UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE DISEÑO Y ARQUITECTURA

DISEÑO INDUSTRIAL

“DISEÑO DE UN MATERIAL ECO-EFICIENTE BASADO EN RESIDUOS RECICLADOS, ADAPTADO A LAS CONDICIONES AMBIENTALES URBANAS, PARA LA FABRICACIÓN DE SUPERFICIES PODOTÁCTILES”

Modalidad: Proyecto de Investigación.

Trabajo de Titulación, proyecto investigación previo a la obtención del Título de Ingeniero en Diseño Industrial, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato.

Autor: José Andrés Flores Mena.

Tutor: MSc. Martin Monar.

Ambato - Ecuador

Diciembre- 2025

APROBACIÓN DEL TUTOR

En mi calidad de Tutor del Trabajo de Titulación sobre el tema:

"Diseño de un material eco-eficiente basado en residuos reciclados, adaptado a las condiciones ambientales urbanas, para la fabricación de superficies podotáctiles" Del alumno José Andrés Flores Mena, estudiante de la carrera de Diseño Industrial, considero que dicho Trabajo de Titulación bajo la Modalidad Proyecto Investigación ha sido revisado en su totalidad, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento para la Titulación de Grado en la Universidad Técnica de Ambato.

Por lo tanto, autorizo la presentación del mismo, ante el organismo pertinente para ser sometido a la evaluación de los profesores calificadores designado por el H. Consejo Directivo de la Facultad.

Ambato, diciembre 2025

.....

Nombre: Ing. Mg. Martin Monar Naranjo

C.C.: 1803474087

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, José Andrés Flores Mena con cédula de ciudadanía No 1804988382, declaro que los criterios emitidos en el trabajo de titulación, modalidad de Proyecto Investigación bajo el tema: **"Diseño de un material eco-eficiente basado en residuos reciclados, adaptado a las condiciones ambientales urbanas, para la fabricación de superficies podotáctiles"**, así como también los contenidos presentados, ideas, análisis, síntesis de datos y conclusiones, son de exclusiva responsabilidad de mi persona, como autor/a de este trabajo de Titulación

Ambato, diciembre 2025

Nombre: José Andrés Flores Mena.

C.C.: 1804988382.

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Yo, José Andrés Flores Mena con C.C.: 1804988382 en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **"Diseño de un material eco-eficiente basado en residuos reciclados, adaptado a las condiciones ambientales urbanas, para la fabricación de superficies podotáctiles"** autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este trabajo de titulación o parte de él, un documento disponible con fines netamente académicos para su lectura, consulta y procesos de investigación.

Cedo una licencia gratuita e intransferible, así como los derechos patrimoniales de mi Trabajo de Titulación a favor de la Universidad Técnica de Ambato con fines de difusión pública; y se realice su publicación en el repositorio institucional de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, siempre y cuando no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor/a.

Ambato, diciembre 2025

.....

Nombre: José Andrés Flores Mena.

C.C.: 1804988382.

AUTOR

TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado del Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación sobre el **TEMA: DISEÑO DE UN MATERIAL ECO-EFICIENTE BASADO EN RESIDUOS RECICLADOS, ADAPTADO A LAS CONDICIONES AMBIENTALES URBANAS, PARA LA FABRICACIÓN DE SUPERFICIES PODOTÁCTILES** de José Andrés Flores Mena, estudiante de la carrera de Diseño Industrial, de la Facultad de Diseño y Arquitectura de conformidad con el Reglamento para la Titulación de Grado para obtener el título terminal de Tercer Nivel de la Universidad Técnica de Ambato, una vez revisado y calificado

Ambato, Enero 2025

Para constancia firman:

_____

Título. Nombres y Apellidos
PRESIDENTE
C.C.:

_____ _____

Título. Nombres Apellidos
MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO
C.C.:

Título. Nombres Apellidos
MIEMBRO TRIBUNAL DE GRADO
C.C.:

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedicado a:

A mi mamá, Raquel, por su amor incondicional, su fortaleza y cada sacrificio que hizo para que yo pudiera llegar hasta aquí. Gracias por ser mi guía, mi apoyo constante y el ejemplo más grande de perseverancia que tengo en la vida.

A mi abuelita, Luisa, cuyo cariño, sabiduría y palabras de aliento siempre me dieron calma y motivación. Gracias por creer en mí incluso antes de que yo lo hiciera.

A mi primo, Juan David, que ha sido como un hermano, por acompañarme en los momentos difíciles y celebrar conmigo los buenos. Gracias por tu apoyo, tu lealtad y por estar siempre a mi lado.

Los quiero profundamente y espero se sientan orgullosos de mí, este logro es tan mío como suyo.

Y finalmente, a todas las personas que creyeron en mí. Gracias por acompañarme en este camino que hoy culmina con gratitud y esperanza.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento al Ing. Martin Monar, mi tutor de tesis, por su guía, dedicación y paciencia durante todo el proceso de investigación. Su experiencia y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

A mis hermanas Erika y Elizabeth, por su apoyo, sus palabras de ánimo y por recordarme siempre la importancia de seguir adelante.

A mis docentes de la facultad, quienes compartieron conmigo sus conocimientos y enseñanzas, formando en mí las bases profesionales y humanas que hoy me acompañan.

A mis compañeros de clases, por cada momento compartido, por el trabajo en equipo y por ser parte de esta etapa llena de aprendizaje y crecimiento.

A mis amigos del colegio, quienes han estado presentes incluso con el paso de los años, brindándome apoyo, motivación y amistad sincera.

Y a mi cuñado Jorge, por estar siempre dispuesto a ayudarme, por su respaldo constante y por creer en mí.

A todos ustedes, gracias por ser parte esencial de este camino.

Índice General.

A. PAGINAS PREELIMINARES

PORTADA i

APROBACIÓN DEL TUTOR ii

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN ii

DERECHOS DE AUTOR iv

TRIBUNAL DE GRADO iv

DEDICATORIA vi

AGRADECIMIENTO..... vii

Índice General. viii

Índice de Contenido ix

ÍNDICE DE TABLAS..... xii

ÍNDICE DE FIGURAS.....xiv

Resumen Ejecutivo.....xvi

ABSTRACT xvii

Introducción 1

Índice de Contenido

B.Contenido

CAPÍTULO I 2

MARCO TEÓRICO. 2

1.1 Tema. 2

1.2 Planteamiento del problema. 2

1.3 Contextualización. 3

1.3.1 Sectores y zonas clave de Tungurahua. 5

1.4 Árbol de problemas. 7

1.5 Justificación. 8

1.6 Objetivos. 9

1.6.1 Objetivos general. 9

1.6.2 Objetivos específicos. 9

1.6.3 Línea de investigación. 9

1.7 Antecedentes de la investigación. 9

1.8 Fundamentación. 16

1.8.1 Fundamentación Legal. 16

1.8.2 Fundamentación Axiológica. 19

1.8.3 Fundamentación Ontológica. 20

1.8.4 Análisis Pestel. 20

1.8.4 Análisis FODA. 22

1.9 Categorías fundamentales. 23

1.9.1 Redes Conceptuales. 23

1.9.2 Redes Conceptuales / Constelación de Ideas. 23

1.9.3 Bases Teóricas. 25
1.9.4 Formulación de idea a defender. 35
1.10 Señalamiento de variables. 35
1.10.1 Variable dependiente. 35
1.10.2 Variable independiente. 35
CAPITULO II 36
METODOLOGÍA 36
2.1 Método. 36
2.2 Enfoque de la investigación. 37
2.3 Modalidad. 37
2.4 Nivel de investigación. 38
2.5 Diseño de la investigación 39
2.6 Operacionalización de variables. 41
2.7 Población y muestra. 43
2.7.1. Muestra. 45
2.7.2. Tipo de muestra 48
2.7.3. Tamaño de la muestra 48
2.7.4. Selección de la muestra 49
2.8 Materiales y procedimiento experimental. 50
2.8.1 Obtención de las limallas metálicas 50
2.8.2 Tamizado y clasificación de las limallas (tamiz #16) 51
2.8.3 Selección del material base para los adoquines podotáctiles. 53
2.8.4 Agregados empleados (arena, ripio, cemento Holcim) 56
2.8.5 Dosificación de las mezclas (en libras, 0 % y 10 % de limallas) 58
2.8.6 Mezclado de los materiales en la bloquera. 59

2.8.7 Moldeo de los adoquines hexagonales 60

2.9 Técnicas de estudio. 62

2.10 Modelo de instrumentos. 63

2.11 Análisis y discusión de resultados. 64

CAPÍTULO III 64

RESULTADOS Y DISCUSIÓN 64

3.1 Análisis y discusión de los resultados. 64

3.1.1 Resultados de compresión de la probeta de referencia sin limallas (ensayo a 7 días). 67

3.1.2 Resultados de compresión del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 1, ensayo a 7 días) 70

3.1.3 Resultados de compresión del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 2, ensayo a 7 días) 72

3.1.4 Resultados de tracción indirecta de la probeta de referencia sin limallas (ensayo a 7 días) 75

3.1.5 Resultados de tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 1, ensayo a 7 días) 77

3.1.6 Resultados de tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 2, ensayo a 7 días) 79

3.2 Verificación de hipótesis, idea a defender o pregunta científica 82

CAPÍTULO IV 85

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 85

4.1. Conclusiones. 85

4.2. Recomendaciones. 86

ANEXOS. 93

BIBLIOGRAFÍA. 88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Sectores y zonas claves de Tungurahua. 5

Tabla 2 Paneles nervados de fibras metálicas. 10

Tabla 3 Concreto con virutas de acero 0,2 – 0,8 %. 11

Tabla 4 Hormigón con virutas de acero como agregado fino. 12

Tabla 5 Adoquines con virutas de acero con remplazo de agregado fino. 13

Tabla 6 Adoquines de hormigón con virutas de acero como remplazo de agregado fino. 14

Tabla 7 Adoquines con virutas de acero como remplazo al agregado fino. 15

Tabla 8: (NTE INEN 3040:2016) — Tolerancias admisibles. 18

Tabla 9 Análisis Pestel. 21

Tabla 10 Variable Independiente: Aprovechamiento de residuos reciclados. 41

Tabla 11 Variable Dependiente: Material Compuesto. 42

Tabla 12 Clasificación de las ciudades de Tungurahua: población, superficie, y rol económico según la SNI. 44

Tabla 13 Categorización de Baños de Agua Santa. 46

Tabla 14 Evaluación comparativa de materiales utilizados en superficies podotáctiles. .54

Tabla 15 Resultados de la evaluación cuantitativa de materiales para podotáctiles. 55

Tabla 16 Dosificación de materiales para seis adoquines hexagonales, con y sin incorporación de limallas metálicas. 58

Tabla 17 Resumen del desarrollo de la resistencia relativa a la compresión del hormigón. 67

Tabla 18 Resultados de la prueba de compresión para la probeta de referencia (0 % limallas). 68

Tabla 19 Resultados de la prueba de compresión para el adoquín con 10 % de limallas (Probeta 1, 7 días). 70

Tabla 20 Resultados de la prueba de compresión para el adoquín con 10 % de limallas (Probeta 2, 7 días). 72

Tabla 21 Resultados de la prueba de tracción indirecta para la probeta de referencia (0 % limallas, 7 días). 75

Tabla 22 Resultados de la prueba de tracción indirecta para el adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 1, 7 días)..... 77

Tabla 23 Resultados de la prueba de tracción indirecta para el adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 2, 7 días)..... 79

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Árbol de problemas.....7

Figura 2 Modo de falla por cizallamiento del refuerzo en la nervadura. 11

Figura 3 Virutas metálicas recicladas.....12

Figura 4 Cilindros de hormigón con virutas metálicas. 13

Figura 5 Ensayo de resistencia a compresión del adoquín de concreto. 14

Figura 6 Esquema de fabricación de adoquines.....15

Figura 7 Granulometría de agregados.....16

Figura 8 Análisis FODA. 22

Figura 9 Categorías fundamentales.....23

Figura 10 Redes Conceptuales variable dependiente.....24

Figura 11 Redes Conceptuales variable independiente.....24

Figura 12 Forma y modelo de un podotáctil guía. (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) 2015) 29

Figura 13 Forma y modelo de un podotáctil de prevención. (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) 2015) 30

Figura 14 Formas del adoquín (Muñoz-Pérez et al. 2021).....33

Figura 15 Pulido de tubos metálicos donde se obtienen las limallas. 50

Figura 16 Limallas obtenidas de la empresa Muebles León. 51

Figura 17 Tamiz Humboldt N. º16, con una abertura de malla de 1,18 mm (1180 µm). 52

Figura 18 Partículas muy largas, conglomerados o impurezas. 52

Figura 19 Obtención de limallas tamizadas 52

Figura 20 Diagrama de araña del desempeño comparativo de materiales para adoquines podotáctiles. 56

Figura 21 Agregado grueso ripio. 57

Figura 22 Agregado fino arena. 57
Figura 23 Cemento Portland de la marca Holcim. 57
Figura 24 Mezcla de materiales con limallas. 60
Figura 25 Moldes para adoquines hexagonales 61
Figura 26 Colocación de la mezcla en los moldes. 61
Figura 27 Vibración de la mezcla. 61
Figura 28 Adoquines hexagonales con el 10% de limallas metálicas. 62
Figura 29 Muestra uno de los tramos observados en el centro de Baños de Agua Santa. 62
Figura 30 Adoquines para pruebas de laboratorio. 64
Figura 31 Adoquín 0% de limallas. 69
Figura 32 Curva de desarrollo de resistencia a la compresión del hormigón probeta 0% de limallas (2426,89 kN – 218,3 70
Figura 33 Adoquín 1 con 10% de limallas. 71
Figura 34 Curva de probeta 10 % limallas (2080,86 kN – 168 s). 72
Figura 35 Adoquines 2 con 10% de limallas. 73
Figura 36 Curva de probeta 2 a 10 % limallas (2553,71 kN – 180,1 s). 74
Figura 38 Curva carga–desplazamiento en tracción indirecta – adoquín 0 % limallas 76
Figura 39 Adoquines 1 con 10% de limallas. 78
Figura 40 Curva fuerza–desplazamiento en tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 1). 78
Figura 41 Adoquín 2 con 10% de limallas Tracción Indirecta. 80
Figura 42 Curva fuerza–desplazamiento en tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 2. 80

Resumen Ejecutivo

El presente trabajo de investigación aborda un tema de gran relevancia y actualidad: la necesidad de mejorar la accesibilidad urbana mediante el uso de materiales sostenibles, considerando que ciudades como Baños de Agua Santa presentan una marcada ausencia de superficies podotáctiles, esenciales para garantizar la movilidad segura de las personas con discapacidad visual. Este problema se agrava por el clima húmedo de la zona, que exige materiales resistentes, duraderos y con un buen comportamiento frente a la humedad. Paralelamente, Tungurahua genera importantes cantidades de residuos metálicos industriales, los cuales no son aprovechados adecuadamente, lo que constituye una oportunidad para fortalecer la economía circular y reducir el impacto ambiental. La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con diseño experimental, empleando una metodología aplicada que incluyó la recolección y tamizado de limallas metálicas, su incorporación en diferentes dosificaciones dentro de una matriz clementica y la elaboración de adoquines podotáctiles sometidos a ensayos de resistencia a compresión, tracción indirecta, la línea de investigación corresponde a Diseño, Materiales y Producción. Los resultados permiten concluir que es viable fabricar un material compuesto eco-eficiente utilizando residuos metálicos en porcentajes específicos, logrando mejorar características mecánicas y reducir la huella ambiental. La propuesta final consiste en un podotáctil sostenible, funcional y adaptable al clima de Baños, capaz de contribuir simultáneamente a la accesibilidad universal y a la gestión responsable de residuos industriales, constituyendo así un aporte innovador y replicable en otros contextos urbanos similares.

Palabras clave: MATERIAL COMPUESTO**,** ACCESIBILIDAD UNIVERSAL**,** ECONOMÍA CIRCULAR**,** PODOTÁCTILES**,** RESIDUOS METÁLICOS.

ABSTRACT

This research project addresses a highly relevant and contemporary issue: the need to improve urban accessibility through the use of sustainable materials, considering that cities such as Baños de Agua Santa lack tactile paving systems essential for the safe mobility of visually impaired individuals. This challenge is intensified by the local humid climate, which demands resistant and durable materials with adequate performance under moisture exposure. At the same time, the province of Tungurahua generates significant quantities of industrial metallic waste that is not properly utilized, presenting an opportunity to strengthen circular economy practices and reduce environmental impact. The study was conducted using a quantitative approach with an experimental design. The applied methodology included the collection and sieving of metallic shavings, their incorporation in different dosages within a cementitious matrix, and the fabrication of tactile concrete pavers subjected to compressive strength and indirect tensile tests. The research line corresponds to Design, Materials, and Production.The results indicate that it is feasible to develop an eco-efficient composite material using industrial metallic waste in specific proportions, achieving improved mechanical performance and reducing environmental footprint. The final proposal consists of a sustainable and functional tactile paving element suitable for the climatic conditions of Baños, contributing both to universal accessibility and to responsible management of industrial waste. This represents an innovative and replicable solution for similar urban contexts.

Keywords: COMPOSITE MATERIAL, UNIVERSAL ACCESSIBILITY, CIRCULAR ECONOMY, TACTILE PAVING, METAL WAST.

Introducción

Por lo que se refiere a la accesibilidad peatonal segura necesita superficies podotáctiles que orienten y avisen a personas con discapacidad visual, en especial si las condiciones climáticas son adversas como ocurre cuando la humedad puede incrementar el riesgo de resbaladicidad. Algunas normativas como la ISO (2019), la NTE INEN (2015) y la NEC (2019) como requisitos de seguridad exigen que esas superficies mantengan su funcionalidad aún con niveles elevados de humedad. En la ciudad de Baños, Ecuador, donde la humedad y precipitación ocurre con gran frecuencia, la ausencia de podotáctiles constituye una de las principales brechas de accesibilidad que existe en la accesibilidad urbana.

Además, en la provincia de Tungurahua, Baños es un sitio turístico destacado y es el segundo cantón con población numerosa tras Ambato, cuya economía se basa en las industrias del metal y del textil. En cambio, Baños no cuenta con pavimentos podotáctiles en sus áreas públicas, a pesar de que recibe muchos visitantes y necesita espacios accesibles a todas las personas. Por este motivo, también se presenta como un lugar ideal para proponer soluciones con materiales reciclados e ir atendiendo esta carencia de infraestructura accesible.

Finalmente, el objetivo de esta tesis se centra en el diseño de un material compuesto con características eco-eficientes mediante el uso de residuos metálicos, así como otros subproductos reciclados, para la construcción de superficies podotáctiles en Baños. Esta toma de decisiones no solo viene del hecho de dar solución a la necesidad de mejorar la accesibilidad en la localidad, sino que también consiste en ofrecer una manera de poner en valor los residuos de las industrias de la zona, contribuyendo así a la economía circular. Este objetivo de desarrollo de un producto replicable que favorezca la seguridad del peatón y minimice el impacto medioambiental de su producción se armoniza con la legislación en vigor, así como con las guías recientes sobre el uso de subproductos en la construcción de pavimentos de concreto.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO.

1.1 Tema.

Diseño de un material eco-eficiente basado en residuos reciclados, adaptado a las condiciones ambientales urbanas, para la fabricación de superficies podotáctiles.

1.2 Planteamiento del problema.

Por otra parte, Ecuador asume un reto medioambiental importante debido a la progresiva acumulación de desechos industriales y de obra, como metales, etc. La gran acumulación de estos desechos no se aprovecha en localidades como Ambato, aunque den una buena vía de explotación. Esta situación abre una vía para el diseño industrial; transformar esta acumulación de residuos en un material compuesto ecológico y eficiente, acorde con las características urbanas y climáticas de la localidad.

Por su parte, la localidad de Baños de Agua Santa no presenta unas condiciones óptimas en cuanto a superficies táctiles, llegando a haber una escasez de ellas, un factor fundamental para las personas con discapacidades de tipo visual que se encuentra muy al margen de los propios ideales para la inclusión en las ciudades. Y, teniendo como referencia el modelo de estos lugares turísticos que son Baños, sumado a la necesidad de mejorar las infraestructuras accesibles, se puede llegar a pensar que se pueden construir superficies táctiles respetuosas con el medio ambiente y de larga duración utilizando materiales reciclables.

De este modo, el problema de la investigación radica en el diseño de un material compuesto de podotáctiles a partir de residuos metálicos, y otros materiales reciclados disponibles en Tungurahua. El propósito de este material será la mejora de la accesibilidad urbana de Baños. Se estudiarán normativas, se identificará los lugares donde se generan residuos en la localidad (mapas de los puntos de producción) y se generará el producto con los parámetros funcionales y requisitos ambientales.

1.3 Contextualización.

En un ámbito tanto global como local, se unen dos aspectos fundamentales: la accesibilidad para todos y el modelo de economía circular. De acuerdo con la ISO (2019), las superficies táctiles son cruciales para asegurar el desplazamiento seguro de quienes tienen discapacidad visual. En Ecuador, la Ley Orgánica de Discapacidades reconoce el derecho al acceso universal a espacios públicos. Al mismo tiempo, el país debe abordar el reto de manejar millones de toneladas de desechos cada año, lo que ofrece la posibilidad de reciclar subproductos industriales para crear nuevos materiales.

A su vez, en la región de la Zona 3 de Ecuador (donde se encuentra Tungurahua), Ambato remarca por su función en el ámbito industrial, de otro lado Baños de Agua Santa se destaca como un destino turístico importante para su zona INEC (2022). La falta de podotáctiles en Baños indica una demanda local inmediata de alternativas que integren accesibilidad e inclusión utilizando materiales reciclados de manera sostenible y responsable.

De la misma manera, en un nivel más detallado, de acuerdo con Alfeehan (2020a), que estudia la inclusión de residuos metálicos en paneles de concreto reforzado, mostrando su viabilidad técnica y su aporte a la durabilidad. Igualmente, según Ponce Angie Nicole (2020), apoyan el uso de virutas de acero y otros desechos metálicos, enfatizando su capacidad para aumentar las características físicas y mecánicas y la sostenibilidad de los materiales.

Además, esta contextualización pone de manifiesto como se ubica el planteamiento de este proyecto, en el punto de encuentro de la necesidad de una accesibilidad urbana inclusiva, de la urgencia de valorizar residuos industriales desde las premisas de la economía circular. Siguiendo un enfoque que va de lo general a lo particular, y a partir del conocimiento anterior que apiñan los estudios del estado del arte y que mejor certificado tienen para dar respuesta a la posibilidad de integrar desechos metálicos en materiales de construcción, se otorga paso a una solución innovadora. En este sentido, el proyecto también tiene como objetivo no solo dar respuesta a la falta de podotáctiles en Baños de Agua Santa, sino también tratar de mostrar que se pueden crear materiales funcionales y

sostenibles que mejoren la accesibilidad urbana al mismo tiempo que se reduce la huella medioambiental. De esta forma también se contempla un marco de referencia que, siguiendo la normativa internacional y nacional, incluso se personaliza en función de las necesidades de la comunidad local.

De tal modo, en la Tabla 1 “Industrias y sectores de la provincia de Tungurahua” muestra la concentración territorial de las principales actividades productivas. En ella se identifica al sector carrocero/metalmecánico con fuerte presencia en el cantón Ambato, donde se localizan talleres, plantas de ensamblaje y empresas de fabricación de piezas y estructuras metálicas. Esta configuración productiva implica una generación constante de residuos metálicos, como virutas y limallas, que, en condiciones adecuadas de manejo, pueden aprovecharse como insumo secundario. Este escenario constituye el marco económico que posibilita la propuesta de utilizar limallas metálicas como refuerzo en el material compuesto para podotáctiles.

1.3.1 Sectores y zonas clave de Tungurahua.

Tabla 1 Sectores y zonas claves de Tungurahua.

Industria y sector.	Productos y actividades.	CIIU, divisiones y grupos.	Cantones y zonas clave.	Características en Tungurahua.	Referencia.
Carrocero y Metalmecánico.	Carrocerías de buses, camiones. Piezas, estructuras metálicas.	29.20 (carrocerías y remolques). 25 (productos metálicos).	Ambato.	Centro de Fomento Productivo Metalmecánico/Carrocero (CFPMC).	(Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Tungurahua 2020; Gobierno Provincial de Tungurahua – Dirección de Producción 2024)
Automotriz y ensamblaje.	Ensamblaje de vehículos y autopartes.	29 (vehículos y remolques).	Ambato.	CIAUTO.	(CIAUTO S.A. n.d.; Vicepresidencia de la República del Ecuador n.d.)
Textil/Confección (jeans)	Tejido, confección y acabados de prendas (denim, básicos)	13 (textiles); 14 (prendas de vestir)	Pelileo (Ciudad Azul) y Ambato	Pelileo es reconocido por el jean y su corredor comercial.	(Gobierno Provincial de Tungurahua 2022c, 2022b)
Cuero y Calzado.	Curtido y manufactura de calzado y marroquinería	15 (cuero, afines y calzado)	Ambato, Quisapincha.	Concentración de artesanos del cuero en Quisapincha.	(Gobierno Provincial de Tungurahua – Promoción Productiva n.d.; Gobierno Provincial de Tungurahua 2022a)
Alimentos y bebidas.	Jugos, vinos y procesados agroalimentarios.	10 (alimentos). 11 (bebidas).	Ambato y Patate.	Tradición en conservas de fruta y vino (PDOT/PUGS Patate).	(GAD Municipal San Cristóbal de Patate 2024)
Madera y Muebles.	Fabricación de muebles de madera y tapicería.	31 (muebles)	Pelileo (Huambaló).	Huambaló es conocida como la capital del mueble.	(GAD Parroquial Rural de Huambaló n.d.; Gobierno Provincial de Tungurahua 2023)
Plástico y caucho.	Productos plásticos y de caucho (componentes para calzado, suelas, empaques).	22 (caucho y plásticos).	Ambato.	Gremio con línea cuero y caucho y presencia de fabricantes locales.	(CIPT n.d.; Plasticaucho Industrial S.A. 2025)
Turismo y alojamiento.	Alojamiento, gastronomía.	55–56 (alojamiento y comidas)	Baños de Agua Santa, Ambato.	Prioridad provincial; eje clave en Zonal 3.	(Gobierno Provincial de Tungurahua 2020; Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) 2021)

La tabla 1 caracteriza los sectores estratégicos de Tungurahua y sus zonas de concentración para mapear dónde y cómo se especializa la actividad productiva provincial. Su propósito es ofrecer una lectura comparativa, útil para identificar clústeres y corredores productivos, reconocer ventajas competitivas territoriales y justificar la localización de casos o intervenciones dentro de la investigación, con sustento en instrumentos de planificación y promoción productiva.

1.4 Árbol de problemas.

