gafas.
Corte húmedo - sierra de mesa	\times No recomendado	Caucho resiste al disco, lo quema	El caucho NFU genera resistencia al disco de diamante en húmedo \rightarrow quemado del material y daño al equipo.
Fijación mobiliario urbano (semaforos, postes, juegos, etc.)	Dado de hormigón $f'c \geq 21$ MPa	Anclar directo sobre baldosa \rightarrow NO	Construir dado H: 30x30 cm mín., prof. ≥ 40 cm antes de colocar baldosas. Cortar baldosas alrededor con amoladora. Junta estándar 3-5 mm.

Nota. Condiciones verificadas experimentalmente en el Laboratorio de la Universidad del Azuay (Cuenca, 2026). Para elementos de mayor diámetro o carga, utilizar siempre el dado de hormigón descrito arriba. Nunca perforar a menos de la distancia segura indicada sin verificación previa en pieza de prueba.

Norma / Referencia	Descripción y aplicación
UNE-EN 1339:2004	Norma de ensayo y clasificación adoptada para todos los parámetros de aptitud. Clasifica la baldosa como Clase 1 (tráfico peatonal intensivo).
ACI 211.1	Método de diseño de mezcla aplicado para determinar las proporciones de cemento, áridos y agua.
ASTM C33	Especificación de áridos (arena y ripio) — conformidad granulométrica verificada.
ASTM C39	Método de ensayo de resistencia a compresión en cilindros — Laboratorio UCuenca.
DIN 51130	Método de clasificación de resistencia al deslizamiento por rampa inclinada — Grupo R13.
NTE INEN 490	Norma ecuatoriana para cemento Portland Puzolánico tipo IP Holcim.
NTE INEN 2245:2016	Accesibilidad al Medio Físico - Rampas fijas. Pendiente máx. 8 %, ancho mín. 1,20 m
Si et al. (2017)	Protocolo de pretratamiento NaOH 10 % / 25 minutos para caucho granulado.

Esta ficha técnica corresponde a un producto en fase de investigación y prototipo experimental. Los valores presentados son resultado de ensayos realizados en el Laboratorio de Geotecnia y Materiales de la Universidad de Cuenca (2026) bajo la UNE-EN 1339:2004.

Universidad del Azuay — Facultad de Arquitectura, Diseño y Arte — Cuenca, Ecuador, 2026.

NOTAS GENERALES Y RECOMENDACIONES

Sobre el producto

- La baldosa M-10-T8 está diseñada exclusivamente para uso peatonal exterior. No es apta para tráfico vehicular ni para ambientes con exposición a ácidos, solventes orgánicos o temperaturas superiores a 60 °C de manera prolongada.
- En ambientes con presencia de cloro u otros productos químicos agresivos se recomienda un estudio previo de compatibilidad antes de especificar el producto.
- No instalar piezas con curado inferior a 28 días desde su fecha de fabricación.

Sobre las dimensiones y juntas

- La junta de colocación recomendada es de 3–5 mm. No instalar con junta menor a 3 mm ni mayor a 5 mm, ya que afecta el trabado entre piezas y la estabilidad del pavimento.
- Respetar las juntas de dilatación de 5 mm cada 4–5 m. Su omisión puede provocar levantamientos o fisuras por movimientos térmicos.

Sobre la instalación

- La subrasante debe estar compactada y libre de asentamientos activos o agua freática antes de iniciar la instalación.
- La pendiente transversal mínima del pavimento terminado debe ser 1,0–2,0 % hacia el sistema de drenaje. No instalar en superficies horizontales sin evacuación de agua pluvial.
- La compactación final con bandeja vibrante es obligatoria. Su omisión compromete el asentamiento uniforme del pavimento.

Sobre las mecanizaciones en obra

- No perforar a menos de las distancias mínimas indicadas en la sección 09. Su incumplimiento produce rotura del borde de la pieza.
- Utilizar exclusivamente corte seco con amoladora y disco para hormigón. El corte húmedo daña el material y el equipo.
- Para anclar mobiliario urbano, señalización o cualquier elemento de carga, construir un dado de hormigón previo. No anclar directamente sobre la baldosa.

Sobre el mantenimiento

- Limpiar con agua a presión moderada o escoba. No utilizar productos ácidos, solventes ni hidrolavadoras de alta presión sobre las juntas.
- Revisar y reponer la arena de sello en juntas deterioradas al menos una vez al año.

