

Boiero, Lucía Abril
Vassallo, Santiago Francisco

**Adoquines colados de áridos
reciclados provenientes de
hormigón triturado y limo
loésico colapsable de
Córdoba**

**Tesis para la obtención del título de
grado de Ingeniería Civil**

Directores:

Cruz, María Pía

Martin Schmädke, Italo

Documento disponible para su consulta y descarga en Biblioteca Digital - Producción Académica, repositorio institucional de la Universidad Católica de Córdoba, gestionado por el Sistema de Bibliotecas de la UCC.



[Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional.](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



**UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE CÓRDOBA**

Universidad Jesuita

*Adoquines colados de áridos reciclados provenientes de hormigón triturado y limo
loésico colapsable de Córdoba*

Autor/es: Boiero, Lucía Abril; Vassallo, Santiago Francisco

Tutor/es: Ing. Cruz, María Pía; Ing. Martin Schmädke, Italo

Año 2026



AGRADECIMIENTOS

A nuestras familias, por su amor, su apoyo incondicional, su esfuerzo constante y su acompañamiento durante este camino de desarrollo profesional y personal. Gracias por ser nuestro sostén, nuestro aliento y confiar en nosotros siempre. Sin ustedes, este logro no hubiera sido posible.

A nuestros amigos y compañeros, por estar presentes y compartir tantos años llenos de momentos de aprendizaje y vivencias. Gracias por hacer de las horas de estudio y cursado más ligeras con su compañía y afecto.

A la Universidad Católica de Córdoba y, especialmente, a la Facultad de Ingeniería, por brindarnos una formación no solo académica, sino también humana y profesional que hizo posible el desarrollo de este trabajo. Gracias por el espacio, las herramientas y el acompañamiento recibido a lo largo de toda la carrera.

A la empresa Ozenplac, por su colaboración y por facilitarnos las herramientas que se usaron en esta investigación. Gracias por su aporte fundamental para el desarrollo de este trabajo.

A la Ing. María Pía Cruz y al Ing. Ítalo Martín S. por su guía, dedicación y compromiso como directores del proyecto de investigación. En particular, agradecemos a la Ing. Cruz por su acompañamiento como tutora de tesis, por su constante predisposición, dedicación y exigencia académica para orientarnos durante el proceso. Sus conocimientos, capacidad de orientación y apoyo fueron decisivos para transformar esta investigación en un trabajo sólido y significativo.

Y un agradecimiento muy especial a José, por su permanente disposición para ayudarnos en el laboratorio y por el entusiasmo que mostró por nuestro trabajo. Nos acompañó en distintas etapas experimentales, preparó los equipos cada vez que lo necesitamos, y siempre estuvo atento para darnos una mano. Su colaboración fue esencial para el desarrollo exitoso de esta investigación. Un héroe sin capa.

Finalmente, agradecemos a todas las personas que, de una u otra manera, nos acompañaron y aportaron a la concreción de esta tesis. Este trabajo representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el esfuerzo compartido de muchas personas que estuvieron a nuestro lado en el camino.

A todos, muchas gracias.

RESUMEN

El presente trabajo final de grado, enmarcado como un estudio de investigación, analiza la viabilidad técnica, económica y ambiental de fabricar adoquines tipo Holanda con árido reciclado (AR) fino proveniente de restos de hormigón y suelo limo-loésico (ML) local de la provincia de Córdoba, estabilizados con cemento Portland. La propuesta surge de la necesidad de valorizar materiales de bajo costo relativo y disponibilidad local, promoviendo estrategias de reutilización de una parte de los residuos de construcción y demolición (RCD) y reducción del consumo de áridos naturales obtenidos mediante explotación de canteras.

Se caracterizaron los materiales constitutivos y se evaluó experimentalmente su comportamiento en distintas dosificaciones. Mediante ensayos preliminares y ajustes progresivos, se definió un procedimiento de fabricación por colado manual, con control de humedad, compactación por capas, curado y desmolde manual. Posteriormente, se realizaron ensayos en los adoquines de suelo loésico colapsable y áridos reciclados finos conforme a la norma IRAM 11656 para determinar dimensiones, estabilidad, absorción, densidad, resistencia a la flexión y a la abrasión.

Los resultados evidenciaron que los adoquines Holanda elaborados con loess más áridos reciclados (0-6 mm) no cumplen con los requisitos exigidos para adoquines estructurales convencionales de tránsito vehicular. Sin embargo, la dosificación 50%AR más 50%ML presentó comportamiento físico óptimo, estabilidad dimensional y resistencia mecánica entre las tres dosificaciones estudiadas en este trabajo. Finalmente, se propuso una aplicación de dichos adoquines en un pavimento articulado permeable de baja sollicitación vehicular, como sería en estacionamientos de vehículos livianos, ciclovías y sendas peatonales. Como caso de estudio, se proyectó un estacionamiento para motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba. Esta aplicación resultó una solución técnico-ambiental óptima elaborada con agregados reciclados y suelos finos problemáticos.

Palabras clave: árido reciclado; limo-loésico; adoquín Holanda; pavimento articulado permeable; estabilización de suelos colapsables.



ABSTRACT

This final degree project, framed as a research study, analyzes the technical, economic, and environmental viability of manufacturing Holland-type paving blocks using fine recycled aggregate (RA) from concrete waste and local silty loess soil (ML) from Córdoba, stabilized with Portland cement. The proposal arises from the need to valorize low-cost, locally available materials, promoting strategies for the reuse of part of construction and demolition waste (CDW) and reducing the consumption of natural aggregates obtained from quarry extraction.

The component materials were characterized, and their behavior was experimentally evaluated under different mix proportions. Through preliminary tests and progressive adjustments, a manual casting manufacturing procedure was defined, including moisture control, layer-by-layer compaction, curing, and manual demolding. Subsequently, tests were carried out on paving blocks made with collapsible loessic soil and fine recycled aggregates in accordance with IRAM 11656 standards to determine dimensions, stability, absorption, density and flexural and abrasion resistance.

The results showed that the Holland paving blocks made with loess and recycled aggregates (0-6 mm) do not meet the requirements established for conventional structural paving blocks subjected to vehicular traffic. However, the mix proportion 50%RA and 50%ML presented the best physical performance, dimensional stability, and mechanical strength. Finally, an application of these paving blocks was proposed in a low load permeable interlocking pavements, such as light parking areas, bicycle paths, and pedestrian walkways. As a case study, a parking area for motorcycles and bikes was designed for the Facultad de Ingeniería at the Universidad Católica de Córdoba. This application proved to be an optimal technical-environmental solution made from recycled aggregates and problematic fine soils.

Keywords: recycled aggregate; silty loess soil; Holland paving blocks; permeable interlocking pavement; stabilization of collapsible soils.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. Hipótesis	17
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivos generales.....	17
1.2.2. Objetivos específicos	17
1.3. Identificación de la problemática.....	18
2. ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1. Evolución del uso de áridos reciclados de hormigón.....	20
2.1.1. Producción de áridos reciclados.....	22
2.2. Aplicación de suelos limo-loésicos en materiales estabilizados	23
2.2.1. Estabilización química de ML con ligantes hidráulicos	23
2.2.2. Mejoramiento mecánico de ML con áridos reciclados	23
2.3. Uso combinado de áridos reciclados y finos naturales	24
2.3.1. Antecedentes académicos	24
2.3.2. Antecedentes industriales.....	25
2.4. Situación actual en Córdoba	26
2.4.1. Gestión y disposición final.....	27
2.4.2. Estimación de disposición de RCD en Córdoba.....	28
3. METODOLOGÍA Y MARCO NORMATIVO.....	31
3.1 Enfoque metodológico	31
3.2. Marco normativo.....	32
3.2.1. Normativa internacional sobre adoquines de hormigón	33
3.2.2. Normativa nacional sobre adoquines de hormigón.....	33
3.2.3. Regulaciones sobre uso de áridos reciclados	34
3.2.4. Regulación regional sobre residuos de construcción y demolición	37
4. MATERIALES DE LOS ADOQUINES	40
4.1. Suelo limo-loésico	40
4.2. Árido Reciclado	42
4.3. Cemento Portland.....	44
4.4. Molde para adoquín rectangular	45



4.5. Desmoldante	46
4.5.1. Desmoldante experimental.....	47
4.5.2. Aceite de motor multigrado	47
4.5.3. Pintura asfáltica.....	48
5. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS MATERIALES.....	51
5.1. Caracterización del comportamiento de los componentes	51
5.1.1. Mezcla 100% AR.....	52
5.1.2. Mezcla 100% AR + 5% CPC.....	53
5.1.3. Mezcla 50% AR + 50% ML	55
5.1.4 Mezcla 25% AR + 75% ML	56
5.1.5 Mezcla 12% AR + 88% ML	58
5.2. Evaluación del Árido Reciclado	60
5.3. Evaluación del suelo Limo - Loésico	61
5.4. Evaluación del Cemento Portland.....	62
5.5. Selección de desmoldante	63
5.6. Criterios técnicos derivados de pruebas realizadas en laboratorio	64
5.6.1. Influencia de la proporción ML:AR	65
5.6.2. Control de humedad y de la relación agua/cemento	65
5.6.3. Energía de compactación y densificación.....	66
5.6.4. Aplicación de desmoldante	67
5.6.5. Condiciones necesarias para curado	70
5.6.6. Comportamiento ante fraguado y desmolde	71
6. PROCESO DE ELABORACIÓN ADOPTADO.....	74
6.1. Procedimiento de dosificación.....	74
6.2. Procedimiento de preparación y acondicionamiento de materiales	75
6.3. Procedimiento de mezclado	77
6.3.1. Ensayo de consistencia	78
6.4. Procedimiento de moldeo y compactación	80
6.5. Procedimiento de curado.....	83
6.6. Procedimiento de desmolde	83
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ADOQUINES COLADOS DE AR Y ML.....	86
7.1. Requisitos físicos y geométricos.....	86
7.2.1. Verificación deformacional ante expansión por humedad.....	87



7.2.2. Verificación volumétrica ante expansión por humedad.....	90
7.3. Ensayo de absorción	92
7.4. Ensayo de módulo de rotura a la flexión	98
7.5. Ensayo de resistencia a la abrasión.....	104
7.6. Correlación de resultados.....	108
7.6.1. Relación entre módulo de rotura y absorción	108
7.6.2. Relación entre absorción y desvío estándar.....	110
7.6.3. Relación entre módulo de rotura y deformación total	110
7.6.4. Relación entre deformación volumétrica y deformación lineal.....	111
8. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS	114
8.1. Influencia de la composición de la mezcla	114
8.2. Comportamiento físico.....	115
8.2.1. Absorción de agua.....	115
8.2.2. Densidad	116
8.2.3. Estabilidad dimensional frente a la humedad	116
8.3. Comportamiento mecánico	117
8.3.1. Resistencia a la flexión	118
8.3.2. Resistencia al desgaste superficial	118
8.4. Comparación con requisitos normativos.....	119
8.5. Comportamiento cualitativo.....	120
8.6. Eficiencia de dosificaciones.....	120
8.6.1. Beneficios del elemento fabricado.....	121
8.6.2. Limitaciones del elemento fabricado	122
8.7. Consideraciones finales	122
9. APLICACIONES.....	126
9.1. Estacionamiento de vehículos livianos	128
9.2. Ciclovía.....	131
9.3. Sendas peatonales	134
9.4. Proyección de estacionamiento para motos y bicicletas con adoquines.....	137
10. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL.....	142
10.1. Análisis económico.....	142
10.2. Análisis ambiental.....	144
10.2.1. Medidas de mitigación durante la etapa de construcción	145



10.2.2. Medidas de mitigación durante la etapa de operación	146
10.2.3. Balance económico-ambiental del proyecto	147
11. BIBLIOGRAFÍA	150

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Diagrama de proceso productivo en economía lineal.....	21
Ilustración 2: Diagrama de proceso productivo en economía circular	21
Ilustración 3: Producción de áridos reciclados	22
Ilustración 4: Gestión y disposición final.	28
Ilustración 5: Esquema metodológico del trabajo.....	31
Ilustración 6: Asignaturas Involucradas.....	32
Ilustración 7: Comparación de normativa internacional sobre el uso de áridos reciclados (Eguia- Feryala, 2025)	37
Ilustración 8: Ubicación del campus de la Universidad Católica de Córdoba, lugar de donde se extrajo el suelo limo loésico	40
Ilustración 9: Dimensiones nominales del molde empleado.....	45
Ilustración 10: Molde rectangular para adoquines.....	46
Ilustración 11: Mezcla Experimental	47
Ilustración 12: Aceite ELAION 20W-50	48
Ilustración 13: Pintura asfáltica Kover Primer.....	49
Ilustración 14: Formación de lechinada superficial, burbujeo y reacción inicial de compuestos cementicios remanentes	52
Ilustración 15: Medición de temperatura de mezcla compuesta por 100% de árido reciclado	53
Ilustración 16: Mezcla con 5% de cemento con mayor cohesión, menor agua decantada y una disminución del burbujeo excesivo.....	54
Ilustración 17: Rotura de pieza por presión lateral	54
Ilustración 18: Buena definición de biselado.....	55
Ilustración 19: Mezcla 50% AR + 50% ML con mayor homogeneidad del amasado y llenado del molde.....	55
Ilustración 20: Medición de temperatura de mezcla 50% AR + 50% ML.....	56
Ilustración 21: Desmolde completo de las piezas, sin roturas estructurales significativas.....	56
Ilustración 22: Desmolde completo de las piezas, sin roturas estructurales significativas.....	57
Ilustración 23: Mezcla preliminar de dosificación 25% AR + 75% ML sin proceso de compactación con una relación A/C de 0,88.	58
Ilustración 24: Tendencia marcada a la retracción plástica en dosificación con mayor contenido de fracción fina	58
Ilustración 25: Dosificación 12%AR + 88%ML con una relación A/C de 0,88 por su gran demanda de agua.....	59
Ilustración 26: Piezas secas con hinchazón debida al comportamiento del ML con excedente de agua	60
Ilustración 27: Desprendimientos de material debido a dificultad de desmolde con ausencia de desmoldante	68
Ilustración 28: Película superficial brillante en superficie expuesta de adoquín sin desmoldante	68
Ilustración 29: Película superficial opaca y con manchas blancas en superficie expuesta de adoquín sin desmoldante.....	69

Ilustración 30: Superficie del adoquín con depósitos localizados de desmoldante excedente	69
Ilustración 31: Comparación entre comportamiento del molde sin desmoldante (izquierda) y con desmoldante (derecha)	70
Ilustración 32: Distinción del contenido de humedad de adoquines de misma dosificación con una exposición a la temperatura ambiente de 24 horas de diferencia	71
Ilustración 33: Matriz interna de adoquines sin proceso de fabricación parametrizado	76
Ilustración 34: Tamiz N°8 utilizado para separar partículas gruesas, aglomerados de ML e impurezas	77
Ilustración 35: Mortero empleado para desmenuzar aglomeraciones de ML	77
Ilustración 36: Espátula introducida en mezcla con su mango vertical con respecto a la superficie	79
Ilustración 37: Restos de mezcla de aproximadamente 3 [cm] de espesor	79
Ilustración 38: Llenado con mezcla que cumple con el Ensayo de Consistencia	81
Ilustración 39: Proceso de llenado y compactación por capas de la mezcla en moldes	81
Ilustración 40: Distribuciones de las penetraciones con espátula para compactación de mezcla en el molde	82
Ilustración 41: Cámara de Curado	83
Ilustración 42: Desmolde de adoquines mediante vuelco del molde	84
Ilustración 43: Medición de largo del adoquín con Calibre Vernier	87
Ilustración 44: Probetas en el horno	92
Ilustración 45: Dispositivo de inmersión	94
Ilustración 46: Prensa utilizada en el ensayo	98
Ilustración 47: Dispositivo de apoyo para ensayo de flexión (IRAM 11656)	99
Ilustración 48: Disposición de puntos de aplicación de carga y apoyo con láminas de caucho	99
Ilustración 49: Adoquín parametrizado de dosificación (a) 50%AR+50%ML+0,72A/C, (b) 25%AR+75%ML+0,80A/C, (c) 12%AR+88%ML+0,84A/C	103
Ilustración 50: Comparación entre adoquín proceso de fabricación preliminar y con proceso de fabricación parametrizado	104
Ilustración 51: Dosificación elegida-Resistencia a la Abrasión	106
Ilustración 52: Adoquines ensayados a la abrasión	106
Ilustración 53: Dispositivo de ensayo (Resistencia a la Abrasión)	107
Ilustración 54: Máquina de desgaste y disco de abrasión	107
Ilustración 55: Relación entre Módulo de Rotura y Absorción	109
Ilustración 56: Relación entre Absorción y Desvío Estándar	110
Ilustración 57: Relación entre Módulo de Rotura y Deformación	111
Ilustración 58: Relación entre Deformación lineal y volumétrica	112
Ilustración 59: Paquete estructural de vehículos livianos	129
Ilustración 60: Determinación de SN requerido	131
Ilustración 61: Paquete estructural ciclovías	132
Ilustración 62: Determinación de SN requerido	133
Ilustración 63: Paquete estructural sendas peatonales	134
Ilustración 64: Determinación de SN requerido	136



Ilustración 65: Estudiantes haciendo uso de espacio verde para estacionar motocicletas	137
Ilustración 66: Vista satelital del de emplazamiento del estacionamiento (rojo) y rampa (amarillo) de acceso de adoquines permeables para motos y bicicletas	138
Ilustración 67: Lugar de emplazamiento del estacionamiento de adoquines permeables para motos y bicicletas.....	138
Ilustración 68: Paquete estructural de estacionamiento de motocicletas y bicicletas	139
Ilustración 69: Representación de estacionamiento de motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería de la UCC	140
Ilustración 70: Gráfico de comparación entre costos de obra empleando adoquines permeables y macizos	144
Ilustración 71: Formato Matriz de Leopold	145
Ilustración 72: ODS N°9	148
Ilustración 73: ODS N°11	148

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estimación de Volúmenes de RCD en Córdoba del 2024 (Eguía- Feryala, 2025)....	29
Tabla 2: Comparación de normativa internacional y nacional sobre adoquines	34
Tabla 3: Composición de áridos reciclados aptos para elaboración de hormigón según normativa española	35
Tabla 4: Composición de áridos reciclados de hormigón para uso estructural y no estructural según normativa alemana.....	36
Tabla 5: Composición de áridos reciclados para bases y subbases en vías no pavimentadas según normativa brasileña.....	36
Tabla 6: Composición de áridos reciclados para uso vial no estructural según normativa colombiana.....	37
Tabla 7: Resumen de características del suelo limo-loésico empleado.....	42
Tabla 8: Resumen de características del árido reciclado empleado.....	44
Tabla 9: Propiedades fisicoquímicas de alternativas de desmoldantes.....	49
Tabla 10: Evaluación de desempeño de alternativas de desmoldante	64
Tabla 11: Dimensiones de adoquines en condición seca	87
Tabla 12: Dimensiones de adoquines en condición saturada superficie seca.....	88
Tabla 13: Variaciones longitudinales en las dimensiones de los adoquines.....	89
Tabla 14: Variaciones volumétricas de adoquines.....	91
Tabla 15: Medidas tomadas en condición seca.....	93
Tabla 16: Medidas en condición saturada superficie seca	94
Tabla 17: Verificación de diferencia entre pesos en condición saturada superficie seca	95
Tabla 18: Absorción de adoquines.....	96
Tabla 19: Densidades de adoquines	97
Tabla 20: Densidades típicas de distintos tipos de hormigón	98
Tabla 21: Valores obtenidos y corregidos durante el ensayo	100
Tabla 22: Análisis de resultados	101
Tabla 23: Requisitos del módulo de rotura a la flexión y resistencia a la abrasión.....	102
Tabla 24: Largo Corregido-Resistencia a la Abrasión.....	108
Tabla 25: Comparativa integral del desempeño de las dosificaciones estudiadas.....	123
Tabla 26: Parámetros generales y criterios de adopción para diseño de paquetes estructurales	128
Tabla 27: Paquete estructural de pavimento de PCIP para estacionamiento de vehículos livianos	129
Tabla 28: Contribución de cada capa del estacionamiento para vehículos livianos	130
Tabla 29: Paquete estructural de pavimento de PCIP para ciclovías.....	131
Tabla 30: Contribución de cada capa del estacionamiento para vehículos livianos	133
Tabla 31: Paquete estructural de pavimento de PCIP para sendas peatonales	134
Tabla 32: Contribución de cada capa del estacionamiento para vehículos livianos	135
Tabla 33: Resumen de aplicaciones analizadas	136
Tabla 34: Paquete estructural de estacionamiento para motocicletas y bicicletas.....	139



Tabla 35: Presupuesto de ejecución del proyecto de estacionamiento adoquinado permeable para motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería, Campus UCC	143
Tabla 36: Presupuesto de ejecución del proyecto de estacionamiento adoquinado convencional para motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería, Campus UCC	143
Tabla 37: Escala de valoración de impactos	144



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.....	67
Ecuación 2.....	74
Ecuación 3.....	74
Ecuación 4.....	88
Ecuación 5.....	88
Ecuación 6.....	88
Ecuación 7.....	88
Ecuación 8.....	88
Ecuación 9.....	88
Ecuación 10.....	89
Ecuación 11.....	90
Ecuación 12.....	90
Ecuación 13.....	90
Ecuación 14.....	90
Ecuación 15.....	95
Ecuación 16.....	95
Ecuación 17.....	96
Ecuación 18.....	100
Ecuación 19.....	127
Ecuación 20.....	127
Ecuación 21.....	130
Ecuación 22.....	133
Ecuación 23.....	135



CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

En el contexto actual, la industria de la construcción se caracteriza por ser una de las principales consumidoras de recursos naturales y, consecuentemente, una generadora importante de residuos sólidos, principalmente residuos de construcción y demolición (RCD). La gestión inadecuada de estos residuos, sumada a la continua extracción y explotación de los recursos naturales y ecosistemas, produce impactos ambientales significativos relacionados al agotamiento de la materia prima, la ocupación de suelo por disposición final de residuos, contaminación, entre otros.