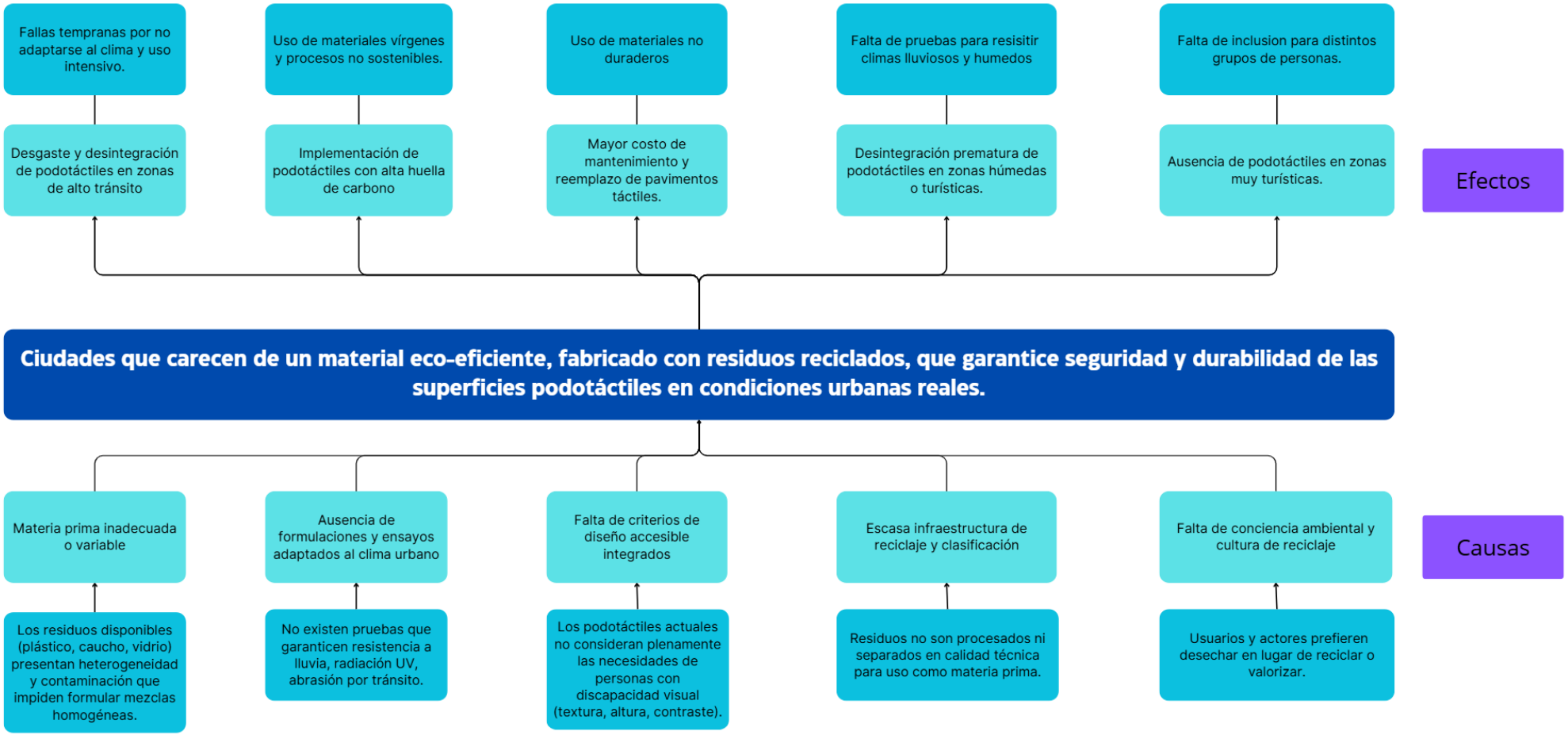


Figura 1 Árbol de problemas.

1.5 Justificación.

El fundamento de este proyecto fundamenta, por un lado, en la confluencia de dos marcos de índole global y nacional como son la accesibilidad universal y la economía circular. A nivel internacional, la norma ISO 23599 regula las superficies podotáctiles para garantizar la movilidad segura de las personas con discapacidad visual. A nivel nacional, la Ley Orgánica de Discapacidades del Ecuador destaca la obligación de adaptar el espacio público para asegurar que las personas y los colectivos puedan acceder a ello de forma adecuada y digna. De forma paralela, el país tiene el reto de gestionar millones de toneladas de residuos industriales, lo que pone de manifiesto la urgencia de realizar valorización de subproductos en vez de extracción de recursos vírgenes.

Igualmente, en la localidad de Baños de Agua Santa, que se encuentra en la provincia de Tungurahua y que se asimila como un espacio turístico de alto aforo, se ha hallado que no existe la presencia de superficies táctiles en su propia trama urbana, lo que debilita la autonomía y dosis de seguridad de las personas con discapacidad visual. Esta realidad local, además, configura una dificultad de accesibilidad, pero al mismo tiempo muestra una oportunidad clara para implementar estrategias de mejora que consideren la aplicación de materiales reciclados y incorporen la inclusión en la ciudad actual.

La viabilidad del proyecto se apoya en la existencia de estudios previos que corroboran la viabilidad de poder implementar residuos metálicos como componentes de materiales de construcción duraderos y fiables Alfeehan et al. (2020). Además, la normativa técnica y las guías recientes sobre el empleo de subproductos en pavimentos configura un marco robusto para lograr un material compuesto que cumpla con aquellos requerimientos funcionales que deben atender las superficies podotáctiles. Lo cual garantiza que la propuesta es técnicamente viable, pero también alineada con requisitos de durabilidad y de seguridad.

En definitiva, este proyecto no solo busca responder a una necesidad concreta de accesibilidad en Baños de Agua Santa, sino que también ofrece un aporte innovador al campo del diseño de materiales sostenibles. Al transformar residuos metálicos en un material

compuesto eco-eficiente, el proyecto beneficia tanto a la comunidad local, al mejorar la seguridad y autonomía de las personas con discapacidad visual como también al sector turístico, que se verá fortalecido por una infraestructura más inclusiva. De este modo, se espera que la investigación no solo contribuya a la reducción de la huella de carbono y al aprovechamiento de residuos, sino que también sirva como modelo replicable en otros entornos urbanos con características similares.

1.6 Objetivos.

1.6.1 Objetivos general.

Desarrollar un material eco-eficiente a partir de residuos reciclados, adaptado a condiciones ambientales urbanas, para su aplicación en la fabricación de superficies podotáctiles en espacios públicos.

1.6.2 Objetivos específicos.

- Identificar la categorización de la ciudad, el régimen térmico y las micro zonas urbanas (temperatura, precipitación y humedad), a fin de fijar criterios climáticos de diseño y durabilidad del podotáctil.
- Establecer industrias locales de Tungurahua generadoras de residuos aptos para el material compuesto (textil, calzado, metalmecánica), definiendo tipos de residuo y viabilidad de abastecimiento.
- Proponer la fabricación de un material compuesto para podotáctiles, a partir de residuos reciclados, ajustado al clima urbano seleccionado, que permita mayor durabilidad y menor huella de carbono.

1.6.3 Línea de investigación.

Diseño, Materiales, Producción.

1.7 Antecedentes de la investigación.

Tabla 2 Paneles nervados de fibras metálicas.

Imagen de referencia	Ver Figura 2
Título	Utilizing Industrial Metal Wastes in One-Way Ribbed Reinforced Concrete Panels.
Autores y año	(Alfeehan et al. 2020b)
Revista / Fuente	Revista Ingeniería de Construcción (RIC), Vol. 35, N.° 3, pp. 246–256, diciembre 2020.
Tipo de estudio	Experimental: paneles nervados unidireccionales en FER (ferrocemento) y SCC (hormigón autocompactante), ensayados bajo carga estática monótona distribuida hasta la falla.
Contexto (material y uso)	Evaluación del efecto de residuos metálicos de maquinado (polvo de limaduras de hierro, virutas de torno de hierro y de aluminio) sobre el desempeño estructural de paneles de losa nervada unidireccional.
Materiales y dosificación	Residuos añadidos (vol.%): en FER y SCC se probaron combinaciones con 2% de un único residuo y una mezcla 0,5% Fe limaduras + 0,5% Fe virutas + 1% Al virutas. A/C = 0,40 y superplastificante 1,6% del material cementico. Mortero FER con relación cemento: arena 1:2; SCC con filler caliza 10% (<0,125 mm) según EFNARC.
Resumen	Se incorporan residuos metálicos de hierro y aluminio a matrices FER y SCC para mejorar el desempeño de paneles nervados. Los residuos de hierro incrementan la carga última y reducen la deflexión central; el aluminio muestra tendencia opuesta. El efecto principal es la mayor resistencia a la propagación de grietas por mejora de la unión fibra-mortero. Se advierten riesgos de embolonamiento de virutas y aglomeración de polvo fino si el contenido es alto.
Resultados	En SCC con limaduras y virutas de hierro, Pu ↑ 42% y 28%, y deflexión central ↓ 30% y 8%; con virutas de aluminio, Pu ↓ 28% y deflexión ↓ 29%. En general, SCC logra Pu mayor que FER. Todos los paneles fallaron por cortante (grietas diagonales cerca de apoyos). Se recomienda recubrimiento protector por riesgo de corrosión.
Aporte que me pueda servir a mí	Orientación de diseño para podotáctiles en Baños: priorizar residuos ferrosos reciclados (limaduras/virutas de hierro) en bajas–medias dosificaciones (≤2% vol.) para mejorar ductilidad y control de fisuración; evitar aluminio por pérdida de capacidad. En SCC la distribución del residuo es más uniforme, lo que podría favorecer la regularidad superficial del podotáctil; controlar embolonamiento y aglomeración con aditivos y granulometría. Por el ambiente húmedo de Baños, aplicar recubrimiento anticorrosivo sobre el módulo y validar el compuesto con abrasión (C944), resbaladicidad en mojado (péndulo), absorción (C642) y fatiga por tránsito peatonal.

Nota Fuente: (Alfeehan et al. 2020b)

Figura 2 Modo de falla por cizallamiento del refuerzo en la nervadura.

Tabla 3 Concreto con virutas de acero 0,2 – 0,8 %.

Imagen de referencia	Ver Figura 3
Título	Aprovechamiento de virutas metálicas como adición en la mezcla de concreto.
Autores y año	(Miranda et al. 2023)
Revista / Fuente	Revista de Iniciación Científica (RIC), Vol. 9, N.° 2, pp. 98–104, julio–diciembre 2023.
Tipo de estudio	Experimental: mezcla diseñada a 3000 psi; adición de virutas de acero 0,2–0,8 % (respecto al peso total del elemento). Ensayos de compresión a 7 y 28 días (ASTM C39), curado (ASTM C192), y granulometría de agregados (ASTM C136).
Contexto (material y uso)	Se valorizan residuos metalmecánicos (virutas) como fibra metálica reciclada para mejorar el concreto, en sustitución/adición con enfoque de reducción de residuos.
Materiales y dosificación	Virutas de acero: longitud 1,2–2,5 in; sección 1–3 mm; Tipo IV (mill cut). Mezcla por ACI 211.2-04: a/c = 0,57; asentamiento 6,25 cm; por m³: agua 218 kg, cemento 383,26 kg, arena 720,74 kg, grava 1023 kg; masa total 2345 kg. Dosificaciones de viruta: 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % (peso total).
Resumen	Se recolectaron y clasificaron virutas, se verificó granulometría de agregados (ASTM C136) y se diseñó la mezcla (3000 psi). Se moldearon cilindros con 0,2–0,8 % de virutas, se curaron (ASTM C192) y se ensayaron en compresión a 7/28 días (ASTM C39), comparando con control y graficando la relación % viruta–resistencia.
Resultados	Compresión (MPa): 7 días → Ctrl 19,89, 0,2 % 15,32, 0,4 % 19,89, 0,6 % 20,43, 0,8 % 16,67; 28 días → Ctrl 29,03, 0,2 % 27,95, 0,4 % 30,10, 0,6 % 30,64, 0,8 % 25,27. Tendencia: óptimo 0,4–0,6 %; por encima ↓ resistencia por pérdida de consistencia/adhesión. Asentamiento disminuye al ↑ % de viruta; con fibras la rotura es menos "explosiva" por mejor control de fisuras.
Aporte que me pueda servir a mí	Para superficies podotáctiles eco-eficientes en Baños: usar virutas de acero como adición en el rango 0,4–0,6 % (peso total) para sostener o mejorar ligeramente la compresión y mejorar el post-fisuramiento; evitar > 0,6 % por caída de resistencia y trabajabilidad.

Nota Fuente: (Miranda et al. 2023)

Figura 3 Virutas metálicas recicladas.

Tabla 4 Hormigón con virutas de acero como agregado fino.

Imagen de referencia	Ver Figura 4.
Título	Análisis de la prestación mecánica del hormigón empleando virutas de acero como agregado fino.
Autores y año	(Ponce Angie Nicole et al. 2020)
Revista / Fuente	Revista RIEMAT, Vol. 5, N.° 1, enero–junio 2020, Art. 3. Universidad Técnica de Manabí (Ecuador).
Tipo de estudio	Experimental con reemplazo parcial del agregado fino por virutas de acero al 5 %, 10 % y 15 %; ensayos de resistencia a compresión (NTE INEN 1573:2010) y resistividad superficial (AASHTO TP 95-11:2011), curado 28 días.
Contexto (material y uso)	Virutas de acero de tornerías de Portoviejo reutilizadas como sustituto parcial de arena para reducir residuos y explorar alternativas de integración al proceso constructivo con beneficios ambientales y económicos.
Materiales y dosificación	Diseño ACI 211.1; a/c = 0,45 constante. Por m³: cemento 397,78 kg, agua 174,58 kg, piedra 725,09 kg. Arena base 603,98 kg (0 %); con sustitución: 5 % → arena 573,78 kg + viruta 30,20 kg, 10 % → arena 543,58 kg + viruta 60,40 kg, 15 % → arena 513,38 kg + viruta 90,60 kg. Aditivo superplastificante reportado. Probetas cilíndricas 10×20 cm.
Resumen	Se evalúa el efecto de sustituir la arena por virutas de acero al 5–15 % en el desempeño del hormigón. Se caracterizan agregados, se diseña la mezcla y se ensayan resistividad superficial y resistencia a compresión a 28 días. El objetivo es demostrar viabilidad técnica y ambiental del aprovechamiento de virutas locales.
Resultados	Resistividad (28 días, kΩ·cm): control 12,53; 5 % 11,40; 10 % 11,13; 15 % 10,70 (rango "moderado" según referencia citada). Compresión (28 días, kg/cm²): control 369,02; 5 % 311,60; 10 % 306,21; 15 % 297,00; todas las mezclas superan la resistencia nominal 240 kg/cm². El trabajo infiere una reducción ≈2 % por cada 5 % de viruta añadida respecto al control.

Nota Fuente: Ponce Angie Nicole et al., 2020)

Figura 4 Cilindros de hormigón con virutas metálicas.

Tabla 5 Adoquines con virutas de acero con remplazo de agregado fino.

Imagen de referencia	Ver Figura 5.
Título	Elaboración de adoquines de concreto adicionando limadura de acero como reemplazo parcial del agregado fino.
Autores y año	(Muñoz-Pérez et al. 2021)
Revista / Fuente	Tesis para optar el título de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán. Pimentel, Perú.
Tipo de estudio	Enfoque cuantitativo; diseño cuasi-experimental; nivel explicativo; investigación aplicada y descriptiva.
Contexto (material y uso)	Evaluación de adoquines de concreto sustituyendo parcialmente el agregado fino por limadura de acero; población: pavimentos articulados de Chiclayo.
Materiales y dosificación	Sustitución del agregado fino por limadura de acero en 5%, 10%, 15% y 20% (en % del agregado fino). Diseño objetivo f'c = 320 kg/cm². Ensayos y normas: absorción/densidad; compresión (NTP 399.611); flexión (COGUANOR NTG 41087 h1); abrasión (ASTM C944-12).
Resumen	El 5% de limadura obtuvo el menor desgaste (abrasión). El 10% presentó mayor absorción. En propiedades mecánicas, el 10% alcanzó la mayor resistencia a compresión a 28 d (+3,30% vs. patrón) y también la mayor resistencia a flexión.
Resultados	Absorción/densidad: patrón ≈ 5% de absorción; 5% LA ≈ 6%; 10% LA ≈ 7%. Compresión (kg/cm²): patrón 28 d ≈ 267.81; 10% LA 28 d ≈ 276.65 (+3.30%). Flexión: máximo con 10% LA. Muestra/ensayos: 129 especímenes; plan de pruebas para absorción/densidad, abrasión, compresión y flexión.
Aporte que me pueda servir a mí	Para podotáctiles en ambiente húmedo (Baños): usar 5% si se prioriza baja abrasión superficial; usar 10% si se prioriza capacidad mecánica (compresión/flexión), cuidando el aumento de absorción con sellado o curado adecuado.

Nota Fuente: (Muñoz-Pérez et al. 2021)

Figura 5 Ensayo de resistencia a compresión del adoquín de concreto.

Tabla 6 Adoquines de hormigón con virutas de acero como remplazo de agregado fino.

Imagen de referencia	Ver Figura 6.
Título	Evaluación de las propiedades mecánicas de adoquines de concreto adicionando limadura de acero para pavimento de tránsito ligero.
Autores y año	(Perez Montoya 2024)
Revista / Fuente	Tesis para optar al título profesional de Ingeniera Civil. Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Pimentel–Perú.
Tipo de estudio	Cuantitativo, aplicado, diseño experimental. Diseño de mezcla para f'c = 420 kg/cm² (ACI 211). Adoquín tipo II (tránsito ligero) según NTP 399.611. Muestras ensayadas a 7, 14 y 28 días.
Contexto (material y uso)	Se evalúa la adición de limadura de acero (sustitución respecto al peso del cemento) en 2%, 4%, 6% y 8% para adoquines de concreto de tránsito ligero, con el fin de determinar el porcentaje óptimo que mejore desempeño mecánico y físico. Población/muestra total: 225 adoquines (45 patrón + 180 con adición).
Materiales y dosificación	Se utilizó una mezcla patrón por m³ con cemento Portland tipo I, confitillo, agregado fino y agua, con relación a/c = 0,312. A esta mezcla se le incorporó limadura en proporciones de 2%, 4%, 6% y 8% respecto al cemento. Las dosificaciones se evaluaron mediante ensayos de consistencia, temperatura, aire, absorción/densidad, abrasión, compresión (f'c ≥ 420 kg/cm²) y flexión según normas NTP y COGUANOR/NTG.
Resultados	Los resultados a 28 días muestran que la dosificación con limadura mejora el desempeño frente al patrón, siendo el 4 % el contenido óptimo, con incrementos cercanos al 13 % en resistencia a compresión y alrededor del 42 % en flexión, además del menor porcentaje de abrasión. Todas las mezclas con limadura presentan absorciones entre 2,3 % y 3,0 %, inferiores al límite del 6 % exigido por la NTP

Nota Fuente: (Perez Montoya 2024)

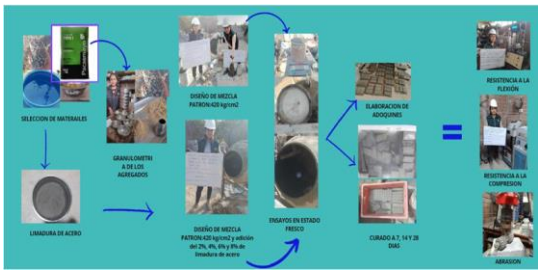


Figura 6 Esquema de fabricación de adoquines.

Tabla 7 Adoquines con virutas de acero como remplazo al agregado fino.

Imagen de referencia	Ver Figura 7.
Título	Comportamiento mecánico de adoquines de concreto reciclado y viruta de acero, Tacna, 2023.
Autores y año	(Zelada Mendoza de Vargas 2023)
Revista / Fuente	Tesis para optar el título profesional de Ingeniera Civil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, Universidad César Vallejo (Lima Este), Lima–Perú, 2023.
Tipo de estudio	Experimental: elaboración de adoquines con combinaciones de concreto reciclado (CR) y viruta de acero (VA) y ensayos de resistencia a la compresión y a la abrasión en laboratorio.
Contexto (material y uso)	Determinar el comportamiento mecánico de adoquines con dosificación de CR y VA en Tacna (2023); se formulan objetivos para evaluar variaciones en compresión y abrasión según porcentajes de ambos residuos.
Materiales y dosificación	Series con CR = 20%, 40% y 60% combinadas con VA = 3%, 5% y 7%; además de adoquín patrón. Muestra total: 240 unidades.
Resultados	– Patrón: 304,92 kg/cm². – 20%CR+3/5/7%VA: 251,82 / 268,72 / 292,63 kg/cm². – 40%CR+3/5/7%VA: 218,08 / 238,98 / 263,30 kg/cm². – 60%CR+3/5/7%VA: 174,40 / 194,07 / 219,88 kg/cm². – Abrasión (mm³/mm²): 14 037 → 16 155 según combinaciones; todas dentro del límite.
Aporte que me pueda servir a mí	Para podotáctiles en Baños (ambiente húmedo): priorizar bajas–medias sustituciones de CR (≈20%) con VA hacia el 7% cuando el objetivo sea maximizar compresión; validar en tu matriz local la abrasión a 28 días y complementar con ensayos de absorción y resbaladicidad por humedad. (Recomendación de diseño propia basada en resultados reportados).

Nota Fuente: (Zelada Mendoza de Vargas 2023)

Figura 7 Granulometría de agregados.

1.8 Fundamentación.

1.8.1 Fundamentación Legal.

De manera que podamos ubicar la normativa en el marco legal, aduciré que el trabajo se apoya en los estándares que conectan lo internacional con lo nacional y que garantizan que en el espacio público se pueda dar la accesibilidad real. En el plano internacional, ISO 23599: (2019) establece los criterios del diseño e instalación de las superficies podotáctiles de uso para la movilidad de las personas con discapacidad visual, a partir de esta norma, Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN (2015). Aterriza estas recomendaciones al ámbito ecuatoriano y establece los requisitos técnicos de la señalización podotáctil en el espacio urbano y en los edificios destinados al uso público. A su vez, ese entramado se apoya en la Ley Orgánica de Discapacidades que obliga a garantizar el acceso universal del entorno construido y que orienta la acción de las GAD y de las entidades del estado.

Además, el comportamiento de la materia se ajusta a la NTE INEN 3040:2016 (2016). Que establece los requisitos y los métodos de ensayo de los adoquines de hormigón prefabricados para aplicaciones peatonales o vehiculares. La norma en cuestión especifica, en concreto, las verificaciones para resistencia a la compresión, tracción indirecta (ensayo brasileño, abrasión (desgaste superficial), absorción de agua, bajo el propósito de asegurar durabilidad, estabilidad dimensional, seguridad en el funcionamiento. También hace referencia al campo de aplicación, criterios de aceptación y muestreo, e indica que no regula aspectos de la visibilidad ni de la

tactilidad del pavimento, por lo que su función es meramente mecánica/funcional en el marco de la accesibilidad antes expuesto.

Al mismo tiempo, en la localidad de Baños de Agua Santa, la falta de superficies podotáctiles supone un vacío en la aplicación de estos preceptos y por tanto en la garantía de derechos de accesibilidad. Baños es un destino turístico con mucho tráfico peatonal, de tal manera que la adaptación del entorno urbano para favorecer la movilidad autónoma de toda la ciudadanía es un elemento de vital importancia. La normativa municipal actual refuerza esa necesidad de incluir criterios de accesibilidad en los proyectos de obra pública, alineándose con las normativas nacional e internacional. En consecuencia, este proyecto encuentra su razón de ser jurídica en la necesidad de dar cumplimiento a tales marcos legales y de ofrecer una solución técnica que los satisfaga.

Norma ISO 23599:2019 – Indicadores podotáctiles de superficie de marcha (TWSIs)

En cuanto a la norma ISO 2019 determina una serie de especificaciones de producto y recomendaciones de instalación para indicadores podotáctiles que fomentan la movilidad segura e independiente de las personas ciegas o con baja visión; propone dos tipos de patrón, advertencia y guía, que usan para complementar aquellos espacios que carecen de la señalización mediante pistas de orientación o presentan puntos de riesgo aplicables al interior y exterior del entorno construido.

- **Objeto y ámbito:** Normaliza el diseño y la utilización de los TWSIs destinados a orientar y advertir a las personas con discapacidad visual mediante la definición de producto e instalación.
- **Tipologías funcionales:** El dibujo de advertencia (domos/truncados) para advertir ante riesgos de tropiezo; el dibujo de guía (barras en relieve) para guiar entre puntos de destino. Pueden ser utilizados de manera aislada o combinada.
- **Criterios de detectabilidad:** La superficie debe ser detectada al tacto con el bastón, deber ser percibida al pisarla o por visión residual y se recomienda tener contrastes de forma visual/tonal con el pavimento adyacente para mejorar la detectabilidad.

- **Seguridad y comportamiento:** Los materiales y el relieve para productiva no deben poner en riesgo la seguridad de otros peatones; la norma alinea requisitos de durabilidad y resistencia a la tracción propios de un producto expuesto al tránsito peatonal.
- **Articulación en Ecuador:** Para los efectos de la aplicabilidad local, la NEC-HS-AU indica el de bandas podotáctiles (TWSI) y reenvía a la NTE INEN 2854 para las especificaciones técnicas, dado que esta NTE establece requisitos para la planificación y ejecución de la señalización en pisos y planos hápticos en espacios urbanos y edificios con accesos Públicos.

Norma NTE INEN 3040 (2016). Adoquines de hormigón y sus requisitos y métodos de ensayo

Referente a la NTE INEN 3040:2016 estipulación que imponen y exigen características, propiedades, requisitos e instrucciones de ensayo para los adoquines prefabricados de hormigón y para los adoquines destinados a zonas con tránsito peatonal y/o vehicular; e indica que no se ocupa de la visibilidad o de la tactilidad del pavimento.

Tabla 8: (NTE INEN 3040:2016) — Tolerancias admisibles.

Espesor del adoquín (mm)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)
< 100	± 2	± 2	± 3
≥ 100	± 3	± 3	± 4

La tabla 8 establece los márgenes permitidos entre la dimensión nominal declarada por el fabricante y la dimensión real medida del adoquín (longitud, ancho y espesor). Las dimensiones se miden según el Anexo C de la norma.

Cómo se interpreta los datos: La fila que aplica depende del **espesor del adoquín** (no de la dimensión que se mide).

- Si el adoquín tiene espesor < 100 mm se aceptan ±2 mm en longitud, ±2 mm en ancho y ±3 mm en espesor.

- Si el adoquín tiene espesor ≥ 100 mm se aceptan ±3 mm en longitud, ±3 mm en ancho y ±4 mm en espesor.

Propiedades físicas y mecánicas.

- Absorción total de agua: ≤ 6 % (Resistencia climática).
- Tracción indirecta (Anexo E): característica ≥ 3,6 MPa; ningún adoquín con T < 2,9 MPa ni carga por unidad de longitud: F < 250 N/mm.
- Abrasión (rueda ancha, Anexo F): longitud de cuerda ≤ 25 mm.
- Deslizamiento/resbalamiento: método del péndulo de fricción cuando se requiera declarar valor; aplicar Anexo G.

De igual manera, se adopta la norma técnica ecuatoriana NTE INEN 3040 (2016), para establecer las dimensiones, muestreo y los ensayos de tracción indirecta (Anexo E), absorción y abrasión del material que se plantea. La evaluación de compresión se introduce como ensayo complementario según la norma del (ASTM C140).

1.8.2 Fundamentación Axiológica.

Al mismo tiempo, Ghoreishi Karimi (2011) expone un marco de valores para la selección de materiales que privilegia la salud y no toxicidad, origen local y bajo impacto, impacto social, sostenibilidad del ciclo de vida, reciclabilidad/reutilización, baja emisión de (CO_2) y energía incorporada como criterio explícito. También advierte con datos contrastados sobre la carga climática de ciertos insumos (cemento) y destina una conclusión a establecer una guía prescriptiva de selección y de aplicación cotidiana en la toma de decisiones de diseño y aprovisionamiento del material podotáctil propuesto.

Dicho de otro modo, el texto ilustra cómo estas decisiones quedan explicadas, como los metales, en consideraciones que encuadran los materiales en dos focos complementarios, la bioconstrucción, que aboga por materiales de bajo impacto, reciclados o muy reciclables a partir de procesos simples, y la arquitectura bioclimática, que abraza materiales y soluciones que se adaptan al clima y a las condiciones del lugar intentando optimizar la eficiencia en la construcción y el confort. Estas posturas sostienen, axiomáticamente, la valorización de limallas

metálicas autóctonas en un compuesto comentico, procuran optimizar el contenido cementante y la adaptación del acabado a un contexto urbano húmedo como el de Baños.