ANEXO 5

Huella de carbono

Anexo 5.A — Memoria de cálculo de la huella de carbono

El presente anexo desglosa cada operación aritmética del cálculo de huella de carbono para ambas mezclas. La estructura aplicada es $HC = \sum_i (M_i \times FE_i)$, donde cada fila representa un componente y la columna final muestra el resultado de la multiplicación. Todos los valores están expresados por metro cuadrado de baldosa colocada.

A.1 Cálculo para M-0 (mezcla de control) -

Material	Cantidad/m ²	FE	Operación	Emisión (kg CO ₂ eq/m ²)
Cemento Portland IP	23,12 kg	0,62 kg CO ₂ eq/kg	$23,12 \times 0,62$	14,334
Arena lavada	48,91 kg	0,0048 kg CO ₂ eq/kg	$48,91 \times 0,0048$	0,235
Ripio triturado	68,47 kg	0,0052 kg CO ₂ eq/kg	$68,47 \times 0,0052$	0,356
Agua potable	9,24 L	0,000344 kg CO ₂ eq/L	$9,24 \times 0,000344$	0,003
Transporte	149,74 kg · 5 km	0,10 kg CO ₂ eq/t·km	$0,14974 \times 5 \times 0,10$	0,075
TOTAL, M-0				15,003

A.2 Cálculo para M-10-T8 (formulación propuesta)

Material	Cantidad/m ²	FE	Operación	Emisión (kg CO ₂ eq/m ²)
Cemento Portland IP	23,12 kg	0,62 kg CO ₂ eq/kg	$23,12 \times 0,62$	14,334
Arena lavada	44,02 kg	0,0048 kg CO ₂ eq/kg	$44,02 \times 0,0048$	0,211
Ripio triturado	68,47 kg	0,0052 kg CO ₂ eq/kg	$68,47 \times 0,0052$	0,356
Caucho NFU procesado	4,89 kg	0,21 kg CO ₂ eq/kg	$4,89 \times 0,21$	1,027
Agua potable	9,24 L	0,000344 kg CO ₂ eq/L	$9,24 \times 0,000344$	0,003
NaOH	1,00 kg	1,12 kg CO ₂ eq/kg	$1,00 \times 1,12$	1,120
Transporte	150,74 kg · 5 km	0,10 kg CO ₂ eq/t·km	$0,15074 \times 5 \times 0,10$	0,075
Subtotal cradle-to-gate				17,126
Crédito por valorización del NFU	4,89 kg	1,00 kg CO ₂ eq/kg	$- 4,89 \times 1,00$	-4,890
TOTAL, NETO M-10-T8				12,236

Reducción porcentual estimada = $(15,003 - 12,236) / 15,003 \times 100 \approx 18,44\%$. La diferencia absoluta entre ambas mezclas (2,767 kg CO₂eq/m²) corresponde al balance neto entre los aportes adicionales de M-10-T8 (procesamiento de caucho y NaOH, +2,147 kg CO₂eq) y los créditos por sustitución de árido fino (-0,024) y valorización del NFU (-4,890), sumando una variación neta de -2,767 kg CO₂eq/m².

Anexo 5.B — Justificación de los factores de emisión adoptados

B.1 Cemento Portland IP — 0,62 kg CO₂eq/kg. El cemento Portland Tipo IP es un Portland-puzolánico con sustitución del clinker del 11 al 35 % por puzolanas naturales (ASTM C595). El cemento Holcim IP comercializado en Ecuador corresponde a esta categoría y cumple con la NIE INEN 490. El factor adoptado proviene de la base ICE (Hammond y Jones, 2019), que reporta 0,62 kg CO₂eq/kg para CEM IP/A-P, frente a ≈ 0,90 kg CO₂eq/kg del cemento Portland puro CEM1. La diferencia refleja la sustitución parcial del clinker por puzolana.

B.2 Arena de río lavada — 0,0048 kg CO₂eq/kg. Valor central del rango 0,0036 a 0,0070 kg CO₂eq/kg reportado por ICE Database v3.0 para áridos naturales lavados, dependiendo de la distancia de transporte y del consumo energético del lavado.

B.3 Ripio triturado 3/4" — 0,0052 kg CO₂eq/kg. Valor representativo del rango 0,0048 a 0,0086 kg CO₂eq/kg reportado por ICE Database v3.0 para áridos triturados. La mayor variabilidad respecto a la arena se debe al consumo energético del proceso de trituración.

B.4 Caucho NFU procesado, fracción T-8 — 0,21 kg CO₂eq/kg. El caucho NFU ingresa al sistema bajo el principio de cut-off: las emisiones del neumático original se asignan al ciclo de uso vehicular previo y no se contabilizan. El factor aplicado corresponde únicamente al consumo energético del proceso de granulación a fracción T-8 (2,36–4,75 mm), reportado por Sienkiewicz et al. (2017) en el rango 0,15–0,28 kg CO₂eq/kg. Se adopta 0,21 kg CO₂eq/kg, valor situado en el extremo superior del rango como medida conservadora.