Frente a esto, surge el aprovechamiento de los RCD con su adecuado procesamiento de morteros, ladrillos, revoques, hormigones, maderas, hierro, entre otros. Este trabajo solo estudia los rezagos de hormigones estructurales sin impurezas para obtener áridos reciclados/agregados reciclados (AR) como una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sustentable. Su incorporación en matrices cementicias, ha sido objeto de estudio, demostrando una potencial aplicación en terraplenes, paquetes estructurales viales, nuevos hormigones y elementos prefabricados. No obstante, estos tienen un desempeño condicionado por sus propiedades intrínsecas, como la variación en su comportamiento mecánico, su elevada absorción de agua y la presencia de mortero que se encuentra adherido en su matriz.

Por otra parte, en la provincia de Córdoba los suelos limos-loésicos (ML) son predominantes, distinguidos por su baja plasticidad, estructura metaestable y su carácter colapsable ante cambios de las condiciones de humedad natural. Aunque estas características limitan su uso ya desde el estado natural, su incorporación como otro agregado fino en matrices cementicias permite estabilizar su comportamiento tenso-deformacional nocivo y lo convierte en un material reutilizable de la construcción.

El presente trabajo se centra en el desarrollo y evaluación de adoquines tipo Holanda colados elaborados con tres dosificaciones de áridos reciclados (AR) y suelo limo-loésico (ML), estabilizados con cemento Portland (CP). Para ello, se consideró la información de base sobre la caracterización de los áridos naturales y reciclados de la tesis Eguía- Feryala (2025). A partir de esta, se realizó un análisis del comportamiento físico, mecánico y cualitativo de cada dosificación a estudiar; siendo propuesto aquí, una serie de pautas de elaboración de los adoquines como la valoración comparativa de las principales propiedades resultantes según las normativas vigentes en la Argentina hasta lo que va del 2026.

Los resultados obtenidos permiten evaluar y determinar la viabilidad técnica de la dosificación óptima de estos materiales en conjunto, formando parte de soluciones constructivas, donde se logra una mayor eficiencia en el uso de los recursos, el aprovechamiento de materiales locales como reciclados, y el establecimiento de alternativas constructivas en concordancia al contexto regional actual.

1.1. Hipótesis

Según lo investigado, experiencias previas y los conocimientos adquiridos en la carrera, se busca analizar la viabilidad técnica de la utilización conjunta de árido reciclado proveniente de rezagos de hormigones estructurales (AR) y suelo limo-loésico colapsables (ML) para la fabricación de elementos prefabricados, como adoquines, con propiedades físicas y mecánicas adecuadas para su aplicación, por lo que se plantea:

La combinación de árido reciclado (AR) con el limo-loésico (ML) y la incorporación de cemento Portland, estabiliza las propiedades tenso-deformacionales de los sedimentos colapsables de la zona sur de la ciudad de Córdoba.

Bajo un estricto control de los materiales incorporados en cada dosificación estudiada de árido reciclado fino 0-6mm, limo-loésicos colapsable y relación agua-cemento, es factible elaborar un adoquín tipo holanda que cumpla con una aplicabilidad técnica-ambiental aceptable para su comercialización futura.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivos generales

- Evaluar el comportamiento físico y mecánico de cada dosificación estudiada, formadas por árido reciclado (AR) y limo-loésicos (ML), con el objetivo de determinar su viabilidad tanto técnica, económica y ambiental para la fabricación de elementos prefabricados (adoquín tipo holanda).
- Materializar y ensayar elementos prefabricados de cada dosificación estudiada, mediante el uso de áridos reciclados (AR), limo-loésico (ML) y cemento portland.
- Brindar especificaciones constructivas para la elaboración de estos adoquines.
- Diseñar una aplicación de bajo tránsito vial para el Campus de la UCC con los adoquines que alcancen la dosificación óptima.
- Concluir con algunos criterios técnico, económico y ambiental.

1.2.2. Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los materiales constituyentes utilizados.
- Diseñar y elaborar distintas dosificaciones de mezclas de árido reciclado (AR) y limo-loésico (ML), incorporando cemento Portland como ligante.
- Evaluar la influencia del árido reciclado (AR) en el comportamiento de los elementos conformados con las distintas dosificaciones, su trabajabilidad durante el amasado, su estabilidad dimensional durante el fraguado y su respuesta mecánica ante sollicitaciones.
- Analizar el comportamiento del limo (ML), como fracción fina en la matriz cementicia y su incidencia en la cohesión, compactación y estabilidad dimensional de los adoquines.

- Aplicar la normativa vigente y garantizar el cumplimiento de las condiciones que establece la norma IRAM 11656, realizando un análisis de las propiedades físicas, mecánicas y cualitativas del producto final, mediante experimentación y ensayos en laboratorio.
- Analizar las relaciones existentes entre las dosificaciones y el desempeño obtenido, identificando distintas tendencias y comportamientos.
- Brindar fichas técnicas concluyentes de las principales propiedades técnicas alcanzadas para la cantidad mínima de adoquines ensayados.
- Proponer una aplicación concreta de bajo tránsito vehicular con los adoquines elaborados con la dosificación óptima para un estacionamiento de motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba (UCC).
- Concluir técnicamente y proponer futuras líneas de investigación o sugerencias a considerar para continuar con este tema.

1.3. Identificación de la problemática

A pesar del creciente interés por la valorización de los residuos de construcción y demolición (RCD), su incorporación en nuevos materiales constructivos continúa presentando limitaciones técnicas, especialmente cuando se busca su aplicación en elementos prefabricados. En particular, el uso de áridos reciclados finos provenientes de hormigón residual plantea dificultades vinculadas a su elevada absorción de agua, su variabilidad granulométrica y la presencia de mortero adherido, factores que condicionan el comportamiento físico y mecánico del producto final.

En forma complementaria, en la provincia de Córdoba los suelos limo-loésicos constituyen un material abundante, pero de baja aptitud ingenieril en estado natural debido a su estructura metaestable, su baja plasticidad y su susceptibilidad al colapso frente a cambios de humedad. Sin embargo, su posible incorporación como fracción fina en matrices cementicias abre una línea de estudio orientada al aprovechamiento de recursos locales de bajo costo y a la estabilización de materiales problemáticos.

En este marco, la problemática específica del presente trabajo radica en la ausencia de criterios técnicos que permitan combinar áridos reciclados finos y suelo limo-loésico local en la fabricación de adoquines prefabricados, garantizando condiciones mínimas de estabilidad, resistencia y uniformidad. Esta situación resulta especialmente relevante debido a que, si bien existen antecedentes de investigación sobre áridos reciclados y mejoramiento de suelos dentro del ámbito de la Universidad Católica de Córdoba, aún persiste la necesidad de profundizar en aplicaciones concretas que articulen reutilización de RCD, aprovechamiento de suelos locales y desarrollo de elementos prefabricados.

A partir de esta problemática, el capítulo siguiente desarrolla el estado del arte que sustenta conceptualmente la presente investigación, abordando antecedentes vinculados al uso de áridos reciclados, suelos limo-loésicos y adoquines de hormigón.



CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

2. ESTADO DEL ARTE

En función del problema de investigación expuesto en el capítulo anterior, el presente capítulo desarrolla el estado del arte vinculado al uso de adoquines de hormigón, a la incorporación de áridos reciclados y al comportamiento de los suelos limo-loésicos. Este relevamiento permite establecer los antecedentes conceptuales, técnicos y normativos que fundamentan el desarrollo experimental abordado en los capítulos siguientes.

Los adoquines para pavimentación surgieron como respuesta a la necesidad de mejorar la transitabilidad y durabilidad de las vías urbanas. A lo largo del tiempo, este elemento constructivo evolucionó desde bloques de roca tallados manualmente hasta piezas prefabricadas de hormigón producidas industrialmente bajo estrictos controles de calidad, adaptándose a los requerimientos técnicos y funcionales de cada período histórico.

Los primeros antecedentes del uso de adoquines se remontan a la época del Imperio Romano, cuando se empleaban piedras trabajadas como superficie de rodadura sobre bases granulares, favoreciendo la circulación y el desarrollo de las comunicaciones. Durante la Edad Media, esta técnica se difundió en ciudades europeas mediante la utilización de bloques de granito y basalto colocados manualmente, lo que permitió mejorar significativamente las condiciones de circulación respecto a las superficies de tierra.

Con la Revolución Industrial y el desarrollo del cemento Portland en el siglo XIX, comenzaron a elaborarse adoquines prefabricados como alternativa a la piedra natural. A principios del siglo XX, se introdujeron los primeros adoquines de hormigón moldeados manualmente, cuya adopción se consolidó progresivamente gracias a la regularidad dimensional, el control de resistencia y la reducción de costos constructivos. Posteriormente, la industrialización de los procesos de vibrocompactación y prensado en la segunda mitad del siglo XX permitió la producción masiva de adoquines con mayor precisión geométrica y mejores propiedades mecánicas, acompañada por la estandarización normativa a nivel internacional.

En la actualidad, el desarrollo de estos elementos incorpora además criterios de sostenibilidad, promoviendo la utilización de materiales reciclados y evidenciando la adaptación del pavimento modular a las demandas ambientales y económicas contemporáneas.

2.1. Evolución del uso de áridos reciclados de hormigón

Las primeras prácticas registradas de hormigón reciclado son de Europa, posterior a la Segunda Guerra Mundial, debido a las necesidades de reconstruir la estructura urbana y de gestionar eficientemente la gran cantidad de escombros, resultando en una estipulación de criterios logísticos y económicos. Más tarde, con el fomento de la conciencia ambiental de 1970, se impulsaron estudios y experimentación para evaluar la viabilidad de usar el hormigón triturado como una alternativa al árido natural (Hansen, 1992). Desde entonces, la consolidación del reciclaje de los residuos

provenientes de construcción y demolición se dio de manera progresiva como una práctica en distintos países.

En consecuencia, con el desarrollo industrial a nivel mundial y el incremento de producción de residuos de construcción y demolición (RCD), el reciclaje de hormigón triturado para la obtención de áridos reciclados surge como una solución para reducir el impacto ambiental, disminuyendo la extracción y explotación de canteras y otros recursos ambientales, además de promover la economía circular en la construcción.



Ilustración 1: Diagrama de proceso productivo en economía lineal

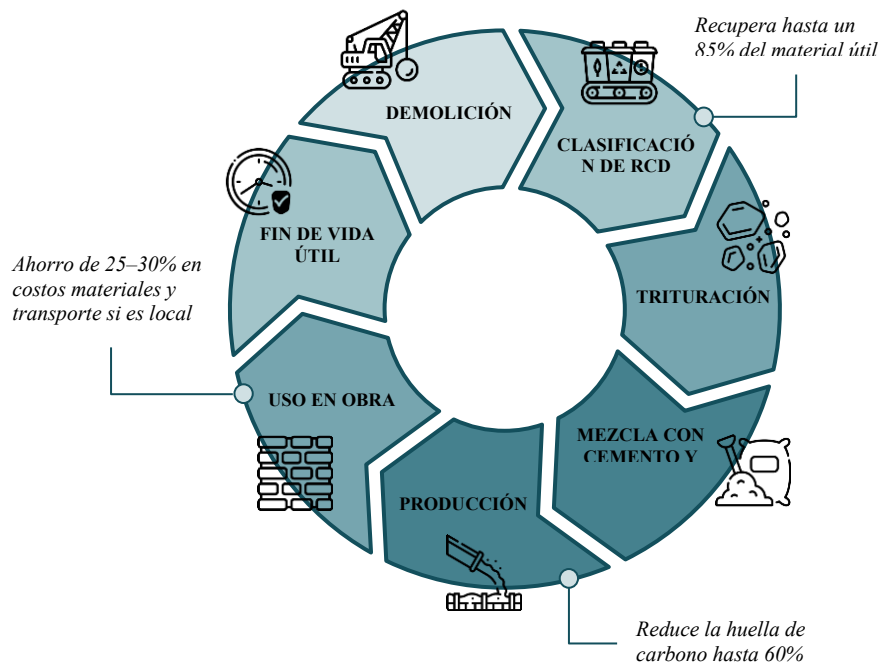


Ilustración 2: Diagrama de proceso productivo en economía circular

2.1.1. Producción de áridos reciclados

Antes de ingresar los RCD en las etapas industriales de producción de los áridos reciclados, es importante garantizar una demolición selectiva mediante la separación sistemática de los distintos materiales que componen una estructura (hormigón, acero, madera, yeso, cerámicos, plásticos), con el objetivo de minimizar la contaminación del residuo a reciclar.

Algunos materiales, como yeso, ladrillos cerámicos, materiales orgánicos o sulfatos, son considerados impurezas en el material demolido debido a su impacto negativo al incrementar la absorción, alterar la durabilidad o generar reacciones indeseadas en el hormigón elaborado. Debido a esto, es indispensable la incorporación de procedimientos de control de admisión y muestreo previo, a fin de verificar la composición del material ingresado a planta.

La clasificación previa del RCD y la eliminación de dichas impurezas permiten mejorar la calidad del árido reciclado, lo cual conlleva a una reducción de la variabilidad del producto y un aumento en la confiabilidad de su aplicación.

La producción de los AR comprende un conjunto de operaciones industriales destinadas a transformar los residuos de construcción y demolición en fracciones granulométricas reutilizables. Este proceso incluye etapas de trituración, clasificación y acondicionamiento del material, orientadas a obtener tamaños nominales controlados y propiedades físicas reproducibles.

En primer lugar, el hormigón proveniente de demolición pasa por una trituración primaria y secundaria, comúnmente mediante trituradoras de mandíbula y de impacto, permitiendo la reducción progresiva del tamaño de partícula. Luego, es sometido a procesos de cribado para separar distintas fracciones granulométricas (por ejemplo, finos de 0–6 mm, y gruesos de 6–19 mm), según su futura aplicación.

El proceso productivo se complementa con una separación magnética para la remoción de acero de refuerzo y otros elementos metálicos residuales. La configuración de dicho sistema influye directamente en el contenido de mortero adherido, en la generación de finos y en la homogeneidad del producto final. Por lo tanto, la calidad del árido reciclado obtenido depende de la eficiencia del proceso industrial y de las características del material de origen, condicionando su comportamiento físico y mecánico en aplicaciones cementicias.

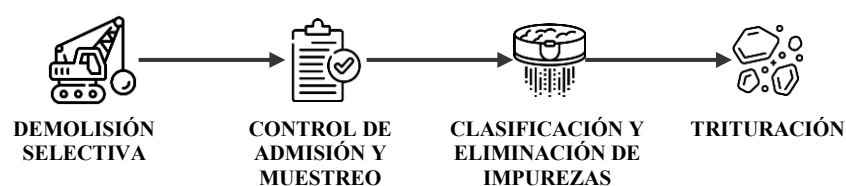


Ilustración 3: Producción de áridos reciclados

2.2. Aplicación de suelos limo-loésicos en materiales estabilizados

Los suelos limo-loésicos (ML) se caracterizan por su predominancia de partículas limosas, baja plasticidad y estructura metaestable, lo que los hace particularmente sensibles a variaciones en el contenido de humedad. Estas propiedades condicionan su comportamiento geotécnico, favoreciendo fenómenos de colapso y retracción en estado natural, pero al mismo tiempo los convierten en materiales susceptibles de mejora mediante procesos de estabilización con ligantes hidráulicos.

Por esto, los suelos loésicos pueden adquirir interés técnico cuando se incorporan a mezclas estabilizadas, ya sea en aplicaciones tradicionales de mejoramiento de subrasantes, bases y subbases, o bien como parte de mezclas cementicias más complejas.

2.2.1. Estabilización química de ML con ligantes hidráulicos

La estabilización de suelos limosos mediante la incorporación de cemento Portland constituye una técnica ampliamente utilizada en obras viales y de infraestructura, dado que permite mejorar la capacidad portante del suelo, reducir su deformabilidad y aumentar su estabilidad volumétrica. La adición de ligantes hidráulicos modifica la estructura interna del material mediante la formación de productos de hidratación, incrementando la cohesión y generando una matriz más estable.

En suelos de baja plasticidad, este tratamiento suele ser especialmente favorable, ya que la menor actividad expansiva de la fracción arcillosa facilita el desarrollo de una estructura cementada más uniforme. Además, el pH alcalino de este tipo de suelo favorece el desarrollo de reacciones cementicias. Como resultado, el suelo-cemento presenta una estructura más densa y mayor resistencia a compresión respecto al suelo natural, reduciendo simultáneamente el potencial de colapso.

Sin embargo, la elevada proporción de finos incrementa la superficie específica del material y, en consecuencia, la demanda de agua de la mezcla, por lo que el control de la relación agua/cemento y de las condiciones de compactación resulta fundamental para evitar problemas de retracción o microfisuración.

2.2.2. Mejoramiento mecánico de ML con áridos reciclados

El mejoramiento del suelo limo-loésico mediante la incorporación de áridos reciclados puede interpretarse como una forma de mejoramiento mecánico y granulométrico, ya que su efecto principal no se basa en reacciones químicas, sino en la modificación de la distribución de tamaños de partículas, la estructura interna del material y sus condiciones de compactación. En este sentido, Eguía y Feryala (2025) señalan que los áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición pueden emplearse en técnicas de mejoramiento de suelos, ya sea mediante estabilización mecánica o química, con el objetivo de modificar propiedades geotécnicas deficientes del suelo natural. Según los autores, esta incorporación permite incrementar la resistencia al corte, disminuir la deformabilidad y mejorar las

condiciones de drenaje, obteniéndose una base más estable y durable para obras de infraestructura.

Aplicado al caso del suelo limo-loésico, este tipo de mejoramiento resulta de interés debido a la elevada proporción de finos y a la sensibilidad del material frente a la humedad. La incorporación de una fracción más gruesa, como el árido reciclado, puede contribuir a conformar un esqueleto granular más trabado, reduciendo la predominancia de la fracción limosa y mejorando el comportamiento del conjunto frente a la compactación y a la transmisión de esfuerzos.

Además, el suelo limo-loésico también tiene beneficios sobre el árido reciclado ya que puede contribuir en reducir la fricción entre partículas gruesas y favorecer el efecto filler, incrementando el contacto entre árido y pasta cementicia. En particular, dentro de mezclas compuestas por áridos reciclados, caracterizados por su textura rugosa y elevada absorción, la presencia de dicho material fino natural puede modificar la interfaz entre el árido y los demás componentes, mejorando la trabajabilidad en estado fresco.

De este modo, el uso combinado de materiales finos naturales y áridos reciclados se presenta como una alternativa de interés técnico, económico y ambiental para el desarrollo de soluciones sostenibles en el ámbito vial y geotécnico.

2.3. Uso combinado de áridos reciclados y finos naturales

En las últimas décadas, se ha estudiado ampliamente la incorporación de AR en matrices cementicias como una estrategia y alternativa sustentable para valorizar los residuos de construcción y demolición. Su implementación conlleva desafíos relacionados a su elevada absorción, textura angular y presencia de mortero adherido, factores que afectan la trabajabilidad y la relación agua/cemento efectiva. Por esta razón, la incorporación balanceada de fracciones finas naturales surge como una alternativa potencial para modificar la microestructura del sistema y mejorar su comportamiento en estado fresco y endurecido, al intervenir en la distribución granular, en la continuidad de la matriz y en el recubrimiento del ligante.