1.8.3 Fundamentación Ontológica.

Para el desarrollo del proyecto se deben considerar aspectos ambientales establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). Esta investigación estaría direccionada por los objetivos; 3, 9, 10, 11, 12 y 13. Los cuales indican:

- **ODS 3:** Salud y bienestar. Garantiza vida saludable y reducción de riesgos. En la tesis, se conecta con superficies seguras y antideslizantes, y con materiales inocuos en uso.
- **ODS 9:** Industria, innovación e infraestructura. Promover el I+D, las tecnologías limpias y la infraestructura sostenible.
- **ODS 10:** Reducción de las desigualdades. Promover la inclusión y la igualdad de oportunidades.
- **ODS 11:** Ciudades y comunidades sostenibles. Se busca promover ciudades inclusivas, seguras y resilientes: mejor gestión de residuos, movilidad a pie segura y el espacio público accesible.
- **ODS 12:** Producción y consumo responsables. Promover la economía circular, la eficiencia de los recursos y la reducción/valorización de los residuos.
- **ODS 13:** Acción por el clima. Exige mitigar emisiones y fortalecer la resiliencia. En la tesis, orienta a bajar energía incorporada (p. ej., optimización del cemento), usar insumos locales y alargar la vida útil del podotáctil. Asamblea General de las Naciones Unidas (2015).

1.8.4 Análisis Pestel.

El PESTEL es un marco de análisis de factores externos que examina de forma sistemática seis dimensiones del entorno; política, económica, social, tecnológica, ambiental y legal; para entender cómo pueden influir en una organización o situación específica, ofreciendo insumos estratégicos para la toma de decisiones y la planificación Corona et al. (2020).

El texto destaca que el PESTEL ayuda a anticipar oportunidades y riesgos y es adaptable a distintos contextos e industrias; al mismo tiempo, advierte limitaciones como su simplicidad, alcance a veces reducido, baja capacidad predictiva, falta de priorización y de análisis contextual si se usa de manera aislada, por lo que conviene complementarlo con otras herramientas Corona et al. (2020).

Tabla 9 Análisis Pestel.

Análisis PESTEL	Factores	Muy negativo (-2)	Negativo (-1)	Neutro (0)	Positivo (1)	Muy positivo (2)
Político	Ordenanzas y PDOT de accesibilidad urbana en Baños					2
	Programas/ordenanzas de gestión de residuos y economía circular del GAD				1	
	Ordenanza/lineamientos de gestión de residuos de la metalmecánica				1	
Económico	Brecha de accesibilidad en un destino turístico con alta afluencia (Baños)					2
	Abastecimiento local de residuos metalmecánicos con trazabilidad y muestreo definidos				1	
	Costos de acondicionamiento del residuo (limpieza, secado, clasificación/cribado) y control de calidad		-1			
Social	Afluencia peatonal turística y escolar en Baños (rutas con alta exposición pública)					2
	Participación de colectivos de discapacidad visual en co-diseño y validación				1	
	Hábitos de limpieza y mantenimiento del espacio público		-1			
Tecnológico	Enasayos de laboratorio disponibles				1	
	Prototipos y moldes digitales				1	
	Compatibilización matriz–metal y protección anticorrosiva		-1			
Ecológico	Valorización de residuos metalmecánicos locales y menor transporte a rellenos					2
	Clima húmedo y lluvioso de Baños (charcos, biofilm, limpieza frecuente)		-1			
	Acondicionamiento del residuo (lavado, desengrase, secado, tamizado) y manejo de lodos/óxidos		-1			
Legal	Norma NTE INEN 2854					2
	Norma ISO 23599:2019				1	
	Norma NEC-HS-AU				1	
	TOTAL	0	-5	0	8	10

Conclusión.

El PESTEL evidencia en la Tabla 9 un entorno favorable para implantar podotáctiles con material reciclado en Baños: existe respaldo político-legal sólido (ordenanzas de accesibilidad, NTE INEN 2854, ISO 23599 y NEC-HS-AU) y una demanda social visible en corredores turísticos, con disponibilidad de residuos locales que habilita economía circular. El bloque económico es positivo, pero la factibilidad real se juega en cerrar riesgos tecnológico-

ambientales: variabilidad del residuo, compatibilización matriz–metal y desempeño en clima húmedo. La decisión de avance debería condicionarse a cuatro cierres críticos verificables: suministro trazable y ficha del residuo, protocolo de mezclado/anticorrosión con control de calidad, diseño de relieve con drenaje y mantenimiento. Cumplidos estos puntos, la solución se diferencia frente a importados por desempeño certificado, costo total competitivo y aporte a la circularidad local, quedando lista para adopción municipal.

1.8.4 Análisis FODA.

El FODA es una herramienta de diagnóstico estratégico que permite identificar y analizar los factores internos y externos que afectan a una organización o proyecto. De acuerdo con Mercieca et al. (2016), el análisis se centra en evaluar las fortalezas y debilidades internas, así como las oportunidades y amenazas del entorno, con el fin de alinear los recursos y capacidades frente a las condiciones del mercado. Su objetivo principal es facilitar la formulación de estrategias que potencien las fortalezas, reduzcan las debilidades, aprovechen las oportunidades y mitiguen las amenazas.

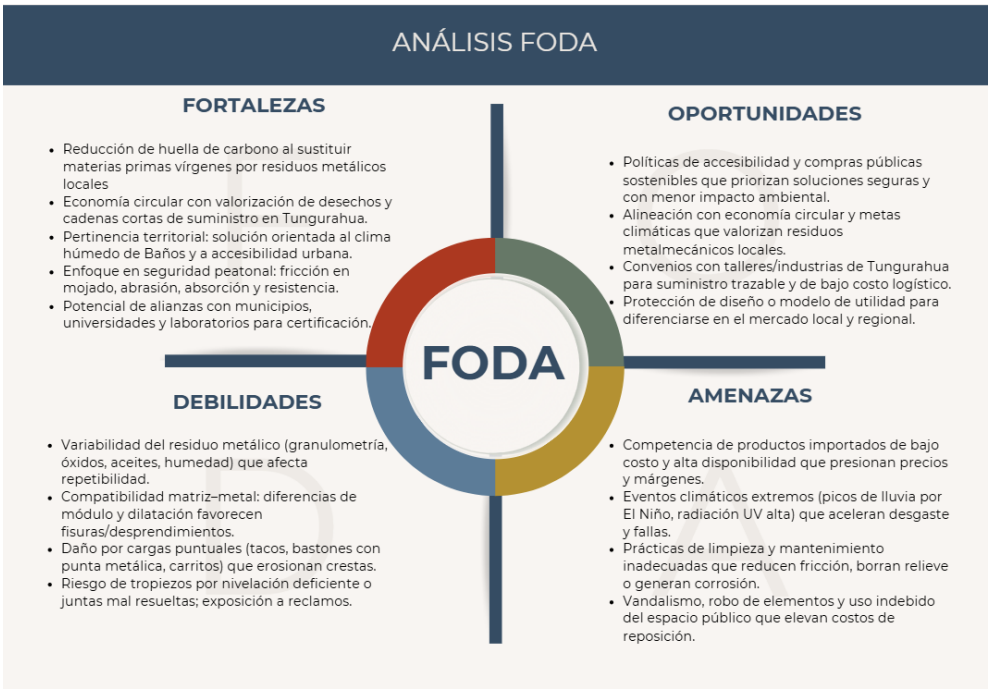


Figura 8 Análisis FODA.

Conclusión.

Por otra parte, el FODA nos muestra en la Figura 8 un encaje estratégico favorable: las fortalezas la reducción de huella de carbono, la economía circular, el enfoque en seguridad peatonal y la posibilidad de lograr alianzas se encuentran directamente alineadas con oportunidades del entorno como las políticas de accesibilidad, las compras públicas sostenibles y los acuerdos locales de suministro, lo que podría habilitar pilotos y escalamiento. La viabilidad, sin embargo, se juega en el resolver las debilidades técnicas internas, en especial la variabilidad del residuo y la compatibilidad matriz/metal, así como en el asegurar instalación sin desniveles que eviten tropiezos, daños por cargas puntuales. En cuanto a amenazas, clima extremo, mantenimiento irregular y vandalismo y durabilidad real en calle, respaldado por especificaciones de residuo, protocolo de mezclado e instalación y protección de diseño.

1.9 Categorías fundamentales.

1.9.1 Redes Conceptuales.

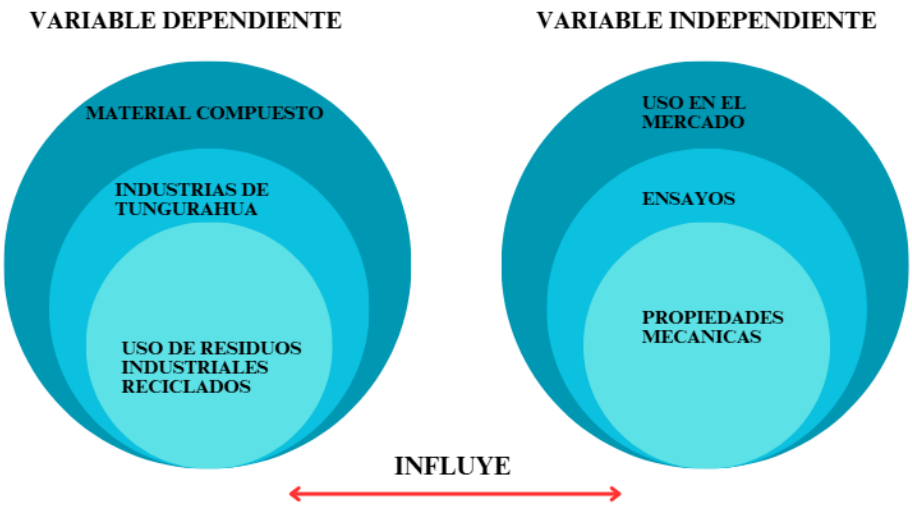


Figura 9 Categorías fundamentales.

1.9.2 Redes Conceptuales / Constelación de Ideas.

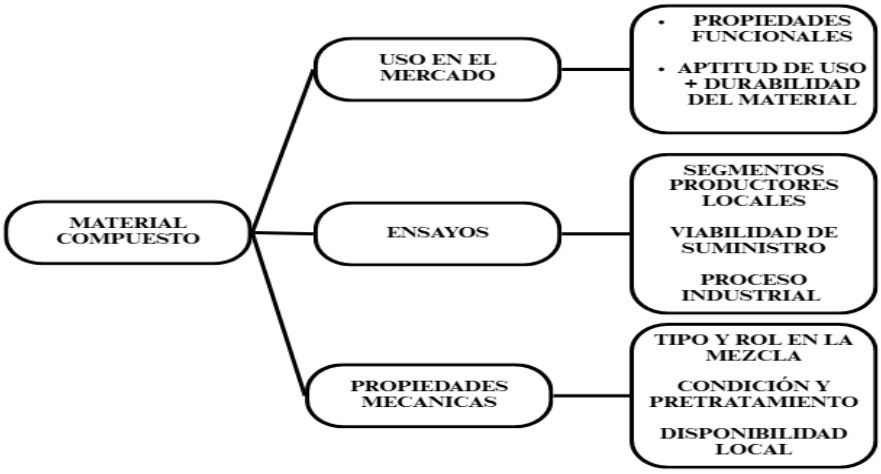


Figura 10 Redes Conceptuales variable dependiente.

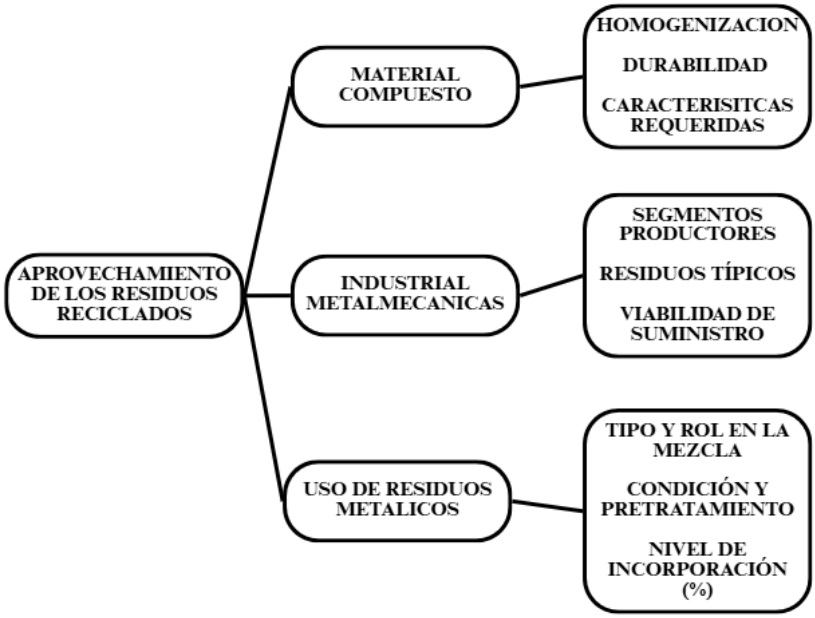


Figura 11 Redes Conceptuales variable independiente.

1.9.3 Bases Teóricas.

Según lo expuesto por Perez Montoya (2024) el trabajo sobre la incorporación de limaduras de acero para adoquines de hormigón para pavimentos de tránsito ligero se convierte, de este modo, en un interesante referente teórico, puesto que su trabajo indica una base teórica ajustada a las intenciones previas de incorporar residuos en el hormigón, como recogía el desarrollo del material compuesto ecoeficiente para superficies podotáctiles; motivo por el cual se concretan las maneras en que la introducción de partículas metálicas varía las propiedades mecánicas, la durabilidad del hormigón, etc., y que permite sustentar teóricamente el trabajo desarrollado.

Destacar en el presente apartado que, de forma similar a las propuestas que considera la autora, la metodología del trabajo realizado que describe la autora Perez Montoya (2024) proporciona un modelo que puede servir para facilitar un diseño experimental relacionado con la incorporación de los residuos metálicos; la autora especifica de forma precisa las diferentes variables que han de considerarse, así como diferentes porcentajes para la adicción de limaduras de acero, así como los ensayos normalizados objeto de la determinación para la medida de la resistencia a la compresión y de la absorción. Por lo que hace que este procedimiento metodológico se convierta en un modelo que puede servir para estructurar las pruebas de laboratorio del presente proyecto, de forma que el procedimiento experimental que se recoge así se base en un procedimiento experimental ya utilizado y comparable.

Conforme a lo que se menciona en Muñoz-Pérez et al. (2021), el trabajo tiene por objeto la integración de limadura de acero como sustituto parcial del agregado fino en la fabricación de adoquines de hormigón. El autor sostiene que se ensayaron la dosificación de los porcentajes entre el 0% y el 20%, observando cómo la variación de diferentes dosificaciones afectaba propiedades como la resistencia a la compresión, la flexión y la abrasión. Así, el autor concluye que en una dosificación de 10% de limadura se tiende a maximizar la resistencia mecánica de los adoquines, mientras que una dosificación del 5% por el contrario disminuye el desgaste por abrasión, de donde se puede deducir un rango de porcentajes para la maximización de diferentes propiedades físicas y mecánicas en distintas aplicaciones.

Por otra parte, el autor Muñoz-Pérez et al. (2021) también hace énfasis en cómo se debe modificar el diseño de mezcla hasta conseguir la resistencia deseada, ya que, en su caso de estudio, ninguna mezcla pudo alcanzar el objetivo de los 320 kg/cm². Por ende, el autor indica que es necesario optimizar la granulometría y el contenido de cemento, junto con tener en cuenta la variabilidad de los agregados locales. Todo ello representa una aproximación metodológica para reajustar los parámetros del diseño de las mezclas en función de las condiciones que rigen para el material y para el entorno, todo en la dirección de adaptar el proceso de fabricación a la normativa o a requerimientos de desempeño.

De acuerdo con lo indicado por Zelada Mendoza de Vargas (2023), la resistencia mecánica de los adoquines de concreto reciclado en el que se reemplaza una parte de los agregados por viruta de acero representa un punto de interés en lo que respecta a las opciones de material alternativo para la pavimentación de calles. La autora recoge un exhaustivo informe sobre el modo en que la sustitución parcial de agregados por viruta de acero afecta a las propiedades de resistencia a la compresión, de resistencia a la flexión y de durabilidad del adoquinado; así se desprende que, lógicamente, unas proporciones de viruta de acero aumentan la capacidad de carga del material sin que comprometan su integridad estructural, lo que constituye el respaldo teórico necesario en el ámbito de la propuesta alternativa para el desarrollo de nuevos usos de los materiales de concreto reciclado.

De la misma manera, Zelada Mendoza de Vargas (2023) pone de manifiesto que es importante tomar en cuenta la durabilidad del material en entornos urbanos húmedos, tal como sucede en Baños, Ecuador. La autora expone ensayos de absorción y de resistencia a ciclos de humedad, de un lado, justamente la viruta de acero no solo implica el reciclaje de residuos metálicos, incluso, puede acoplarse a regio de las condiciones climáticas; lo que no deriva en una menor durabilidad. De esta manera, y mediante esta reflexión metodológica y experimental, se enriquece a las personas que quieran adaptar materiales compuestos a ambientes húmedos asegurando así que el material conservé sus propiedades físicas a lo largo del tiempo.

Igualmente, se ha realizado un extensivo estudio sobre los materiales compuestos reciclados en el campo de la reutilización de residuos metálicos. Por ejemplo, en el trabajo realizado por

Alfeehan et al. (2020) pudimos observar el análisis de los paneles de hormigón armado nervado unidireccional incorporando residuos metálicos donde se demostraba el incremento de las propiedades mecánicas sin afectar a la integridad del material. Todo ello demuestra que se pueden usar residuos metálicos, como las virutas de acero, para introducirlos en matrices cementicias y, por tanto, contribuir a la economía circular y a la reducción del impacto medioambiental.

Igualmente, Briones Ponce et al. (2020), llevaron a cabo un estudio de la prestación mecánica del hormigón utilizando virutas de acero como agregado fino, ante lo cual los resultados revelaron que se potenciaron tanto la resistencia a la compresión como la durabilidad del hormigón, lo que nos demuestra que las materias compuestas con componentes reciclados pueden llegar a cumplir perfectamente los requisitos técnicos necesarios para las estructuras, como, por ejemplo, los podotáctiles.

Mientras tanto, la ISO (2019), igualmente, establece cuáles son los indicadores táctiles en las superficies para caminar (con función de alerta y función de guía) y qué rol cumplen en la movilidad en la vía pública de las personas invidentes; tanto la divulgación técnica, como las guías de accesibilidad enfatizan que la textura y el acabado superficial condicionan el recorrido y la seguridad del peatón, de forma que el compuesto propuesto debe mantener fricción y geometría bajo lluvia, bajo abrasión y bajo tránsito intensivo. Este encaje funcional equivale a traducir el concepto de compuesto a criterios de diseño del podotáctil: se seleccionan matriz y refuerzo reciclado que aportarán resistencia mecánica, estabilidad dimensional y propiedades antideslizantes adecuadas al uso urbano que se deba ejecutar.

Podotáctil.

La señalización podotáctil se define como un sistema de baldosas o superficies en relieve instaladas sobre el pavimento, diseñado para ser percibido principalmente a través de los pies y del bastón guía, más que por la vista. Mediante patrones de textura y relieve, estas superficies permiten advertir la presencia de riesgos (como escaleras, cruces o cambios de nivel) y, al mismo tiempo, orientar el desplazamiento de las personas con discapacidad visual a lo largo de rutas

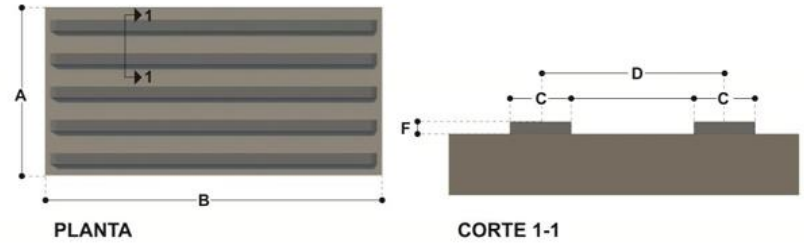
seguras y predefinidas, facilitando así la autonomía, la orientación espacial y una movilidad más segura en los espacios públicos y privados Montoya Gacharná (2021).

Tipos de bandas y significado de líneas y puntos.

La norma distingue dos tipos de bandas podotáctiles en piso.

1. **Banda podotáctil guía (líneas / barras en relieve).**

    - Está conformado por relieves prolongados (barras rectas, continuas o segmentadas) dispuestos en el sentido de la infraestructura.
    - Su finalidad es indicar dirección y continuidad del recorrido, ayudan a una persona con discapacidad visual a seguir un “camino seguro” usando la planta del pie o el bastón.



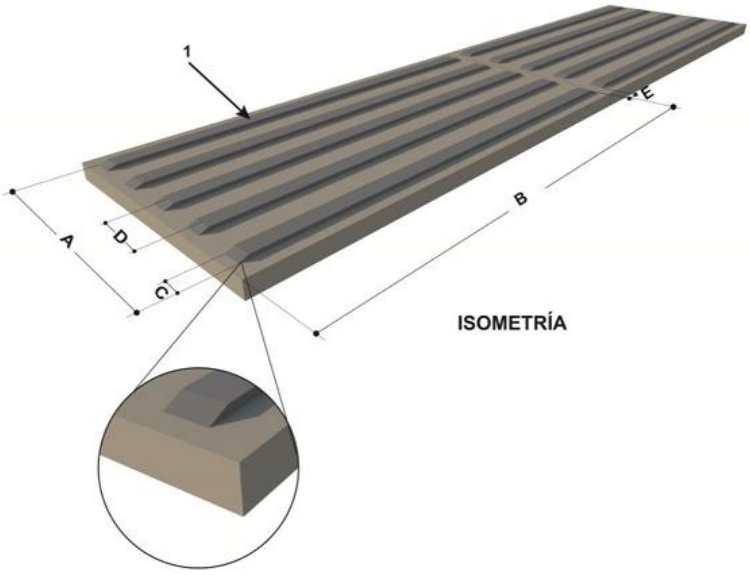


Figura 12 Forma y modelo de un podotáctil guía. (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) 2015)

Leyenda:

1: Patrón de alto relieve rectangular

A: Ancho. Mínimo 200 mm

B: Largo. Mínimo 200 mm

C: Anchura en la base del alto relieve

D: Distancia entre ejes en alto relieve

E: Distancia entre barras. Mínimo 25 mm

F: Altura del alto relieve entre 2 mm a 5 mm ± 1 mm, según el tipo de material utilizado

2. Banda podotáctil de prevención (puntos / cúpulas / pirámides)

- Son relieves puntuales (cúpulas, conos, troncos de pirámide o cilindros) dispuestos en matriz ortogonal o diagonal.
- Su finalidad es advertir el peligro, cambio de nivel o zona de decisión (escaleras, rampas, vados, cruces, bifurcaciones, ingreso principal, paradas de bus, mobiliario que puede ser obstáculo, etc.).

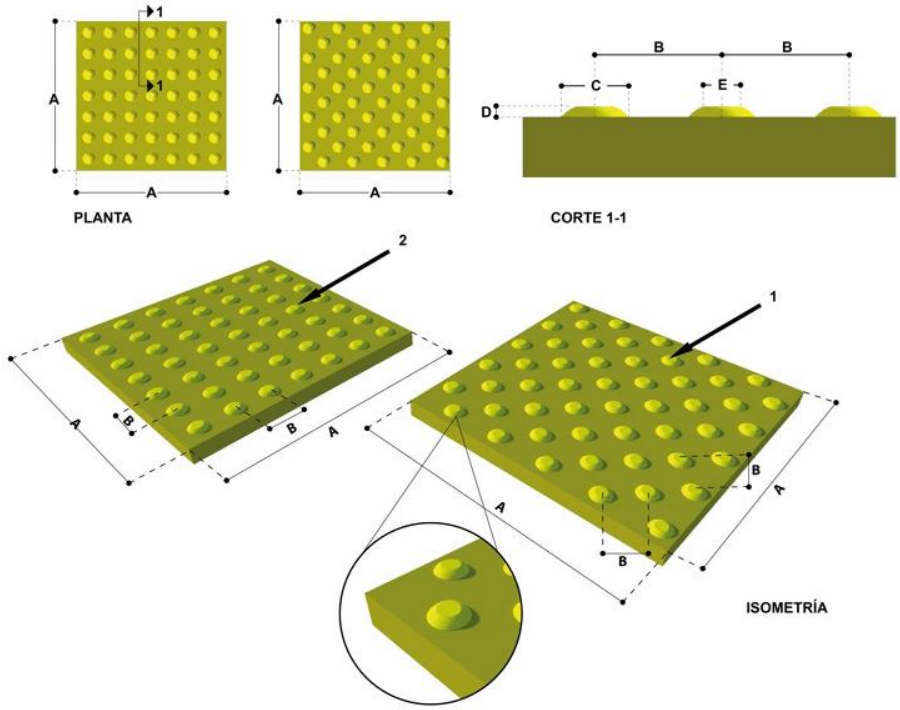


Figura 13 Forma y modelo de un podotáctil de prevención. (Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN) 2015)

Leyenda:

1: Patrón de alto relieve secciones esféricas dispuestas en diagonal

2: Patrón de alto relieve secciones esféricas dispuestas en cuadrícula

A: Ancho. Mínimo 200 mm Largo. Mínimo 200 mm

B: Espacio entre centros y ejes entre 60 mm ± 5 mm

C: Diámetro o lado de la base de 25 mm ± 5 mm

D: Altura de la cúpula entre 2 mm y 5 mm ± 1mm, según el tipo de material utilizado

Material Compuesto.

Para Kalizhanova et al. (2023) la definición de un material compuesto es una mezcla heterogénea que está hecho de, al menos, dos fases: una matriz continua y un refuerzo (fibras o

partículas). La matriz le confiere forma, une y protege al sistema y transfiere los esfuerzos mecánicos; el refuerzo aumenta la rigidez, la resistencia y otras prestaciones funcionales. La clasificación mayor se articula en función del tipo de matriz: polimérica (PMCs), metálica (MCCs) y cerámica (CMCs).

Respecto a los materiales compuestos de matriz metálica (MMCs), Kalizhanova et al. (2023) señalan que emplean metales, frecuentemente aleaciones de aluminio, como fase continua, reforzados con partículas o fibras cerámicas. Estos sistemas se caracterizan por mayor módulo, resistencia, dureza y estabilidad térmica en comparación con la matriz monolítica, así como mejoras en desgaste y fatiga; tales ganancias dependen de la fracción volumétrica y del tamaño del refuerzo, observándose, en general, respuestas superiores con nanopartículas frente a refuerzos micrométricos. La obtención puede realizarse mediante metalurgia de polvos, infiltración o procesos en estado sólido como el friction stir processing, donde el control microestructural resulta decisivo para alcanzar la combinación deseada de resistencia específica y conductividad térmica, admitiéndose que incrementos en el refuerzo pueden conllevar pérdidas de ductilidad si no se optimiza la interfaz y la distribución del refuerzo.

Ecoeficiencia.

La ecoeficiencia se define como la capacidad de un sistema productivo para utilizar de manera eficiente los recursos ecológicos con el fin de satisfacer las necesidades humanas, garantizando la producción económica mientras se reduce el consumo de recursos naturales y el impacto ambiental. Este concepto implica mantener o incrementar el valor económico generado al mismo tiempo que se minimizan los efectos negativos sobre el medio ambiente, incorporando no solo variables económicas, sino también impactos sociales y de salud derivados de la contaminación, lo que permite una evaluación integral del desempeño ambiental de países o sectores productivos Puertas et al. (2022)

Adoquines de concreto

Muñoz-Pérez et al. (2021), describe el adoquín como una unidad prefabricada de concreto que funciona como elemento modular para la conformación de pavimentos articulados. Se trata

de un componente compacto que suele adoptar la forma de un prisma recto, cuyas bases pueden ser rectangulares, cuadradas, hexagonales u otras variantes poligonales, y que se dispone sobre una cama de arena y una base granular para conformar superficies de rodadura continuas. Desde esta perspectiva, el adoquín no solo cumple la función de transmitir las cargas hacia las capas inferiores del pavimento, sino que también aporta estabilidad, facilidad de mantenimiento y una buena respuesta frente a acciones ambientales y de tránsito, lo que explica su amplio uso en vías peatonales y vehiculares ligeras.