B.5 NaOH (sosa cáustica) — 1,12 kg CO₂eq/kg. La producción industrial de hidróxido de sodio se realiza mediante el proceso cloro-álcali, de alto consumo eléctrico. Ecoinvent v3.8 reporta 1,12 kg CO₂eq/kg de NaOH puro, valor consistente con ICE Database.

B.6 Agua potable — 0,000344 kg CO₂eq/L. Factor estándar de agua de red según ICE Database v3.0, considera el consumo energético del bombeo, tratamiento y distribución. Su contribución a la huella total es marginal en ambas mezclas, aunque se incluye por completitud metodológica.

B.7 Transporte camión — 0,10 kg CO₂eq/t km. Factor para camión rígido mediano (3,5–7,5 t de carga útil), basado en IPCC (2019) Volumen 2 Capítulo 3 — Mobile combustion. Aplicable al transporte local en el área metropolitana de Cuenca, donde las distancias entre proveedor y planta no superan los 5 km.

B.8 Crédito por valorización del NFU (disposición evitada) — 1,00 kg CO₂eq/kg. Valor conservador adoptado para representar las emisiones evitadas al desviar el caucho NFU desde su destino habitual en el Ecuador (quemado a cielo abierto, vertido informal documentado en el Capítulo 1) hacia su valorización como insumo de construcción. La justificación metodológica detallada se presenta en el Anexo 5.5.C.

Anexo 5.C — Justificación del crédito por valorización del NFU

El presente análisis aplica el principio de expansión del sistema, contemplado en ISO 14067:2018 § 6.4.5 y en ISO 14040:2006, para incorporar el crédito ambiental derivado de la valorización del caucho NFU. La aplicación de este principio se justifica con base en los siguientes argumentos:

(i) Escenario sin valorización (M-0): los 4,89 kg de NFU por m² siguen el flujo de gestión habitual del residuo en el contexto ecuatoriano, predominantemente disposición informal mediante quema a cielo abierto o vertido en quebradas y terrenos baldíos (Capítulo 1). Estos destinos generan emisiones reales de CO₂, metano y contaminantes secundarios como carbón negro y compuestos orgánicos volátiles.

(ii) Escenario con valorización (M-10-T8): los mismos 4,89 kg de NFU se incorporan como insumo de construcción y permanecen inmovilizados en la matriz de hormigón durante la vida útil del pavimento, desviándose del sistema de gestión de residuos hacia el sistema productivo y evitando las emisiones de la disposición informal.

(iii) Cuantificación conservadora: las emisiones evitadas por kg de NFU desviado se estiman en 1,00 kg CO₂eq/kg, valor sustancialmente menor a los rangos publicados en la literatura técnica sobre combustión incompleta de neumáticos (típicamente 1,4 a 2,5 kg CO₂eq/kg). El valor adoptado se sitúa aproximadamente un 30 % por debajo del límite inferior del rango publicado, proporcionando un margen de prudencia metodológica que minimiza el riesgo de sobreestimar el beneficio ambiental.

(iv) Coherencia con la normativa internacional: ISO 14067:2018 autoriza explícitamente el uso de expansión del sistema en estudios comparativos donde una de las alternativas analizadas modifica la gestión final de un flujo de residuos. Esta es exactamente la situación del presente análisis: las dos mezclas comparadas (M-0 y M-10-T8) divergen específicamente en el destino del residuo NFU.

Aclaración sobre la naturaleza del crédito. El valor de 1,00 kg CO₂eq/kg adoptado no representa una captura física de carbono por parte de la baldosa, sino una estimación de las emisiones que se evitan al desviar el residuo NFU del escenario de disposición informal. La baldosa, en sí misma, no secuestra CO₂ atmosférico; el beneficio ambiental se origina en la prevención de un flujo de emisiones que ocurriría en ausencia de la propuesta.

Implicación analítica: la reducción reportada del 18,4 % (sección 5.5.6) incorpora este crédito. En su ausencia, el análisis cradle-to-gate puro arrojaría un incremento neto de aproximadamente 14 % respecto del control, lo que evidencia que el aporte ambiental de la baldosa M-10-T8 deriva fundamentalmente de la valorización del residuo más que de la sustitución física del árido. Esta observación es metodológicamente honesta y refuerza el argumento de economía circular como eje conceptual del aporte ambiental de la tesis.