2.3.1. Antecedentes académicos

En principio, se buscó que el procedimiento estuviese encaminado a partir de los criterios técnicos consolidados por bibliografías académicas y documentación científica y técnica relativas al uso de áridos reciclados en hormigón, con el foco puesto en lograr compatibilizar las propiedades del AR y del ML, cumpliendo con los requisitos de la normativa nacional referidos a los adoquines de hormigón (IRAM 11.656).

Como se ha mencionado anteriormente, el árido reciclado es un material que cuenta con mayor absorción y porosidad debido al mortero adherido en su composición, haciendo que sea necesario el control de la relación agua/cemento (A/C) y de la humedad previa del material. Debido a esto, se recomienda la prehidratación del árido reciclado, hasta la condición

aproximada de saturada superficie seca (SSS), evitando así la variación en la trabajabilidad y, en consecuencia, a la resistencia mecánica final (Silva et al., 2014; Evangelista & de Brito, 2007).

En el caso particular del árido reciclado fino (0–6 mm) empleado en este trabajo de investigación, se determinó una absorción del 4,65%, una densidad relativa real de 2,50 [g/cm³] y una densidad aparente en condición S.S.S. de 2,24 [g/cm³], valores que evidencian una mayor porosidad interna respecto de áridos naturales convencionales. Asimismo, su densidad a granel, comprendida entre 1254,5 y 1300 [kg/m³], confirma un peso unitario inferior, asociado a su estructura interna más abierta. Estas características físicas, evidencian que parte del agua de amasado será absorbida inicialmente por el árido reciclado durante el inicio del mezclado, reduciendo el agua efectiva disponible para la hidratación del cemento y confirmando la necesidad de una hidratación previa del AR hasta una condición SSS.

Desde la granulometría, el árido reciclado fino tiene un módulo de finura de 4,09 y un contenido de material pasante tamiz N°200 del 3,3%, clasificándose como A-3 (AASHTO) y SC (SUCS), es decir que se trata de un material predominantemente granular y no plástico. Por otro lado, el suelo limo-loésico empleado (ML) se clasifica como A-4 (AASHTO) y ML (SUCS), con 69 % de limo, 25% de arcilla y 94,3% de material pasante tamiz N°200, presentando límite líquido de 25,1% e índice de plasticidad de 2,8%. La diferencia granulométrica significativa y de plasticidad entre ambos materiales establece desde el análisis teórico que la proporción relativa ML:AR condiciona la estructura interna del sistema y su sensibilidad hídrica.

En lo referido a los resultados obtenidos durante los ensayos Proctor estándar, el ML contiene una humedad óptima $\omega_{opt} = 19\%$ y una densidad seca máxima $\gamma_{d_{max}} = 1,59$ [g/cm³], mientras que el AR presenta $\omega_{opt} = 16,5\%$ y $\gamma_{d_{max}} = 1,60$ [g/cm³]. Con esto, se infiere que para compactaciones similares el material limoso requiere mayor contenido de agua, lo cual debe considerarse al definir el contenido total de agua de la mezcla.

Asimismo, el ML presenta potencial de colapso medio-alto ($\epsilon_v = 3,53\%$), mientras que el AR exhibe bajo potencial de colapso ($\epsilon_v = 0,2\%$), reforzando la necesidad de controlar la estabilidad volumétrica cuando predomina la fracción fina. A medida que el adoquín presenta mayor proporción de limo, este presentará más complicaciones en su resistencia mecánica.

2.3.2. Antecedentes industriales

Desde el punto de vista industrial, para la fabricación de adoquines se busca conseguir una mezcla de hormigón con consistencia seca (en inglés referido como “dry mix” o “zero slump”) compactados a partir de vibroprensado, método que permite una producción rápida de piezas de alta densificación, baja porosidad y fácil desmolde. Además, el vibrocompactado tiene la ventaja de proporcionarle al elemento de estabilidad dimensional por la energía de compactación, logrando altas resistencias con cantidades mínimas de agua.

Adicionalmente, se consultaron los manuales técnicos propios del Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) y de la Asociación Argentina del Bloque de Hormigón (AABH), los cuales cuentan con parámetros operativos para la ejecución de los adoquines y del sistema completo del pavimento semi-flexible conformado por el conjunto adoquín–cama de asiento–arena de sello. Puntualmente, en cuanto a los adoquines, dichos manuales recomiendan adoptar dimensiones nominales de 200 mm x 100 mm (largo x ancho) y espesores típicos de 60 mm para tránsito liviano y 80 mm para tránsito pesado.

Por otro lado, manuales internacionales de organismos como el Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI) y la Concrete Masonry & Hardscapes Association (CMHA) establecen que dicha consistencia seca debe lograrse en base a una humedad controlada dentro de un rango de 4 a 8 % en masa, garantizando que no se generen efectos de exudación durante el fraguado ni deformaciones luego del desmolde. Dicho rango se basa en que el exceso de humedad genera defectos como los abombamientos superficiales (en inglés “bulging”), pérdida de aristas y aumento de absorción final, mientras que la falta de humedad dificulta la compactación y reduce la cohesión inicial de la pieza. A su vez, establece rangos de tolerancia respecto a las variaciones dimensionales de ± 3 mm en espesor y ± 2 mm en largo y ancho, con control sistemático de aristas y biseles. Esto se debe a que las variaciones geométricas tienen influencia directa sobre la uniformidad del intertrabado y la distribución de tensiones, una vez conformado el pavimento.

Resulta fundamental recalcar en que estos parámetros y especificaciones son propios de procesos de vibrocompactación industrial, método que cuenta con una elevada energía de compactación, a diferencia del caso en particular del método adoptado en el marco de esta investigación, donde el moldeo es manual. Por esta razón, estos criterios industriales sirven inicialmente como guía inicial para el procedimiento final adoptado.

2.4. Situación actual en Córdoba

En la ciudad de Córdoba, una parte significativa de los residuos de construcción y demolición (RCD) es dispuesta de manera inadecuada en basurales a cielo abierto o en sitios no habilitados por las autoridades municipales. Esta situación se vincula, en gran medida, con circuitos informales de recolección y transporte que dificultan el control efectivo del destino final de los residuos. No obstante, es importante señalar que el presente trabajo no aborda la totalidad de los RCD, sino en una fracción específica de estos, correspondiente a los residuos de base cementicia provenientes de sobrantes o restos de hormigón, a partir de los cuales se obtiene el árido reciclado fino utilizado en la elaboración de los adoquines colados.

Ya en 2016, el INTI Córdoba señalaba la existencia de más de 110 basurales a cielo abierto en la ciudad, alimentados principalmente por residuos de construcción, y advertía que esta situación era uno de los principales problemas ambientales urbanos. En ese mismo diagnóstico se indicaba que la disposición de RCD se realizaba tanto en sitios formales como informales, y se estimaba una magnitud del orden de 150.000 t/año destinadas a escombrera

municipal y 210.000 t/año al enterramiento sanitario, además de la existencia de canteras y múltiples sitios de disposición ilegal.

Una década después, la problemática continúa vigente. En 2025, un relevamiento periodístico realizado por La Voz informó que la ciudad de Córdoba contaba con más de 90 basurales y alrededor de 300 sitios de disposición ilegal si se consideraban tanto macro como microdepósitos. A su vez, durante 2026 la Municipalidad de Córdoba informó sucesivos operativos de limpieza en basurales ilegales, retirando 2.192 toneladas de residuos en 78 basurales durante enero y 4.194 toneladas en distintos puntos de la ciudad durante marzo. Estos datos muestran que, si bien existen acciones de remediación y limpieza, la generación de focos de disposición informal sigue siendo un problema activo en el área urbana.

Las escombreras existentes en Córdoba son municipales, de dominio público y no todas se encuentran en funcionamiento. Esta situación se debe en un principio a que los RCD, al estar formados principalmente por materiales inertes, generan una elevada ocupación volumétrica, lo que genera una rápida saturación de la capacidad disponible en los sitios de disposición final.

Todos aquellos residuos, que se someten a una disposición legal, se trasladan a la escombrera situada en Chacra de la Merced, ubicada en la zona este de la ciudad o bien en la escombrera situada en Coronel Olmedo, ubicada en la zona sur de la misma.

2.4.1. Gestión y disposición final

Para obtener una mejor representación territorial sobre la gestión y disposición de residuos en la provincia de Córdoba, a continuación, se puede observar un mapa (Ilustración 4), donde se pueden distinguir todos los lugares donde estos se encuentran. Este mapa permite visualizar la distribución en el espacio de distintas categorías de sitios de disposición final:

- **Puntos verdes:** representan centros de transferencia de residuos en la ciudad, que son fundamentales dentro de la gestión de residuos.
- **Puntos rojos:** representan basurales a cielo abierto, donde se puede observar que están ubicados en distintos sectores de la ciudad de Córdoba. Si bien hay un número elevado de sitios de disposición ilegal, en este mapa solo se incluyen a los que presentan un volumen significativo de residuos. Cabe destacar que en todos los basurales se encuentra un común denominador en relación a los escombros. Esto es que, en los basurales la proporción de residuos de construcción o demolición es ínfima, identificándose residuos sólidos urbanos y basura.
- **Puntos amarillos:** identifican aquellos centros de disposición final que se encuentran habilitados para el vertido de RCD.

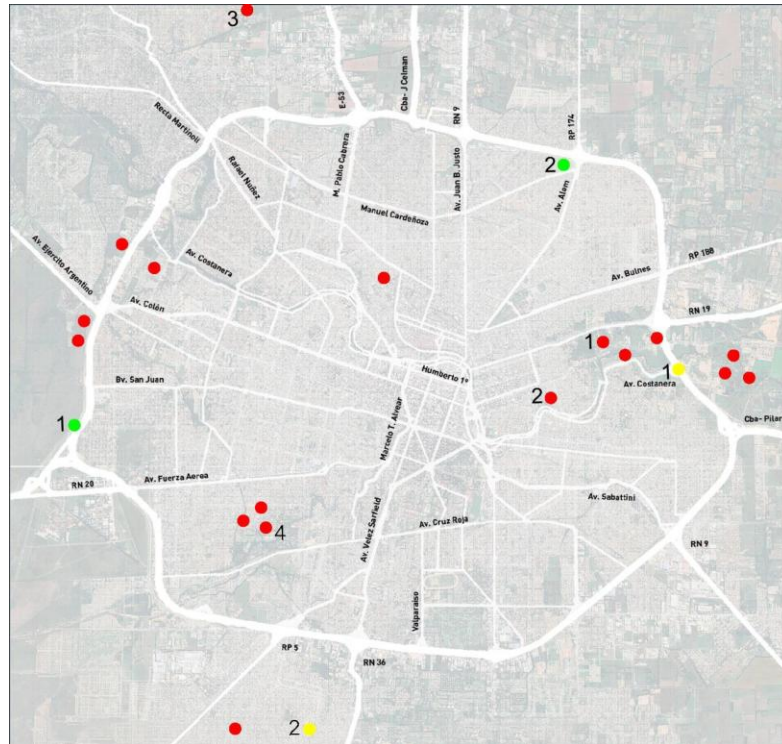


Ilustración 4: Gestión y disposición final.

En la Ilustración 4, se muestra la ubicación geográfica y la distribución de los mismos dentro de la ciudad, lo cual es fundamental para visualizar la infraestructura existente y áreas de potenciales problemas para la disposición adecuada.

2.4.2. Estimación de disposición de RCD en Córdoba

Con respecto a la estimación de los residuos de construcción y demolición en la ciudad de Córdoba, Eguía y Feryala (2025) utilizaron dos fuentes principales: por un lado, la disposición realizada por las empresas encargadas de realizar tareas de demolición y, por otro lado, la gestionada por la Cámara de Volqueteros de Córdoba.

A partir de la información revelada por dichos autores, se estimó que las empresas demolidoras generan aproximadamente 1.800 [m³] mensuales de RCD, equivalentes a 21.600 [m³] anuales. Por su parte, la Cámara de Volqueteros reporta un volumen promedio considerablemente mayor, del orden de 8.000 m³ mensuales, lo que representa aproximadamente 96.000 [m³] anuales. Considerando una densidad promedio de 1,5 [t/m³], el volumen total estimado asciende a 117.600 [m³/año], equivalentes a 176.400 toneladas anuales.

Tabla 1: Estimación de Volúmenes de RCD en Córdoba del 2024 (Eguía- Feryala, 2025)

Organismo	Volumen Mensual [m3]	Volumen Anual [m3]	Peso Total Anual [Ton]	Densidad Promedio [kg/m3]
Empresas Demolidoras	1800	21600	32400	1,5
Empresas Volqueteras	8000	96000	144000	1,5
Σ	9800	117600	176400	

Estos resultados muestran que la mayor parte del volumen estimado de RCD en la ciudad de Córdoba proviene de los circuitos gestionados por las empresas volqueteras, superando ampliamente al generado por las empresas de demolición.

Tomando como base esta estimación del año 2024, puede adoptarse para 2026 una proyección conservadora del mismo orden de magnitud, de aproximadamente 117.600 m³/año de RCD, equivalentes a 176.400 t/año, entendiendo que se trata de una aproximación sujeta a variaciones en función del nivel de actividad de la industria de la construcción. En consecuencia, los datos relevados permiten dimensionar la magnitud del flujo de residuos generado en el ámbito local y refuerzan la necesidad de desarrollar estrategias de reciclaje, reutilización y valorización de estos materiales.



CAPÍTULO 3

METODOLOGÍA Y MARCO NORMATIVO

3. METODOLOGÍA Y MARCO NORMATIVO

El desarrollo del presente capítulo se basa en los lineamientos teóricos expuestos en el capítulo anterior, donde se realizó un estudio acerca de todos los antecedentes relacionados con el uso de adoquines, la incorporación de áridos reciclados y suelos finos loésicos, los cuales son característicos de la ciudad de Córdoba. A partir de dicho marco de referencia, se define la metodología adoptada para el trabajo, así como el encuadre normativo utilizado para la caracterización de materiales, la elaboración de mezclas y la evaluación del producto final. Estos lineamientos constituyen la base operativa para el estudio experimental que se desarrolla en los capítulos posteriores.

3.1 Enfoque metodológico

En el enfoque metodológico del presente trabajo se plantea una secuencia de etapas para su realización, donde a partir de los resultados obtenidos, permitirá definir distintas aplicaciones para las dosificaciones propuestas y determinar la más óptima para su uso.

En la Ilustración 5, se puede observar el enfoque metodológico para llevar a cabo el trabajo, con sus distintas etapas.

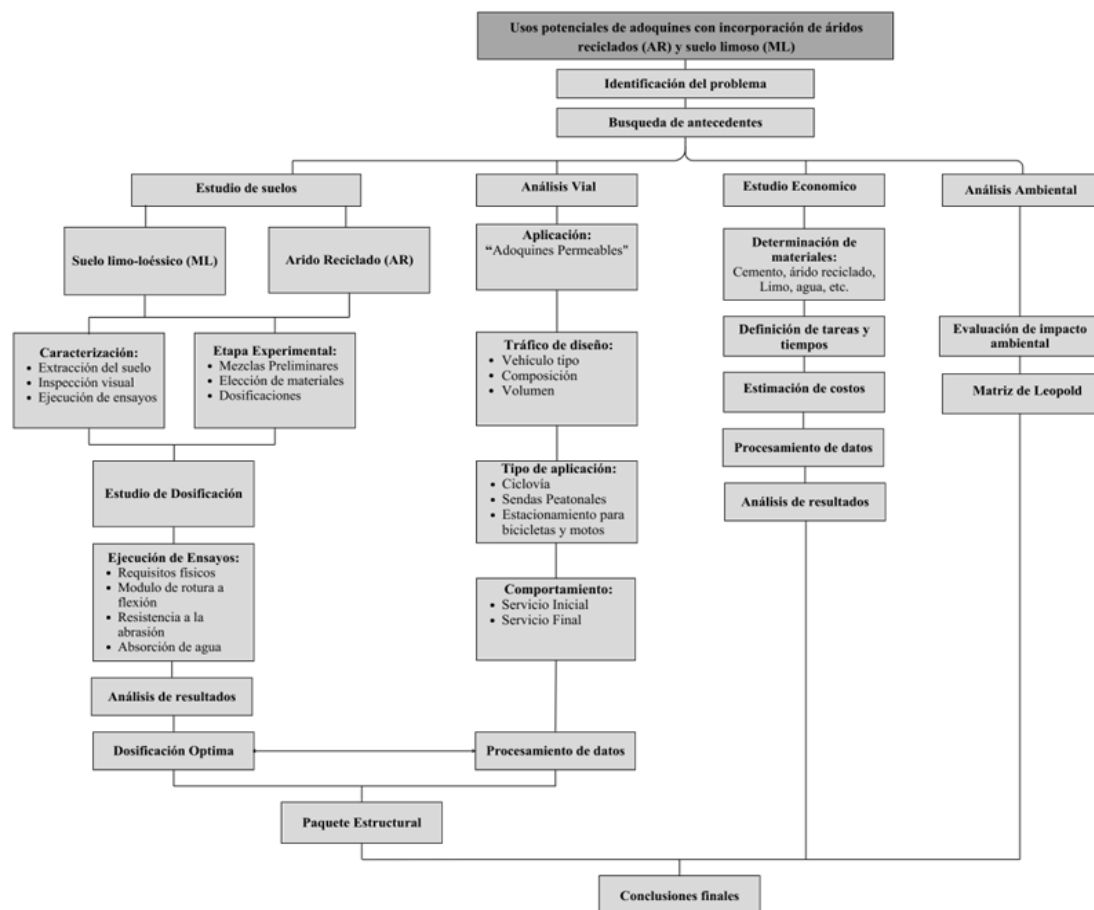


Ilustración 5: Esquema metodológico del trabajo

Para la ejecución del trabajo experimental, se utilizaron las instalaciones del laboratorio de suelos de la facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba donde se llevaron a cabo tareas de caracterización de materiales, elaboración de mezclas de distintas dosificaciones y ensayos sobre las piezas conformadas. A su vez, el trabajo de investigación fue acompañado por reuniones semanales de seguimiento y consulta con la dirección y los tutores del trabajo, para realizar un control de avance del cronograma de actividades establecido, discutir los resultados obtenidos a medida que se van desarrollando los distintos ensayos y validar las decisiones metodológicas adoptadas.

Asimismo, este trabajo tiene un carácter interdisciplinario, al integrar diversos contenidos, ramas y herramientas propias de la Ingeniería Civil. A continuación, sintetizan en la Ilustración 6 las distintas asignaturas vinculadas y con incidencia en el presente trabajo.

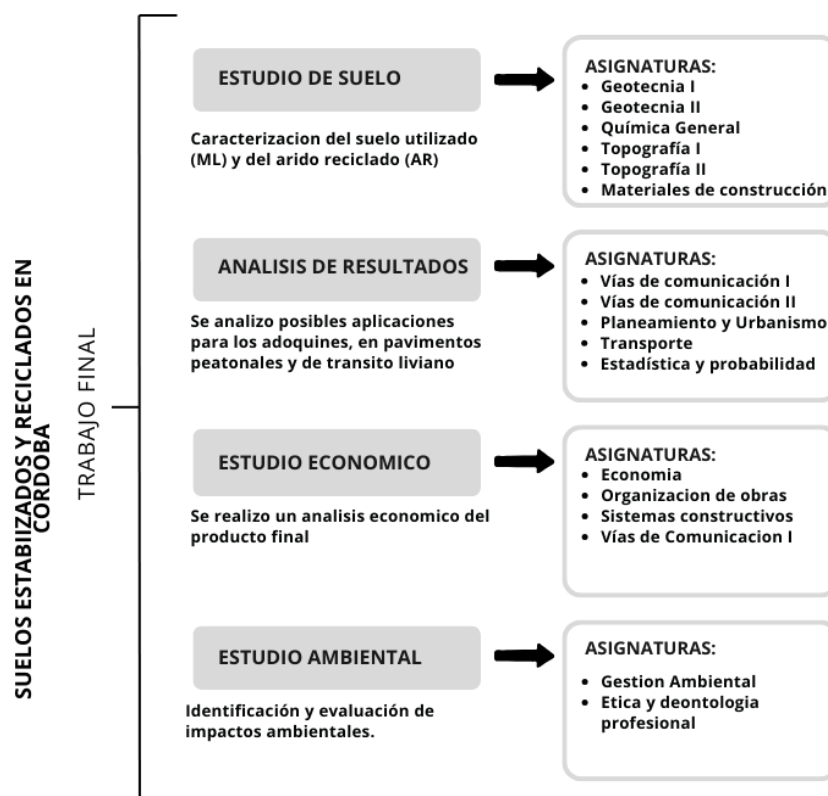


Ilustración 6: Asignaturas Involucradas

3.2. Marco normativo

La validación de la producción de adoquines de árido reciclado requiere desarrollarse dentro de un marco normativo que abarque los requisitos técnicos de desempeño y las regulaciones vinculadas al uso de materiales reciclados. Debido a esto, el presente trabajo se enmarca en normativas internacionales y nacionales que regulan la fabricación de estos elementos estructurales y la incorporación de áridos reciclados en hormigón, permitiendo contextualizar los resultados obtenidos desde una perspectiva técnica y ambiental.