Formas y partes de los adoquines.

En cuanto a referente a su geometría la forma y las partes del adoquinado inciden directamente en la conexión del pavimento y en la resistencia estructural del conjunto. Se indican un conjunto de configuraciones comerciales: adoquines rectangulares estándar, rectangulares con cara inclinada, piezas de forma combinación en zigzags, piezas cuadradas, hexagonales, en cruz y la conocida forma "I" o "Hueso de perro", entre otros diseños especiales. Cada una de esas variantes condiciona el tipo de junta, el patrón de colocación y el grado de enredado entre las piezas, lo que repercute en la distribución de esfuerzos y en el comportamiento frente al deslizamiento o el movimiento lateral del pavimento. En lo que se refiere a sus partes, se distingue una cara de rodadura o de arriba, que es donde se recibe el contacto con el tráfico; caras laterales que sirven para la trabazón entre los elementos; chaflanes que protegen las aristas del impacto; y una cara de abajo que se apoya sobre la cama de arena.

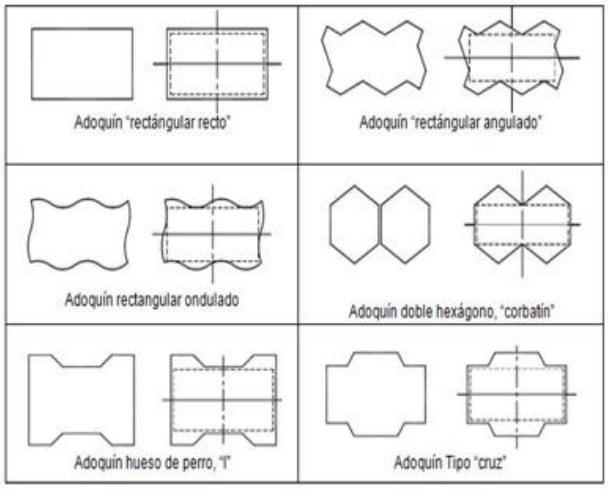


Figura 14 Formas del adoquín (Muñoz-Pérez et al. 2021)

Composición de los adoquines de concreto.

Muñoz-Pérez et al. (2021) explica que los adoquines de concreto se elaboran, de manera general, a partir de una mezcla de cemento, agua, agregados gruesos y finos, a los que se pueden incorporar aditivos químicos y pigmentos, según las exigencias del proyecto. Esta combinación de materiales busca alcanzar una mezcla con adecuada trabajabilidad en estado fresco y con resistencia, durabilidad y estabilidad volumétrica en estado endurecido. La correcta selección de los componentes y de sus proporciones se considera fundamental para garantizar que el adoquín cumpla con los requisitos de resistencia a compresión, abrasión y absorción de agua establecidos en las normas técnicas aplicables.

- **Cemento:** Respecto al cemento, el autor señala que constituye el material aglomerante principal en la fabricación de adoquines de concreto, se indica que el cemento es un polvo de naturaleza finamente pulverizada que, al mezclarse con agua, forma una pasta capaz de hidratarse, fraguar y endurecer, uniendo los agregados y proporcionando cohesión y resistencia mecánica a la mezcla. En los adoquines, el cemento actúa como matriz continua que recubre las partículas de agregado, rellena los vacíos y garantiza la integridad estructural de la unidad prefabricada. En consecuencia, la calidad del cemento, su tipo y la relación agua/cemento influyen directamente en la resistencia a compresión, la durabilidad frente a agentes ambientales y el comportamiento frente al desgaste por abrasión Muñoz-Pérez et al. (2021).
- **Agua:** En cuanto al agua, Muñoz-Pérez et al. (2021), la define como un componente esencial para la reacción química de hidratación del cemento y para la formación de la pasta que envuelve a los agregados. Se subraya que el contenido de agua debe ser el adecuado para lograr una mezcla trabajable durante el moldeo del adoquín, sin comprometer la resistencia final; un exceso de agua incrementa la porosidad y reduce la capacidad resistente, mientras que una cantidad insuficiente dificulta la compactación y limita el desarrollo completo de la hidratación. Por ello, se

recomienda emplear agua de calidad potable y controlar cuidadosamente la relación agua/cemento a fin de obtener adoquines con buenas propiedades físicas y mecánicas.

- **Aditivos:** Muñoz-Pérez et al. (2021) indica que los aditivos son componentes que se incorporan en pequeñas cantidades con el fin de modificar o mejorar ciertas propiedades del concreto, tanto en estado fresco como endurecido. Entre las funciones señaladas se encuentran acelerar o retrasar el fraguado, incrementar la trabajabilidad sin aumentar la relación agua/cemento, reducir la segregación, mejorar la compacidad o conferir características especiales, como mayor resistencia a ciclos de congelamiento y deshielo o al ataque químico. Se mencionan, entre otros, los plastificantes, que facilitan la colocación y compactación de la mezcla; los retardadores, que prolongan el tiempo de fraguado en climas cálidos; y diferentes tipos de aditivos que pueden incluir fibras de refuerzo u otros productos químicos orientados a optimizar el desempeño del adoquín en servicio.

Los agregados.

En relación con los agregados, Muñoz-Pérez et al. (2021), destaca que estos materiales cumplen un papel crucial al aportar resistencia, estabilidad y volumen al adoquín de concreto, se incluyen dentro de esta categoría la arena, la grava, la piedra triturada y otros materiales de naturaleza similar. La adecuada combinación de fracciones gruesas y finas permite alcanzar los niveles de resistencia y durabilidad requeridos para el pavimento, por lo que su selección debe responder a criterios granulométricos, de limpieza y de cumplimiento de normas técnicas específicas.

- **Agregado grueso:** Para el agregado grueso, Muñoz-Pérez et al. (2021) indica que se pueden emplear, entre otros, grava de río completamente lavada, grava triturada, piedra triturada y escoria de alto horno enfriada al aire. Además, se recomienda utilizar un agregado capaz de pasar por un tamiz de 13 mm (1/2") y quedar retenido en uno de 9 mm (3/8"), y cuyo tamaño máximo no exceda la quinta parte del espesor nominal del adoquín, de modo que se garantice una distribución adecuada de esfuerzos en la unidad de pavimento.

- **Agregado fino:** Respecto al agregado fino, Muñoz-Pérez et al. (2021) menciona que la arena recomendada es la proveniente de ríos con origen basáltico o de cuarzo, la cual debe estar completamente lavada y libre de arcilla, tierra vegetal, sales o basura. Se establece que no debe contener partículas con tamaño superior a 6 mm y que el porcentaje que pasa por el tamiz N.º 30 no debe exceder el 25 % de la muestra, con el fin de asegurar una granulometría adecuad.
- **Pigmentos:** Finalmente, en lo referente a los pigmentos, Muñoz-Pérez et al. (2021) explica que se trata de sustancias colorantes empleadas para proporcionar color a los productos de concreto, incluidos los adoquines. Estos pigmentos no cumplen una función estructural, pero sí tienen relevancia estética y de señalización, especialmente en pavimentos urbanos. Para su uso se requiere que cumplan con los requisitos que regula aspectos como estabilidad del color, compatibilidad con el medio alcalino del cemento y resistencia a la intemperie.

1.9.4 Formulación de idea a defender.

Es posible fabricar superficies podotáctiles para espacios públicos utilizando materiales eco-eficientes elaborados a partir de residuos reciclados, los cuales pueden ofrecer un rendimiento adecuado y sostenible frente a las condiciones ambientales urbanas.

1.10 Señalamiento de variables.

1.10.1 Variable dependiente.

Material compuesto.

1.10.2 Variable independiente.

Aprovechamiento de los residuos reciclados.

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 Método.

De acuerdo con Hernández Sampieri (2014) el enfoque cuantitativo se caracteriza por la recolección de datos numéricos y su análisis estadístico, permitiendo establecer relaciones objetivas y generalizables entre las variables de estudio. Este enfoque, según los autores, se basa en la medición controlada y en el uso de procedimientos estandarizados para garantizar la validez de los resultados. En el contexto de un diseño experimental destacan que este tipo de diseño implica la manipulación deliberada de una variable independiente y el control de otras variables para observar sus efectos sobre una o más variables dependientes, lo que permite inferir relaciones causales y obtener conclusiones robustas. Asimismo, los autores señalan que, dentro de este enfoque, los diseños experimentales y cuasi experimentales se distinguen por la manipulación deliberada de una variable independiente para observar su efecto sobre una o más variables dependientes.

En este contexto, la presente investigación adopta un enfoque cuantitativo con un diseño cuasi experimental, mediante el cual se manipula de forma intencional la variable independiente, correspondiente al porcentaje de limallas metálicas incorporadas como sustituto parcial del agregado fino. Dicha manipulación se realiza con el propósito de analizar su influencia sobre la variable dependiente, representada por las propiedades mecánicas del adoquín, específicamente la resistencia a la compresión y la resistencia a la tracción indirecta.

En base a estos lineamientos, la presente investigación adoptará un enfoque cuantitativo y un diseño experimental, en el cual se manipulará el porcentaje de limadura metálica incorporada en el material compuesto. Tal como lo plantean Muñoz-Pérez et al. (2021), se establecerán varios niveles de la variable independiente (por ejemplo, 0%, 5%, 10%, 15% y 20%) y se medirán las propiedades mecánicas resultantes (resistencia a la compresión, flexión, abrasión, entre otras) bajo condiciones controladas. De esta manera, se seguirá un procedimiento sistemático para analizar el efecto de la incorporación de residuos metálicos, con el fin de identificar la proporción óptima para las condiciones ambientales específicas de Baños, Ecuador.

2.2 Enfoque de la investigación.

En cuanto al enfoque de la investigación adoptado en el presente estudio, este es de carácter mixto (cuantitativo–cualitativo). Según Hernández Sampieri (2014) el enfoque mixto permite integrar la recolección y el análisis de datos numéricos con la interpretación de información cualitativa, con el propósito de obtener una comprensión más amplia y profunda del fenómeno de estudio. Este enfoque combina la objetividad y medición propia del enfoque cuantitativo con el análisis descriptivo e interpretativo del enfoque cualitativo, fortaleciendo la validez de los resultados.

Desde el enfoque cualitativo, la investigación se sustenta en la observación directa del espacio urbano, mediante la cual se diagnostican las condiciones de accesibilidad peatonal existentes en el cantón Baños de Agua Santa. Este análisis permite identificar limitaciones en la infraestructura urbana, particularmente en relación con la ausencia o inadecuación de elementos podotáctiles, lo que justifica la pertinencia de desarrollar un adoquín podotáctil adaptado al contexto local, considerando las características climáticas y las condiciones de uso propias del entorno.

Por su parte, el enfoque cuantitativo se aplica para la evaluación del material compuesto desarrollado, a través de la recolección de datos numéricos obtenidos mediante ensayos estandarizados. En este sentido, se analizan propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión, la tracción indirecta y la durabilidad del adoquín, permitiendo establecer relaciones objetivas entre el porcentaje de limaduras metálicas incorporadas y el comportamiento del material. La aplicación de análisis estadísticos posibilita identificar patrones y validar el desempeño del material bajo condiciones controladas, garantizando la reproducibilidad y aplicabilidad de los resultados para el contexto específico de Baños, Ecuador.

2.3 Modalidad.

La modalidad de la investigación que se escoge para este trabajo corresponde a aquella que se define como proyecto de investigación aplicada. En este sentido, la investigación no solo apunta a la producción de conocimiento teórico, sino que la investigación aplicada busca el uso práctico de los conocimientos con la solución de un caso específico. En este caso, resaltar el

problema de un material compuesto eco-eficiente en la utilización de residuos metálicos para la producción de superficies de podotactiles como en Baños, Ecuador.

La decisión de optar por una modalidad de este tipo está motivada por la consideración de que integra los aspectos teóricos y experimentales de la investigación orientándola hacia obtener resultados que sean palpables y reales. Al ser una investigación de tipo aplicada, hace hincapié en la resolución de un problema real partiendo de la aplicación de una metodología cuantitativa y experimental. Esto asegurará que no solo ofrezca respuestas a lo ya conocido en ciencia, sino que pueda dar una solución a la realidad, concretamente a la comunidad en la que se desarrolle dicha investigación.

2.4 Nivel de investigación.

Según Hernández Sampieri (2014), una investigación de nivel descriptivo tiene como finalidad presentar las características de un fenómeno o de una población, pero en este tipo de investigación no se manipulan las variables, sino que se observa y se registran las condiciones de los mismos tal como se presentan en la realidad misma tal como son; por lo tanto, este tipo de investigación tiene como finalidad mostrar cómo son las cosas, detallar y documentar aquellas variables que componen la imagen, mas no en explicar relaciones de causa-consecuencia; de ahí que la investigación descriptiva sirva para poder elaborar un diagnóstico y caracterización del fenómeno, a la vez que proporciona la información necesaria para profundizar en dicha situación actual.

El nivel descriptivo corresponderá a la descripción de las características y del comportamiento de los materiales compuestos eco-eficientes bajo las condiciones climáticas de Baños, Ecuador, el que implica realizar la descripción de forma concreta observando como ejemplo las propiedades que se observan en forma de resistencia, de durabilidad y de otras propiedades que sean de interés, pero sin la modificación de variables, sino con el análisis del comportamiento registrado tal cual. De este modo se podrá tener un panorama claro, objetivo que pueda ser punto de partida para sugerencias futuras o también para aplicaciones prácticas.

En el contexto de nivel de investigación exploratorio se justifica porque el diseño de un material compuesto ecoeficiente a partir de residuos metálicos para la fabricación de superficies podotáctiles en Baños, Ecuador, es un tema poco abordado y con escasos antecedentes sistematizados. Desde el enfoque de Hernández Sampieri (2014), este estudio exploratorio permite un primer acercamiento al fenómeno, con el fin de delimitar mejor el problema, reconocer las variables relevantes, como el porcentaje de limallas metálicas en el agregado fino, el comportamiento mecánico del adoquín y las condiciones ambientales locales, y generar bases para futuras investigaciones descriptivas o explicativas. En esta investigación, dicho nivel se operacionaliza mediante la revisión de literatura científica y normativa, el análisis del contexto urbano y climático, y la realización de pruebas de laboratorio en adoquines podotáctiles prototipo, con el propósito de reducir la incertidumbre sobre el desempeño del material compuesto y sentar fundamentos técnicos y conceptuales para su desarrollo posterior.

2.5 Diseño de la investigación

El presente trabajo emplea un diseño experimental de carácter comparativo y breves medidas repetidas. La variable independiente porcentaje de residuo incorporada va a ser manipulada en niveles previamente acordados y se llevará a cabo la comparación en cada formulación respecto de la mezcla de control. Las respuestas serán numéricas y replicables; se registrarán mediante planillas para analizar los datos mediante estadística descriptiva y contraste de medias para encontrar diferencias significativas entre las condiciones. La estructura operativa recurre a procedimientos de elaboración y ensayo de las probetas, lo que permite asegurar la trazabilidad y reproducibilidad de los datos Miranda et al. (2023)

Por otra parte, de acuerdo con el objetivo de comparación, el diseño presenta determinaciones funcionales del material y su proceso: trabajabilidad (consistencia de mezclado), resistencia a compresión como predictor de capacidad mecánica y resistividad superficial como proxy de comportamiento frente a espacios urbanos húmedos. Los protocolos normalizados serán aplicados para su medición, el enfoque es consistente con los trabajos de investigación que analizan la sustitución del aglomerante fino a partir de porcentajes de sustitución definidos y contraposiciones aglomerantes frente al control.

Finalmente, la evaluación de los resultados obtenidos se realizará a través de un proceso de validación y fiabilidad, asegurando que los hallazgos sean consistentes y relevantes para la comunidad de Baños de Agua Santa. La pertinencia de este estudio radica en su capacidad para demostrar de manera cuantitativa que es posible diseñar un material compuesto más sostenible y accesible, contribuyendo no solo a la reducción del impacto ambiental, sino también al bienestar social de la población con discapacidad visual. En resumen, el diseño de la investigación se ha estructurado para proporcionar respuestas claras y fundamentadas, alineadas con la idea central de que el aprovechamiento de residuos industrial reciclados para la creación de un nuevo material compuesto.

2.6 Operacionalización de variables.

Tabla 10 Variable Independiente: Aprovechamiento de residuos reciclados.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas	Instrumentos
Proceso de selección, acondicionamiento y transformación de residuos industriales/posconsumo en materia prima secundaria para un nuevo material, priorizando cierre de ciclo y trazabilidad local.	Disponibilidad y trazabilidad	Volumen mensual disponible (kg/mes).	¿Cuántos kg/mes hay? ¿Cuántos proveedores? ¿Varía por temporada?	Relevamiento y muestreo en campo; entrevistas a proveedores.	Balanza; registro; kg, nº.
	Granulometría	Distribución granulométrica (% por tamiz).	¿Cómo se distribuyen los tamaños?	Análisis granulométrico (tamizado).	Molino; tamices (ASTM C136)
	Composición y tipo	Clasificar por material (metal, polímero, caucho, etc.) y aleación/grado	¿Qué material exacto es? ¿Hay mezclas?	Inspección; pruebas rápidas (imán, densidad).	Imán; %, g/cm³.
	Compatibilidad con matriz	Interacción con la matriz (adhesión/mojabilidad)	¿Se moja bien? ¿Necesita tratamiento superficial?	Pruebas piloto	Mezcladora: sí/no

*T*abla 11 Variable Dependiente: Material Compuesto.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems	Técnicas	Instrumentos
Material compuesto matriz–refuerzo (con contenido de residuo reciclado) diseñado para pavimentos podotáctiles urbanos, con desempeño mecánico, antideslizante y de durabilidad acorde a normas de accesibilidad.	Propiedades físicas.	Densidad (g/cm³).	¿Cuál es la densidad del material?	ASTM D792 (densidad).	Ficha de muestreo; balanza. Unid.: kg.
	Propiedades mecánicas.	Resistencia a compresión (MPa).	¿Resiste las cargas peatonales y puntuales?	ASTM C39/C109 (compresión, según tipo de matriz).	Prensa universal. Unid.: MPa.
	Resistencia al desgaste.	Pérdida por abrasión (mg/1000 ciclos).	¿Qué pérdida de masa presenta frente a tránsito peatonal?	ASTM D4060 (Taber).	Abrasímetro Taber. Unid.: mg/1000 ciclos.
	Contenido reciclado	% en masa del residuo incorporado.	¿Cuál es el porcentaje real de contenido reciclado?	Cálculo gravimétrico.	Balanza. Unid.: %.

2.7 Población y muestra.

Asimismo, en la Tabla 12 resume la clasificación de las 9 cabeceras cantonales de Tungurahua en base a las tres dimensiones señaladas: la de escala urbana (tamaño de población y superficie urbana), la de la especialización económica expuestos en los propios documentos de planificación (PDOT/PUGS) y la de la jerarquía del asentamiento. Se puede ver cómo, a partir de esta información oficial, se atribuye a Ambato la función de "Articulador nacional" como consecuencia de su tamaño y diversificación en la manufactura (cuero y calzado) mientras que las otras ciudades se reconocen como "Poblado menor" con vocaciones determinadas: Baños de Agua Santa con vocación turística; Pelileo que se especializa en textil/jeans y agrocomercio; Píllaro en agropecuario y comercio; Quero, Tisaleo y Mocha en agropecuario; Cevallos en calzado y Patate en fruticultura templada. Se trata de una interpretación comparativa que sitúa funciones urbanas y pesos poblacionales y hierve los criterios para la selección de los casos y la priorización territorial de la investigación.

En coherencia con la clasificación territorial presentada en la Tabla 12 “Clasificación de las ciudades de Tungurahua: población, superficie y rol económico según SIN”, la población de referencia de este estudio está constituida por las nueve cabeceras cantonales de la provincia de Tungurahua. Estas ciudades se diferencian por su tamaño demográfico, superficie urbana y especialización económica. Dentro de este conjunto se seleccionó como caso de estudio la ciudad de Baños de Agua Santa, clasificada como “Poblado menor” con vocación turística (turismo como principal actividad económica) y una población urbana aproximada de 14 100 habitantes. La elección de Baños responde a dos criterios principales: por un lado, su condición de destino turístico consolidado, que genera un elevado flujo de peatones en el espacio público; y por otro, la evidente ausencia o insuficiencia de superficies podotáctiles en las aceras y cruces peatonales, lo que evidencia una brecha en términos de accesibilidad para personas con discapacidad visual. Estos elementos justifican que Baños de Agua Santa sea la muestra territorial para el desarrollo y prueba del material compuesto propuesto.

Tabla 12 Clasificación de las ciudades de Tungurahua: población, superficie, y rol económico según la SNI.

Ciudad (Cantón)	Habitantes	Superficie urbana (km²)	Economía dominante (PDOT/OFICIAL)	Código SNI	Categoría	Fuente
Ambato (Ambato)	177 316	34.64	Cuero y calzado, manufactura.	AN	Articulador nacional	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Ambato (PDOT - PUGS). 2022)
Baños de Agua Santa (Baños)	14 100	4.16	Turismo (principal actividad).	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017)(GAD Baños (PDOT 2019–2023 y PUGS). 2019)
San Pedro de Pelileo (Pelileo)	11 403	2.15	Textil/jeans; agrocomercio.	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Pelileo (PDOT 2024) 2024)
Santiago de Píllaro (Píllaro)	9 816	6.90	Agropecuario, comercio.	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Píllaro (PDOT 2024) 2024)
Quero (Quero)	3 269	2.400	Agropecuario.	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Quero (PUGS 2022) 2022)
Cevallos (Cevallos)	3 754	1.79	Calzado.	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Cevallos (PDOT–PUGS 2024) 2024)
San Cristóbal de Patate (Patate)	2 514	1.09	Fruticultura (manzana, durazno, etc.).	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Patate (PDOT 2024; PUGS 2024). 2024)

Tisaleo (Tisaleo)	1 269	1.270	Agropecuario (agricultura/ganadería).	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (SENPLADES), 2017) (GAD Tisaleo (PUGS) 2022)
Mocha (Mocha)	1 209	1.820	Agropecuario.	PM	Poblado menor	(INEC), 2022) (Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES) 2017) (GAD Mocha (Ordenanza PDOT/PUGS) 2025)
Nota: "Habitantes" y "superficie urbana" corresponden a la localidad urbana (ciudad) reportada por CityPopulation con fuente INEC Censo 2022 para cada localidad. Ejemplos: Ambato y Baños de Agua Santa muestran explícitamente población 2022 y área urbana. (Códigos SNI según "Jerarquía de Asentamientos Humanos" del SNI (AN ≥100 000; AR 50–100 k; AL 15–50 k; PM <15 k).						

2.7.1. Muestra.

Por otra parte, la tabla 13 reúne la categorización administrativa de Baños (Ecuador, Zonal 3, Tungurahua ,cantón/parroquias) y su contexto físico básico (superficie + contingente censal). Recoge el régimen climático en la zona de acuerdo con estaciones meteorológicas oficiales y normas climáticas de referencia, poniendo de manifiesto: altitud, promedios de temperaturas máxima y mínima, humedad relativa, precipitación anual y estacionalidad habitual de la Sierra. El documento sirve, de esta forma, como fuente directa para establecer criterios de clima que sirvan para el diseño y la durabilidad del podotáctil en un ambiente templado-húmedo.

La muestra territorial de la investigación está constituida por el área urbana del cantón Baños de Agua Santa. Como se presenta en la Tabla 13 "Categorización de Baños de Agua Santa", este cantón se ubica en un ambiente templado-húmedo, con rangos térmicos de 10–16 °C, alta humedad relativa y elevados niveles de precipitación anual, condiciones propias del valle del

río Pastaza. Estas características climáticas, sumadas a su función turística dentro de la provincia, justifican la selección de Baños como caso de estudio para evaluar el desempeño de un material podotáctil sometido a intemperismo en un contexto urbano húmedo.

*T*abla 13 Categorización de Baños de Agua Santa.

Ámbito / Micro zona	**Indicador**	**Dato (rango / valor típico)**	**Fuente oficial**
Región Sierra (Ecuador)	Régimen térmico (mesotérmico)	T° media anual 12–20 °C; mínimas rara vez < 0 °C; máximas generalmente < 30 °C	(Pourrut 1995) (Portilla Farfán 2018)
Región Sierra (Ecuador)	Humedad relativa	65–85 % (según altura y exposición)	(Portilla Farfán 2018) (Pourrut 1995)
Región Sierra (Ecuador)	Estacionalidad	Dos periodos lluviosos: feb–may y oct–nov. Sequía principal: jun–sep. "Veranillo del Niño": fines de dic.–ene.	(Portilla Farfán 2018)
Baños de Agua Santa (cantón)	Rango térmico cantonal	Por variación altitudinal, T° entre ~6 y 20 °C; en el valle del Pastaza predominan 10–16 °C	(GAD Parroquial Rural Río Negro 2023b; Gobierno Autónomo Descentralizado de Baños de Agua Santa; UNISDR (Campaña "Ciudades Resilientes"); Secretaría de Gestión de Riesgos 2016)
Cabecera urbana / valle (referencia espacial)	Temperatura media (isotermas)	Franjas típicas 10–12, 12–14, 14–16, 16–18 y 18–20 °C; predominan 10–16 °C en el valle	(Gobierno Provincial de Tungurahua n.d.)
Serie histórica cantonal	T° máxima media anual / mínima media anual	Referencia: 1990–2003 máx. ~23,8 °C / mín. ~12,1 °C; desde ~2014 máx. ~24,7 °C / mín. ~14,8 °C (tendencia al alza). Estimado con datos descargables de estaciones locales	(Gobierno Provincial de Tungurahua (Red Hidrometeorológica) n.d.)

Baños (microzonas muy húmedas)	Precipitación anual	En la parroquia Río Negro predominan > 4000 mm/año (≈72,9 % del área); luego 3000–4000 mm (≈25,8 %) y 2000–3000 mm (≈1,3 %).	(GAD Parroquial Rural Río Negro 2023a; GPT (Red Hidrometeorológica) / INAMHI n.d.)
Baños (meso–alto / valle interandino)	Humedad relativa	Mesotérmico interandino: ~65–85 %; hacia cumbres/vertientes externas (transición a Amazonía) humedad muy alta (> 80 %).	(GAD Parroquial Rural Río Negro 2023a; Portilla Farfán 2018)
Microzonificación urbana orientativa	Estaciones y altitud (soporte)	Parque de la Familia – 1695 m; Hidroagoyán – 1666 m; Río Verde – 1529 m	(Gobierno Provincial de Tungurahua (Red Hidrometeorológica) n.d.)
País / Zona de planificación	Ecuador · Zonal 3 – Centro	Integra Cotopaxi, Chimborazo, Tungurahua, Pastaza	(Secretaría Nacional de Planificación 2024)
Estacionalidad Sierra (nota)	“Veranillo” (Sierra centro)	Ventana seca corta a fines de dic.–ene (“veranillo del Niño”)	(Pourrut 1995)

2.7.2. Tipo de muestra

El diseño de la investigación considera una muestra no probabilística de tipo intencional o por conveniencia tanto a nivel territorial como experimental. En el plano territorial, la selección del cantón Baños de Agua Santa no responde a un muestreo aleatorio entre las cabeceras cantonales de Tungurahua, sino a criterios deliberados: su condición de ciudad turística, el elevado flujo peatonal en el espacio público, la ausencia de superficies podotáctiles y sus condiciones climáticas templado/húmedas, que representan un contexto exigente para la durabilidad del material. En este sentido, Baños se configura como un caso de estudio elegido estratégicamente para la evaluación del material compuesto podotáctil.

2.7.3. Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra, a nivel territorial, se definió bajo un enfoque de estudio de caso. En consecuencia, se trabajó con un solo cantón como unidad de análisis: Baños de Agua Santa. Esta decisión responde al interés de profundizar en un contexto urbano específico con alta afluencia turística y déficit de superficies podotáctiles, más que a la comparación estadística entre varias ciudades de la provincia. Por ello, la muestra territorial queda conformada por el área urbana de Baños de Agua Santa, donde se proyecta la futura implementación del material compuesto podotáctil.