3.2.1. Normativa internacional sobre adoquines de hormigón

En Europa, la fabricación y control de calidad de adoquines de hormigón se encuentra regulada por la norma EN 1338:2003 + AC:2006: “*Concrete paving blocks – Requirements and test methods*”. Esta norma constituye el marco técnico de referencia en diversos países, como Alemania y el Reino Unido, estableciendo requisitos mínimos de desempeño para adoquines destinados a pavimentos intertrabados.

La EN 1338 regula aspectos tales como:

- Resistencia característica a flexotracción
- Resistencia a la abrasión superficial
- Resistencia al hielo–deshielo con sales de deshielo
- Absorción de agua
- Tolerancias dimensionales
- Evaluación de conformidad y marcado CE

Es decir, la normativa europea enfatiza el módulo de rotura a flexión, considerando que el comportamiento estructural del adoquín intertrabado se encuentra gobernado principalmente por sollicitaciones flexionales y no la resistencia a compresión. Además, incorpora criterios estrictos de durabilidad frente a condiciones ambientales adversas, como en climas con ciclos de congelamiento y deshielo, aspecto que no siempre se encuentra contemplado en normativas latinoamericanas. Por esto, el sistema europeo presenta un enfoque integral que combina control de producción en fábrica, ensayos iniciales de tipo y certificación obligatoria, para lograr garantizar la uniformidad en el desempeño del producto prefabricado.

3.2.2. Normativa nacional sobre adoquines de hormigón

En Argentina, la fabricación y control de calidad de adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados se rige en base a la norma IRAM 11656: “*Adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados – Requisitos y métodos de ensayo*”. Con esto, la norma busca definir los requisitos mínimos de desempeño requeridos para garantizar aptitud estructural y funcional del adoquín, además de los métodos de ensayo para su verificación. Entre los aspectos regulados se incluyen:

- Resistencia característica a compresión.
- Absorción de agua.
- Resistencia al desgaste superficial.
- Tolerancias dimensionales.
- Clasificación según exigencias de servicio.

Adicionalmente, se incluyen los procedimientos de muestreo y los criterios de aceptación, permitiendo evaluar con objetividad el cumplimiento de los requisitos técnicos.

En relación con presente trabajo de fin de grado, enmarcado en el ámbito de proyecto de investigación, la IRAM 11656 constituye el marco normativo de referencia para la

validación experimental de los adoquines elaborados con árido reciclado y limo loésico y la comparación de los resultados obtenidos. Consecuentemente, la interpretación del desempeño mecánico y físico de las mezclas desarrolladas no se realiza de manera aislada, sino en función de los umbrales normativos vigentes, asegurando la pertinencia técnica del estudio dentro del contexto constructivo argentino.

A fin de visualizar las principales diferencias entre los marcos regulatorios analizados referidos a adoquines de hormigón, y que se tomarán como referencia, se presenta la siguiente tabla comparativa:

Tabla 2: Comparación de normativa internacional y nacional sobre adoquines

Región	Europa	Argentina
Norma	EN 1338:2003	IRAM 11656
Ensayo principal de resistencia	Resistencia a flexotracción (módulo de rotura) mediante carga centrada sobre probeta en ensayo de tres puntos de apoyo	Resistencia a flexotracción (módulo de rotura) mediante carga centrada sobre probeta en ensayo de tres puntos de apoyo
Resistencia exigida	<ul style="list-style-type: none">• Valor individual $\geq 3,6$ MPa• Valor promedio $\geq 4,5$ MPa	<ul style="list-style-type: none">• Valor individual $\geq 3,4$ MPa• Valor promedio $\geq 4,2$ MPa
Absorción de agua	Control indirecto mediante requisitos de durabilidad y ensayo de hielo-deshielo	Absorción promedio $\leq 5\%$ (límite explícito de aceptación como indicador de porosidad y durabilidad)
Resistencia al desgaste	Clasificación por índice de abrasión, mediante disco ancho tipo Böme, con valores límites de longitud de huella (lh) según categoría: <ul style="list-style-type: none">• Clase 1: adoquín de baja resistencia, sin requisitos.• Clase 2: adoquín de resistencia media, $lh \leq 26$ mm.• Clase 3: adoquín de alta resistencia, $lh \leq 23$ mm.• Clase 4: adoquín de máxima resistencia, $lh 20$ mm.	Mediante método IRAM específico (ensayo con disco) con un valor promedio entre tres probetas de $lh \leq 23$ mm.
Durabilidad frente a hielo-deshielo	Pérdida de masa típica ≤ 1 kg/m ²	No se exige debido a condiciones climáticas predominantes del país
Control de producción y certificación	Exige marcado CE, control de producción en fábrica (FPC) y evaluación de conformidad	Control por ensayos de aceptación por lote, sin sistema de certificación industrial obligatorio.

3.2.3. Regulaciones sobre uso de áridos reciclados

Diversos países han progresado en regular y perfeccionar la incorporación de áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición (RCD), tanto en hormigones estructurales como en no estructurales, estableciendo límites de sustitución y requisitos de calidad específicos.

- **España:** el Código Estructural (Real Decreto 470/2021) permite el uso de áridos reciclados de hormigón en determinadas aplicaciones, estableciendo límites de reemplazo del árido grueso, restricciones según clase de exposición ambiental y requisitos de caracterización previa. La sustitución admitida es de hasta un 20% del árido grueso en hormigones estructurales de determinadas clases resistentes. Según esta norma, los áridos aptos para ser utilizados en la fabricación de elementos de hormigón están compuestos como se describe en la Tabla 3:

Tabla 3: Composición de áridos reciclados aptos para elaboración de hormigón según normativa española

Nomenclatura	Tipo de Agregado	Composición
ARH	Áridos reciclados de Hormigón	<ul style="list-style-type: none">● Hormigón o piedra natural $\geq 90\%$● Material cerámico $\leq 10\%$● Asfalto $\leq 5\%$● Material adicional $\leq 1\%$

(Guía Española de Áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD) - GERD, 2008)

- **Reino Unido:** las normas BS EN 12620 (agregados de hormigón) y BS EN 206-1 (especificaciones, desempeño, producción y conformidad del hormigón) contemplan la incorporación de áridos reciclados procedentes de RCD, estableciendo requisitos de calidad en relación con el origen del material, el contenido de impurezas, absorción y granulometría. Con esto, admite porcentajes de reemplazo de hasta un 25% del árido grueso, cumpliendo con las exigencias de resistencia y durabilidad del hormigón.
- **Alemania:** las normas DIN 4226-100/102 clasifican los áridos reciclados según su composición y contenido de impurezas, permitiendo sustituciones de hasta un 30% en hormigones con resistencias características del orden de 25 MPa, bajo condiciones de control técnico específico. Dicho sistema es más riguroso en términos de clasificación y control ambiental. De acuerdo con esta norma, los tipos de agregados reciclados que se pueden utilizar para elaborar hormigones destinados a un uso estructural y/o no estructural se pueden distinguir como en la Tabla 4:

Tabla 4: Composición de áridos reciclados de hormigón para uso estructural y no estructural según normativa alemana

Nomenclatura	Tipo de Agregado	Composición	Uso
Tipo 1	Residuos de hormigón	<ul style="list-style-type: none"> ● Hormigón $\geq 90\%$ ● Mampostería $\leq 10\%$ ● Asfalto $\leq 1\%$ ● Contaminantes $\leq 1\%$ 	Estructural
Tipo 2	Residuos de hormigón y mampostería	<ul style="list-style-type: none"> ● Hormigón $\geq 70\%$ ● Mampostería $\leq 30\%$ ● Asfalto $\leq 1\%$ ● Contaminantes $\leq 1\%$ 	
Tipo 3	Residuos de mampostería	<ul style="list-style-type: none"> ● Mampostería $\leq 80\%$ ● Asfalto $\leq 1\%$ ● Contaminantes $\leq 1\%$ 	No estructural
Tipo 4	Residuos mixtos	<ul style="list-style-type: none"> ● Hormigón / mampostería $\geq 80\%$ ● Materiales adicionales $\leq 20\%$ ● Asfalto $\leq 20\%$ ● Material fino $\leq 4\%$ ● Contaminantes $\leq 1\%$ 	

(DIN-4226-1000/102:2017)

- **Brasil:** la norma ABNT NBR 15116 regula el uso de agregados reciclados de RCD principalmente en hormigones para uso vial sin función estructural, tales como pavimentos y rellenos, estableciendo límites de absorción y control granulométrico. La composición de la Categoría ARC, destinada a para bases y subbases en vías no pavimentadas contemplan la siguiente composición:

Tabla 5: Composición de áridos reciclados para bases y subbases en vías no pavimentadas según normativa brasileña

Nomenclatura	Tipo de Agregado	Composición
ARC	Residuos de hormigón	<ul style="list-style-type: none"> ● Hormigón o piedra natural $\geq 90\%$ ● Material fino $\leq 10\%$ ● Contaminantes $\leq 3\%$ ● Arcilla $\leq 2\%$ ● Sulfatos $\leq 2\%$

(ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas)

- **Colombia:** los lineamientos técnicos del Instituto de Desarrollo Urbano (IDU) permiten el uso de áridos reciclados en aplicaciones viales y no estructurales, promoviendo su incorporación bajo criterios de desempeño y categorizados como se muestra en la Tabla 6:

Tabla 6: Composición de áridos reciclados para uso vial no estructural según normativa colombiana

Nomenclatura	Tipo de Agregado	Composición	Uso
AR _{BG}	Áridos reciclados mixtos con preferencia de hormigón	<ul style="list-style-type: none"> • Hormigón o piedra natural $\geq 65\%$ • Mampostería $\leq 35\%$ • Vidrio $\leq 1\%$ • Material adicional $\leq 1\%$ 	Bases y subbases
AR _{SBG}	Áridos reciclados mixtos	<ul style="list-style-type: none"> • Hormigón o piedra natural $\geq 50\%$ • Mampostería $\leq 50\%$ • Material bituminoso $\leq 5\%$ • Vidrio $\leq 1\%$ • Material adicional $\leq 1\%$ 	
AR _{SBG PEA}	Áridos reciclados mixtos con material bituminoso	<ul style="list-style-type: none"> • Hormigón o piedra natural $\geq 35\%$ • Mampostería $\leq 65\%$ • Material bituminoso $\leq 30\%$ • Vidrio $\leq 1\%$ • Material adicional $\leq 1\%$ 	Subbases peatonales

(IDU, 2018)

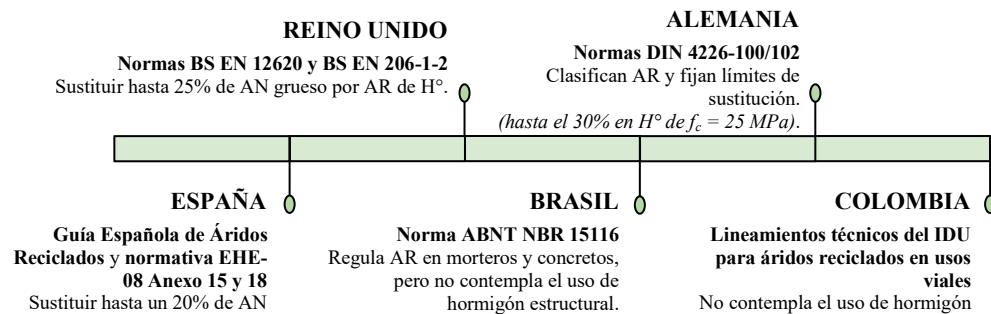


Ilustración 7: Comparación de normativa internacional sobre el uso de áridos reciclados (Eguía-Feryala, 2025)

Como se puede observar, numerosos países buscan garantizar el desempeño mecánico del hormigón y fomentar modelos de economía circular y reducción de emisiones. Los cinco países mencionados han incorporado de manera explícita el uso de áridos reciclados dentro de sus marcos regulatorios, integrando criterios de desempeño y sostenibilidad. Por el contrario, en Argentina, la normativa vigente para adoquines se centra exclusivamente en el control del comportamiento mecánico del producto final, sin contemplar lineamientos específicos para la incorporación de materiales reciclados. Esto evidencia una oportunidad de desarrollo normativo futuro, considerando el potencial de reducción de emisiones, ahorro de recursos naturales y disminución de residuos en el país, promoviendo la implementación de áridos reciclados en pavimentos prefabricados.

3.2.4. Regulación regional sobre residuos de construcción y demolición

La presente investigación se desarrolla en un contexto normativo que, si bien no regula de manera específica la reutilización de áridos reciclados en adoquines de hormigón, sí

establece lineamientos generales para la protección ambiental, la gestión adecuada de residuos y la responsabilidad de los generadores. En este sentido, el encuadre regional aplicable puede analizarse en tres escalas: nacional, provincial y municipal.

- **Nivel Nacional:** la Constitución Nacional, en su Artículo 41, reconoce el derecho de todos los habitantes a un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano, mientras que la Ley N° 25.675, Ley General del Ambiente, establece los presupuestos mínimos de protección ambiental. Estas disposiciones constituyen el marco general dentro del cual se inscriben las políticas de gestión y valorización de residuos, incluyendo los residuos de construcción y demolición.
- **Nivel Provincial:** la Ley N° 10.208 de Política Ambiental Provincial regula la política ambiental de la provincia de Córdoba y define instrumentos de gestión orientados a la preservación, protección y mejoramiento del ambiente. Asimismo, la Ley N° 10.830 actualiza los Anexos I y II de dicha norma, manteniendo su vigencia como referencia principal en materia de evaluación y gestión ambiental provincial.
- **Nivel Municipal:** la ciudad de Córdoba cuenta con normativa vinculada a la protección ambiental y a la gestión de residuos. Entre las disposiciones más relevantes se encuentran la Ordenanza N° 7.104, Reglamento de Protección Ambiental, que prohíbe la contaminación o degradación de los suelos, del agua, de la flora y de la fauna; la Ordenanza N° 9.612/97, junto con la Ordenanza N° 12.734/17 y el Decreto Reglamentario N° 144-E-99, que regulan la gestión de residuos, desechos o desperdicios y de residuos no convencionales; y la Ordenanza N° 12.648, correspondiente al marco regulatorio para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos.

En este contexto, la reutilización de RCD como materia prima secundaria en adoquines de hormigón puede interpretarse como una alternativa alineada con los principios generales de protección ambiental, uso eficiente de recursos y reducción del volumen destinado a disposición final.

En conjunto, las normas y referencias regulatorias analizadas constituyen un encuadre metodológico y normativo adoptado para el análisis y elección de materiales constituyentes de los adoquines colados. En los capítulos siguientes se presentan las características y propiedades de dichos materiales, conformando una etapa fundamental y decisiva en el comportamiento de las mezclas desarrolladas y del producto final, es decir, el adoquín.



CAPÍTULO 4

MATERIALES DE LOS ADOQUINES

4. MATERIALES DE LOS ADOQUINES

La selección de los materiales para la elaboración de los adoquines responde no sólo al marco metodológico y normativo planteado en el capítulo anterior, sino que también a criterios técnicos y a la necesidad de aprovechar recursos locales, de tal manera que se obtengan beneficios económicos y ambientales, además de estructurales. Es por esto que la implementación de áridos reciclados provenientes de RCD constituye un enfoque central de esta investigación, orientado a la valorización de subproductos y a la reducción del impacto ambiental. Asimismo, se buscó incorporar como fracción fina al suelo loésico colapsable propio de la región de Córdoba, con el objetivo de disminuir la cantidad de cemento portland, logrando la cohesión y el desarrollo de las propiedades mecánicas de los adoquines con menores costos. Por último, se implementó la utilización de un desmoldante para facilitar el proceso de moldeo y extracción de las piezas.

4.1. Suelo limo-loésico

El suelo empleado para la conformación de los adoquines corresponde a un limo loésico colapsable de color pardo-rojizo, extraído del Campus de la Universidad Católica de Córdoba, ubicado en la zona sureste de la ciudad (Ilustración 8). El material se obtuvo de depósitos que fueron extraídos de entre 0,10 m y 2,00 m desde el nivel natural del terreno.

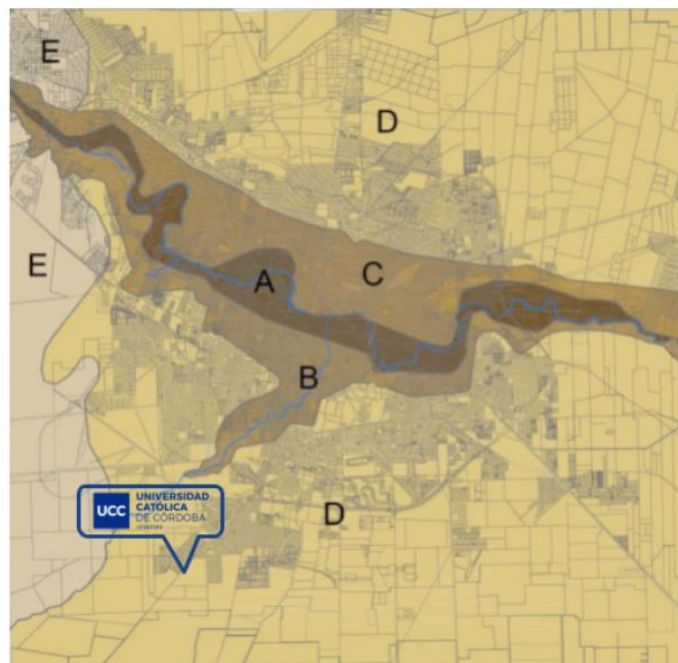


Ilustración 8: Ubicación del campus de la Universidad Católica de Córdoba, lugar de donde se extrajo el suelo limo loésico

Es decir que este suelo forma parte de la cobertura superficial de la región y tiene un origen predominantemente eólico, con una estratigrafía compuesta principalmente por:

- Manto orgánico: de un grosor de 5 a 10 cm. Se descarta debido a que su presencia puede comprometer la estabilidad y calidad de los adoquines.

- Capa superficial: depósitos de loess y limos colapsables, con espesores que varían dependiendo de la zona en donde se sitúan, siendo en el caso de la locación de la Universidad oscilantes entre 0,10 m y 2,00 m. Estos materiales finos se caracterizan por su baja capacidad portante en estado natural y su comportamiento colapsable al saturarse.
- Estratos inferiores: suelos arenosos o limo-arenosos cementados a mayores profundidades, que cuentan con una capacidad portante considerablemente mayor.

En cuanto a la granulometría del suelo utilizado, este se compone con una proporción predominante de partículas finas, siendo un 94,3% del material pasante del tamiz N°200 (75 [µm]), según se determinó en análisis previos por vía húmeda. De acuerdo con los resultados obtenidos, la distribución de dicho suelo está compuesta por 6% arena, 69% limo y 25% arcilla. Mediante los diámetros característicos se logró evidenciar que se trata de un suelo bien definido dentro de la fracción fina y con bajo grado de uniformidad.

Por otro lado, en base a los ensayos endotérmicos que se le realizaron bajo condición saturada se identificaron presiones de fluencia que confirman la presencia de características colapsables en los primeros metros de profundidad. Sin embargo, la elevada proporción de fracción arcillosa (25%) en los niveles superficiales tiende a mitigar el colapso. Por esta razón, se caracteriza como un suelo metaestable con riesgo de pérdida de estructura al ser humedecidos.

Asimismo, el limo colapsable tiene un límite líquido (ω_{LL}) de 25,1% y un límite plástico (ω_{LP}) de 22,2%, por lo que su índice de plasticidad (IP) es de 2,8%. De acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), el material corresponde a un limo inorgánico de baja plasticidad (ML), y de acuerdo con el sistema AASHTO, pertenece al grupo A-4, siendo considerado de calidad regular a mala como subrasante vial.

Su composición química se basa en un bajo contenido de carbonato de calcio, mientras que la conductividad eléctrica medida en relación suelo: agua de 1:2,5 alcanza los 0,6 [mS/cm], con un pH de 9,29, correspondiente a un comportamiento alcalino y salinidad baja. Su contenido de sales solubles es inferior al 0,1%, resultando despreciable.

Mediante la simple observación del suelo, este presenta una coloración pardo-oscura a levemente rojiza, dependiente de la humedad con la que cuente y de la profundidad de la que se extrajo. Teniendo en consideración que se encontraba en una zona con un nivel freático entre los 30 m y 50 m desde el nivel natural del terreno, se evidencia que el suelo se encuentra bajo condiciones no saturadas. Por otra parte, el suelo natural presenta una baja capacidad portante y un hinchamiento de 21,80%. En conjunto, estas características permiten identificarlo como un suelo fino, de baja plasticidad, comportamiento alcalino y aptitud deficiente como

subrasante natural, lo que justifica su análisis dentro de estrategias de estabilización y aprovechamiento en mezclas con árido reciclado y cemento.

Tabla 7: Resumen de características del suelo limo-loésico empleado

Origen		Campus UCC, Córdoba
Profundidad de extracción		0,10 - 2,00 m
Coloración		Pardo oscuro a rojizo
Contenido de humedad		2,4%
Pasante tamiz N°200		94,3%
Clasificación	SUCS	ML
	AASHTO	A-4
Límites de Atterberg	Límite líquido (LL)	25,1%
	Límite plástico (LP)	22,2%
Índice de plasticidad (IP)		2,8%
Proporción de componentes	Arena	6%
	Limo	69%
	Arcilla	25%
Diámetros característicos	D10	≤ 0,002 mm
Sales solubles		≤ 0,1%
Carbonato de Calcio (CaCO₃)		Bajo
pH		9,29
Compactación	Humedad óptima (ω_{opt})	19%
	Densidad máxima ($\gamma_{d,max}$)	1,59 g/cm ³
Hinchamiento		21,80%

4.2. Árido Reciclado

Los áridos reciclados empleados para la conformación de los adoquines provienen de la trituración y procesamiento de residuos de hormigón, los cuales constituyen una fracción específica dentro de los residuos de construcción y demolición (RCD), es decir que se adoptan sobrantes y restos de base cementicia aptos para una valorización como agregado reciclado fino. Su implementación se basa en buscar la incorporación de materiales reciclados en elementos que compongan infraestructuras urbanas, en este caso preciso adoquines de hormigón, con los objetivos de reducir la explotación de recursos naturales, reduciendo el impacto ambiental, disminuyendo los costos y, finalmente, promoviendo una economía circular en el ámbito de la construcción.

En base a la caracterización realizada por Eguía y Feryala (2025), el árido reciclado empleado corresponde a la fracción fina 0–6 [mm], obtenida a partir de residuos de hormigón H-21 sometidos a procesos de selección, trituración y cribado. De acuerdo con su clasificación geotécnica, el material se encuadra como A-3 según AASHTO y SP según SUCS, lo que indica un predominio de fracción granular. Asimismo, presenta un 7,0% de material pasante por el tamiz N°200, con una composición aproximada de 80% de grava y arena, 5% de limo y 15% de arcilla, evidenciando una granulometría más gruesa que la del suelo limo-loésico utilizado en esta investigación.

En cuanto a sus propiedades físicas, el árido reciclado presentó un contenido de humedad de 7,70%, una humedad óptima de compactación de 16,5% y una densidad seca máxima de 1,6 [g/cm³], valores que indican una respuesta compatible con procesos de compactación, aunque condicionada por la porosidad propia del material reciclado. Además, el ensayo CBR arrojó un valor de 3,5%, superior al del suelo natural, mientras que el hinchamiento fue de 0,85%, significativamente menor que el observado en el limo-loésico. Esto indica que el árido reciclado posee un comportamiento mecánico y volumétrico más favorable que el suelo natural, aunque todavía limitado para aplicaciones estructurales sin estabilización.

Desde el punto de vista de la plasticidad, el material presentó un límite líquido de 35,8%, mientras que el límite plástico resultó no plástico (NP), por lo que el índice de plasticidad es igual a 0. Esta condición indica que, pese a la presencia de finos, el material no desarrolla plasticidad en el rango ensayado, lo que resulta consistente con su carácter predominantemente granular.

En relación con sus propiedades químicas, el árido reciclado presentó un contenido de sales solubles de 5,5%, una proporción de carbonato de calcio clasificada como muy alta y un pH de 11,46, lo que evidencia un comportamiento fuertemente alcalino. Estas características pueden asociarse a la presencia de mortero adherido y restos cementicios propios del origen del material reciclado. En conjunto, estos resultados muestran que el árido reciclado fino presenta un comportamiento distinto al del árido natural, no solo por su composición granulométrica, sino también por sus características físico-químicas, las cuales deben ser consideradas al momento de dosificar mezclas con suelo limo-loésico y cemento.

Tabla 8: Resumen de características del árido reciclado empleado

Origen	H-21	
Coloración	Gris claro	
Contenido de humedad	7,70%	
Pasante tamiz N°200	7,0%	
Clasificación	SUCS	SP
	AASHTO	A-3
Límites de Atterberg	Límite líquido (LL)	35,8%
	Límite plástico (LP)	-
Índice de plasticidad (IP)	0	
Proporción de componentes	Arena	80%
	Limo	5%
	Arcilla	15%
Diámetros característicos	D10	$\leq 0,002$ mm
Sales solubles	5,5%	
Carbonato de Calcio (CaCO₃)	Muy alto	
pH	11,46	
Compactación	Humedad óptima (ω_{opt})	16,5%
	Densidad máxima ($\gamma_{d,max}$)	1,6 g/cm ³
Hinchamiento	0,85%	

4.3. Cemento Portland

El cemento empleado en el presente trabajo corresponde a un cemento portland compuesto (CPC 40), el cual es desarrollado por Cementos Avellaneda S.A, el cual es obtenido por la molienda de clinker portland, rocas calcáreas de alta pureza, puzolanas artificiales, pequeñas cantidades de yeso y aditivos mejoradores de la calidad. Este cemento se halla destinado a aquellas aplicaciones en las que no es necesario un requisito especial.

A su vez el producto cumple con todos los requisitos establecidos por la norma IRAM 5000 para la categoría 40 y cuenta con las correspondientes certificaciones de calidad bajo la norma ISO 9001 y del INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial). Dentro de sus propiedades más relevantes se destaca su resistencia a la compresión, superando de gran manera los valores exigidos por la norma tanto a los 2 como a los 28 días de curado, así como

su correspondiente finura (por permeametría Blaine) y un tiempo de fraguado inicial de 170 minutos.

Por su adecuada composición, el cemento portland compuesto Avellaneda CPC40 permite elaborar mezclas más amigables con el medio ambiente, en virtud de las posibilidades de este cemento desde el punto de vista de la sostenibilidad:

- Menor cantidad de emisiones de CO₂ al ambiente
- Menor uso de combustibles fósiles,
- Mayor extensión de la vida útil de los recursos no renovables

4.4. Molde para adoquín rectangular

El molde para la fabricación de adoquines rectangulares Assaplast, es un instrumento utilizado para la obtención de unidades prefabricadas de hormigón, que tienen como objetivo la construcción de pavimentos vehiculares o peatonales. Este permite obtener elementos prismáticos rectangulares, los cuales formarán parte de la superficie que estará sometida a sollicitaciones de distinto tipo según su destino.

El molde tiene dimensiones nominales de 10[cm] de ancho, 20 [cm] de largo y 6 [cm] de espesor, como se puede ver en la Ilustración 9. Estas dimensiones forman parte de un formato utilizado en pavimentos intertrabados, donde el espesor de 6[cm], resulta conveniente en aquellas situaciones destinadas a tránsito peatonal y tránsito liviano. El molde muestra caras laterales rectas, las cuales favorecen la obtención de superficies planas y con aristas definidas, favoreciendo el comportamiento de los mismos frente a diversas sollicitaciones, donde a su vez la precisión en su geometría resulta de suma importancia para cumplir con todos los requisitos establecidos por la norma. Este molde, según la norma IRAM 11656, permite obtener adoquines del tipo 1, el cual tiene forma única, básicamente rectangular, denominado adoquín rectangular recto (holandés).

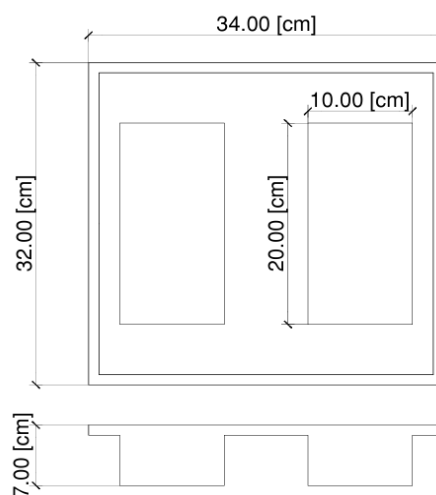


Ilustración 9: Dimensiones nominales del molde empleado

Este está fabricado en plástico de alta resistencia (ABS), el cual tiene como ventaja soportar todas las acciones que se producen durante el proceso de moldeo, como son los impactos, vibraciones y exposición a soluciones desmoldantes. Dentro de sus propiedades más importantes podemos destacar su alta resistencia mecánica, baja adherencia, resistencia a la humedad y resistencia al desgaste.

Además, el diseño y el peso reducido de este molde permiten su apilamiento vertical de forma segura, sin producir daños al mismo. Esto, facilita el transporte, el almacenamiento (reduciendo la superficie ocupada) y la organización en la producción, sin generar esfuerzos excesivos al ser apilados.

En la Ilustración 10, se puede observar el molde utilizado para llevar a cabo el proceso de elaboración de adoquines colados.



Ilustración 10: Molde rectangular para adoquines

4.5. Desmoldante

Seleccionar el desmoldante correcto es fundamental para la fabricación de los adoquines con áridos reciclados, limo loésico y cemento Portland. Su aplicación influye directamente en la facilidad para extraer las piezas de los moldes, la posibilidad de preservar y reutilizar los moldes, y la calidad superficial de los adoquines obtenidos.

Considerando estas importantes variables, se evaluaron distintas alternativas para un desmolde eficiente y compatible con la mezcla AR - ML - CP y el material plástico de los moldes empleados:

1. Aceite vegetal filtrado con 10% de alcohol etílico.
2. Aceite de motor multigrado ELAION 20W-50.
3. Pintura asfáltica (Kover Primer).

4.5.1. Desmoldante experimental

Se confeccionó una mezcla experimental de aceite vegetal filtrado en proporción del 90% con alcohol etílico al 10%. El aceite vegetal presenta una viscosidad aproximada de 35 – 40 [cSt] a temperaturas del orden de 25 – 40 °C y una densidad cercana a 0,91 [g/cm³] a 15 °C. Es un fluido de naturaleza orgánica, insoluble en agua y soluble en solventes orgánicos.

La incorporación de alcohol etílico tiene como finalidad disminuir ligeramente la viscosidad del conjunto y favorecer la dispersión inicial sobre la superficie del molde. El alcohol, de menor viscosidad y mayor volatilidad, se evapora con rapidez, dejando una película oleosa residual.

Desde la química, el aceite vegetal está compuesto principalmente por triglicéridos de ácidos grasos. El etanol es un alcohol de cadena corta miscible en agua. Por esta razón, al mezclar ambos compuestos se busca generar una película lubricante fina que depende de la evaporación parcial del componente alcohólico para estabilizarse.



Ilustración 11: Mezcla Experimental

4.5.2. Aceite de motor multigrado

El aceite de motor multigrado ELAION 20W-50 es un lubricante mineral formulado para aplicaciones automotrices. Presenta una viscosidad aproximada de 1040 [cSt] a 40 °C y alrededor de 140 [cSt] a 100 °C, valores que le confieren una película lubricante de mayor espesor y persistencia respecto a aceites vegetales.

Su densidad típica se encuentra en el rango de 0,883–0,884 [g/cm³] a 15 °C. Es insoluble en agua y soluble en solventes orgánicos. Además del aceite base, contiene aditivos

tales como detergentes, antioxidantes, mejoradores del índice de viscosidad y compuestos antidesgaste (por ejemplo, aditivos con zinc y fósforo).

Todas estas propiedades permiten que se forme una película lubricante continua, estable en el tiempo, con baja volatilidad y muy resistente a la degradación térmica.



Ilustración 12: Aceite ELAION 20W-50

4.5.3. Pintura asfáltica

La pintura asfáltica base solvente (Kover Primer) es un recubrimiento compuesto por asfalto disuelto en solventes orgánicos. Presenta una viscosidad mayor que los aceites lubricantes, con valores que pueden ubicarse en un rango equivalente aproximado de 110 a 330 [cSt] a 25 °C (según viscosidad Saybolt Furol).

Su densidad típica es del orden de 0,85 [g/cm³]. Es insoluble en agua y soluble en solventes orgánicos. Durante su aplicación, el solvente se evapora progresivamente, dejando una película asfáltica adherente sobre la superficie.

Desde la química, el asfalto contiene hidrocarburos pesados y compuestos aromáticos de masa molecular alta, lo que le brinda una buena adherencia y la capacidad de formar recubrimientos continuos.



Ilustración 13: Pintura asfáltica Kover Primer

Tabla 9: Propiedades fisicoquímicas de alternativas de desmoldantes

Propiedad	Mezcla casera (90% aceite vegetal + 10% etanol)	Aceite de motor (ELAION 20W-50)	Pintura asfáltica (Kolver Primer)
Viscosidad cinemática	30–40 cSt a 25–40 °C (aceite vegetal ≈ 35–40 cSt; el etanol reduce levemente la viscosidad)	1040 cSt a 40 °C; 140 cSt a 100 °C	50–150 SSF a 25 °C (≈110–330 cSt a 25 °C)
Densidad (15°C)	0,91 g/cm ³ (aceite vegetal)	0,883–0,884 g/cm ³	0,85 g/cm ³
Solubilidad	Insoluble en agua; miscible con solventes orgánicos. El etanol es parcialmente miscible en agua	Insoluble en agua; soluble en solventes orgánicos	Soluble en solventes orgánicos (base solvente); insoluble en agua
Comportamiento ante secado	El etanol evapora rápidamente, dejando una película oleosa delgada	No presenta secado por evaporación; película lubricante persistente	Secado al tacto en menos de 30 min (30 °C / 60% HR); formación de película asfáltica
Composición química	Triglicéridos de ácidos grasos (aceite vegetal) + etanol	Aceite base mineral con aditivos detergentes, antioxidantes y antidesgaste (Zn, P)	Asfalto disuelto en solventes orgánicos

A partir de la caracterización de los materiales constituyentes y auxiliares, junto con la identificación de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, se prosigue a abordar la etapa preliminar de la experimentación, donde se analizan distintas combinaciones de AR - ML - CP.



CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS MATERIALES

5. EVALUACIÓN PRELIMINAR DE LOS MATERIALES

A partir de la caracterización individual de los materiales en la primera etapa del proyecto de investigación, se llevó a cabo un proceso exploratorio para identificar aspectos tecno-constructivos preliminares al elaborar los adoquines Holanda colados con la mezcla compuesta de árido reciclado (AR), limo loésico (ML) y cemento Portland (CP). En este capítulo, no se expone la búsqueda de la dosificación final optimizada, sino una etapa preliminar de identificación de variables y propiedades dominantes, análisis de sus interacciones y establecimiento de criterios técnicos para la fase de elaboración definitiva.

A diferencia de las dosificaciones convencionales de hormigón, la dosificación en estudio presenta particularidades significativas. Por un lado, el AR se diferencia de los áridos naturales no solo por su confección heterogénea, sino también por su elevada absorción y porosidad debido a la presencia de mortero adherido. Por otro lado, el ML se caracteriza por la alta proporción de finos que lo componen, su baja plasticidad y el comportamiento metaestable cuando se enfrenta a variaciones de humedad. Con esto, el comportamiento simultáneo de ambos materiales resulta en un comportamiento híbrido y balanceado, como un intermedio entre un hormigón granular y un suelo-cemento estabilizado, exigiendo un proceso con una necesidad de ajuste progresivo en base a la observación experimental y el análisis crítico.

En particular, las variables e interacciones analizadas fueron:

- Influencia del contenido relativo de árido reciclado y limo.
- Influencia de la relación agua/cemento (A/C) en la trabajabilidad y en comportamiento en estado endurecido.
- Incidencia del tiempo de desmolde sobre integridad de la pieza.
- Necesidad y desempeño de distintos métodos de desmoldantes.
- Efectos del método de compactación en la porosidad superficial y cohesión interna del adoquín.

Con las observaciones realizadas en los distintos procesos experimentales preliminares, se reconocieron patrones de comportamiento repetitivos, pudiendo identificar causas de fallas tempranas por adherencia excesiva, exudación, retracción plástica y desgranamiento, y adoptar metodologías para la etapa posterior de búsqueda de una óptima dosificación.

5.1. Caracterización del comportamiento de los componentes

En primera instancia, se analizó el comportamiento individual y combinado del árido reciclado, del limo loésico y del cemento Portland, ya que resultaba necesario comprender la interacción entre los componentes en estado fresco y endurecido, para identificar su influencia en la trabajabilidad, cohesión interna, adherencia al molde y estabilidad geométrica durante el fraguado.

Con el objetivo de evaluar el comportamiento del árido reciclado fino en relación al suelo limo-loésico y al cemento, se ensayaron 5 (cinco) dosificaciones expresadas en peso para identificar los mecanismos dominantes del sistema y establecer criterios fundamentales

para el desarrollo posterior de las dosificaciones más factibles a utilizar para materializar los adoquines Holanda de este trabajo:

1. Mezcla compuesta únicamente por árido reciclado: 100% AR.
2. Mezcla de árido reciclado con incorporación de cemento: 100% AR + 5% CPC.
3. Mezcla equilibrada de árido reciclado y limo loésico: 50% AR + 50% ML.
4. Mezcla con alto contenido en fracción fina: 25% AR + 75% ML.
5. Mezcla con predominio de fracción fina: 12% AR + 88% ML.

5.1.1. Mezcla 100% AR

La mezcla compuesta exclusivamente por árido reciclado se ensayó con el propósito de establecer una condición de referencia extrema, que permitiera identificar el comportamiento del AR sin la influencia de la fracción fina natural. Esta dosificación buscó verificar si el árido reciclado fino podía conformar una matriz suficientemente estable para la fabricación del adoquín.

Durante la confección, la mezcla evidenció una elevada absorción inicial de agua, asociada a la porosidad intrínseca del material y a la presencia de mortero adherido en la superficie de las partículas. Se observó formación de lechinada superficial, burbujeo vinculado a la liberación de aire y reacción inicial de compuestos cementicios remanentes (Ilustración 14), además de exudación de agua y un leve ascenso térmico durante el asentamiento (Ilustración 15), demostrando que la influencia del mortero adherido en el comportamiento no es despreciable.



Ilustración 14: Formación de lechinada superficial, burbujeo y reacción inicial de compuestos cementicios remanentes



Ilustración 15: Medición de temperatura de mezcla compuesta por 100% de árido reciclado

Luego de 14 (catorce) días de fraguado, la pieza continuó presentando elevada adherencia al molde. No fue posible lograr un desmolde satisfactorio por gravedad ni mediante golpes controlados, evidenciándose que el mortero adherido no resultó suficiente para resolver la falta de continuidad de matriz y la vinculación con las paredes laterales.

5.1.2. Mezcla 100% AR + 5% CPC

La incorporación de un 5% de cemento en peso respecto del árido reciclado se ensayó con el fin de analizar si una pequeña cantidad de ligante era suficiente para incrementar la cohesión interna del sistema y corregir las deficiencias observadas en la mezcla 100% AR. Esta dosificación se planteó como un paso intermedio entre el árido reciclado puro y las mezclas con incorporación de limo-loésico.

Durante el amasado, la presencia de cemento modificó parcialmente el comportamiento de la mezcla, aportando mayor cohesión, menor agua decantada y una disminución del burbujeo excesivo (Ilustración 16). También se observó un ascenso térmico más notorio, asociado al inicio de la hidratación del cemento. En comparación con la mezcla 100% AR, la exudación superficial disminuyó, lo que sugiere un mayor consumo de agua por reacción cementicia.



Ilustración 16: Mezcla con 5% de cemento con mayor cohesión, menor agua decantada y una disminución del burbujeo excesivo

Luego de 4 (cuatro) días de fraguado, el adoquín presentó una fuerte adherencia a las paredes del molde, imposibilitando su desmolde por gravedad. Fue necesario recurrir a golpes en la contracara y esfuerzos de palanca en los laterales, lo que provocó rotura parcial al aplicar la presión (Ilustración 17). La superficie inferior reprodujo correctamente la geometría y el biselado, como se observa en la Ilustración 15, indicando que el principal problema no residía en la definición del molde sino en la adherencia lateral y en la insuficiente estabilidad de la mezcla con bajos contenidos de cemento.



Ilustración 17: Rotura de pieza por presión lateral



Ilustración 18: Buena definición de biselado

5.1.3. Mezcla 50% AR + 50% ML

La dosificación 50% AR + 50% ML se planteó como un punto de equilibrio a analizar entre la estructura granular, la continuidad de matriz y la trabajabilidad, con el objetivo de estudiar el comportamiento de una matriz en la que la fracción granular, aportada por el árido reciclado, y la fracción fina del limo loésico estuvieran presentes en igual proporción.