Al mismo tiempo, en el aspecto experimental, el tamaño de la muestra se vio determinado por el tipo de diseño de ensayos mecánicos y la capacidad operativa del laboratorio, resultando en un total de 6 probetas de adoquín hexagonal de hormigón, de las que 4 contenían un 10% de limallas metálicas como sustitución parcial del agregado fino y otras 2 se obtuvieron como probetas de referencia sin adición de residuos metálicos. Las probetas con limallas fueron divididas en dos grupos de dos probetas cada uno, destinadas a ensayos de resistencia a la compresión y tracción indirecta respectivamente, contando a su vez cada tipo de ensayo con una probeta de referencia de hormigón convencional. Este tamaño de la muestra permite tener réplicas para el material compuesto y tener un punto de comparación del hormigón tradicional cuyas características se consideran adecuadas para un estudio experimental de carácter exploratorio.

2.7.4. Selección de la muestra

La selección de la muestra se realizó en coherencia con los objetivos de la investigación y en dos niveles. En el plano territorial se trabajó con un único caso de estudio: el área urbana de Baños de Agua Santa, escogida de manera intencional por tratarse de un entorno turístico con alto flujo peatonal, carencia de superficies podotáctiles y un clima templado/húmedo con elevada precipitación, condiciones que exigen materiales resistentes a la intemperie. Este contexto define el escenario donde se proyecta la futura aplicación del material compuesto desarrollado.

De tal manera, se optó por el adoquín hexagonal de hormigón como elemento constructivo en el experimento hasta conseguir un tamaño de 23 * 25 * 8 cm de espesor, tratando de tener una mezcla de base, que se comporta con una resistencia característica próxima a 350 kg/cm² a los 28 días, de acuerdo a los valores que se han manejado para adoquines de paso peatonal, a partir de la mezcla de base definimos dos contingentes: hormigón convencional/hormigón con una sustitución del 10 % del agregado fino por limallas metálicas, para determinar el comportamiento a compresión y a tracción indirecta.

Asimismo, las limallas metálicas se eligieron por conveniencia mediante el uso de un residuo obtenido en Muebles León, ubicada en el cantón Ambato, la cual produce virutas y limallas continuamente en sus procesos metalmecánicos. Este residuo fue incluido en la dosificación experimental y se utilizó para el moldeo de seis probetas de adoquín, las cuales se asignaron a ambas mezclas, y fueron ensayadas a los siete días de edad, esto de acuerdo con las edades de evaluación recogidas en la normativa técnica y con las restricciones de tiempo del trabajo de laboratorio. Así, la elección de la muestra experimental responde a la utilización de un desecho local, como respuesta a la necesidad de mantener un enfoque ecoeficiente, así como a la exigencia de poder llevar a cabo una comparación temprana y controlada entre el hormigón convencional y el hormigón con limallas en condiciones de ensayo equivalentes.

2.8 Materiales y procedimiento experimental.

2.8.1 Obtención de las limallas metálicas

Las limallas metálicas utilizadas en esta investigación se obtuvieron en la empresa Muebles León, ubicada en la provincia de Tungurahua, dedicada a la fabricación de mobiliario y estructuras con componentes metálicos. En sus procesos de corte, taladrado y mecanizado de perfiles se generan de forma continua residuos en forma de virutas o limallas, que habitualmente son considerados desecho. A partir de un acuerdo de colaboración con la empresa, estos residuos fueron destinados al proyecto con el propósito de valorizar un subproducto industrial local e incorporarlo como insumo en la elaboración de un material compuesto para adoquines podotáctiles.

La recolección de limallas se llevó a cabo directamente en bandejas y/o contenedores de las máquinas, como se visualiza en la Figura 15, eligiéndose únicamente el material que era limpio y desechando elementos no deseables como tornillos, trozos de piezas, polvo, restos de embalajes, etc. Seguidamente, las limallas eran sacudidas para eliminar el exceso de lubricantes y posteriormente dejadas secar al aire, como se muestra en la Figura 16, antes de ser almacenadas en recipientes plásticos etiquetados para el traslado hasta el laboratorio. Este procedimiento garantizaba disponer de un residuo metálico semi-homogéneo que podía ser utilizado en las posteriores etapas de tamizado, dosificado e incluido en las mezclas de hormigón.

Figura 15 Pulido de tubos metálicos donde se obtienen las limallas.

Figura 16 Limallas obtenidas de la empresa Muebles León.

2.8.2 Tamizado y clasificación de las limallas (tamiz #16)

Una vez obtenidas las limallas metálicas en la empresa Muebles León, estas fueron trasladadas al laboratorio de materiales para su preparación previa a la dosificación. Con el propósito de homogenizar el tamaño de partícula y eliminar fracciones excesivamente gruesas o finas, se realizó un proceso de tamizado empleando un tamiz Humboldt N. º16, como se observa en la Figura 17, con una abertura de malla de 1,18 mm (1180 µm)**.** Las limallas se colocaron en el tamiz en porciones controladas y se sometieron a agitación manual hasta lograr que las partículas de menor tamaño atravesaran la malla, separando así la fracción apta para ser incorporada como sustituto parcial del agregado fino.

El material que quedó retenido sobre el tamiz (partículas muy largas, conglomerados o impurezas) fue descartado, como se observa en la Figura 18, mientras que la fracción que pasó a través de la malla se consideró adecuada para el estudio, por presentar una granulometría más compatible con la arena utilizada en la mezcla de hormigón. Las limallas tamizadas se almacenaron en recipientes limpios y rotulados, listas para su pesada y dosificación. Este procedimiento permitió obtener un residuo metálico con tamaño de partícula más uniforme, mejorando su dispersión dentro de la matriz de hormigón y facilitando la comparación entre la

mezcla de referencia y la mezcla modificada con un 10 % de limallas metálicas en el agregado fino, como se observa en la Figura 19.

Figura 17 Tamiz Humboldt N. º16, con una abertura de malla de 1,18 mm (1180 µm).

Figura 18 Partículas muy largas, conglomerados o impurezas.

Figura 19 Obtención de limallas tamizadas

2.8.3 Selección del material base para los adoquines podotáctiles.

Para determinar el material más adecuado en la fabricación de los adoquines podotáctiles se realizó una evaluación comparativa de las principales soluciones empleadas en este tipo de superficies. En la matriz se consideraron materiales usuales para podotáctiles como cerámica o porcelanato, hormigón prefabricado, piedra natural, metal, arcilla cocida, FRP, polímeros y termoplásticos, recopilados a partir de experiencias previas y recomendaciones técnicas.

Cada material se analizó frente a criterios funcionales y de durabilidad relevantes para el contexto de Baños de Agua Santa, caracterizado por alta humedad relativa y lluvias frecuentes. Se valoraron el comportamiento antideslizante en mojado, el desempeño frente a lluvia intensa y drenaje, la susceptibilidad al biofilm, la resistencia a radiación UV y la estabilidad del color, así como la dilatación térmica, el tipo de fijación o adhesivo, la resistencia a agentes químicos de limpieza, las necesidades de mantenimiento, la vida útil estimada, la huella de carbono y el contraste LRV, junto con el cumplimiento de normas específicas para pavimentos podotáctiles.

A cada criterio se le asignó una calificación de 1 a 5 puntos, donde 5 representa el desempeño más favorable. La suma de estos valores generó un puntaje global para cada material, registrado en la tabla de decisión y representado gráficamente en el diagrama de araña correspondiente. Este procedimiento permitió comparar de manera sintética el comportamiento de los materiales usuales en podotáctiles bajo las mismas condiciones de exigencia.

Los resultados mostraron que la cerámica o porcelanato obtuvo el mayor puntaje global debido a su excelente resistencia química, buen comportamiento antideslizante y alta durabilidad. Sin embargo, su producción requiere hornos y equipamiento especializado que no se encontraban disponibles para el desarrollo experimental de este estudio. Ante esta limitación, y considerando la necesidad de utilizar un material viable con la infraestructura local, se seleccionó el hormigón prefabricado como alternativa con el siguiente mejor desempeño global, estableciéndolo como material base para el diseño y fabricación de los adoquines podotáctiles del proyecto.

Tabla 14 Evaluación comparativa de materiales utilizados en superficies podotáctiles.

Material para podotáctil	Antideslizante en mojado	Métrica antideslizante (método/valor)	Lluvia intensa / drenaje	HR alta / biofilm	Resistencia UV / color	Dilatación térmica (movimiento)	Fijación / adhesivo (norma)	Resistencia a químicos (limpieza)	Mantenimiento en Baños	Vida útil (aprox.)	Huella de carbono (CO_2e)	Contraste LRV	WA / PEI / Adhesivo (norma)	Notas microzonas (Centro ↔ Río Verde)
Hormigón prefabricado (loseta/adoquín; opción permeable)	Cumple con textura rugosa profunda	Pendulum PTV ≥ 36; si usas DCOF, reporta solo como referencia de interior	Muy apto; versión permeable reduce charcos	Mineral; baja retención si se limpia	Buena; puede palidecer sin sellador	Media; juntas controlan movimiento	Cama granular o mortero; anclajes en bordes	Media; depende de sellador	Bajo–medio (cepillado + desalgado periódico)	25–40 años	Media	≥ 30 puntos	*N/A*	En Río Verde prioriza permeable o textura alta por spray; en centro urbano vale convencional
Arcilla cocida / ladrillo vitrificado (adoquín)	Cumple con piezas rugosas	PTV ≥ 36	Buena; juntas drenan	Si es vitrificado, baja absorción	Excelente	Baja–media	Cama granular/mortero; rejunte cementicio	Media	Bajo	30–50 años	Media–alta	≥ 30 puntos	WA: baja si vitrificado (ensayo ISO 10545-3)	Mejor en zonas húmedas si es vitrificado; mantener juntas compactas
Piedra natural (granito/basalto texturizado: flameado/bujardado)	Muy buena	PTV ≥ 36	Muy apta; casi no absorbe	Poco susceptible; limpiar biofilm superficial	Excelente	Baja	Losa sobre mortero; anclajes puntuales	Alta (inertes)	Bajo	40–75+ años	Media (masa y transporte)	≥ 30 puntos	*N/A*	Muy recomendable en gargantas con spray (Hidroagoyán)
Cerámica / porcelánico (placa exterior antideslizante)	Excelente (textura o microrelieve)	PTV ≥ 36 (exterior). Si reportas DCOF, ≥ 0.42 solo para interior (ANSI A326.3)	Excelente; porcelánico casi no absorbe	Inerte; limpieza mantiene agarre	Excelente	Baja	Adhesivo C2TE S1 (ISO 13007); rejunte epoxi en zonas muy húmedas (ANSI A118.3)	Alta (con epoxi)	Bajo	30–50+ años	Baja–media	≥ 30 puntos	WA ≤ 0.5 % (porcelánico, ISO 13006/10545-3). PEI ≥ 3–4 (ISO 10545-7)	Muy recomendado para Río Verde e hiperhumedad; asegurar pendiente y rejunte epóxico
Metal (studs/pernos inox; placas texturadas)	Excelente (sistemas de alto agarre)	PTV ≥ 36 con patrón adecuado	Excelente; no absorbe	Muy baja retención	Excelente	Media (expansión térmica)	Fijación mecánica al sustrato	Alta si es inox	Muy bajo	25–40+ años	Media (pero poca masa por m²)	≥ 30 puntos	*N/A*	Ideal para retrofit y cruces de alto tránsito; verificar dilatación y anclajes
Polímeros (PVC/PU; baldosa aplicada)	Buena si el relieve es alto	PTV ≥ 36 (depende del relieve)	Aceptable; evitar charcos (riesgo de despegue)	Media; limpiar frecuente	Buena (aditivos UV)	Alta	Adhesivo flexible compatible con humedad	Media–alta (según formulación)	Bajo–medio	10–20 años	Baja–media	≥ 30 puntos	Adhesivo C2TE S1 si va sobre mortero; sellos compatibles	Útil para obras rápidas; evitar como solución permanente en hiperhumedad
FRP (fibra de vidrio + resina; panel/placa antideslizante)	Buena–muy buena (grano embebido)	PTV ≥ 36	Muy buena; impermeable y ligero	Baja; limpiar periódicamente	Muy buena	Media	Tornillería / epoxi estructural	Muy alta (excelente resistencia química/corrosión)	Bajo	20–30 años	Media	≥ 30 puntos	*N/A*	Alternativa robusta en rampas/pasarelas con spray constante
Termoplástico preformado (aplicado con calor)	Buena (alto agarre inicial)	PTV ≥ 36 al instalar	Buena si base drena e instalación en seco	Media; se ensucia más	Muy buena	Alta	Fusión térmica; seguir ventana climática	Media (sensibles a solventes/grasas)	Muy bajo	5–10 años	Media–baja	≥ 30 puntos	*N/A*	Señalización rápida; no "permanente" en zonas hiperhúmedas

Tabla 15 Resultados de la evaluación cuantitativa de materiales para podotáctiles.

Material para podotáctil	Antideslizante en mojado	Métrica antideslizante (método/valor)	Lluvia intensa / drenaje	HR alta / biofilm	Resistencia UV / color	Dilatación térmica (movimiento)	Fijación / adhesivo (norma)	Resistencia a químicos (limpieza)	Mantenimiento en Baños	Vida útil (aprox.)	Huella de carbono (CO_2e)	Contraste LRV	WA / PEI / Adhesivo (norma)	Total
Cerámica / Porcelánico	5	5	5	5	5	3	5	5	5	5	3	5	5	**61**
Hormigón prefabricado *(incluye opción permeable)*	5	5	5	5	5	4	5	4	4	5	4	4	4	**59**
Piedra natural (granito/basalto texturizado)	5	5	5	4	5	5	4	4	4	5	3	3	4	**56**
Metal (studs inox / placas texturadas)	5	5	4	4	5	4	5	5	4	5	3	4	4	**57**
Arcilla cocida / ladrillo vitrificado	4	4	4	4	5	4	5	4	4	4	3	3	4	**52**
FRP (fibra de vidrio + resina, grano antideslizante)	4	4	4	4	4	3	4	5	4	4	3	5	3	**51**
Polímeros (PVC/PU aplicados)	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	3	**42**
Termoplástico preformado	4	3	3	3	4	3	3	3	3	3	3	5	3	**43**

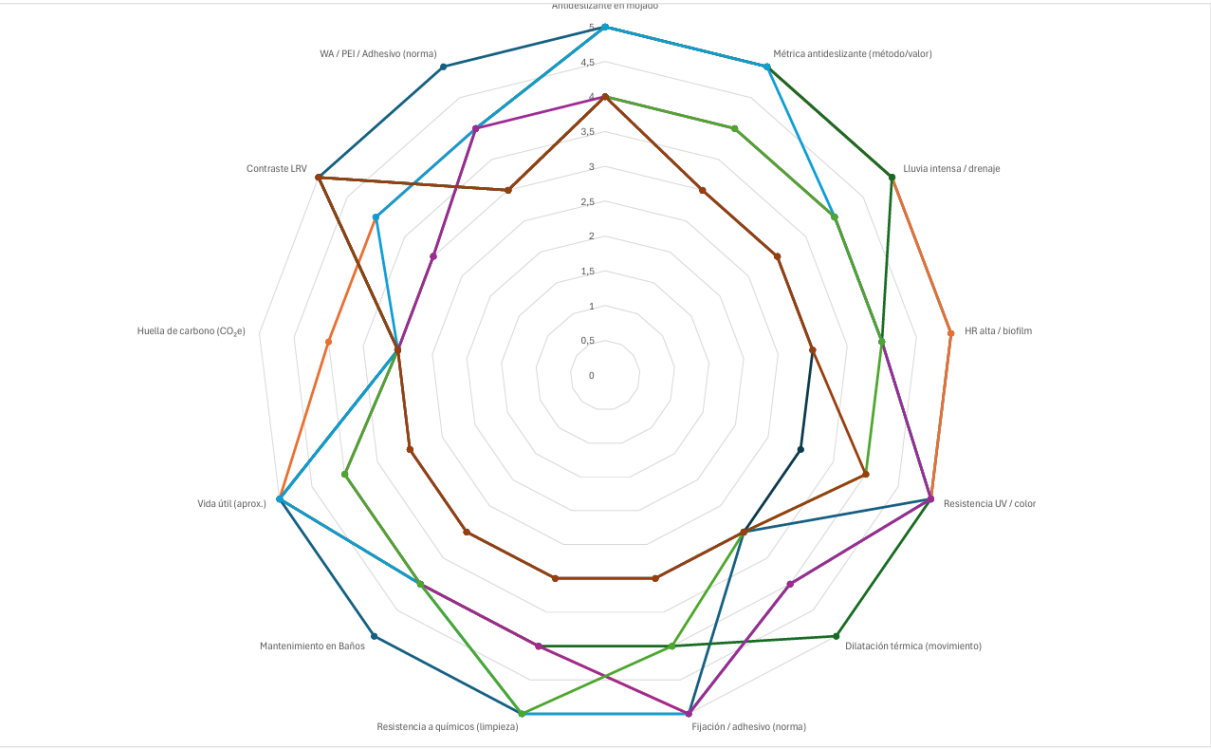


Figura 20 Diagrama de araña del desempeño comparativo de materiales para adoquines podotáctiles.

2.8.4 Agregados empleados (arena, ripio, cemento Holcim)

Para la elaboración de los adoquines se emplearon agregados pétreos y cemento de uso habitual en la construcción local. Como agregado fino se utilizó arena limpia, como se observa en la Figura 22, con presencia mínima de materia orgánica y partículas arcillosas, adecuada para mezclas de hormigón. Como agregado grueso se empleó ripio de granulometría media, como se observa en la Figura 21, identificado en obra como grava triturada, el cual aporta capacidad resistente y estabilidad volumétrica a la mezcla. Ambos agregados fueron seleccionados de proveedores locales y se utilizaron en estado seco y tamizado de forma previa, con el fin de garantizar una mejor dosificación y una adecuada homogeneidad en el hormigón.

Asimismo, se utilizó cemento Portland de la marca Holcim de características estructurales como material aglutinante (ver Figura 23) por su disponibilidad en el mercado y por el dicho y conocido comportamiento de éste con otros elementos de hormigón para pavimentación. El cemento se mantuvo en un lugar seco y aislado de la humedad, entre la superficie del suelo y los fuertes cambios de temperatura, con la finalidad de conservar sus propiedades hasta el

momento del mezclado. Así, la combinación seleccionada de arena, ripio y cemento Holcim, permite realizar que la base sea estable, a la cual posteriormente se incorporó el 10 % de limallas metálicas en el agregado fino, permitiendo así el contraste entre el comportamiento de un hormigón convencional y un hormigón modificado en condiciones controladas.

Figura 21 Agregado grueso ripio.

Figura 22 Agregado fino arena.

Figura 23 Cemento Portland de la marca Holcim.

Determinación del porcentaje adecuado de limallas metálicas en el hormigón.

En el año 2017, en la Universidad Francisco de Paula Santander, sede Ocaña (Colombia), se desarrolló una investigación orientada a la incorporación de virutas de acero en mezclas de hormigón. El estudio contempló la caracterización física de los agregados y el posterior diseño de mezclas con porcentajes de reemplazo parcial del agregado fino del 10 % y 12 %. Los ensayos de desempeño mecánico se aplicaron tanto a una mezcla patrón como a aquellas adicionadas con virutas de acero. Los resultados evidenciaron que el hormigón con un 10 % de reemplazo presentó un comportamiento mecánico más favorable y comparable al de la muestra de control, mientras que el incremento al 12 % no generó mejoras significativas. En función de estos resultados, los autores determinaron que el 10 % constituye el porcentaje más adecuado para la sustitución parcial del agregado fino con virutas de acero. Este antecedente respalda la decisión metodológica de la presente investigación de emplear un reemplazo del 10 % de limallas metálicas, al considerarse un valor técnicamente apropiado y sustentado en estudios previos. Andrea Pinzón Rincón Gaona (2016).

2.8.5 Dosificación de las mezclas (en libras, 0 % y 10 % de limallas)

Para la fabricación de los adoquines hexagonales se definió una dosificación base expresada en libras, considerando un lote de seis unidades por mezcla. Se estableció una mezcla de referencia de hormigón convencional (0 % de limallas metálicas) y una mezcla modificada con 10 % de limallas como sustitución parcial del agregado fino. En ambos casos se mantuvieron constantes las cantidades de cemento y agregado grueso (ripio), de manera que la única variación entre las dosificaciones corresponde a la sustitución de una fracción de arena por limallas metálicas. La Tabla 16 presenta el resumen de los materiales empleados en cada mezcla.

Tabla 16 Dosificación de materiales para seis adoquines hexagonales, con y sin incorporación de limallas metálicas.

Material	Mezcla de referencia 0 % limallas (lb)	Mezcla con 10 % de limallas (lb)	Comentario.
Ripio (agregado grueso)	4,6	4,6	Se mantiene constante en ambas mezclas.
Arena (agregado fino)	25,0	22,5	Se reduce para permitir la sustitución parcial por limallas.

Limallas metálicas (sustituto de arena)	0,0	2,5	Corresponde al 10 % del agregado fino total considerado.
Cemento Portland (Holcim)	12,0	12,0	Se mantiene constante en ambas mezclas.
Agregado fino total (arena + limallas)	**25,0**	**25,0**	En la mezcla con limallas se adopta 25 lb como 100% del agregado fino.

Por otro lado, se determinó el 10 % de limallas metálicas a partir de 25 lb de agregado fino total en la mezcla modificada: de esa cantidad se obtuvieron 2,5 lb de limallas (10 %) y 22,5 lb de arena (90 %). Con ello, se continúa utilizando prácticamente la misma cantidad de material fino en la mezcla, garantizando que cualquier comparación entre el hormigón convencional y el hormigón con residuos metálicos esté determinada sobre todo por el propio efecto de sustituir parcialmente el agregado fino por limallas, sin que se modifique significativamente la relación entre el cemento la cantidad de agua y la de los agregados gruesos utilizados en la fabricación de los adoquines.

2.8.6 Mezclado de los materiales en la bloquera.

El proceso de mezclado de los materiales se realizó en la bloquera colaboradora, utilizando el mismo procedimiento para ambas dosificaciones: mezcla de referencia (0 % de limallas metálicas) y mezcla modificada (10 % de limallas). En primer lugar, se incorporaron a la mezcladora los agregados en estado seco, es decir, la arena y el ripio, y en el caso de la mezcla modificada también las limallas metálicas previamente tamizadas. Esta etapa de mezclado en seco permitió dispersar de manera uniforme las partículas metálicas dentro de la matriz granular, reduciendo el riesgo de zonas con concentración excesiva de limallas.

Los agregados se homogeneizaron antes de añadir el cemento Portland Holcim y continuar con el mezclado hasta obtener color y textura de la masa seca que fueran iguales. Durante el continuado del mezclado se incorporó progresivamente el agua de amasado, determinada su cantidad en función de la consistencia necesaria para el moldeo de adoquines. La acción de mezclado mantuvo su duración hasta conseguir una pasta de hormigón de un color homogéneo y la ausencia de grumos, sin que se evidenciasen signos de segregación ni de exudación. De tal forma se consiguió que la mezcla convencional y la mezcla con 10 % de limallas se distribuyeran

homogéneamente, condición necesaria para el aseguramiento de la comparabilidad de los resultados mecánicos obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Figura 24 Mezcla de materiales con limallas.

2.8.7 Moldeo de los adoquines hexagonales

Una vez obtenida la mezcla de hormigón con la consistencia adecuada, se procedió al moldeo de los adoquines en la bloquera. Para ello se utilizaron moldes metálicos de geometría hexagonal, con dimensiones en planta de 23 × 25 cm y un espesor de 8 cm, acordes con las medidas establecidas para los elementos de ensayo. La mezcla fresca se vertió en los moldes por capas, distribuyéndola de manera uniforme en toda la superficie. En cada capa se aplicó compactación mediante vibrado mecánico, según el procedimiento del equipo disponible, con el propósito de eliminar vacíos, asegurar el llenado completo de las esquinas y mejorar la adherencia entre los componentes de la mezcla.

Figura 25 Moldes para adoquines hexagonales

Figura 26 Colocación de la mezcla en los moldes.

Figura 27 Vibración de la mezcla.

Figura 28 Adoquines hexagonales con el 10% de limallas metálicas.

2.9 Técnicas de estudio.

La investigación se fundamenta, principalmente, en el uso de la técnica de observación no participante y estructurada, la que fue aplicada en dos escenarios complementarios. En el contexto urbano, se realizaron recorridos sistemáticos por la zona central de Baños de Agua Santa, para poder registrar las circunstancias que afectan la accesibilidad peatonal: continuidad y ancho de las aceras, existencia o carencia de superficies podotáctiles, presencia de rampas, cruces peatonales y las zonas donde la afluencia de personas es mayor. La mencionada observación se particularizó mediante el uso de una ficha diseñada con indicadores de accesibilidad y mediante el apoyo de un registro fotográfico, que permitió documentar de forma objetiva la situación real del espacio público en el que se anchaba el material compuesto.

Figura 29 Muestra uno de los tramos observados en el centro de Baños de Agua Santa.
Nota: Fotografía tomada por el autor (2025).

También, en el marco experimental, se utilizó también la observación sistemática, pero en esta ocasión la observación se refería al comportamiento de las probetas de adoquín de hormigón en los ensayos de resistencia a la compresión y la tracción indirecta. Para ello se utilizaron fichas de experimentación en las que se anotaron datos como tipo de mezcla (con limallas o sin limallas), en qué edad estaba el adoquín, carga máxima aplicada, modo de fallo, además de fotografías de las probetas antes y después del ensayo. Así que la observación como técnica constituye la técnica de la investigación que enlaza el diagnóstico del espacio urbano y la evaluación del material compuesto propuesto.

2.10 Modelo de instrumentos.

De acuerdo con Hernández Sampieri (2014), los instrumentos deben elaborarse en la medida de que se deban medir las variables y permitir un registro sistemático/ordenado y a la vez comparable de la información. En esta investigación se utilizaron, para el trabajo de campo en el área urbana de Baños de Agua Santa, instrumentos estructurados fundamentalmente un formato de observación de la accesibilidad peatonal y registro fotográfico, que permite documentar, ordenadamente, la continuidad /ancho de las aceras, de la existencia o ausencia de superficies podotáctiles (guías), la existencia de rampas y cruces peatonales y la probabilidad de flujo de peatones, y documentar para todas las partes de las calles observadas un registro de imágenes digitales.

En el componente experimental se utilizaron instrumentos diseñados para el registro uniforme de los ensayos mecánicos realizados a las probetas de adoquín de hormigón convencional y a las mezclas con incorporación del 10 % de limallas metálicas. Se aplicó una ficha de registro de ensayos en la que se consignaron el código de la probeta, tipo de mezcla, fecha de elaboración y de ensayo, edad del hormigón, dimensiones, carga máxima y modo de falla, además de una matriz de resultados en hoja de cálculo para procesar los valores de resistencia a la compresión y a la tracción indirecta. Estos instrumentos aseguraron la organización y trazabilidad de los datos que se analizan en el capítulo de resultados.

2.11 Análisis y discusión de resultados.

Para el análisis mecánico del material compuesto se programó una serie de ensayos sobre adoquines hexagonales de hormigón, elaborados con las dimensiones nominales definidas previamente para el proyecto. Se fabricaron tres probetas para cada tipo de ensayo, compresión y tracción indirecta: una probeta de referencia sin limallas metálicas y dos probetas con incorporación del 10 % de limallas en el agregado fino. Todas las unidades se curaron bajo las mismas condiciones hasta la edad establecida y luego se ensayaron en la máquina correspondiente, aplicando la carga según el procedimiento indicado para adoquines hexagonales. Con esta configuración se obtuvo un conjunto de datos comparable entre el hormigón convencional y el hormigón con limallas en ambas solicitaciones.

Figura 30 Adoquines para pruebas de laboratorio.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados.

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio realizadas sobre los adoquines de hormigón elaborados con y sin incorporación de limallas metálicas. Como se describió en el Capítulo II, sección 2.8, los adoquines hexagonales se fabricaron a partir de una mezcla de referencia de hormigón convencional y de una mezcla modificada con sustitución del 10 % del agregado fino por limallas metálicas procedentes de la empresa Muebles León. Posteriormente, las unidades fueron sometidas a ensayos de resistencia

a la compresión y tracción indirecta, siguiendo los procedimientos establecidos en la NTE INEN 3040:2016 y considerando una edad de 7 días de curado, de acuerdo con la tabla de desarrollo de resistencia del hormigón.

El periodo de curado de 7 días fue adoptado debido a las limitaciones temporales propias del desarrollo de la investigación. Este tiempo permitió obtener resultados preliminares representativos sobre el comportamiento mecánico del material compuesto, manteniendo condiciones controladas de ensayo. Si bien los periodos de 14 y 28 días proporcionan una evaluación más completa del desempeño del hormigón, su aplicación no fue posible dentro del cronograma establecido. En consecuencia, los resultados obtenidos constituyen una referencia inicial para futuros estudios con tiempos de curado prolongados.

El propósito de este capítulo es evaluar el comportamiento mecánico del material compuesto propuesto y compararlo con el hormigón convencional, identificando el efecto que produce la incorporación de limallas metálicas en las resistencias a compresión y a tracción indirecta. Para ello, en primer lugar, se presentan los resultados individuales de las probetas ensayadas, organizados en tablas y gráficos que facilitan la comprensión de los valores obtenidos. A continuación, se discuten estos resultados a la luz de los requisitos normativos y de los antecedentes teóricos revisados, con el fin de determinar la viabilidad del uso de adoquines con 10 % de limallas para superficies podotáctiles.

Con base en el análisis de los datos experimentales, se procede a la verificación de la idea a defender planteada en el marco metodológico, estableciendo si la incorporación de residuos metálicos permite mantener o alcanzar niveles de resistencia compatibles con las exigencias técnicas para elementos de pavimentación peatonal y podotáctil.

Determinación de la resistencia a compresión en los adoquines

Para evaluar el comportamiento mecánico de los adoquines frente a cargas de compresión se utilizó la expresión clásica de esfuerzo normal, basada en la relación entre la carga aplicada y el área resistente de la sección:

$$\sigma_c = \frac{P}{A}$$

Donde:

- σ_c= resistencia o esfuerzo a compresión (MPa),
- P= carga máxima registrada por la máquina de ensayo (N),
- A= área de aplicación de la carga (mm²).

El área de carga se calculó considerando la geometría real del adoquín hexagonal que entra en contacto con las placas de la prensa durante el ensayo. Para ello, se utilizó el área de un hexágono regular, calculada a partir de la distancia entre caras opuestas del adoquín, la cual es de aproximadamente 23 cm.

El área del hexágono regular se determinó mediante la siguiente expresión:

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot a^2$$

Donde:

- $a$es el lado del hexágono (cm), calculado como:

$$a = \frac{23}{\sqrt{3}} \approx 13{,}28 \text{ cm}$$

Sustituyendo en la ecuación:

$$A = \frac{3\sqrt{3}}{2} \cdot (13{,}28)^2$$

$$A \approx 458{,}5 \text{ cm}^2$$

Conversión del área a milímetros cuadrados

Dado que, 1 MPa=1 N/mm2 el área se expresó en milímetros cuadrados:

$$A = 458{,}5\ \text{cm}^2 \times 100 = 45\,850\ \text{mm}^2$$

Finalmente, sustituyendo en la ecuación:

1. Se toma la carga máxima P (en N) registrada para cada probeta.
2. Se divide entre el área de carga $A = 57\,500\ \text{mm}^2$.
3. El resultado se expresa en MPa, y, cuando se requiere, se convierte también a kg/cm² mediante la aproximación:

$$1\ \text{MPa} \approx 10{,}2\ \text{kg/cm}^2$$

Este procedimiento se aplicó de manera sistemática a todas las probetas de compresión (0 % y 10 % de limallas), permitiendo comparar la resistencia a compresión del hormigón convencional con la del hormigón modificado con residuos metálicos.

3.1.1 Resultados de compresión de la probeta de referencia sin limallas (ensayo a 7 días).

La interpretación de los resultados de compresión se realizó considerando la edad del hormigón al momento del ensayo. De acuerdo con los criterios de control de calidad, las pruebas estándar de compresión suelen ejecutarse a los 7, 14 y 28 días, ya que la resistencia del material evoluciona con el tiempo de curado. En la Tabla 17, que resume el desarrollo de la resistencia relativa a la compresión del hormigón, se observa que, para distintas clases de resistencia, el hormigón a los 7 días alcanza aproximadamente entre el 65 % y el 75 % de la resistencia que presentará a los 28 días. En la tabla se aprecia, por tanto, que los resultados obtenidos a los 7 días corresponden a una resistencia temprana, que aún puede incrementarse conforme avanza la edad del material.

Tabla 17 Resumen del desarrollo de la resistencia relativa a la compresión del hormigón.

Edad (días)	Límite inferior (%)	Promedio (%)	Límite superior (%)	Interpretación general

0	0	0	0	Hormigón recién colocado, sin resistencia.
1	10	10	10	Desarrolla solo alrededor del 10 % de la resistencia final.
3	45	50	55	Alrededor de la mitad de la resistencia de diseño.
7	**65**	**70**	**75**	**Se alcanza aprox. entre el 65 % y 75 % de la resistencia a 28 días.**
14	80	85	90	La resistencia continúa creciendo, cerca del 85 % promedio.
21	90	95	100	Se aproxima al valor de diseño.
28	95	100	105	Resistencia de diseño (referencia estándar).
56	115	120	125	Puede superar en un 15–25 % la resistencia de diseño.

Sobre la base de lo señalado en la tabla de edades, en esta investigación se analizó en primera instancia el comportamiento a compresión del adoquín de referencia, elaborado con hormigón convencional sin incorporación de limallas metálicas. La probeta ensayada corresponde a un adoquín de geometría hexagonal regular, con una altura de 8 cm. Para el cálculo del esfuerzo a compresión se consideró el área efectiva real de la sección hexagonal, determinada en 458,5 cm² (45 850 mm²), lo cual representa de manera más precisa la superficie de contacto con las placas de la máquina de ensayo. Durante el ensayo, la prensa registró una carga máxima de 2423,89 kN al momento de la rotura, valor que fue utilizado para determinar la resistencia a compresión mediante la relación entre la carga aplicada y el área efectiva de carga, expresando los resultados en unidades de MPa.

Tabla 18 Resultados de la prueba de compresión para la probeta de referencia (0 % limallas).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad del ensayo (días)	Dimensiones en planta (cm)	Área de carga (cm²)	Carga máxima P (kN)	Esfuerzo de compresión σc (MPa)	σc (kg/cm²) aprox.	Tiempo hasta la falla (s)
1	Hormigón convencional	0 %	7	23 × 25	458,5	2423,89	52,86	430	218,3

La carga máxima de 2 423,89 kN equivale a 2 423 890 N. Al dividir este valor entre el área de carga de 45850 mm2 (458,5 cm² convertidos a mm²) se obtiene un esfuerzo de compresión de aproximadamente 52,86 MPa, es decir, cerca de 539,17 kg/cm2. Considerando lo señalado en la Tabla 26 sobre el desarrollo de resistencia con la edad, este valor a los 7 días evidencia una

resistencia temprana elevada, coherente con un hormigón de buena calidad y con un adecuado proceso de dosificación y curado. De acuerdo con la tendencia descrita en la tabla de edades, es razonable esperar que este valor aumente a los 14 y 28 días, alcanzando o incluso superando la resistencia de diseño, en la Figura 31 se observan la prueba de compresión que se le sometió al adoquín.

Por otro lado, el tiempo hasta la rotura (218,3 s) indica que la probeta soportó un incremento de carga progresivo, durante un tiempo relativamente extenso antes de la rotura. Esto se pone de manifiesto como un comportamiento estable y homogéneo, el comportamiento que exhibe la probeta bajo el régimen de carga ensayado. En la suma de situaciones probadas, y tomando como referencia la información descrita en el listado de edades, el adoquín sin limallas se erige como el mejor testigo a partir del cual se evaluará el comportamiento de las mezclas con residuos metálicos incorporados.

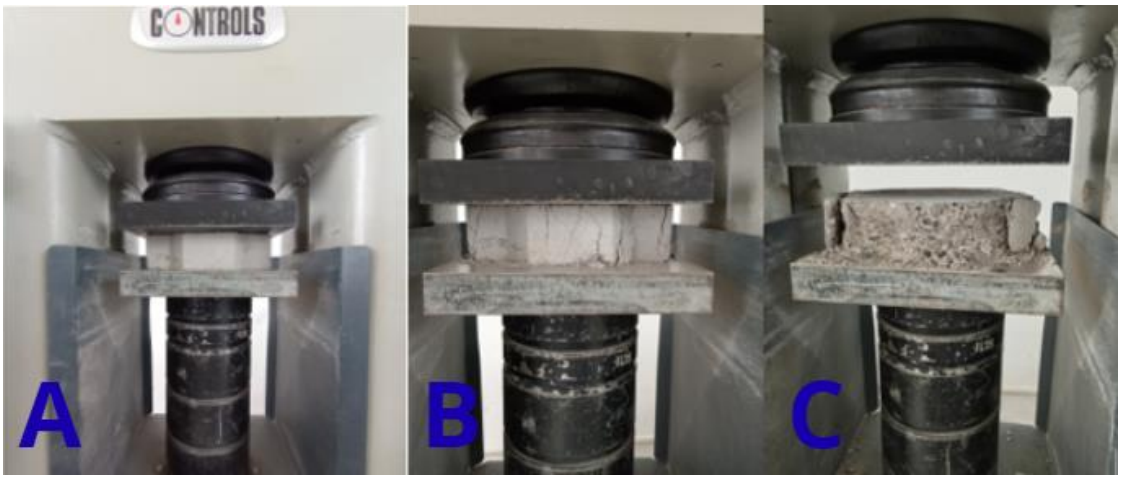


Figura 31 Adoquín 0% de limallas.

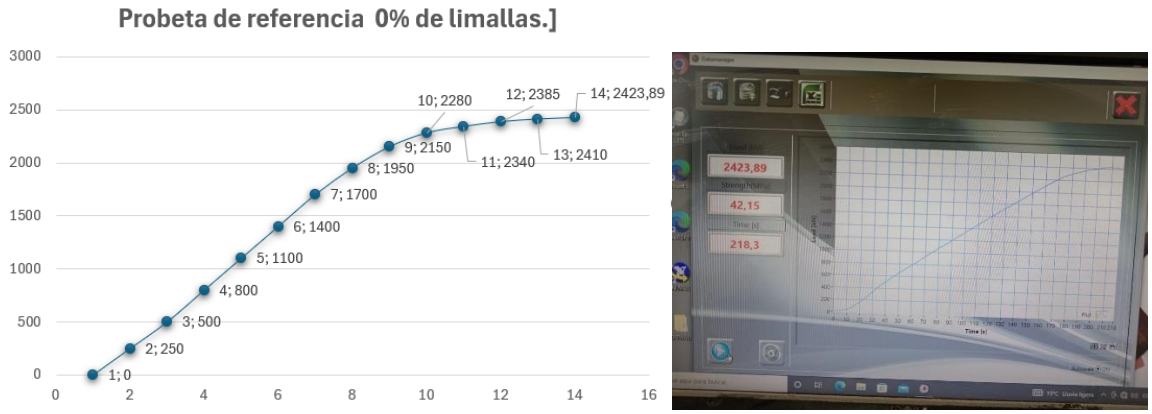


Figura 32 Curva de desarrollo de resistencia a la compresión del hormigón probeta 0% de limallas (2426,89 kN – 218,3

Siguiendo las mismas condiciones de ensayo descritas previamente y considerando el criterio de edades resumido en la Tabla 17, se evaluó la resistencia a la compresión del primer adoquín hexagonal elaborado con hormigón que incorpora un 10 % de limallas metálicas como sustitución parcial del agregado fino. La probeta corresponde a un adoquín de geometría hexagonal regular, con una altura de 8 cm, manteniendo dimensiones nominales similares al adoquín de referencia. Para el cálculo del esfuerzo a compresión se consideró el área efectiva real de carga del hexágono, determinada en 458,5 cm² (45 850 mm²), la cual representa de manera más precisa la superficie de contacto entre la probeta y las placas de la máquina de ensayo, sustituyendo la aproximación rectangular utilizada inicialmente.

Igualmente, en la prueba, que se efectuó a los 7 días de curado, la máquina solicitó una carga máxima de 2080,86kN, a partir de la cual se calculó el esfuerzo de compresión. La Tabla 19 presenta el resumen de los resultados obtenidos.

Tabla 19 Resultados de la prueba de compresión para el adoquín con 10 % de limallas (Probeta 1, 7 días).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad del ensayo (días)	Dimensiones en planta (cm)	Área de carga (cm²)	Carga máxima P (kN)	Esfuerzo de compresión σc (MPa)	σc (kg/cm²) aprox.	Tiempo hasta la falla (s)
2	Hormigón con limallas	10 %	7	23 × 25	458,5	2080,86	45,38	369	168,0

La carga máxima de 2 080,86 kN corresponde a 2 080 860 N. Al dividir este valor entre el área de 45850 mm2 se obtiene un esfuerzo de compresión de 45,38 MPa, equivalente aproximadamente a 462,88 kg/cm². En comparación con el adoquín de referencia sin limallas (42,15 MPa), este resultado representa una reducción cercana al 14 % en la resistencia a compresión a los 7 días. Tal disminución indica que la incorporación del 10 % de limallas metálicas modifica la respuesta mecánica del hormigón, aunque el valor obtenido sigue siendo propio de un material con capacidad resistente significativa para aplicaciones de pavimentación, en la Figura 31 se observan las imágenes donde se realizaron las pruebas de laboratorio.

Asimismo, el tiempo hasta la rotura (168,0 s) también es menor que el que se consignó en la probeta sin limallas, lo que se puede interpretar como que la mezcla con residuos potencia la ruptura en un periodo de carga menor. Por otro lado, la curva carga/tiempo efectuado por la máquina (ver Figura 34) sigue, de todas formas, una tendencia ascendente, relativamente uniforme, razón por la cual denota un comportamiento seguro hasta la rotura. Entonces, estos resultados permiten dar un paso hacia la comparación global de mezclas, considerando que el material con limallas mantiene un nivel de resistencia, funcionalmente idóneo, perfectamente compatible con los rangos habituales de hormigones para adoquines, aunque con una ligera pérdida cuando lo comparamos con la mezcla tradicional.

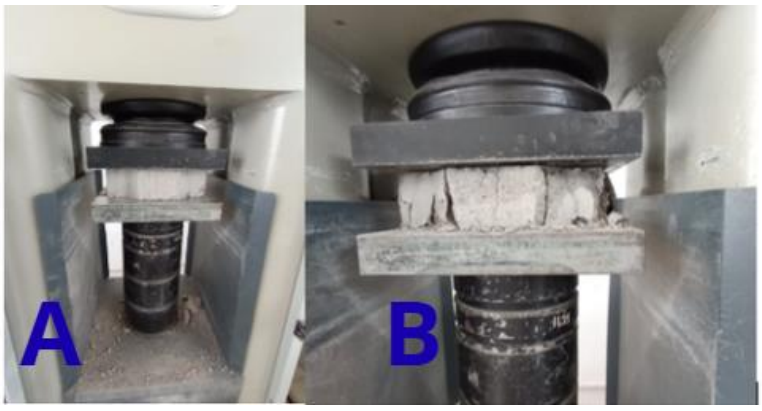
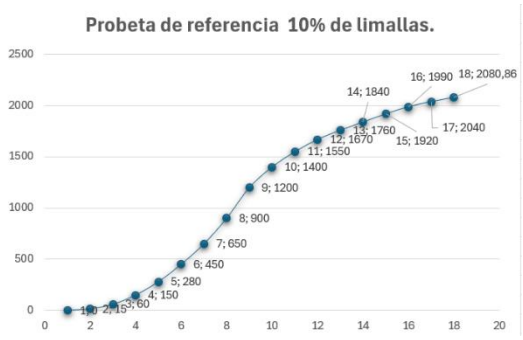


Figura 33 Adoquín 1 con 10% de limallas.



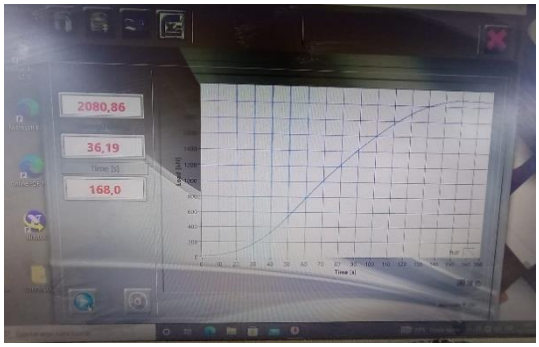


Figura 34 Curva de probeta 10 % limallas (2080,86 kN – 168 s).

3.1.3 Resultados de compresión del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 2, ensayo a 7 días)

Al igual que en las probetas anteriores, el segundo adoquín elaborado con un 10 % de limallas metálicas fue ensayado a los 7 días de curado, de acuerdo con los criterios de desarrollo de resistencia resumidos en la Tabla 17. La pieza corresponde a un adoquín de geometría hexagonal regular, con una altura de 8 cm y dimensiones nominales equivalentes a las del adoquín de referencia. En el cálculo del esfuerzo a compresión se consideró el área efectiva real de carga de la sección hexagonal, determinada en 458,5 cm² (45 850 mm²), lo cual permite representar de forma más precisa la superficie de contacto entre la probeta y las placas de la máquina de ensayo y evitar la subestimación de los esfuerzos resistentes.

Además, durante el ensayo de compresión, la máquina registró la carga máxima alcanzada de 2553,71 kN, que correspondió a un tiempo hasta la falla de 180,1 s. A partir de esta carga máxima se determinó el esfuerzo de compresión que se adjunta en la Tabla 20.

Tabla 20 Resultados de la prueba de compresión para el adoquín con 10 % de limallas (Probeta 2, 7 días).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad del ensayo (días)	Dimensiones en planta (cm)	Área de carga (cm²)	Carga máxima P (kN)	Esfuerzo de compresión σc (MPa)	σc (kg/cm²) aprox.	Tiempo hasta la falla (s)
3	Hormigón con limallas	10 %	7	23 × 25	458,5	2553,7	55,67	453	180,1

La carga máxima de 2553,71 kN equivale a 2 553 710 N. Al dividir este valor entre el área de 45850 mm2 se obtiene un esfuerzo de compresión de 55,67 MPa, es decir, aproximadamente 567,83 kg/cm². Este resultado es superior tanto al registrado en la primera probeta con 10 % de limallas (36,19 MPa) como al del adoquín de referencia sin limallas (42,15 MPa), lo que representa un incremento cercano al 5,4 % respecto a la mezcla convencional. Esta diferencia sugiere que, bajo ciertas condiciones de distribución y adherencia de las limallas en la matriz de hormigón, la incorporación de residuos metálicos puede contribuir a mejorar la capacidad resistente a compresión.

El tiempo hasta la falla (180,1 s) se sitúa entre el valor de la probeta de referencia y el de la primera probeta con limallas, indicando un comportamiento intermedio en cuanto al intervalo de carga soportado. La curva carga/tiempo mostrado por la máquina (ver *Figura 35)* presenta una tendencia creciente continua hasta alcanzar la rotura, lo que evidencia un proceso de carga progresivo sin discontinuidades abruptas. En conjunto, los resultados de esta probeta refuerzan la viabilidad mecánica de la mezcla con 10 % de limallas metálicas y ponen de manifiesto la influencia de factores como la homogeneidad de la mezcla y la orientación de las partículas metálicas en la respuesta final del material.

Figura 35 Adoquines 2 con 10% de limallas.

Figura 36 Curva de probeta 2 a 10 % limallas (2553,71 kN – 180,1 s).

Ensayos de tracción indirecta en adoquines de hormigón.

Además de la resistencia a compresión, la NTE INEN 3040:2016 (2016) establece la evaluación de la resistencia a tracción indirecta en adoquines de hormigón, con el fin de estimar el comportamiento del material frente a esfuerzos de tracción que se generan por flexión, cargas excéntricas y condiciones de servicio. Este ensayo consiste en apoyar el adoquín sobre dos líneas de carga y aplicar un esfuerzo compresivo en una configuración particular, de manera que, internamente, en la zona central de la pieza se desarrollan tensiones de tracción. Aunque la máquina aplica una carga de compresión, el estado tensional resultante permite evaluar la capacidad del material frente a la tracción, razón por la cual se denomina tracción indirecta.

Para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta T se utiliza la expresión recomendada por la norma, basada en la relación entre la carga máxima aplicada y las dimensiones del adoquín:

$$T = \frac{0{,}637\ P}{L \cdot e}$$

Donde:

- T= resistencia a tracción indirecta (MPa),
- P= carga máxima registrada por la máquina de ensayo (N),

- L= longitud entre líneas de carga (mm),
- e= espesor del adoquín (mm).

En los adoquines ensayados, se consideró una longitud entre líneas de carga de 250 mm (correspondiente al lado mayor de la pieza) y un espesor de 80 mm, según las dimensiones geométricas del adoquín hexagonal utilizado. La carga máxima Pse tomó directamente de la columna "Max. Fuerza" registrada por el equipo de ensayo. Al igual que en los ensayos de compresión, las pruebas de tracción indirecta se realizaron a una edad de 7 días, tomando como referencia la tabla de desarrollo de resistencia del hormigón presentada en el capítulo metodológico, donde se indica que a esta edad el material ha alcanzado un porcentaje importante, aunque aún creciente, de su resistencia final.

3.1.4 Resultados de tracción indirecta de la probeta de referencia sin limallas (ensayo a 7 días)

La primera probeta ensayada en tracción indirecta corresponde al adoquín de hormigón convencional, elaborado sin incorporación de limallas metálicas (0 %). La pieza se sometió al esquema de carga definido en la NTE INEN 3040:2016, registrándose la carga máxima antes de la rotura y calculando posteriormente la resistencia a tracción indirecta mediante la expresión señalada. En la Tabla 21 se presenta el resumen de los resultados obtenidos para esta probeta.

Tabla 21 Resultados de la prueba de tracción indirecta para la probeta de referencia (0 % limallas, 7 días).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad del ensayo (días)	Máx. Fuerza P (N)	P (kN)	Longitud entre líneas L (mm)	Espesor e (mm)	Resistencia a tracción indirecta T (MPa)	T (kg/cm²) aprox.
1	Hormigón convencional	0 %	7	253 480	253,48	250	80	8,07	82,3

La fuerza máxima registrada fue de 253 480 N (253,48 kN). Sustituyendo este valor en la fórmula de la norma, con $L = 250\text{mm}$ y $e = 80\text{mm}$, se obtiene una resistencia a tracción indirecta de 8,07 MPa, equivalente aproximadamente a 82,3 kg/cm². Este valor es coherente con el comportamiento típico del hormigón, que presenta resistencias de tracción significativamente

menores que las de compresión, pero suficientes para soportar las tensiones inducidas por las condiciones de servicio en pavimentos peatonales.

Para una edad de 7 días, y considerando la tabla de desarrollo de resistencia del hormigón utilizada como referencia, este resultado representa una resistencia temprana adecuada, que previsiblemente aumentará a medida que el material continúe su proceso de hidratación y ganancia de resistencia. La curva carga/tiempo registrado por la máquina dada en la Figura 38 muestra una tendencia creciente hasta alcanzar la carga máxima, seguida de la rotura de la probeta, lo que evidencia un comportamiento estable del adoquín de referencia sin limallas frente al ensayo de tracción indirecta.

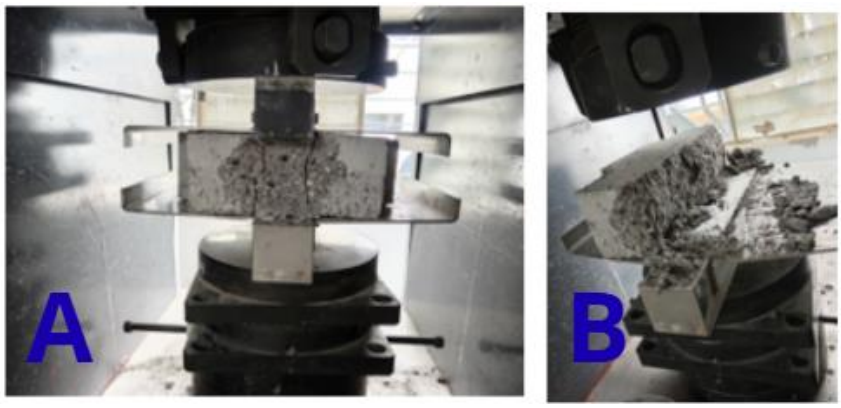


Figura 37 Adoquín con 0% de limallas Tracción Indirecta.

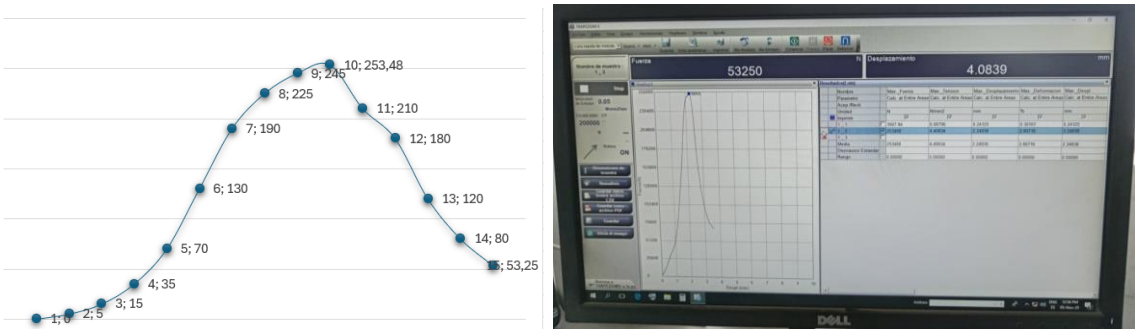


Figura 38 Curva carga–desplazamiento en tracción indirecta – adoquín 0 % limallas.

3.1.5 Resultados de tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 1, ensayo a 7 días)

La primera probeta modificada en tracción indirecta corresponde al adoquín elaborado con hormigón que incorpora un 10 % de limallas metálicas como sustitución parcial del agregado fino, de acuerdo con la dosificación descrita en la sección 2.8.4. El ensayo se realizó a una edad de 7 días, donde en esta edad el material ha alcanzado un porcentaje significativo de su resistencia final. La configuración de carga y la expresión utilizada para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta fueron las mismas indicadas en el apartado 3.1.4, considerando una longitud entre líneas de carga $L = 250\text{mm}$ y un espesor del adoquín $e = 80\text{mm}$.

Durante el ensayo, la máquina registró una fuerza máxima de 135 799 N (135,80 kN), valor a partir del cual se calculó la resistencia a tracción indirecta Tmediante la expresión $T = 0{,}637\ P/(L \cdot e)$. Los resultados se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22 Resultados de la prueba de tracción indirecta para el adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 1, 7 días).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad del ensayo (días)	Máx. Fuerza P (N)	P (kN)	Longitud entre líneas L (mm)	Espesor e (mm)	Resistencia a tracción indirecta T (MPa)	T (kg/cm²) aprox.
2	Hormigón con limallas 1	10 %	7	135 799	135,80	250	80	4,33	44,1

Al sustituir los valores en la fórmula, se obtiene una resistencia a tracción indirecta de 4,33 MPa, equivalente aproximadamente a 44,1 kg/cm². En comparación con la probeta de referencia sin limallas, que alcanzó 8,07 MPa, se observa una disminución cercana al 46 % en la resistencia a tracción indirecta. Esta reducción indica que la incorporación del 10 % de limallas metálicas afecta de forma más sensible el comportamiento del hormigón frente a esfuerzos de tracción que frente a esfuerzos de compresión, lo cual es coherente con la naturaleza frágil del material y con la influencia que pueden tener las discontinuidades internas generadas por la presencia de partículas metálicas en la matriz.