La incorporación de limo produjo cambios significativos respecto de los casos anteriores: disminuyó el burbujeo observado en el AR puro, aumentó la homogeneidad del amasado y favoreció el llenado del molde (Ilustración 19 y 20). El limo mostró capacidad de recubrimiento de la superficie porosa del árido reciclado, generando una matriz más continua. La exudación de agua persistió, aunque el sistema presentó una respuesta más estable, con un ascenso térmico moderado.



Ilustración 19: Mezcla 50% AR + 50% ML con mayor homogeneidad del amasado y llenado del molde



Ilustración 20: Medición de temperatura de mezcla 50% AR + 50% ML

A los 14 (catorce) días de fraguado se logró el desmolde completo de las piezas, sin roturas estructurales significativas, como se puede observar en la Ilustración 21. Se observaron, no obstante, microfisuras superficiales, retracción en los bordes y una textura rugosa y heterogénea, lo que sugiere compactación insuficiente. Aun así, esta mezcla mostró un comportamiento claramente superior al de las dosificaciones basadas solo en AR, lo que coincide con lo reportado por Eguía y Feryala para mezclas intermedias, en las que la combinación de suelo fino y árido reciclado mejora notablemente el desempeño global respecto de los materiales por separado.



Ilustración 21: Desmolde completo de las piezas, sin roturas estructurales significativas

5.1.4 Mezcla 25% AR + 75% ML

La dosificación 25% AR + 75% ML se planteó con el propósito de priorizar el aporte cohesivo y de continuidad de matriz del limo loésico, incorporando al mismo tiempo una porción limitada de árido reciclado como corrector granulométrico y refuerzo granular. Esta lógica es análoga a la desarrollada por Eguía y Feryala en la mezcla 75% ML + 25% AR, donde

el objetivo fue conservar en mayor medida las propiedades del suelo natural e incorporar una fracción granular suficiente para mejorar la resistencia mecánica y la estabilidad del conjunto.

Durante el amasado, la mezcla presentó mayor cohesión y mejor trabajabilidad que las dosificaciones con alto contenido de árido reciclado (Ilustración 22). El llenado del molde resultó más uniforme y la masa mostró menor tendencia a la segregación. Asimismo, se observó una reducción del burbujeo y una matriz más compacta y continua, asociada al predominio de la fracción fina.



Ilustración 22: Desmolde completo de las piezas, sin roturas estructurales significativas

Sin embargo, el incremento del contenido de limo también implicó una mayor demanda de agua, con una relación A/C muy elevada sin un proceso de compactación (Ilustración 23), y una tendencia más marcada a la retracción durante el secado (Ilustración 24). Como resultado, la pieza desmoldada presentó mejor integridad general, pero con riesgo de fisuración superficial y bordes más sensibles a deformaciones. Esta mezcla mostró que el aumento de ML mejora la homogeneidad y el comportamiento en fresco, aunque exige mayor control del contenido de agua y de las condiciones de compactación.



Ilustración 23: Mezcla preliminar de dosificación 25% AR + 75% ML sin proceso de compactación con una relación A/C de 0,88.

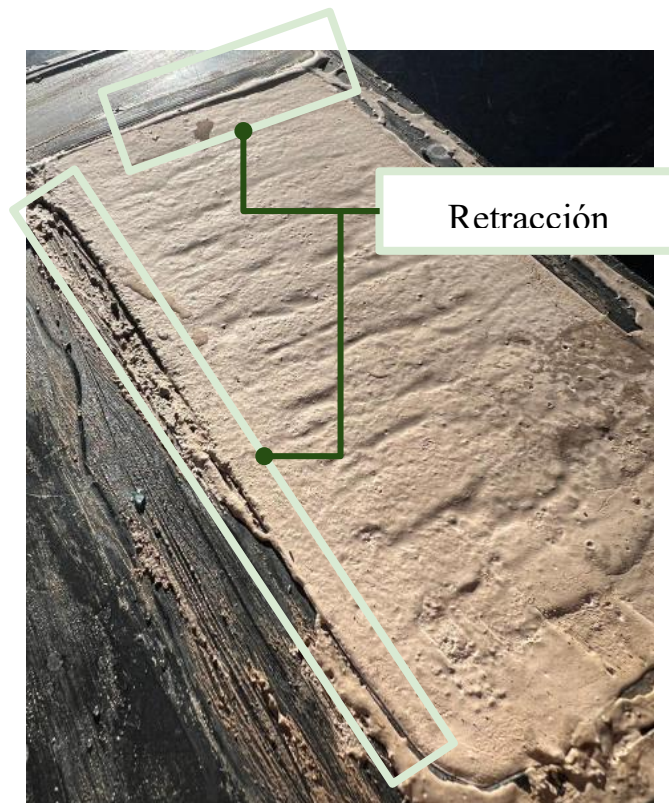


Ilustración 24: Tendencia marcada a la retracción plástica en dosificación con mayor contenido de fracción fina

5.1.5 Mezcla 12% AR + 88% ML

La dosificación 12% AR + 88% ML se ensayó como una condición próxima al comportamiento del limo loésico como componente dominante, incorporando una pequeña proporción de árido reciclado. Esta mezcla tuvo por finalidad analizar el límite inferior de

aporte granular y evaluar si una corrección mínima de la granulometría era suficiente para modificar el comportamiento del material.

La mezcla presentó una marcada dominancia del limo en su comportamiento, con buena cohesión inicial y facilidad de conformación dentro del molde. No obstante, la escasa proporción de árido reciclado limitó el desarrollo de un esqueleto granular efectivo, por lo que el sistema quedó fuertemente condicionado por la demanda hídrica y la retracción de la fracción fina, como se puede observar en la Ilustración 25.



Ilustración 25: Dosificación 12%AR + 88%ML con una relación A/C de 0,88 por su gran demanda de agua

En consecuencia, si bien se logró una masa continua, la mezcla tendió a comportarse de manera más cercana al suelo estabilizado que a un material granularmente corregido, experimentando cambios volumétricos al secarse (Ilustración 26).

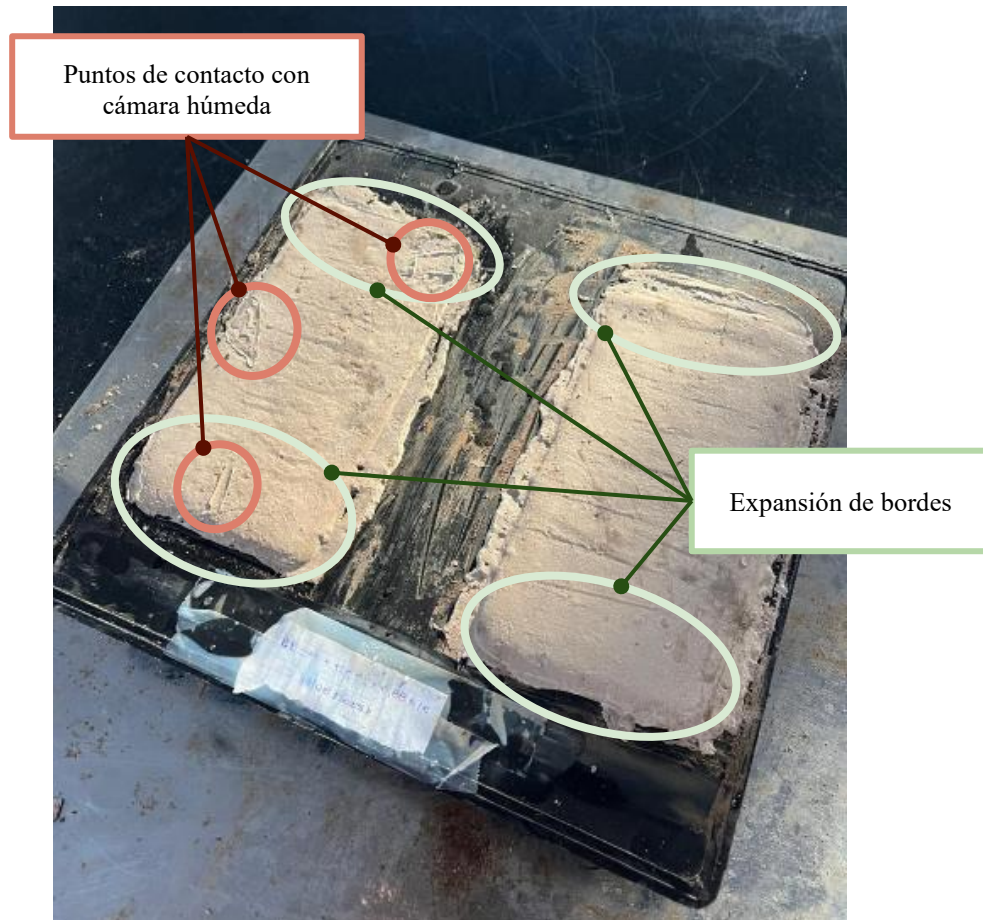


Ilustración 26: Piezas secas con hinchazón debida al comportamiento del ML con excedente de agua

Este comportamiento resulta consistente con lo señalado por Eguía y Feryala para las mezclas con bajo contenido de árido reciclado, en las cuales el material natural conserva la mayor parte de sus características originales y el agregado proporciona una mejora leve. En el contexto de este trabajo, esta dosificación permitió reconocer que una cantidad muy baja de AR no alcanza para aportar una corrección granulométrica significativa ni para generar el equilibrio buscado entre fracción fina, esqueleto granular y estabilidad dimensional.

5.2. Evaluación del Árido Reciclado

El análisis realizado durante la primera etapa permitió identificar que la presencia del árido reciclado es determinante en el comportamiento del sistema, tanto en estado fresco como en estado endurecido. Su influencia se debe a su elevada absorción de agua, su superficie rugosa y porosa, su composición con presencia de mortero adherido y textura angular.

Durante la confección de las distintas mezclas ensayadas, estas características se manifiestan mediante la alta demanda inicial de agua, la exudación localizada, la fuerte adherencia a las paredes del molde y la dificultad de desmolde. Entonces, se comprobó que el

AR puro genera una matriz con elevada fricción interna y escasa capacidad de deslizamiento superficial, lo que impide la separación natural entre el molde y la pieza.

Al incorporar cemento, la cohesión interna mejora, pero no se modifica la alta adherencia al molde, confirmando que el problema no es únicamente la resistencia mecánica inicial, sino en la interfaz molde–mezcla. Con respecto a la porosidad, la de los áridos reciclados finos es mayor respecto a la de los áridos naturales equivalentes, generando una mayor capacidad de absorción de agua e impactando directamente en la relación A/C de la mezcla correspondiente, afectando la trabajabilidad y resistencia final.

En consecuencia, se requiere de una prehidratación para estabilizar la relación A/C efectiva, la incorporación de una fracción fina que reduzca la fricción superficial y favorezca el desmolde y, además el uso de un desmoldante adicional.

Asimismo, una de las principales diferencias entre el árido reciclado y el árido natural radica en la presencia de mortero adherido. En la fracción fina, esta condición resulta aún más significativa, ya que una parte importante del material corresponde a partículas de mortero triturado. Esto confiere al árido reciclado una mayor porosidad y una menor densidad que las del agregado original, lo que puede incidir negativamente sobre ciertas propiedades del material. No obstante, en determinadas condiciones, la presencia de este mortero también puede contribuir parcialmente a la cohesión interna de la mezcla.

Por último, la granulometría relativamente discontinua, la forma angular y la superficie rugosa del árido reciclado generan, por un lado, el intertrabado entre partículas y aportan estabilidad mecánica, pero, por otro lado, incrementan la fricción interna, dificultan la compactación y agravan el desmolde. En este sentido, los resultados obtenidos indican que el árido reciclado no puede evaluarse únicamente como un agregado granular convencional, sino como un componente con comportamiento particular, cuya influencia sobre la mezcla exige criterios específicos de dosificación, compactación y fabricación.

5.3. Evaluación del suelo Limo - Loésico

La incorporación del suelo limo-loésico local produjo modificaciones significativas en el comportamiento de las mezclas, ya que permitió corregir el sistema inicialmente dominado por el árido reciclado mediante el aporte de una fracción fina capaz de mejorar la cohesión y la trabajabilidad en estado fresco.

Desde el punto de vista granulométrico, el ML incrementa el contenido de partículas finas, favoreciendo el recubrimiento superficial del árido reciclado y reduciendo la fricción directa entre las partículas gruesas y el molde. Su presencia permite obtener una mezcla más homogénea, mejora el amasado y facilita el llenado eficiente de los moldes, evidenciándose una disminución del burbujeo observado en las dosificaciones compuestas exclusivamente por árido reciclado. Asimismo, el aumento del contenido de finos contribuye a reducir parcialmente la exudación, al generar una matriz más continua y menos susceptible a la segregación. Como

consecuencia, se obtiene una mejor terminación superficial, particularmente en las caras en contacto con el molde.

Desde el punto de vista químico, el bajo contenido de sales solubles y el carácter alcalino del suelo, evidenciado por su pH, resultaron compatibles con el ligante cementicio utilizado, sin registrarse reacciones adversas durante el fraguado inicial. En este sentido, los principales cuidados no se vincularon con incompatibilidades químicas, sino con el control del agua de amasado y con la terminación de la cara expuesta.

Por otra parte, al tener una granulometría fina y una gran superficie específica, el limo-loésico generó una importante demanda de agua de amasado. En múltiples ensayos, esto condujo a incrementos en la relación A/C efectiva, afectando negativamente la resistencia mecánica y favoreciendo la aparición de porosidad superficial. Adicionalmente, al tratarse de un suelo con predominio de fracción limosa y contenido arcilloso de baja plasticidad, se observaron fenómenos de retracción plástica durante el secado, especialmente en los bordes de las piezas. En las mezclas con mayor contenido de ML, esta retracción se manifestó en forma de microfisuras superficiales y levantamientos próximos a las paredes del molde.

En consecuencia, si bien el limo loésico actúa como un lubricante interno y mejora el comportamiento de moldeo, su incorporación requiere un control riguroso de la dosificación y de la relación agua/cemento. Por ello, su combinación con árido reciclado y cemento resulta indispensable para compensar la mayor demanda hídrica y minimizar los efectos adversos asociados a la retracción, la porosidad y la pérdida de resistencia.

5.4. Evaluación del Cemento Portland

El comportamiento mecánico de las mezclas, en particular la cohesión interna y la estabilidad de las piezas durante el desmolde, se modificaron significativamente con la incorporación de cemento.

El consumo de agua asociado a la hidratación favorece una disminución del decantamiento superficial y otorga mayor estabilidad volumétrica durante las primeras horas de fraguado. Sin embargo, esta mejora en la cohesión interna no fue suficiente para resolver la fuerte adherencia lateral al molde, evidenciándose que la problemática del desmolde no dependía únicamente de la resistencia mecánica temprana, sino también de las características superficiales del sistema.

Cuando el cemento fue mezclado con el árido reciclado y el limo loésico, su efecto resultó más favorable. Se observó una mejora en la integridad estructural de las piezas, una mayor estabilidad durante el desmolde y una reducción del desgranamiento superficial, especialmente cuando la relación agua/cemento se mantuvo dentro de valores controlados. En estas condiciones, el cemento actuó como ligante efectivo entre la fracción granular y la fracción fina, generando una matriz más continua y resistente.

No obstante, el comportamiento del sistema se mostró altamente sensible a variaciones en la relación agua/cemento. Cuando esta se incrementó significativamente con el objetivo de mejorar la trabajabilidad, la matriz resultante presentó mayor porosidad, exudación superficial, retracción plástica y pérdida de resistencia en aristas y caras expuestas. Este fenómeno confirma que la eficiencia del cemento como ligante depende estrictamente del control del contenido de agua efectivo en la mezcla.

5.5. Selección de desmoldante

La primera alternativa, en donde se realizó una mezcla experimental de aceite vegetal al 90% y alcohol etílico al 10% contaba con una aplicación sencilla y económica, formando una película oleosa delgada. Sin embargo, al querer desmoldar la pieza, hubo desgaste superficial y ruptura parcial en aristas durante el desmolde, teniendo que realizar esfuerzos adicionales con espátula y martillo de goma. Esto se asoció a una insuficiente barrera lubricante y a la evaporación parcial del alcohol, que redujo la eficacia del recubrimiento.

En segundo lugar, el aceite de motor ELAION 20W-50 permitió un desmolde más efectivo, reduciendo la necesidad de esfuerzo mecánico. Su viscosidad (1040 [cSt] a 40 °C) y la presencia de aditivos detergentes y antioxidantes generaron una película lubricante persistente, que no se evaporó durante el fraguado, garantizando una separación más uniforme entre pieza y molde.

Finalmente, la tercera opción de desmoldante que se consideró fue la pintura asfáltica, la cual tuvo una fuerte adherencia al molde. Esto generó una adhesión rígida y permanente con el hormigón, inutilizando el molde para posteriores reutilizaciones. Además, se observaron manchas oscuras y pérdida de uniformidad superficial en los adoquines.

En base a los resultados experimentales, se optó por utilizar como desmoldante principal al aceite de motor ELAION 20W-50. Las pruebas mostraron que, si bien el aceite vegetal y la pintura asfáltica eran económicamente viables, presentaban limitaciones críticas: el primero generó deterioro en las aristas por adherencia excesiva, y la segunda inutilizó los moldes por su alta fijación. Por el contrario, el aceite de motor permite un equilibrio adecuado entre lubricación, protección del molde y facilidad de extracción de los adoquines, asegurando además una mayor repetitividad del proceso. El empleo de este desmoldante representó un punto de inflexión en la metodología de moldeo, garantizando una producción más eficiente y piezas con mejores condiciones superficiales.

Por un lado, cuenta con importantes propiedades físicas que favorecen su uso como desmoldante. Su viscosidad implica que es un aceite denso, ideal para formar una película lubricante resistente, clave para evitar la adherencia entre la mezcla de cemento y el molde. Además, tiene un índice de viscosidad (≈ 130) que asegura que la viscosidad se mantiene relativamente estable frente a cambios de temperatura, lo que ayuda a que el desmoldante no se escurra ni se vuelva demasiado fluido en laboratorio. Otra propiedad destacable es su baja volatilidad, la cual indica una menor pérdida por evaporación y evita manchas o pérdida de

efectividad durante el curado inicial. El punto de inflamación elevado (≈ 235 °C) del desmoldante seleccionado indica seguridad frente a manipulación normal en laboratorio, ya que no es inflamable en condiciones habituales.

Por otro lado, sus propiedades químicas también toman relevancia en su desempeño como desmoldante. Dicho aceite se mantiene estable frente a la oxidación, evitando que se degrade en el tiempo, por lo que no forma fácilmente compuestos pegajosos que podrían quedar adheridos en el molde. También, su detergencia y su capacidad de dispersión evitan que se acumule material en la superficie del molde. Por último, al contar con pH neutro y baja reactividad no ataca químicamente al molde plástico ni al hormigón fresco que conforma al adoquín.

Tabla 10: Evaluación de desempeño de alternativas de desmoldante

Criterio de selección	Mezcla casera (90% aceite vegetal + 10% etanol)	Aceite de motor (ELAION 20W-50)	Pintura asfáltica (Kolver Primer)
Aplicación en molde	Aplicación sencilla, pero con tendencia al escurrimiento en superficies verticales debido a baja viscosidad	Aplicación controlada al tener mayor viscosidad que favorece permanencia uniforme en superficie	Alta viscosidad, con aplicación más espesa y menos uniforme
Comportamiento durante fraguado	Formación de película delgada y evaporación parcial de etanol	Formación de película lubricante persistente durante todo el fraguado	Formación de película rígida adherente tras evaporación del solvente
Desempeño en desmolde	Esfuerzos mecánicos adicionales con martillo de goma y palanqueo con espátula; desgaste superficial y rotura parcial de aristas	Desmolde efectivo mediante golpes controlados y sin daño estructural significativo	No se logró desmolde adecuado debido a fuerte adherencia entre pieza y molde
Superficie de Adoquín	Superficie con irregularidades por fricción	Presencia de película oleosa fina sin afectaciones en la integridad mecánica	Manchas oscuras y alteración estética significativa
Reutilización del molde	Posible con necesidad de limpieza con cepillado	Reutilizable con enjuague, sin deterioro significativo	Molde inutilizado por adherencia rígida

5.6. Criterios técnicos derivados de pruebas realizadas en laboratorio

A partir de esta etapa experimental realizada en laboratorio, se pudieron establecer criterios técnicos específicos, derivados de la experimentación directa entre tres dosificaciones en estudio con una proporción ML:AR de 50:50, 75:25 y 88:12. En contraste con los procesos de vibrocompactación que se emplean en el sector industrial, se adoptó un colado manual, implicando condiciones de compactación y energía aplicada significativamente menores. Por

esta razón, fue necesario implementar un control más estricto respecto a la humedad de la mezcla, el contenido de cemento y el procedimiento de consolidación de los materiales.