A pesar de esta disminución, los valores obtenidos siguen siendo del mismo orden de magnitud reportado para elementos de hormigón sometidos a tracción indirecta, recordando que el hormigón es un material diseñado principalmente para resistir compresión. La curva fuerza/desplazamiento correspondiente a este ensayo, obtenida a partir de los registros de la máquina, muestra un incremento progresivo de la carga hasta alcanzar el máximo de 135 799 N, seguido de una caída abrupta asociada a la fisuración y rotura de la probeta. Este comportamiento confirma que la mezcla con 10 % de limallas presenta una respuesta frágil similar a la del hormigón convencional, pero con una menor capacidad para soportar esfuerzos de tracción indirecta, aspecto que debe considerarse en el análisis global de la viabilidad del material compuesto para su aplicación en superficies podotáctiles.

Figura 39 Adoquines 1 con 10% de limallas.

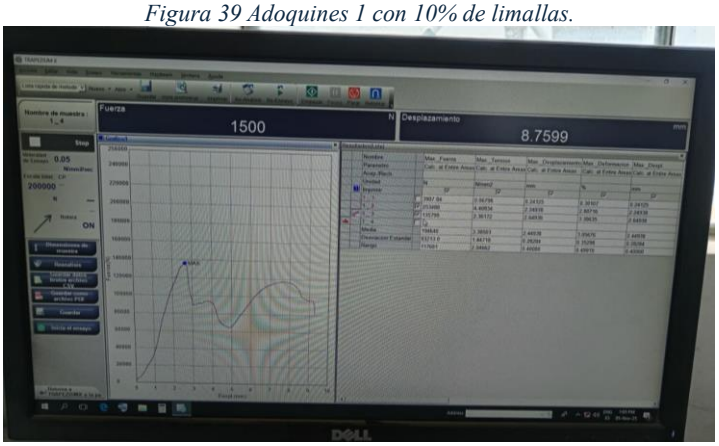


Figura 40 Curva fuerza–desplazamiento en tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 1).

3.1.6 Resultados de tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas (Probeta 2, ensayo a 7 días)

La tercera probeta ensayada en tracción indirecta corresponde a un adoquín elaborado con hormigón que incorpora un 10 % de limallas metálicas como sustitución parcial del agregado fino, siguiendo la dosificación descrita en la sección 2.8.4. Al igual que en los casos anteriores, el ensayo se realizó a una edad de 7 días. La configuración de carga y la expresión utilizada para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta fueron las mismas indicadas en el apartado 3.1.4, adoptando una longitud entre líneas de carga $L = 250\text{mm}$ y un espesor del adoquín $e = 80\text{mm}$.

Durante la prueba, la máquina de ensayo registró una fuerza máxima de 148 477 N (148,48 kN), a partir de la cual se calculó la resistencia a tracción indirecta Tmediante la expresión de la norma. En la Tabla 23 se resumen los resultados obtenidos para esta probeta.

Tabla 23 Resultados de la prueba de tracción indirecta para el adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 2, 7 días).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad del ensayo (días)	Máx. Fuerza P (N)	P (kN)	Longitud entre líneas L (mm)	Espesor e (mm)	Resistencia a tracción indirecta T (MPa)	T (kg/cm²) aprox.
3	Hormigón con limallas 2	10 %	7	148 477	148,48	250	80	4,73	48,2

Al sustituir los valores en la fórmula $T = 0{,}637\, P/(L \cdot e)$, se obtiene una resistencia a tracción indirecta de 4,73 MPa, equivalente aproximadamente a 48,2 kg/cm². En comparación con el adoquín de referencia sin limallas, que alcanzó 8,07 MPa, este resultado representa una disminución cercana al 41 % en la resistencia a tracción indirecta. No obstante, al compararla con la primera probeta con 10 % de limallas (4,33 MPa), se observa un ligero incremento del orden del 9 %, lo que sugiere una cierta variabilidad asociada a la distribución de las limallas en la matriz de hormigón y a las condiciones propias del ensayo, pero manteniéndose en el mismo rango de comportamiento.

En conjunto, las dos probetas con 10 % de limallas metálicas ensayadas en tracción indirecta presentan valores próximos, alrededor de 4,5 MPa, lo que confirma que la incorporación de

residuos metálicos genera una reducción consistente de la resistencia a tracción indirecta respecto al hormigón convencional. Sin embargo, la respuesta sigue siendo típica de un material frágil como el hormigón y debe evaluarse considerando que su función principal en los adoquines es resistir esfuerzos de compresión. Estos resultados serán retomados en el análisis global para valorar si el compromiso entre aprovechamiento de residuos y capacidad resistente resulta aceptable para su aplicación en superficies podotáctiles.

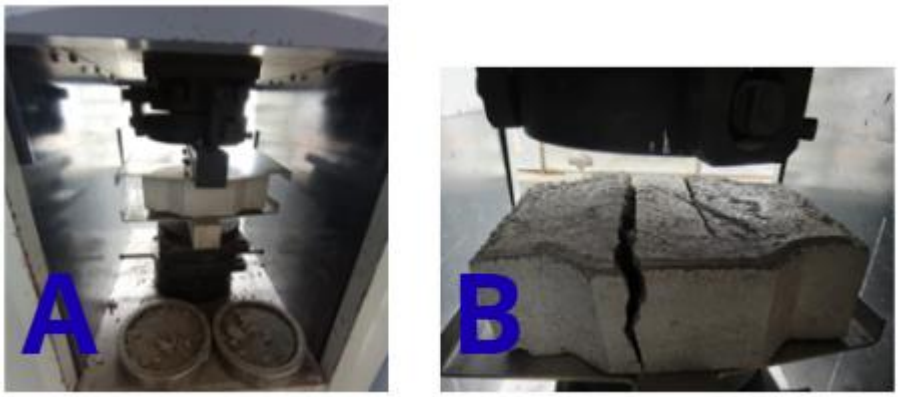


Figura 41 Adoquín 2 con 10% de limallas Tracción Indirecta.

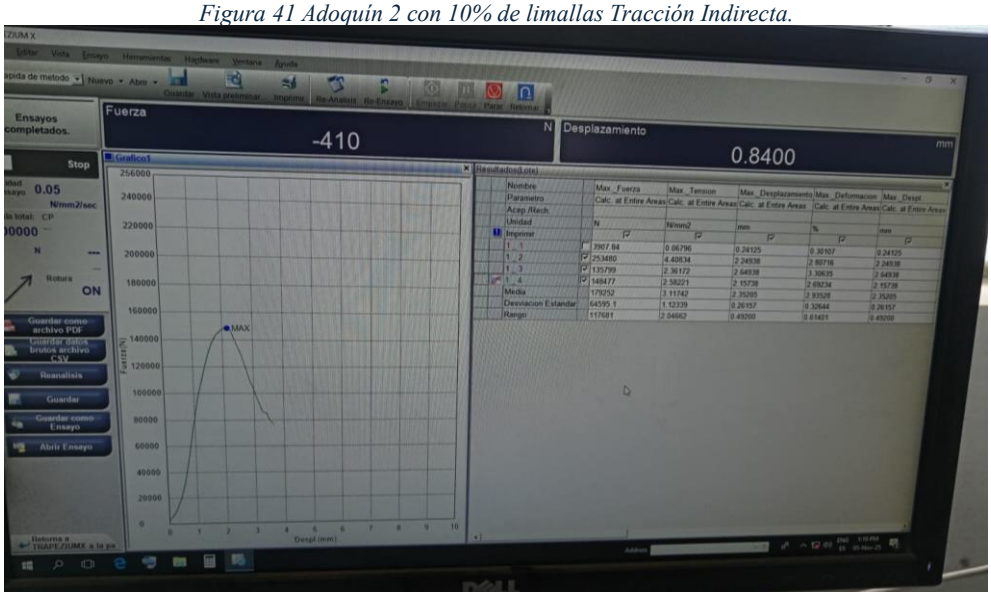


Figura 42 Curva fuerza–desplazamiento en tracción indirecta del adoquín con 10 % de limallas metálicas (Probeta 2.

Así pues, en los ensayos de tracción indirecta, los adoquines de hormigón mostraron valores dentro de los límites que establece la NTE INEN 3040 para este tipo de elementos. Esta norma establece que para que un adoquín de hormigón sea aceptable en servicio, la resistencia característica mínima a tracción indirecta debe ser igual o mayor a 3,6 MPa y a la vez, ningún valor individual debe ser menor que 2,9 MPa En la investigación llevada a cabo, el adoquín de referencia sin limallas fue de 8,07 MPa, los adoquines con 10 % de limallas metálicas fueron de 4,33 MPa y 4,73 MPa, y juntas tuvieron un promedio de aproximadamente 4,5 MPa, por encima por tanto del límite mínimo normativo.

De tal manera, es importante señalar que todos estos resultados corresponden a ensayos realizados a los 7 días de curado, mientras que la norma plantea sus requisitos pensando en la resistencia característica a 28 días. El hormigón continúa ganando resistencia entre los 7 y los 28 días, por lo que es razonable esperar que los valores medidos de tracción indirecta aumenten con el tiempo y se alejen aún más del mínimo exigido. En términos prácticos, esto significa que, aunque los adoquines con 10 % de limallas muestran una reducción respecto al hormigón convencional, ya cumplen de forma temprana con el orden de magnitud que la norma considera aceptable, y es previsible que a los 28 días su desempeño en tracción indirecta sea todavía más favorable frente a los requisitos establecidos.

Tabla general, pruebas de compresión (7 días).

Tabla 24 Resultados generales de resistencia a la compresión en adoquines de hormigón (0 % y 10 % de limallas metálicas).

Probeta	Mezcla	% de limallas metálicas	Edad de ensayo (días)	Carga máxima (kN)	Resistencia compresión (MPa)	Resistencia a compresión (kg/cm²)
1	Hormigón convencional	0 %	7	2423,89	52,86	539
2	Hormigón con limallas	10 %	7	2080,86	45,38	463
3	Hormigón con limallas	10 %	7	2553,71	55,67	568

Tabla general, pruebas de tracción indirecta (7 días).

Tabla 25 Resultados generales de resistencia a tracción indirecta en adoquines de hormigón (0 % y 10 % de limallas metálicas).

Probeta	Mezcla	% limallas metálicas	Edad de ensayo (días)	Máx. fuerza P (N)	P (kN)	Resistencia a tracción indirecta T (MPa)	T (kg/cm²) aprox.
1	Hormigón convencional	0 %	7	253 480	253,48	8,07	82,3
2	Hormigón con limallas	10 %	7	135 799	135,80	4,33	44,1
3	Hormigón con limallas	10 %	7	148 477	148,48	4,73	48,2

3.2 Verificación idea a defender.

La idea a defender planteada en esta investigación sostiene que **es posible fabricar superficies podotáctiles para espacios públicos utilizando materiales eco-eficientes elaborados a partir de residuos reciclados, los cuales pueden ofrecer un rendimiento adecuado y sostenible frente a las condiciones ambientales urbanas.**

Considerando los resultados de las pruebas de laboratorio, principalmente esta afirmación se constata desde dos dimensiones: el comportamiento mecánico inicial del material compuesto y su posible contribución a la sostenibilidad a partir del aprovechamiento de residuos metálicos de la empresa Muebles León.

Asimismo, en relación con el comportamiento mecánico, los ensayos de compresión realizados a los 7 días de curado evidenciaron que los adoquines elaborados con un 10 % de limallas metálicas presentan resistencias comparables, e incluso superiores en algunos casos, a las obtenidas con el hormigón convencional. La probeta de referencia, sin incorporación de limallas metálicas, alcanzó una resistencia a compresión de 52,86 MPa, mientras que las probetas con sustitución parcial del agregado fino mediante limallas registraron valores de 45,38

MPa y 55,67 MPa, obteniéndose un valor promedio de 50,64 MPa. Estos resultados se ubican dentro del rango de resistencias reportadas para adoquines de hormigón destinados a tránsito peatonal. En consecuencia, los valores obtenidos permiten inferir que la incorporación de limallas metálicas en un 10 % no afecta de manera significativa la capacidad resistente a compresión del material; por el contrario, los resultados indican que, aun a una edad temprana de curado, el comportamiento mecánico del hormigón modificado puede igualar o incluso superar al de la mezcla convencional.

De la misma manera, en los ensayos de tracción indirecta se observó una reducción más marcada de la resistencia al incorporar un 10 % de limallas metálicas en la mezcla. El adoquín de referencia, elaborado con hormigón convencional, alcanzó una resistencia a tracción indirecta de 8,07 MPa, mientras que las probetas con sustitución parcial del agregado fino mediante limallas registraron valores de 4,33 MPa y 4,73 MPa, obteniéndose un valor promedio de 4,53 MPa. A pesar de esta disminución, los resultados se mantienen dentro del orden de magnitud esperado para un material frágil como el hormigón, cuyo comportamiento estructural se basa principalmente en la resistencia a compresión. Considerando que las superficies podotáctiles trabajan fundamentalmente bajo cargas de compresión distribuidas, transmitidas hacia las capas de base y sub-base que permiten la difusión de los esfuerzos, la reducción observada en la resistencia a tracción indirecta no compromete la aplicabilidad del material. No obstante, estos resultados evidencian la necesidad de prestar especial atención a los criterios de diseño, apoyo y mantenimiento, con el fin de minimizar la aparición y propagación de fisuras durante la vida útil en servicio.

Así pues, desde la óptica de la eco-eficiencia y la sostenibilidad se puede afirmar que la investigación indica que es técnicamente posible utilizar limallas metálicas recicladas en la fabricación de adoquinado podotáctil mediante la inclusión de este material en el agregado fino en su fabricación, lo cual tendría como resultado la valorización de un residuo industrial que, de no ser incorporado, sería desechado, todo ello reduciendo la presión sobre los recursos naturales por el consumo de la arena. El uso de las limallas metálicas recicladas como residuo local procedente de Muebles León potencia las estrategias de economía circular a nivel territorial,

además de estar en consonancia con las líneas de desarrollo sostenible relativas a la producción responsable, la innovación en materiales y la mejora de la infraestructura urbana accesible.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten sustentar, de forma preliminar, la propuesta en cuanto a que es posible elaborar superficies podotáctiles mediante un material compuesto ecoeficiente con residuos metálicos, garantizando un válido resultado mecánico inicial conforme a los porcentajes solicitados para adoquines de uso peatonal y con una clara aportación en cuanto a la recuperación de residuos. Sin embargo, la validación se considera parcial, ya que, a su vez, habría de aportarse el estudio de ensayos de edad superior (14 y 28 días), ensayos de durabilidad (absorción, desgaste, resistencia a ciclos de humedad y temperatura, etc.) y en condiciones reales de servicio. Las futuras estudios permitirían corroborar, de una forma más sólida, la sostenibilidad y el comportamiento a largo plazo del material en condiciones ambientales urbanas a las que se verán sometidas las superficies podotáctiles.

La ecoeficiencia se entiende como el uso eficiente de los recursos naturales para generar productos funcionales, reduciendo el impacto ambiental y manteniendo un desempeño técnico adecuado. Desde esta perspectiva, los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que la incorporación de **limallas metálicas recicladas** como sustitución parcial del agregado fino en adoquines podotáctiles representa una alternativa ecoeficiente para el sector de la construcción. Los ensayos de laboratorio realizados a los 7 días de curado evidenciaron que las mezclas con un **10 % de limallas metálicas** alcanzaron resistencias a compresión comparables a las del hormigón convencional y valores de tracción indirecta superiores al mínimo exigido por la normativa vigente, lo que confirma su aptitud para aplicaciones de tránsito peatonal. En consecuencia, el material compuesto propuesto permite **valorizar residuos industriales**, disminuir la demanda de agregados naturales y mantener condiciones adecuadas de resistencia mecánica, aportando a la sostenibilidad y a la economía circular en la fabricación de superficies podotáctiles para espacios públicos.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

La investigación facilitó la posibilidad de analizar el contexto climático y productivo de Baños de Agua Santa, además de la evaluación experimental de un material compuesto en base a residuos metálicos. A partir de este proceso, se fue capaz de ofrecer una propuesta de superficie podotáctil que incluía limallas como refuerzo en el hormigón, además de disminuir la dependencia de áridas vírgenes. Aprovechando residuos, rendimiento de características técnico, accesibilidad, este principio parece construir bases para el desarrollo de soluciones podotáctiles eco-eficientes en espacios públicos urbanos.

De tal manera, al efectuar el análisis de la categorización urbana y del comportamiento climático de Baños de Agua Santa, es posible caracterizar al cantón de Baños de Agua Santa como un entorno templado/húmedo caracterizado por elevada humedad relativa, con precipitaciones importantes y con una fuerte dinámica turística. La sistematización de los rangos térmicos, precipitación y humedad, y microzonas urbanas concretó criterios para el diseño del podotáctil, validando un material con buena resistencia mecánica, estable ante la humedad y con resistencia al uso peatonal en el centro urbano.

Además, el análisis de los sectores de producción en Tungurahua, así como el uso de la clasificación CIIU y la búsqueda de empresas locales, coincidieron en señalar que el sector metalmecánico es donde se produce la mayor parte de los residuos metálicos reutilizables. El caso de Muebles León demostró que existen flujos constantes de limallas y que su logística permite la recolección de estas, validando así su elección como refuerzo de un material compuesto. Se agotando, por lo tanto, la opción de crear una cadena local de aprovechamiento de residuos metálicos basada en principios de economía circular.

Igualmente, las acciones de fabricación de adoquines de hormigón tradicional y de adoquines de hormigón con sustitución parcial del árido fino por limallas metálicas, han permitido estudiar la respuesta mecánica del material compuesto dado frente a la mezcla de referencia. A la edad

de ensayo considerada, las resistencias a compresión y a tracción indirecta se encuentran en valores compatibles a los requeridos para adoquines de uso peatonal, lo que indica que la inclusión de limallas es técnicamente factible en las condiciones establecidas en el estudio. Se recomienda, sin embargo, ampliar el estudio hacia ensayos a mayores edades y al análisis pormenorizado de huella de carbono, aun así, los resultados obtenidos son coherentes con la propuesta de un podotáctil eco-eficiente, adaptado al clima urbano de Baños de Agua Santa y basado en el aprovechamiento de los residuos locales.

En el análisis de los resultados mecánicos obtenidos, se determinó que la prueba de tracción indirecta constituye el ensayo más relevante para la evaluación del desempeño de los adoquines propuestos, debido a que este parámetro es considerado por la normativa técnica como un criterio mínimo de aptitud para elementos prefabricados de hormigón. De acuerdo con lo establecido en la norma, la resistencia mínima exigida para este tipo de unidades es del orden de 3,6 MPa. En este contexto, los resultados experimentales evidencian que todas las probetas ensayadas superaron dicho valor normativo, incluso a una edad temprana de 7 días de curado. El adoquín elaborado con hormigón convencional alcanzó una resistencia a tracción indirecta de 8,07 MPa, mientras que los adoquines con incorporación del 10 % de limallas metálicas registraron valores de 4,33 MPa y 4,73 MPa, respectivamente. Estos resultados confirman que, aun con la sustitución parcial del agregado fino por residuos metálicos reciclados, los adoquines cumplen satisfactoriamente con los requisitos mínimos normativos, validando su viabilidad mecánica para aplicaciones en superficies podotáctiles destinadas a tránsito peatonal.

4.2. Recomendaciones.

De tal manera, se sugiere que en futuras investigaciones se insista en combinar diferentes porcentajes de sustitución del agregado fino por limallas metálicas, tanto superiores como inferiores al 10 % que se ha utilizado en el estudio, así como para un mayor número de probetas por dosificación, al objeto de poder comparar con mayor precisión el comportamiento mecánico de cada mezcla y el porcentaje óptimo de limallas para confeccionar el podotáctil.

Además, teniendo en cuenta que sólo se han realizado ensayos de resistencia a la compresión y a la tracción indirecta en la presente investigación, se sugiere considerar también la expansión

de la evaluación del material compuesto mediante la realización de las otras pruebas que aparecen en la NTE INEN 3040, tales como: verificación dimensional, absorción de agua, desgaste por abrasión, y otras pruebas de desempeño. La aplicación de los ensayos mencionados permitiría aportar un aval más completo sobre la idoneidad del material propuesto para la utilización como superficie podotáctil en el espacio público.

De tal manera, se sugiere que posibles ensayos futuros elaboren y ensayen probetas de adoquín que tomen como índice un periodo de curado de 28 días, según el periodo de referencia que suele tomarse en la evaluación de elementos de hormigón, y así poder mirar los resultados de las edades más tempranas (7 días, como en este trabajo) y el comportamiento del material compuesto en un estado más representativo de su resistencia final, para poder comprobar si el hecho de incorporar limallas aumenta o no el comportamiento mecánico del material cuando el proceso de hidratación del cemento ha podido llevarse a cabo de un modo más exhaustivo.

Aparte de las limallas metálicas, también se propone evaluar la adición de otros residuos o agregados provenientes de actividades productivas de la zona o de otros materiales autóctonos de los que existen en Baños de Agua Santa y en la provincia de Tungurahua. La valoración experimental de las mismas permitiría contrastar su eficacia sobre la resistencia, durabilidad y comportamiento medioambiental del podotáctil, y se podría abrir la opción de formular materiales compuestos ad hoc a distintos tipos de residuos locales, ampliando el efecto del proyecto en cuanto a la optimización de recursos y al desarrollo territorial.

BIBLIOGRAFÍA.

Alfeehan, A., M. Mohammed, M. Jasim, U. Fadehl, and F. Habeeb. 2020a. "Utilización de Desechos Metálicos Industriales En Los Paneles de Hormigón Armado Nervados Unidireccionales." *Revista Ingeniería de Construcción* 35(3):246–56. doi:10.4067/S0718-50732020000300246.

Asamblea General de las Naciones Unidas. 2015. *Transformar Nuestro Mundo: La Agenda 2030 Para El Desarrollo Sostenible*. Nueva York, EE. UU. https://sdgs.un.org/es/2030agenda?utm_source.

Briones Ponce, Angie Nicole, Jean Carlos Zambrano Macías, Jonathan Andrés Muñoz Macías, Wilter Enrique Ruiz Párraga, and Ramona Albertina Panchana de Calderero. 2020. "Análisis de La Prestación Mecánica Del Hormigón Empleando Virutas de Acero Como Agregado Fino." *Revista de Investigaciones En Energía, Medio Ambiente y Tecnología: RIEMAT ISSN: 2588-0721* 5(1):15. doi:10.33936/riemat.v5i1.2498.

Corona, Giovanni, Dimitrios G. Goulis, Ilpo Huhtaniemi, Michael Zitzmann, Jorma Toppari, Gianni Forti, Dirk Vanderschueren, and Frederick C. Wu. 2020. "European Academy of Andrology (EAA) Guidelines on Investigation, Treatment and Monitoring of Functional Hypogonadism in Males: Endorsing Organization: European Society of Endocrinology." *Andrology* 8(5):970–87.

GAD Ambato (PDOT - PUGS). 2022. *Ordenanza de Aprobación de La Normativa Para La Aplicación Del PUGS Ambato y Actualización Del PDOT* . Ambato, Tungurahua, Ecuador.

GAD Baños (PDOT 2019–2023 y PUGS). 2019. *Ordenanza Que Aprueba El PDOT 2019–2023 y El PUGS Del Cantón Baños de Agua Santa*. Baños, Tungurahua, Ecuador.

GAD Cevallos (PDOT–PUGS 2024). 2024. *Ordenanza Que Sanciona La Actualización Del PDOT–PUGS (Período 2024–2027) Del Cantón Cevallos*. Cevallos, Tungurahua, Ecuador.

GAD Mocha (Ordenanza PDOT/PUGS). 2025. *Ordenanza Que Pone En Vigencia El PDOT y El PUGS Del Cantón Mocha*. Mocha, Tungurahua, Ecuador.

GAD Parroquial Rural Río Negro. 2023a. *Actualización Del PDOT de La Parroquia Río Negro 2023–2027 (Isoyetas y Distribución de Precipitación)*. Río Negro, Baños, Ecuador. https://www.gadrionegro.gob.ec/images/PDOT_GAD_RIO_NEGRO_2023_-_2027_compressed.pdf?utm_source.

GAD Parroquial Rural Río Negro. 2023b. *Actualización Del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de La Parroquia Río Negro 2023–2027*. Río Negro, Baños, Ecuador. https://www.gadrionegro.gob.ec/images/PDOT_GAD_RIO_NEGRO_2023_-_2027_compressed.pdf?utm_source.

GAD Patate (PDOT 2024; PUGS 2024). 2024. *Ordenanza Que Aprueba PUGS 2024 y PDOT 2024–2027 Del Cantón Patate*. Patate, Tungurahua, Ecuador.

GAD Pelileo (PDOT 2024). 2024. *Ordenanza de Aprobación/Actualización Del PDOT Del Cantón San Pedro de Pelileo (Vigente 2024)*. Pelileo, Tungurahua, Ecuador.

GAD Píllaro (PDOT 2024). 2024. *Ordenanza de Aprobación/Actualización Del PDOT Del Cantón Santiago de Píllaro (Vigente 2024)*. Píllaro, Tungurahua, Ecuador.

GAD Quero (PUGS 2022). 2022. *Ordenanza Que Sanciona El PUGS 2022–2034 Del Cantón Santiago de Quero*. Quero, Tungurahua, Ecuador.

GAD Tisaleo (PUGS). 2022. *Ordenanza Que Sanciona El PUGS Del Cantón Tisaleo*. Tisaleo, Tungurahua, Ecuador.

Ghoreishi Karimi, Kusha. 2011. *Ecomateriales y Construcción Sostenible*.

Gobierno Autónomo Descentralizado de Baños de Agua Santa; UNISDR (Campaña “Ciudades Resilientes”); Secretaría de Gestión de Riesgos. 2016. *Agenda de Reducción de Riesgos Del Cantón Baños de Agua Santa*. Baños, Ecuador. https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3211-10302.pdf?utm_source.

Gobierno Provincial de Tungurahua. n.d. “Geoportal – Mapa Provincial (Capas: Isotermas, Isoyetas, Estaciones).” Retrieved November 8, 2025. https://mapas.tungurahua.gob.ec/application/mapa_provincial?utm_source.

Gobierno Provincial de Tungurahua (Red Hidrometeorológica). n.d. “Estación Parque de La Familia – Ficha y Series.” Retrieved November 8, 2025. https://rrnn.tungurahua.gob.ec/red/estaciones/estacion/530b84ed74daaf23bce53ce9?utm_source.

GPT (Red Hidrometeorológica) / INAMHI. n.d. “Estación Río Verde – Ficha y Promedios (Pluviometría).” Retrieved November 8, 2025. https://rrnn.tungurahua.gob.ec/red/estaciones/estacion/53a3450dbd92eafc03000001?utm_source.

Hernández Sampieri, Roberto; Fernández Collado, Carlos; Baptista Lucio, María del Pilar. 2014. *Metodología de La Investigación*. 6a ed. México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). 2022. *Censo de Población y Vivienda 2022*. Quito, Ecuador.

International Organization for Standardization. 2019. *ISO 23599: Assistive Products for Blind and Vision-Impaired Persons — Tactile Walking Surface Indicators*. Geneva, Switzerland.

Kalizhanova, Aliya, Ainur Kozbakova, Bakhyt Eralieva, Murat Kunelbayev, and Zhalau Aitkulov. 2023. “RESEARCH AND ANALYSIS OF THE PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS. DEFINITION AND CLASSIFICATION OF COMPOSITE MATERIALS.” *Вестник КазАТК* 128(5):131–40. doi:10.52167/1609-1817-2023-128-5-131-140.

Mercieca, Maria, Frederick Schembri, Anthony Serracino Inglott, and Lilian M. Azzopardi. 2016. “Swot Analysis.” *Pharmaceutical Technology* 40(4):40.

Miranda, Mauricio, Yurianis Morales, Gabriel Sánchez, and Karen Caballero. 2023. "Aprovechamiento de Virutas Metálicas Como Adición En La Mezcla de Concreto." *Revista de Iniciación Científica* 9(2):98–104. doi:10.33412/rev-ric.v9.2.3847.

Montoya Gacharná, María Paula. 2021. "¿Podo Táctil o Poco Táctil?" https://www.inci.gov.co/blog/podo-tactil-o-poco-tactil?utm_source.

Muñoz-Pérez, Socrates Pedro, Antonny Luis Cabrera-Alcántara, Carlos César Delgado- Bravo, and Paula Alejandra Renilla-Lau. 2021. "Comportamiento Físico-Mecánico Del Hormigón Adicionando Residuos de Acero: Una Revisión Literaria." *Revista UIS Ingenierías* 21(1). doi:10.18273/revuin.v21n1-2022005.

NTE INEN 3040:2016. 2016. *Adoquines de Hormigón. Requisitos y Métodos de Ensayo*. Quito, Ecuador.

PAULA ANDREA ANGARITA PINZÓN HEYFA JESNEY RINCÓN GAONA. 2016. "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL CONCRETO ADICIONADO CON VIRUTA DE ACERO EN PORCENTAJES DE 10 y 12 % RESPECTO AL AGREGADO FINO DE LA MEZCLA." UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA, Colombia.

Perez Montoya, Luz Antonella. 2024. "Evaluación de Las Propiedades Mecánicas de Adoquines de Concreto Adicionando Limadura de Acero Para Pavimento de Tránsito Ligero." Universidad Señor de Sipán (USS), Lambayeque, Perú.

Ponce Angie Nicole, Briones, Zambrano Macías Jean Carlos, Muñoz Macías Jonathan Andrés, Ruiz Párraga Wilter Enrique, and Panchana de Calderero Ramona Albertina. 2020. *Análisis de La Prestación Mecánica Del Hormigón Empleando Virutas de Acero Como Agregado Fino*.

Portilla Farfán, F. 2018. *Agroclimatología Del Ecuador*. edited by F. Portilla Farfán. Cuenca, Ecuador.

Pourrut, P. ;. Róvere, O. ;. Romo, I. ;. Villacrés, H. (capítulo); Editor científico: Pierre Pourrut. 1995. “Clima Del Ecuador (Artículo III). En: El Agua En El Ecuador: Clima, Precipitaciones, Escorrentía.” Pp. 13–26 in *El agua en el Ecuador: clima, precipitaciones, escorrentía*, edited by P. Pourrut. Quito: Corporación Editora Nacional; Colegio de Geógrafos del Ecuador; ORSTOM.

Puertas, Rosa, José M. Guaita-Martinez, Patricia Carracedo, and Domingo Ribeiro-Soriano. 2022. “Analysis of European Environmental Policies: Improving Decision Making through Eco-Efficiency.” *Technology in Society* 70:102053. doi:10.1016/j.techsoc.2022.102053.

Secretaría Nacional de Planificación. 2024. “Dirección Zonal de Planificación 3 – Centro (Provincias y Estructura Territorial).” https://www.planificacion.gob.ec/https-www-planificacion-gob-ec-coordinacion-zonal-planificacion-3/?utm_source.

Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES). 2017. *Plan Nacional de Desarrollo 2017–2021*. Quito, Ecuador.

Servicio Ecuatoriano de Normalización (INEN). 2015. *Accesibilidad de Las Personas al Medio Físico. Señalización Para Personas Con Discapacidad Visual En Espacios Urbanos y En Edificios Con Acceso al Público. Señalización En Pisos y Planos Hápticos*. Quito, Ecuador.

Zelada Mendoza de Vargas, Diane. 2023. “Comportamiento Mecánico de Adoquines de Concreto Reciclado y Viruta de Acero, Tacna, 2023.” Universidad César Vallejo (UCV), Repositorio UCV-Institucional., Lima, Perú.

ANEXOS.

FICHA SOPs, Ensayo de resistencia a la compresión en adoquines de hormigón.

Esta ficha SOP resume de manera estructurada el procedimiento aplicado para el ensayo de resistencia a la compresión en adoquines hexagonales de hormigón, tanto convencionales como modificados con 10 % de limallas metálicas. En la tabla se detallan los datos generales del procedimiento, su objetivo y alcance, las referencias normativas utilizadas, las definiciones clave y los equipos y especímenes empleados. Además, se describe paso a paso la preparación de las probetas, su colocación en la prensa hidráulica, la aplicación de la carga y el método de cálculo de la resistencia a compresión a partir de la carga máxima y del área de carga. Finalmente, se incluyen valores referenciales de las resistencias obtenidas en el estudio, lo que permite comprender, en un solo formato, tanto el protocolo técnico seguido como el rango de resultados esperados para este tipo de adoquines.

Ficha SOPs N.º 1.

Campo.	**Contenido**
Código del procedimiento.	SOP-PC-001
Título.	Ensayo de resistencia a la compresión en adoquines hexagonales de hormigón con y sin limallas metálicas
Versión.	01
Fecha de emisión.	Noviembre / 2025
Elaborado por.	Flores Mena José Andrés (Tesista de Diseño Industrial)
Revisado por.	MSc. Martin Monar.
Aprobado por.	MSc. Martin Monar.
Objetivo.	Establecer el procedimiento estándar para realizar el ensayo de resistencia a la compresión en adoquines hexagonales de hormigón, elaborados con mezcla convencional (0 % limallas) y con incorporación del 10 % de limallas metálicas en el agregado fino, con el fin de determinar su capacidad resistente y facilitar la replicación del ensayo en futuras aplicaciones.
Alcance.	Aplica a adoquines hexagonales de 23 × 25 cm en planta y 8 cm de espesor, fabricados con hormigón convencional y con hormigón

	modificado con 10 % de limallas metálicas. El procedimiento se ejecuta en el laboratorio de materiales de construcción, utilizando una prensa hidráulica calibrada, para ensayos realizados a los 7 días de curado.
Referencias normativas.	**NTE INEN 3040:2016:** Unidades de adoquines de hormigón para pavimentos. / Tabla de desarrollo de la resistencia relativa del hormigón (resistencia a 7, 14 y 28 días).
Definiciones.	**Adoquín:** elemento prefabricado de hormigón usado en pavimentos, en este caso de geometría hexagonal. Resistencia a compresión (σc): esfuerzo máximo que soporta la probeta al ser sometida a carga axial de compresión hasta su rotura. Limallas metálicas: residuos de mecanizado provenientes de procesos de corte y taladrado de piezas metálicas, utilizados como sustituto parcial del agregado fino.
Responsables.	**Operador del ensayo:** ejecuta el procedimiento y maneja la prensa hidráulica. **Responsable del laboratorio:** verifica el cumplimiento del procedimiento y la calibración del equipo.
Equipos y materiales.	Prensa hidráulica para ensayos de compresión, calibrada; placas de carga planas y rígidas; vernier o cinta métrica; sistema de adquisición de datos (si la máquina es digital); elementos de protección personal (casco, guantes, gafas de seguridad, calzado de punta reforzada).
Especímenes de ensayo.	Adoquines hexagonales de hormigón de 23 × 25 cm en planta y 8 cm de espesor. Lotes con 0 % de limallas (mezcla convencional) y con 10 % de limallas metálicas (mezcla modificada). **Edad de ensayo:** 7 días de curado.
Seguridad.	Verificar que la prensa esté en buen estado y calibrada. No introducir manos ni objetos entre las placas durante la operación. Mantener despejada el área alrededor de la máquina. Utilizar siempre los elementos de protección personal indicados.
Procedimiento/ preparación de la probeta.	1) Identificar el adoquín (código, mezcla, porcentaje de limallas, fecha de fabricación). 2) Verificar dimensiones en planta (23 × 25 cm) y altura (8 cm). 3) Limpiar las superficies de apoyo retirando polvo o partículas sueltas.
Procedimiento/colocación en la máquina	4) Colocar el adoquín centrado entre las placas de la prensa, apoyando una de sus caras en planta sobre la placa inferior.

	5) Alinear la probeta de forma que la carga se aplique de manera aproximadamente uniforme sobre el área de 23 × 25 cm.
Procedimiento/ aplicación de la carga.	6) Configurar la máquina para registrar la carga máxima y, si es posible, la curva carga/tiempo. 7) Aplicar la carga de compresión en forma continua y creciente, sin impactos ni variaciones bruscas, hasta la rotura de la probeta. 8) Registrar la carga máxima P (en kN o N), el tiempo hasta la falla y el tipo de rotura observado.
Cálculo/ área de carga.	El área de carga se aproxima al rectángulo que contiene al adoquín: 23 cm × 25 cm = 575 cm². Conversión a mm²: 575 cm² × 100 = 57 500 mm².
Cálculo/ conversión de carga.	Si la máquina entrega P en kN, se convierte a N mediante: P [N] = P [kN] × 1000.
Cálculo/ resistencia a compresión	La resistencia a compresión se obtiene con la expresión: σc = P / A, donde σc es la resistencia a compresión (MPa), P es la carga máxima (N) y A es el área de carga (mm²). Como 1 MPa = 1 N/mm², el resultado se expresa directamente en MPa. Para convertir a kg/cm² se usa: 1 MPa ≈ 10,2 kg/cm².
Resultados generales referenciales	En tres adoquines ensayados a 7 días se obtuvieron valores referenciales: Mezcla 0 % limallas: 42,15 MPa (≈ 430 kg/cm²). Mezcla 10 % limallas: 36,19 MPa y 44,41 MPa, con un promedio de 40,30 MPa (≈ 411 kg/cm²). En términos generales, la mezcla con 10 % de limallas presenta resistencias de compresión del mismo orden que la mezcla convencional, con una variación promedio cercana al −4,4 %.
Registros y almacenamiento de datos	Los datos de cada ensayo (carga máxima, tipo de mezcla, porcentaje de limallas, edad de la probeta, resistencia calculada, observaciones de la falla) deben registrarse en una hoja de resultados o archivo digital. Los registros se conservarán en el archivo del laboratorio o del proyecto según la normativa interna de la institución.

FICHA SOPs – Ensayo de resistencia a la tracción indirecta en adoquines de hormigón.

Esta ficha SOP organiza de manera sistemática el procedimiento aplicado para el ensayo de resistencia a la tracción indirecta en adoquines hexagonales de hormigón, tanto convencionales como modificados con 10 % de limallas metálicas. En la tabla se presentan los datos generales

del procedimiento, el objetivo y alcance del ensayo, las normas de referencia utilizadas y las definiciones básicas asociadas al método de tracción indirecta. Asimismo, se describen los equipos y especímenes empleados, las condiciones de seguridad, y el paso a paso para la preparación, colocación y carga de los adoquines en la máquina de ensayo. Se incluye la expresión utilizada para el cálculo de la resistencia a tracción indirecta a partir de la carga máxima y de las dimensiones del adoquín, junto con valores referenciales de los resultados obtenidos en el estudio. De esta forma, la ficha permite comprender en un solo formato tanto el protocolo técnico del ensayo como el rango de resistencias esperadas para los adoquines con 0 % y 10 % de limallas metálicas.

Ficha SOPs N.º 2.

Campo	**Contenido**
Código del procedimiento	SOP-PTI-001
Título	Ensayo de resistencia a la tracción indirecta en adoquines hexagonales de hormigón con y sin limallas metálicas
Versión	01
Fecha de emisión	Noviembre / 2025
Elaborado por	Flores Mena José Andrés (Tesista de Diseño Industrial)
Revisado por	MSc. Martin Monar.
Aprobado por	MSc. Martin Monar.
Objetivo	Establecer el procedimiento estándar para realizar el ensayo de resistencia a la tracción indirecta en adoquines hexagonales de hormigón, elaborados con mezcla convencional (0 % limallas) y con incorporación del 10 % de limallas metálicas en el agregado fino, con el fin de determinar su capacidad para resistir esfuerzos de tracción y facilitar la replicación del ensayo en futuras aplicaciones.
Alcance	Aplica a adoquines hexagonales de 23 × 25 cm en planta y 8 cm de espesor, fabricados con hormigón convencional y con hormigón modificado con 10 % de limallas metálicas. El procedimiento se ejecuta en el laboratorio de materiales de construcción, utilizando una máquina de ensayo capaz de aplicar la configuración de carga para tracción indirecta, en probetas ensayadas a los 7 días de curado.

Referencias normativas	NTE INEN 3040:2016 – Unidades de adoquines de hormigón para pavimentos (ensayo de tracción indirecta). / Tabla de desarrollo de la resistencia relativa del hormigón (resistencia a 7, 14 y 28 días).
Definiciones	**Tracción indirecta:** ensayo en el cual la probeta se somete a una carga de compresión en una configuración que genera tensiones de tracción en su zona central. **Resistencia a tracción indirecta (T):** esfuerzo máximo de tracción que el adoquín puede soportar antes de fisurarse y romperse bajo este esquema de carga. **Limallas metálicas:** residuos de mecanizado provenientes de procesos de corte y taladrado de piezas metálicas, utilizados como sustituto parcial del agregado fino.
Responsables	**Operador del ensayo:** ejecuta el procedimiento y maneja la máquina de ensayo. **Responsable del laboratorio:** verifica el cumplimiento del procedimiento, la correcta configuración de la máquina y el registro de datos.
Equipos y materiales	Máquina de ensayo de materiales con dispositivo para tracción indirecta en adoquines; sistema de aplicación de carga controlada; vernier o cinta métrica para verificación de dimensiones; sistema de adquisición de datos (fuerza y desplazamiento); elementos de protección personal (casco, guantes, gafas de seguridad, calzado de punta reforzada).
Especímenes de ensayo	Adoquines hexagonales de hormigón de 23 × 25 cm en planta y 8 cm de espesor. Lotes con 0 % de limallas (mezcla convencional) y con 10 % de limallas metálicas (mezcla modificada). Edad de ensayo: 7 días de curado.
Seguridad	Verificar que la máquina esté en buen estado y correctamente configurada. No introducir manos ni objetos en la zona de carga durante el ensayo. Mantener el área libre de obstáculos. Usar siempre los elementos de protección personal indicados.
Procedimiento – preparación de la probeta	1) Identificar el adoquín (código, tipo de mezcla, porcentaje de limallas, fecha de fabricación). 2) Verificar dimensiones de planta y espesor. 3) Limpiar las superficies de apoyo y contacto para asegurar un correcto asiento en el dispositivo de ensayo.
Procedimiento – colocación en la máquina	4) Colocar el adoquín en el dispositivo de ensayo siguiendo la configuración de tracción indirecta establecida por la norma (apoyo sobre líneas o zonas de carga definidas). 5) Alinear la probeta de manera que la carga se transmita de forma uniforme y se genere la zona central de tracción.

Procedimiento – aplicación de la carga	6) Configurar la máquina para registrar la fuerza máxima y, de ser posible, la curva fuerza–desplazamiento. 7) Aplicar la carga de manera continua y creciente, sin impactos ni variaciones bruscas, hasta la aparición de fisuras y la rotura de la probeta. 8) Registrar la fuerza máxima P (en N), el desplazamiento asociado y observaciones sobre el modo de falla.
Cálculo – parámetros geométricos	Longitud entre líneas de carga: L = 250 mm (lado mayor efectivo del adoquín). Espesor del adoquín: e = 80 mm. Estos valores se utilizan en la fórmula de la resistencia a tracción indirecta.
Cálculo – resistencia a tracción indirecta	La resistencia a tracción indirecta se calcula con la expresión: $T = 0{,}637 \cdot P / (L \cdot e)$, donde T es la resistencia a tracción indirecta (MPa), P es la carga máxima (N), L es la longitud entre líneas de carga (mm) y e es el espesor del adoquín (mm). El resultado se expresa en MPa; para convertir a kg/cm² se emplea: 1 MPa ≈ 10,2 kg/cm².
Resultados generales referenciales	En las probetas ensayadas a 7 días se obtuvieron valores referenciales: Mezcla 0 % limallas: 8,07 MPa (≈ 82,3 kg/cm²). Mezcla 10 % limallas: 4,33 MPa y 4,73 MPa, con un promedio de 4,53 MPa (≈ 46,2 kg/cm²). Los adoquines con 10 % de limallas presentan una reducción aproximada del 44 % en la resistencia a tracción indirecta respecto al hormigón convencional, manteniendo un comportamiento frágil típico del material y trabajando principalmente a compresión en su aplicación como pavimento.
Registros y almacenamiento de datos	Los datos de cada ensayo (fuerza máxima, tipo de mezcla, porcentaje de limallas, edad de la probeta, resistencia calculada, observaciones del modo de falla) deben registrarse en una hoja de resultados o archivo digital. Los registros se conservarán en el archivo del laboratorio o del proyecto, conforme a la normativa interna de la institución.

Ficha de observación – Presencia de superficies podotáctiles en Baños.

La ficha de observación se diseñó para registrar de forma sistemática la presencia o ausencia de superficies podotáctiles en espacios públicos de Baños de Agua Santa. El instrumento se aplica mediante una observación no participante en distintos puntos de la ciudad, como aceras, cruces peatonales, plazas, paradas de transporte y accesos a equipamientos públicos. Para cada punto observado se consigna si existen o no elementos podotáctiles, así como su ubicación y

condiciones básicas de uso. La estructura de la ficha utiliza respuestas tipo "Sí/No", lo que facilita la tabulación de los datos y permite evidenciar de manera clara los sectores donde no se han implementado superficies podotáctiles, información clave para sustentar el diagnóstico de accesibilidad de la ciudad.

Presencia de superficies podotáctiles en espacios públicos de Baños de Agua Santa.

Ficha de observación N.º 1.

Campo	**Contenido**
Fecha	Noviembre / 2025
Hora	15/ h00
Observador/a	Flores Mena José Andrés (Tesista de Diseño Industrial)
Sector / barrio	Centro de Baños de Agua Santa
Tipo de espacio	Parque/plaza (Parque Sebastián Acosta – Parque La Basílica)
Dirección o referencia	Parque central de Baños, frente a la Basílica y al área comercial turística del centro.
Condiciones climáticas	Nublado/Húmedo.

Sección A. Presencia de superficies podotáctiles.

Aspecto observado	**Sí / No**	**Comentario breve**
Existe alguna superficie podotáctil en el punto observado	No	No se identifican bandas ni botones podotáctiles en los accesos ni recorridos internos del parque.
El podotáctil está ubicado sobre la ruta peatonal principal	No aplica	No existe superficie podotáctil en las rutas que rodean o atraviesan el parque.
El podotáctil se encuentra en el acceso a un equipamiento (Municipio, terminal, centros de salud, etc.)	No aplica	El parque conecta con la Basílica y comercios, pero sin señalización podotáctil.

El recorrido podotáctil es continuo (no se interrumpe bruscamente)	No aplica	No hay recorrido podotáctil trazado en el espacio.
El podotáctil presenta buen estado físico (sin piezas sueltas o rotas)	No aplica	No se observaron elementos podotáctiles instalados.
El podotáctil presenta contraste visual con el pavimento adyacente	No aplica	El pavimento y las veredas presentan acabado homogéneo, sin franjas de contraste táctil o visual.

Sección B. Condiciones del entorno y riesgos.

Aspecto observado	**Sí / No**	**Comentario breve**
Hay cambios de nivel (escalones, rampas, bordillos) sin ningún tipo de señalización táctil o visual	Sí	Existen bordillos y pequeños desniveles en los accesos y circulaciones perimetrales sin señalización podotáctil ni marcación especial.
Se observan obstáculos en la ruta peatonal (puestos, mobiliario urbano, vehículos, postes, árboles, etc.)	Sí	El parque presenta bancas, jardineras, postes y árboles ubicados cerca de las rutas peatonales sin elementos de advertencia táctil.
Existe cruce vehicular cercano sin guía para personas con discapacidad visual	Sí	Alrededor del parque se ubican vías vehiculares con cruces peatonales que no cuentan con guía podotáctil ni señalización específica para personas con discapacidad visual.
El flujo peatonal es medio o alto en este punto	Sí	Es un punto de alta concentración de turistas y residentes, especialmente en horarios diurnos y fines de semana.

Sección C. Nivel de riesgo para personas con discapacidad visual.

Ítem	**Valor**	**Descripción**

Nivel de riesgo estimado en el punto	2	0 = sin riesgo evidente; 1 = riesgo medio; 2 = riesgo alto

Observaciones.

El Parque Sebastián Acosta, a pesar de ser el parque central y un punto de alta afluencia peatonal en Baños, no cuenta con superficies podotáctiles que orienten la circulación de personas con discapacidad visual. Los accesos y recorridos internos presentan cambios de nivel y bordillos sin ningún tipo de señalización táctil o visual. La presencia de mobiliario urbano, jardineras y árboles cercanos a las rutas peatonales puede generar obstáculos difíciles de percibir para usuarios con discapacidad visual. La combinación de alta circulación de personas, cruces vehiculares cercanos y ausencia total de señalización podotáctil evidencia un nivel de riesgo elevado y una falta de adecuación del espacio público a criterios de accesibilidad universal.

Ficha de observación N.º 2.

Campo	**Contenido**
Fecha	Noviembre / 2025
Hora	16h00
Observador/a	Flores Mena José Andrés (Tesista de Diseño Industrial)
Sector / barrio	Zona central de Baños de Agua Santa
Tipo de espacio	Parque/plaza (Parque Palomino Flores – Central Park)
Dirección o referencia	Parque Palomino Flores, ubicado en el área central de Baños, cercano a zonas comerciales y de tránsito peatonal.
Condiciones climáticas	Nublado/Húmedo.

Sección A. Presencia de superficies podotáctiles.

Aspecto observado	**Sí / No**	**Comentario breve**

Existe alguna superficie podotáctil en el punto observado	**No**	No se observan bandas ni botones podotáctiles en los accesos ni en los recorridos del parque.
El podotáctil está ubicado sobre la ruta peatonal principal	No aplica	No existen elementos podotáctiles en las circulaciones perimetrales o internas.
El podotáctil se encuentra en el acceso a un equipamiento (Municipio, terminal, centros de salud, etc.)	No aplica	El parque conecta con vías y comercios, pero sin señalización podotáctil.
El recorrido podotáctil es continuo (no se interrumpe bruscamente)	No aplica	No se identifican recorridos podotáctiles definidos.
El podotáctil presenta buen estado físico (sin piezas sueltas o rotas)	No aplica	No se encontraron superficies podotáctiles instaladas.
El podotáctil presenta contraste visual con el pavimento adyacente	No aplica	El pavimento y veredas presentan acabado uniforme, sin franjas contrastantes.

Sección B. Condiciones del entorno y riesgos.

Aspecto observado	Sí / No	Comentario breve
Hay cambios de nivel (escalones, rampas, bordillos) sin ningún tipo de señalización táctil o visual	Sí	Se observan bordillos y desniveles en accesos y circulaciones sin marcación táctil ni visual específica.
Se observan obstáculos en la ruta peatonal (puestos, mobiliario urbano, vehículos, postes, árboles, etc.)	Sí	Existen bancas, jardineras, postes y árboles próximos a las rutas de paso, sin advertencias táctiles para usuarios con discapacidad visual.
Existe cruce vehicular cercano sin guía para personas con discapacidad visual	Sí	Alrededor del parque hay vías vehiculares y cruces peatonales sin guía podotáctil ni señalización especializada.
El flujo peatonal es medio o alto en este punto	Sí	El parque es utilizado por residentes y visitantes, con presencia constante de peatones durante el día.

Sección C. Nivel de riesgo para personas con discapacidad visual.

Ítem	Valor	Descripción
Nivel de riesgo estimado en el punto	2	0 = sin riesgo evidente; 1 = riesgo medio; 2 = riesgo alto

Observaciones.

El Parque Palomino Flores (Central Park) constituye un espacio público importante dentro de la zona central de Baños; sin embargo, no cuenta con superficies podotáctiles que orienten la circulación de personas con discapacidad visual. Los accesos y circulaciones se conforman por pavimentos continuos, sin bandas táctiles ni cambios de textura que indiquen rutas seguras. La presencia de bordillos, pequeños desniveles y mobiliario urbano cercano a las zonas de paso, sumada a la proximidad de vías vehiculares, incrementa el riesgo de tropiezos, desorientación y posibles accidentes para personas con discapacidad visual. La ausencia de señalización podotáctil en este parque refleja la falta de criterios de accesibilidad universal en un espacio público de uso frecuente.

Ficha de observación N.º 3.

Campo	Contenido
Fecha	15 / 10 / 2025
Hora	15h00
Observador/a	Flores Mena José Andrés (Tesista de Diseño Industrial)
Sector / barrio	Zona de acceso a la Terminal Terrestre de Baños
Tipo de espacio	Terminal de transporte terrestre (acceso y andenes)
Dirección o referencia	Terminal Terrestre de Baños, área de acceso principal y andenes de buses interprovinciales e intercantonales.
Condiciones climáticas	Nublado/Humedo.

Sección A. Presencia de superficies podotáctiles.

Aspecto observado	Sí / No	Comentario breve

Existe alguna superficie podotáctil en el punto observado	No	No se identifican bandas ni botones podotáctiles en accesos, vestíbulo o andenes.
El podotáctil está ubicado sobre la ruta peatonal principal	No aplica	No existen elementos podotáctiles en las rutas de ingreso o circulación interna.
El podotáctil se encuentra en el acceso a un equipamiento (Municipio, terminal, centros de salud, etc.)	No aplica	La terminal carece de señalización podotáctil en los accesos peatonales.
El recorrido podotáctil es continuo (no se interrumpe bruscamente)	No aplica	No hay recorrido podotáctil definido en el interior ni en el entorno inmediato.
El podotáctil presenta buen estado físico (sin piezas sueltas o rotas)	No aplica	No se observan superficies podotáctiles instaladas.
El podotáctil presenta contraste visual con el pavimento adyacente	No aplica	El pavimento presenta acabado uniforme, sin franjas de contraste táctil o visual.

Sección B. Condiciones del entorno y riesgos.

Aspecto observado	**Sí / No**	**Comentario breve**
Hay cambios de nivel (escalones, rampas, bordillos) sin ningún tipo de señalización táctil o visual	Sí	Se observan bordillos, rampas y desniveles en accesos y andenes sin marcación táctil ni visual específica.
Se observan obstáculos en la ruta peatonal (puestos, mobiliario urbano, vehículos, postes, árboles, etc.)	Sí	Existen boleterías, columnas, mobiliario y equipaje de usuarios que ocupan parcialmente las rutas peatonales.
Existe cruce vehicular cercano sin guía para personas con discapacidad visual	Sí	Los andenes se encuentran junto a zonas de maniobra de buses sin guía podotáctil ni elementos que orienten a personas con discapacidad visual.
El flujo peatonal es medio o alto en este punto	Sí	Alta afluencia de usuarios que ingresan y salen de la terminal, con presencia constante de personas y equipaje.

Sección C. Nivel de riesgo para personas con discapacidad visual.

Ítem	Valor	Descripción
Nivel de riesgo estimado en el punto	2	0 = sin riesgo evidente; 1 = riesgo medio; 2 = riesgo alto

Observaciones.

La Terminal Terrestre de Baños constituye uno de los puntos de mayor concentración de personas en la ciudad, al articular el ingreso y salida de usuarios locales y turistas. Sin embargo, en los accesos, vestíbulo y andenes no se identifican superficies podotáctiles que orienten el desplazamiento de personas con discapacidad visual. Los cambios de nivel, bordillos y rampas no cuentan con señalización táctil ni contraste visual, y la presencia de columnas, boleterías, mobiliario y equipaje en las rutas peatonales genera obstáculos que resultan difíciles de percibir para quienes presentan discapacidad visual. La proximidad inmediata entre las zonas peatonales y las áreas de circulación y maniobra de buses incrementa el nivel de riesgo, especialmente ante la ausencia de guías podotáctiles o elementos de advertencia. Este punto refuerza la evidencia de que los espacios de uso masivo en Baños no incorporan criterios de accesibilidad universal orientados a personas con discapacidad visual.