5.6.1. Influencia de la proporción ML:AR

Durante la fase de experimentación, se registraron diferencias sistemáticas en el comportamiento de las distintas mezclas según la proporción ML:AR que las componía. Esto se debe a que la variación entre el porcentaje de AR y ML produce modificaciones sustanciales en la configuración y la resistencia del material.

En la mezcla 50:50, se produjo un equilibrio entre el esqueleto granular (AR), el cual aportó estructura interna, estabilidad y transmisión eficiente de esfuerzos de compactación, y la matriz fina (ML) que funcionó como filler cohesivo. Esta configuración generó menor dispersión de resultados mecánicos, mayor estabilidad geométrica y menor sensibilidad a las variaciones de humedad.

En cuanto a la mezcla 75:25, se observó un comportamiento más matricial, donde el aumento de la fracción fina produjo una mayor dependencia del contenido de agua, un incremento de variabilidad mecánica y una reducción del margen operativo seguro.

En tercer lugar, en la mezcla 88:12, el sistema pasó a estar dominado por la fracción fina, provocando que el esqueleto granular resistente pierda continuidad estructural y el comportamiento se vuelva cohesivo - matricial. Experimentalmente, se registró mayor sensibilidad a pequeñas variaciones de humedad y mayor tendencia a retracción superficial.

Con esto, se infiere que al incorporar mayores porcentajes de ML se perciben cambios estructurales dentro del sistema, donde el comportamiento deja de depender del engranamiento granular y pasa a estar dominado mayormente por el control hídrico y del ligante cementicio.

5.6.2. Control de humedad y de la relación agua/cemento

A partir de la experimentación en el laboratorio, resultó que el control de humedad es la variable más crítica de la composición, especialmente debido a la alta absorción del árido reciclado fino de 4,65% contra un árido fino natural que suele tener menos de 0,9% de absorción. A esto se le suma la alta demanda de agua para compactación que tiene el ML, comprobada durante el ensayo Proctor realizado durante la caracterización realizada por Eguía y Feryala en el 2025, siendo un suelo natural con una humedad óptima $\omega_{opt} = 19 \%$ y una densidad seca máxima $\gamma_{d_{max}} = 1,59 \text{ g/cm}^3$.

Al incorporar el AR en la mezcla sin una prehidratación, se produjo una pérdida de trabajabilidad de mezclado casi instantánea y una mayor fricción interna. Con esto, la compactación resultó incompleta provocando que la resistencia tenga una mayor dispersión. Luego, al aumentar la proporción de ML, se observó un incremento de la demanda hídrica total, haciendo que la relación A/C efectiva se vuelva más crítica. En consecuencia, el control de humedad resultó directamente proporcional al contenido de ML en la mezcla.

5.6.3. Energía de compactación y densificación

Como se mencionó anteriormente en el Capítulo 4, el ensayo Proctor estándar arrojó para el ML una humedad óptima $\omega_{opt} = 19$ [%] y una densidad seca máxima $\gamma_{d_{max}} = 1,59$ [g/cm³], mientras que el AR presentó $\omega_{opt} = 16,5$ [%] y $\gamma_{d_{max}} = 1,60$ [g/cm³], demostrando que ambos materiales tienen compactaciones compatibles en término de valores máximos, pero a distintas humedades óptimas.

Durante la compactación manual por capas, se observó una variación en la eficiencia del proceso dependiendo de la proporción ML: AR. En la mezcla 50:50, la compactación permitió alcanzar piezas homogéneas con buena definición de aristas y baja variabilidad dimensional. En la mezcla 75:25, fue necesario incrementar el número de penetraciones para lograr consolidación equivalente, observándose mayor sensibilidad a la uniformidad del procedimiento. Para la mezcla 88:12, aun manteniendo constante el protocolo de compactación, se detectó mayor presencia de deformaciones y menor estabilidad inmediata, lo que indica menor eficiencia en la transmisión de la energía aplicada manualmente.

En consecuencia, bajo condiciones de compactación manual, aumentar la proporción de componente granular aportado por el AR favorece la eficiencia del proceso de densificación y mejora la estabilidad inmediata de la pieza.

Así mismo, se buscó adoptar una metodología que proporcione una energía de compactación equivalente a un aproximado del 10% de la energía utilizada durante una fabricación industrial con vibrocompactación. Con esto se realizaron cálculos de la energía proporcionada por los métodos manuales empleados en el laboratorio:

- **Energía de compactación por golpes contra mesada**

Siendo el peso de la mezcla de 5,58 [kg] y el peso del molde de 2,6 [kg]:

Vertido	1	2	3
Peso/vertido [kg]	4,46	6,32	8,18
Energía [J]	196,89	279,00	361,11

Obteniendo una energía total de 837 [J]

- **Energía de compactación por golpes laterales**

Se utilizó un destornillador, con su mango de 0,1 [kg] aproximadamente, realizando golpes rápidos y secos de una velocidad de 3,5 [m/s]. Adoptando la energía cinética (ver Ecuación 1) para obtener la energía de cada golpe:

$$E_c = \frac{0,1 [kg] \cdot (3,5[m/s])^2}{2} = 0,61 [J] \quad \text{Ecuación 1}$$

Al realizar 30 golpes en las 4 caras, se obtiene una energía total de 73,5 [J]

- **Energía de compactación por penetración con espátula**

Siendo que el procedimiento de vertido se realiza en tres capas, cada una estas cuentan con un espesor aproximado de 2 [cm], es decir 0,02 [m]. Realizando 100 compactaciones con espátula distribuidas en cada una de las capas, con una fuerza aproximada a 30 [N] y garantizando que se penetre hasta la mitad de la capa anterior, se calcula la energía en cada capa:

Capa	1	2	3
L. de penetración [m]	0,02	0,03	0,03
Energía [J]	60	90	90

Resultando en una energía total de 240 [J]

Con estos tres procedimientos, se obtiene una energía total de compactación de 1105 [J].

5.6.4. Aplicación de desmoldante

A partir de las pruebas realizadas en condiciones de moldeo manual, donde la extracción de la pieza depende en gran medida de la fricción desarrollada entre la mezcla fresca y la superficie plástica del molde, el mejor desempeño se obtuvo mediante la utilización de aceite de motor multigrado 20W-50. Este permitió un desmolde limpio, sin arranque superficial del material y conservación de las aristas del adoquín. Asimismo, se verificó que la presencia de limo en la mezcla favorece el desmolde respecto de mezclas más granulares, debido a la mayor cohesión inicial de la matriz fina y a la menor tendencia al desprendimiento localizado durante la extracción.

Se comprobó experimentalmente que la ausencia de desmoldante produce una adherencia severa entre la mezcla y el molde, dificultando la extracción y provocando roturas parciales, pérdida de material en bordes y deterioro geométrico de la pieza.



Ilustración 27: Desprendimientos de material debido a dificultad de desmolde con ausencia de desmoldante

Asimismo, sobre la superficie expuesta del adoquín se observó la formación de una película superficial de aspecto brillante o cristalino, interpretada como resultado de segregación localizada y/o concentración de finos y sales en la interfase molde–mezcla.



Ilustración 28: Película superficial brillante en superficie expuesta de adoquín sin desmoldante

Por el contrario, el exceso de desmoldante resulta perjudicial para la calidad final de la pieza, ya que genera manchas superficiales, heterogeneidad en la terminación y aumento de la porosidad visible en la cara en contacto con el molde. Esto se interpreta como consecuencia de

la formación de una interfase lubricada excesiva entre mezcla y molde, que dificulta la correcta compactación superficial del material.

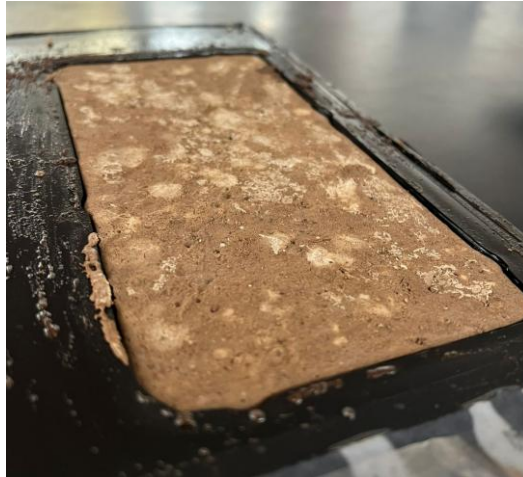


Ilustración 29: Película superficial opaca y con manchas blancas en superficie expuesta de adoquín sin desmoldante

A su vez, las caras del adoquín que estuvieron en contacto con las paredes del molde quedan con concentraciones de desmoldante adherido, en donde se pueden observar en la Ilustración 30 como depósitos blanquecinos del aceite excedente. Esto produce una alteración en la interfase superficial del producto y afecta la calidad de la terminación de este.



Ilustración 30: Superficie del adoquín con depósitos localizados de desmoldante excedente



Ilustración 31: Comparación entre comportamiento del molde sin desmoldante (izquierda) y con desmoldante (derecha)

En función de estos resultados, se adoptó como criterio final la aplicación de aceite de motor 20W-50 con pincel, en capa fina y uniforme, inmediatamente antes del vertido de la mezcla. Este procedimiento fue el que permitió lograr el mejor equilibrio entre facilidad de desmolde, integridad geométrica de las piezas y calidad superficial final.

5.6.5. Condiciones necesarias para curado

El curado constituye una etapa crítica en la estabilidad y calidad de la mezcla confeccionada con AR, ML y cemento debido a que, a partir del seguimiento de las piezas, se observó que la pérdida prematura de humedad durante las primeras horas posteriores al moldeo puede generar retracción plástica, fisuración superficial y pérdida de continuidad en la matriz cementicia, afectando tanto la integridad geométrica de la pieza como su resistencia mecánica final. Las mezclas con mayor contenido de ML presentaron una sensibilidad más marcada frente a la evaporación temprana, evidenciando mayor tendencia a retracción en bordes y superficies expuestas.

En base a esto, se adoptó el almacenamiento de las piezas dentro de una cámara de curado con humedad controlada durante un período mínimo de 7 días, con el objetivo de favorecer el desarrollo de la hidratación del cemento y minimizar fenómenos de retracción asociados a la fracción limosa. Durante dicho proceso, se evita la desecación prematura, la exposición al sol, corrientes de aire intensas o cambios bruscos de temperatura.

5.6.6. Comportamiento ante fraguado y desmolde

Finalmente, se comprobó que el desmolde no debía efectuarse inmediatamente después del fraguado inicial dentro de la cámara de curado, ya que las piezas tienden a retener humedad debido a la presencia del limo-loésico en la mezcla, como se puede observar en la Ilustración 32. Por esta razón, se adoptó como criterio dejar las piezas 24 horas adicionales a temperatura ambiente, permitiendo la eliminación parcial de la humedad remanente y favoreciendo una mayor estabilidad superficial antes de la extracción.



Ilustración 32: Distinción del contenido de humedad de adoquines de misma dosificación con una exposición a la temperatura ambiente de 24 horas de diferencia

Experimentalmente se observó que un desmolde anticipado incrementa el riesgo de roturas parciales, desprendimientos de material en bordes y deformaciones locales de la pieza. En cambio, con un tiempo adicional de secado controlado, los adoquines presentaron una mejor conservación geométrica y una menor susceptibilidad al daño durante la extracción.

Asimismo, se verificaron distintos métodos de desmolde:

- **Apertura por contracción:** se ha observado que, la contracción natural del material, en este caso el limo (ML), genera una pequeña separación de las paredes del molde, permitiendo generar el desmolde por vuelco, con mucha facilidad, lo cual es una gran ventaja ya que se evita realizar esfuerzos externos sobre el adoquín.
- **Apertura por esfuerzos de tracción, con la inclusión de espátula:** hubo casos donde el material permaneció fuertemente adherido a las paredes del molde, por lo que se utilizó una espátula, la cual se insertaba con cuidado en los bordes, de manera de lograr la separación del material del borde.



- **Desmolde mediante vuelco del molde:** otra de las técnicas utilizadas, consiste en invertir el molde y favorecer la salida del adoquín por acción de la gravedad. Para que este método sea utilizable, es necesario que la adherencia entre el material y el molde sea relativamente baja.
- **Desmolde mediante vuelco y golpes con martillo de goma:** en aquellos casos donde la adherencia no era lo suficientemente baja, para lograr el desmolde por vuelco, se aplicaron golpes con un martillo de goma, sobre las caras del molde, para facilitar su salida.
- **Desmolde mediante vuelco, golpes con martillo de goma y destornillador en los laterales:** este procedimiento no es recomendable, ya que afecta la integridad del adoquín, produciendo fisuras, grietas y aplastamiento del material, solo se emplea en casos donde la extracción de la muestra no es posible con ninguno de los métodos anteriormente mencionados.

Los únicos procedimientos de desmolde que permitieron retirar las piezas sin producir roturas significativas ni alterar su geometría fueron el desmolde por vuelco y la aplicación de golpes controlados en la contracara del molde con martillo de goma. Este método permitió liberar las piezas sin concentraciones de esfuerzo lateral que pudieran fisurarla o provocar desprendimientos superficiales.



CAPÍTULO 6

PROCESO DE ELABORACIÓN ADOPTADO

6. PROCESO DE ELABORACIÓN ADOPTADO

A partir de los criterios técnicos establecidos en el capítulo anterior y de los resultados experimentales obtenidos, se definió un procedimiento de fabricación específico para la elaboración de adoquines conformados con árido reciclado fino (AR), suelo limo-loésico local (ML) y cemento Portland (CPC) como ligante.

A diferencia de la fabricación industrial con vibrocompactación de mezclas casi secas, el procedimiento adoptado implementó un moldeo manual por colado, complementado con compactación por capas y vibrado inducido mediante golpes controlados. Este método deriva en una menor energía de consolidación, por lo que se requirió adoptar controles específicos sobre las variables críticas como el contenido de humedad, la secuencia de incorporación de materiales y el sistema de desmolde, para garantizar la homogeneidad, estabilidad dimensional y reproducibilidad entre unidades.

6.1. Procedimiento de dosificación

La dosificación de las mezclas fue definida en función del volumen unitario del adoquín ($6 \times 10 \times 20 \text{ cm} = 1200 \text{ [cm}^3\text{]}$) y de un peso unitario objetivo cercano a $1,70 - 1,80 \text{ [g/cm}^3\text{]}$, obtenido a partir de las primeras piezas moldeadas (ver Ecuación 2 y Ecuación 3).

$$\text{Masa por cavidad} = 1200 \text{ [cm}^3\text{]} \cdot 1,80 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 2160 \text{ [g]} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\text{Masa por molde} = 2160 \text{ [g]} \cdot 2 = 4320 \text{ [g]} \quad \text{Ecuación 3}$$

Esto implicó trabajar con masas totales por molde del orden de $4200 - 4500 \text{ [g]}$ de mezcla fresca, ya que en cada uno cuenta con dos cavidades para conformar adoquines. En base a dichos valores, las dosificaciones se establecieron en términos máxicos de fracción sólida total (AR + ML) y relación agua/cemento.

A partir de los registros experimentales, se verificó la influencia de la relación A/C en el desempeño de la mezcla. Con A/C próximos a $0,40$ la mezcla resultaba excesivamente seca y difícil de compactar, mientras que para relaciones próximas a $0,90$ se incrementó la exudación, formación de cavidades internas por burbujas de aire atrapadas y porosidad superficial. En consecuencia, el procedimiento adoptado fija un rango operativo óptimo que permite un balance entre trabajabilidad y control de porosidad y exudación:

$$0,70 \leq A/C \leq 0,90$$

- $A/C \leq 0,70$ (mezcla no compactable manualmente).
- $A/C \geq 0,90$ (mezcla líquida con alta exudación).

En relación con estos ajustes, la humedad total de la mezcla respecto al peso seco osciló entre el 24% y el 29% , dependiendo de la dosificación. Mientras mayor es el contenido de ML,

mayor es la humedad necesaria de la mezcla debido al aumento de la superficie específica y la capacidad de absorción del limo.

Todos los materiales fueron dosificados en masa mediante balanza digital con precisión de ± 1 [g], trabajando sobre proporciones previamente definidas en función del volumen del molde (1200 [cm³] por unidad) y del peso unitario objetivo.

6.2. Procedimiento de preparación y acondicionamiento de materiales

Con el fin de garantizar condiciones iniciales controladas, es necesaria una etapa previa de preparación y acondicionamiento de los materiales que se incorporarán en la mezcla.

En primer lugar, se buscó corregir el factor de absorción significativo del AR fino. Como se determinó con anterioridad, el AR con el que se trabaja tiene una absorción del 4,56%. Por esta razón, es necesario someterlo a una prehidratación parcial con una cantidad de agua equivalente al 5% del peso del AR. Cabe aclarar que esta cantidad de agua destinada a la prehidratación se resta de la cantidad de agua total para no modificar la relación A/C. Así, se aproxima a una condición levemente superior a saturado-superficie-seca (SSS), evitando la presencia de agua libre superficial, compensando la elevada porosidad interna y evitando la absorción inmediata del agua de mezclado durante los primeros minutos de amasado.

Por otra parte, el CPC también requiere de una prehidratación con un 10% del agua total de la mezcla para conformar una lechada base que se incorpora con los sólidos. Esta lechada base permite desde un inicio un proceso uniforme de hidratación, reduciendo defectos por la formación de grumos secos y mejorando la cohesión.

Por el contrario, se decide no prehidratar el limo. Durante las primeras confecciones realizadas a modo de prueba, se observó que la incorporación previa de agua al limo generaba apelmazamiento y formación de aglomerados difíciles de desintegrar manualmente, afectando la homogeneidad de la mezcla.

Como se puede observar en la Ilustración 33, en la etapa previa a adoptar un procedimiento de fabricación parametrizado, se visualiza una marcada heterogeneidad interna. Esto comprueba un mezclado insuficiente, una baja trabajabilidad efectiva y una distribución despareja del agua de amasado. En particular, en la dosificación 50% AR + 50% ML se observaron con mayor claridad grumos de limo, mientras que en la dosificación 25% AR + 75% ML se identificaron zonas con mayor concentración de cemento.

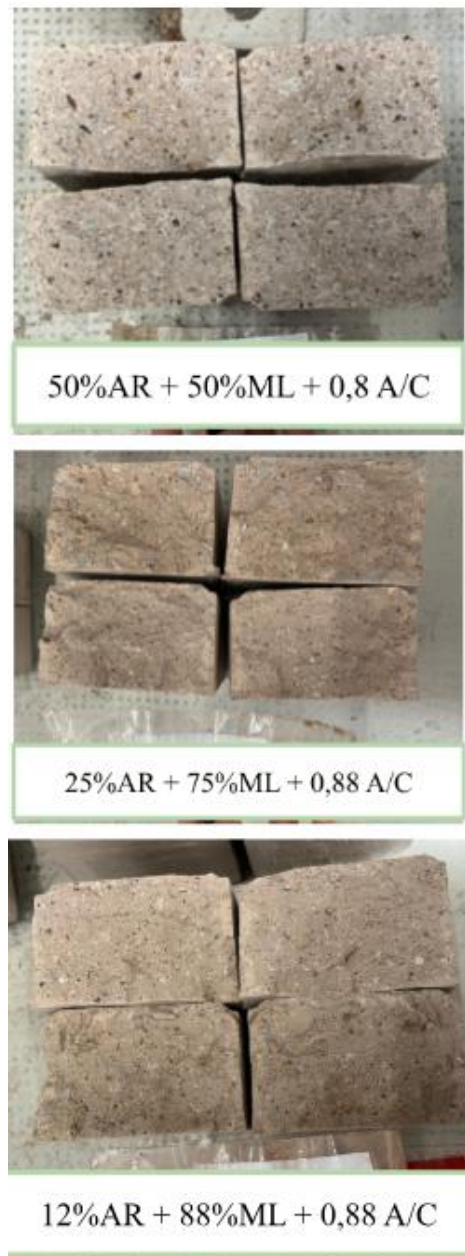


Ilustración 33: Matriz interna de adoquines sin proceso de fabricación parametrizado

Estas observaciones justifican la necesidad de parametrizar el procedimiento de elaboración de los adoquines, orientado a mejorar la homogeneidad interna de la mezcla y reducir la dispersión de resultados en los ensayos posteriores exigidos por norma.

En consecuencia, la preparación del ML en estado seco consistió en un previo proceso iterativo de desmenuzado con mortero (Ilustración 34) y tamizado por malla N°8 (Ilustración 35), asegurando una distribución granulométrica uniforme y evitando la presencia de terrones e impurezas.



Ilustración 34: Tamiz N°8 utilizado para separar partículas gruesas, aglomerados de ML e impurezas



Ilustración 35: Mortero empleado para desmenuzar aglomeraciones de ML

6.3. Procedimiento de mezclado

A partir de ajustes progresivos realizados durante la fase de moldeos experimentales, se adoptó un proceso de mezclado que garantiza la homogeneidad, una hidratación controlada y estabilidad de la relación A/C efectiva. Durante dicha fase, se corroboró que la secuencia de incorporación de los materiales es determinante en el comportamiento de la mezcla en

condiciones de mezclado y colado manual. Por esta razón, para minimizar variaciones, apelmazamiento, segregación o una gran absorción inicial del agua disponible, se estableció la siguiente secuencia operativa de incorporación:

1. Cemento prehidratado con el 10% del agua total prevista para la dosificación.
2. Áridos Reciclados en condición cercana a saturado superficie seca (SSS) con una cantidad de agua equivalente al 5% del peso del AR.
3. Incorporación de parte de limo en forma de enarenado hasta que el amasado comience a dificultarse por pérdida de fluidez.
4. Agua en fracciones controladas equivalentes al 20% del agua restante según la dosificación de la mezcla.

De esta forma, los pasos 3 y 4 se van intercalando hasta completar la incorporación de la totalidad de ambos componentes (ML y agua). Realizar esta incorporación alternada permite una mejor homogeneización, evita la formación de grumos de ML seco y reduce la concentración local de humedad. Además, con una adición progresiva del agua se evitan fenómenos de sobrehidratación súbita, pérdida de trabajabilidad abrupta, segregación visible, aumento de porosidad y pérdida de cohesión repentina, así como permite ajustar la relación A/C en relación al rango operativo definido.

En cuanto a los tiempos de mezclado total, se desarrolló durante aproximadamente 10 minutos, asegurando una distribución uniforme de los componentes, ausencia de grumos de los materiales secos, una textura plástica homogénea y ausencia de exudación visible. Por más que estos factores podrían evitarse con tiempos mayores de mezclado, fue imprescindible evitar el sobremezclado para evitar la evaporación parcial del agua e influyendo en la consistencia final de la mezcla.

6.3.1. Ensayo de consistencia

Durante la fase experimental, se diseñó y aplicó un criterio empírico propio para el control de consistencia. Este criterio surge a partir de trabajar con mezclas que no corresponden a los hormigones convencionales o industriales con vibrocompactación, sino que son mezclas moldeadas manualmente sin ensayos normalizados y tradicionales aplicables.

Por esta razón, el criterio empírico de control de consistencia se desarrolló específicamente para esta investigación, con el objetivo de poder repetir el contenido de humedad preciso y la cohesión óptima en otras dosificaciones. El procedimiento formulado resultó en:

1. Extender manualmente una capa de mezcla fresca de aproximadamente 3 [cm] de espesor sobre una superficie lisa.
2. Introducir una espátula metálica en posición vertical (90° respecto a la superficie).

3. Evaluar la estabilidad de la espátula en el tiempo ante la inserción de la misma en la mezcla.



Ilustración 36: Espátula introducida en mezcla con su mango vertical con respecto a la superficie



Ilustración 37: Restos de mezcla de aproximadamente 3 [cm] de espesor

De esta manera, se consideró que la mezcla presentaba consistencia adecuada si la espátula permanecía momentáneamente sostenida sin perder el equilibrio luego de su inserción vertical. El equilibrio debe ser inestable, perdiéndose ante la más mínima perturbación. Asimismo, es imprescindible que la mezcla no evidencie exudación superficial de agua, fisuras o disgregación granular, ya que esto significa que la mezcla está demasiado seca o demasiado húmeda.

Gracias a este ensayo, se logró aplicar en la fabricación una herramienta práctica de control que permitió reducir la variabilidad entre lotes y establecer un rango operativo de humedad compatible con la compactación manual adoptada. Mediante esta, se verificó que las mezclas con agua excedente ($A/C \geq 0,90$) comenzaban a perder cohesión, mientras que las mezclas con agua insuficiente ($A/C \leq 0,70$) contaban con un comportamiento granular seco, poca trabajabilidad y propensas a la fisuración temprana.

Debido a esto, el procedimiento experimental desarrollado resultó de particular utilidad en las dosificaciones conformadas con proporciones de ML mayores, debido a su alta sensibilidad a las pequeñas variaciones de la cantidad de agua disponible.

6.4. Procedimiento de moldeo y compactación

El procedimiento de moldeo y compactación de adoquines colados constituye una etapa crítica dentro del proceso de la cuál dependen aspectos fundamentales como la densidad y la presencia de vacíos, los cuales tendrán influencia sobre las propiedades mecánicas y la vida útil del elemento.

Con respecto a la elaboración de adoquines colados, con todas las características anteriormente mencionadas, resulta de suma importancia llevar a cabo un adecuado control del proceso. Debido a lo observado, la elevada superficie específica del limo-loésico (ML), demanda una gran cantidad de agua, favoreciendo la aparición de poros, segregaciones y porosidades si no se realiza un adecuado proceso de compactación. Por esto, se implementó un moldeo por colado con compactación manual, con el objetivo de llevar al mínimo el contenido de aire, buscando lograr una mezcla homogénea y asegurar una correcta adherencia entre cada una de las capas que conforman el elemento.

Antes de realizar el vertido de la mezcla, se debe aplicar una capa fina de desmoldante en todas las paredes del molde, garantizando una cobertura total y uniforme, sobre todo en las esquinas y en los biselados. Es importante que esto se realice instantes antes del vertido para evitar el escurrimiento del aceite por las paredes hacia el fondo.

Inmediatamente después del cubrimiento con el desmoldante, se realiza el vertido de la mezcla dentro de los moldes mediante un llenado por capas, con compactación manual de cada una de ellas, como se puede observar en la Ilustración 38 y 39.



Ilustración 38: Llenado con mezcla que cumple con el Ensayo de Consistencia



Ilustración 39: Proceso de llenado y compactación por capas de la mezcla en moldes

En primer lugar, se debe llenar el molde hasta una altura aproximadamente a un tercio de la altura total del molde. Luego se deben realizar 100 penetraciones con espátula, con una adecuada distribución, de la siguiente manera:

- 20 en centro, a lo largo del molde
- 20 del lado izquierdo, a lo largo del molde
- 20 del lado derecho, a lo largo del molde
- 20 entre el centro y el lado izquierdo.
- 20 entre el centro y el lado derecho.

Estas distribuciones de las penetraciones con espátula pueden visualizarse claramente en la Ilustración 40:



Ilustración 40: Distribuciones de las penetraciones con espátula para compactación de mezcla en el molde

Luego, se impacta el molde con pequeños golpes en todas sus paredes con el fin de favorecer la liberación de aire que se encuentra en el interior de la mezcla:

- 90 golpes contra la superficie de trabajo, desde una altura aproximadamente de 5 [cm].
- 30 golpes en cada uno de los laterales del molde, con una varilla metálica o similar.

En segundo y tercer lugar, se llena el molde con una segunda capa hasta el segundo tercio del molde y luego con una tercera capa que llena la totalidad del molde. Para cada una de estas, se debe realizar el mismo procedimiento de penetración, garantizando que la espátula alcance la mitad de la capa anterior, y de compactación mediante golpes controlados en su contracara y cuatro paredes.

Por último, se nivela y se enrasa la superficie libre del adoquín, retirando todo el material excedente, mediante el uso de una espátula o cuchara de albañil. Esto permite obtener una superficie uniforme y cumplir con los requisitos geométricos establecidos por la Norma IRAM 11656.

6.5. Procedimiento de curado

Luego del proceso de moldeo y compactación, la mezcla contenida en los moldes es almacenada dentro de una cámara húmeda donde se somete a un proceso de curado controlado, para lograr un correcto fraguado del cemento y evitar pérdidas abruptas de humedad, preservando los aspectos físicos, geométrico y las propiedades mecánicas del adoquín.

La cámara de curado se confeccionó empleando una bolsa de plástico en perfecto estado, rociada con agua en su interior. Se la ubicó en el laboratorio de trabajo, garantizando un ambiente protegido, sin exposición a la luz solar o a altas temperaturas, como se puede observar en la Ilustración 41.

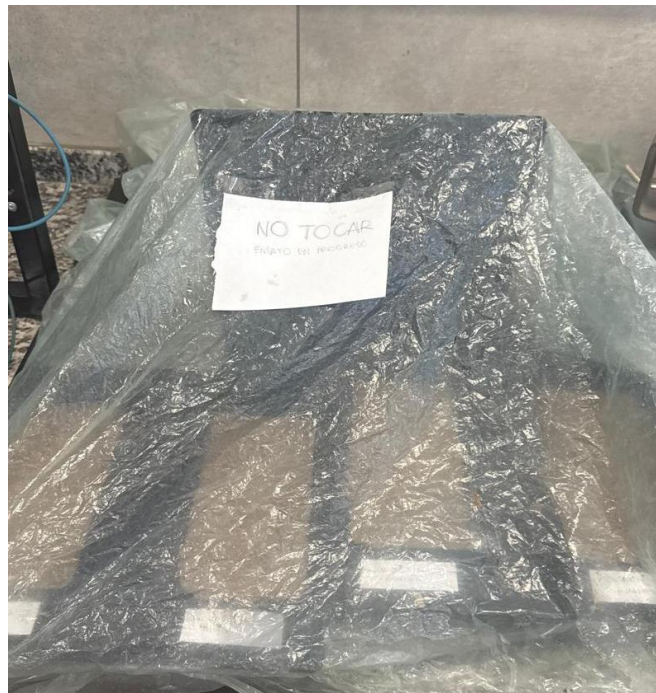


Ilustración 41: Cámara de Curado

Las muestras permanecieron dentro de la cámara de curado por un periodo de 28 días, ayudando al desarrollo progresivo de la hidratación del cemento y a que se consolide la matriz cementicia. Una vez superado este periodo, los adoquines se retiraron de la cámara y se mantuvieron por 24 horas en condiciones ambientales para completar el secado de forma natural.

6.6. Procedimiento de desmolde

Una vez finalizado el proceso de curado de los adoquines, el siguiente paso es el desmolde de los mismos, donde se busca llevar a cabo una extracción correcta, sin dañar la muestra, generar grietas y fisuras o dañar sus bordes y aristas. Para esto, este procedimiento debe realizarse preferentemente mediante vuelco (como se muestra en la Ilustración 42) y, en

los casos de mayor adherencia, golpes con martillo de goma sobre la contracara y las paredes del molde, para facilitar su extracción.



Ilustración 42: Desmolde de adoquines mediante vuelco del molde

En síntesis, el proceso de elaboración adoptado permitió sistematizar las variables operativas más influyentes en la elaboración manual de los adoquines, reduciendo la dispersión que se daba lugar en las etapas preliminares. Ya con un proceso parametrizado definido, se elaboran las dosificaciones definitivas para ensayar y obtener sus propiedades físicas y mecánicas.



CAPÍTULO 7

ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ADOQUINES COLADOS CON ÁRIDO RECICLADO Y LIMO LOÉSSICO

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE ADOQUINES COLADOS DE AR Y ML

Los ensayos fueron realizados conforme a lo establecido en la norma IRAM 11656 y contemplando los aspectos tecno-constructivos preliminares, utilizada como referencia para evaluar el comportamiento físico, geométrico y mecánico de los adoquines elaborados con árido reciclado y limo-loésico. A partir de estos ensayos, se busca determinar el desempeño del adoquín Holanda frente a sollicitaciones vinculadas con su posible aplicación, considerando parámetros como estabilidad dimensional, absorción de agua, resistencia a flexión y resistencia al desgaste superficial.

Con el fin de garantizar un adecuado comportamiento en servicio, es fundamental que estos cumplan con una serie de requisitos mecánicos, físicos y geométricos. Este capítulo tiene como propósito especificar las características técnicas de los mismos y la ejecución de cada uno de los ensayos establecidos por la norma con el fin de destacar su importancia desde el punto de vista funcional, su diseño y durabilidad.

7.1. Requisitos físicos y geométricos

La evaluación de los adoquines elaborados en esta investigación se realizó tomando como referencia los requisitos establecidos por la norma. Estos requisitos constituyen una base de control de calidad, ya que permiten verificar la uniformidad de las piezas, su adecuada colocación en obra y su comportamiento frente a las sollicitaciones de servicio.

Desde el punto de vista geométrico, la norma establece límites para las dimensiones nominales del adoquín y tolerancias admisibles para sus dimensiones reales, con el objetivo de asegurar una correcta trabazón entre piezas, una distribución adecuada de cargas y la estabilidad del conjunto pavimentado. En este sentido, la geometría del adoquín queda definida por su largo, ancho y espesor, siendo este último un parámetro particularmente relevante, dado que condiciona la capacidad portante del elemento y, por lo tanto, su ámbito de aplicación según el tipo de tránsito previsto.

Para el presente trabajo se adoptó un adoquín de dimensiones nominales:

$$200 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$$

Estas dimensiones son compatibles con piezas destinadas a sollicitaciones de tránsito liviano. De acuerdo con la IRAM 11656, el largo nominal no debe ser inferior a 50 [mm] ni superior a 250 [mm], el ancho nominal no debe ser menor que 50 [mm], y el espesor estándar mínimo para este tipo de aplicación es de 60 mm.

Una vez definidas las dimensiones nominales, se procedió a verificar las dimensiones reales de cada pieza mediante Calibre Vernier (Ilustración 43). Esta verificación adquiere especial importancia en el presente estudio, dado que el proceso de fabricación manual puede introducir variaciones dimensionales mayores que las observadas en procesos industrializados. Por ello, el control geométrico fue considerado una etapa fundamental para evaluar la

uniformidad de los adoquines y detectar posibles irregularidades que pudieran afectar tanto su colocación como su comportamiento en servicio.



Ilustración 43: Medición de largo del adoquín con Calibre Vernier

A continuación, en la Tabla 11 se pueden observar las dimensiones de cada una de las piezas analizadas para cuantificarlas y tener en cuenta estas variaciones propias del proceso de fabricación.

Tabla 11: Dimensiones de adoquines en condición seca

Identificación	Largo (Ls) [cm]	Ancho (Bs) [cm]	Espesor (Es) [cm]
50 -1	19,57	9,65	6,19
50 -2	19,53	9,70	6,18
75 -1	19,51	9,67	6,07
75 -2	19,50	9,63	6,00
75 -3	19,52	9,65	6,15
88 - 0,84	19,50	9,65	6,12
88 - 0,8 -2	19,53	9,59	6,06
88 - 0,8 -1	19,57	9,61	6,05

Se observa que todos los adoquines cumplen con los límites geométricos impuestos por la normativa.

7.2.1. Verificación deformacional ante expansión por humedad

En adición, se registraron las dimensiones correspondientes al largo, ancho y espesor en condición saturada superficie seca (SSS) (ver Tabla 12), con el fin de compararlas con las registradas en condición seca (S) y evaluar las posibles variaciones geométricas asociadas a la absorción de agua.

Tabla 12: Dimensiones de adoquines en condición saturada superficie seca

Identificación	Largo (L _{SSS}) [cm]	Ancho (B _{SSS}) [cm]	Espesor (E _{SSS}) [cm]
50 - 1	19,58	9,64	6,19
50 - 2	19,54	9,70	6,18
75 - 1	19,55	9,65	6,06
75 - 2	19,52	9,60	6,01
75 - 3	19,54	9,64	6,13
88 - 0,84	19,51	9,65	6,11
88 - 0,8 - 2	19,55	9,63	6,01
88 - 0,8 - 1	19,58	9,67	6,00

En primer lugar, se analizó las deformaciones lineales entre la condición S y la condición SSS para tener un indicador de deformación total. Para esto, se calcularon las variaciones entre ambos estados de las dimensiones correspondientes al largo (ver Ecuaciones 4 y 5), al ancho (ver Ecuaciones 6 y 7), y al espesor (ver Ecuaciones 8 y 9):

$$\Delta L [cm] = L_{SSS} - L_S \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\Delta L [\%] = \frac{L_{SSS} - L_S}{L_S} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\Delta B [cm] = B_{SSS} - B_S \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\Delta B [\%] = \frac{B_{SSS} - B_S}{B_S} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\Delta E [cm] = E_{SSS} - E_S \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\Delta E [\%] = \frac{E_{SSS} - E_S}{E_S} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 9}$$

Siendo:

- L_S : largo en condición seca, en centímetros
- L_{SSS} : largo en condición saturada superficie seca, en centímetros
- B_S : ancho en condición seca, en centímetros
- B_{SSS} : ancho en condición saturada superficie seca, en centímetros
- E_S : espesor en condición seca, en centímetros
- E_{SSS} : espesor en condición saturada superficie seca, en centímetros

Con estas fórmulas se obtuvieron variaciones positivas, que significaban expansiones, y negativas, siendo estas contracciones, luego de sumergirse en agua.

A partir de las variaciones dimensionales medidas entre ambas condiciones, se calculó la deformación total de cada probeta mediante la suma de los valores absolutos de las deformaciones relativas de cada dimensión (ver Ecuación 10). Con esto se buscó estimar la magnitud global de deformación higroscópica asociada a la absorción de agua de cada dosificación.

$$Def. total [\%] = |\Delta L| + |\Delta B| + |\Delta E| \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- ΔL : variación o deformación en la dirección longitudinal, en porcentaje absoluto
- ΔB : variación o deformación en la dirección transversal, en porcentaje absoluto
- ΔE : variación o deformación, asociada al espesor, en porcentaje absoluto

En la Tabla 13 se pueden observar las deformaciones lineales totales correspondientes a cada dosificación estudiada.

Tabla 13: Variaciones longitudinales en las dimensiones de los adoquines

Identificación	ΔL [cm]	ΔL [%]	ΔB [cm]	ΔB [%]	ΔE [cm]	ΔE [%]	Def. total [%]
50 - 1	0,010	0,051	-0,006	-0,062	0,004	0,065	0,178
50 - 2	0,008	0,041	-0,002	-0,021	-0,005	-0,078	0,139
75 - 1	0,038	0,195	-0,018	-0,186	-0,014	-0,231	0,612
75 - 2	0,022	0,113	-0,028	-0,291	0,006	0,100	0,504
75 - 3	0,018	0,092	-0,010	-0,104	-0,013	-0,218	0,414
88 - 0,84	0,010	0,051	0,002	0,021	-0,012	-0,196	0,268
88 - 0,8 - 2	0,020	0,102	0,040	0,417	-0,053	-0,869	1,388
88 - 0,8 -1	0,002	0,010	0,062	0,645	-0,050	-0,826	1,482

Las mezclas con proporción equilibrada 50%AR + 50%ML presentan los menores niveles de deformación, con valores comprendidos entre 0,139% y 0,178%. Esto demuestra que la presencia de un esqueleto granular aportado por el árido reciclado contribuye a limitar las deformaciones volumétricas inducidas por la absorción de agua.

En segundo lugar, las mezclas con proporción de limo de 75% presentaron de los mayores niveles de deformación, alcanzando valores de hasta 0,612%. Este comportamiento puede deberse a una pérdida de continuidad del esqueleto granular debido a la alta proporción

de limo. Sin embargo, está gran cantidad de limo tampoco es suficiente para generar una matriz fina consolidada, lo que empeora la sensibilidad del material frente a variaciones de humedad.

Las mezclas con mayor contenido de limo (88% ML) mostraron un comportamiento más variable, evidenciando una fuerte influencia de la relación A/C utilizada durante la dosificación. Al adoptar una relación A/C limitada a 0,8, valor especificado por manuales internacionales como el ICPI y la CMHA, las deformaciones fueron significativas, tomando como valor máximo 1,482%. En cambio, al exceder dicho límite y adoptar una relación de A/C de 0,84 se observa una gran mejoría del comportamiento del adoquín, sugiriendo que se requiere un leve aumento del límite técnico recomendado en mezclas donde predominan las fracciones finas.

7.2.2. Verificación volumétrica ante expansión por humedad

En adición, se tomó como segundo parámetro la variación volumétrica entre la condición seca y la saturada superficie seca, expresando los cambios en el volumen externo del adoquín, reflejando la presencia de expansión higroscópica, redistribución interna de humedad y sensibilidad del material a la saturación.

Para esto, se calcularon los volúmenes de cada adoquín en la condición seca con la Ecuación 11 y de la condición saturada superficie seca con la Ecuación 12:

$$V_s = L_s \cdot B_s \cdot E_s \quad \text{Ecuación 11}$$

$$V_{SSS} = L_{SSS} \cdot B_{SSS} \cdot E_{SSS} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

- V_s : volumen en condición seca, en centímetros cúbicos
- V_{SSS} : volumen en condición saturada superficie seca, en centímetros cúbicos

Una vez obtenidos los volúmenes, se calculó la diferencia entre los mismos (ver Ecuaciones 13 y 14):

$$\text{Relación volumétrica [\%]} = \frac{V_{SSS}}{V_s} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 13}$$

$$\text{Variación volumétrica [\%]} = \frac{V_{SSS} - V_s}{V_s} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 14}$$

Dichas relaciones y variaciones de cada dosificación se resumen en la Tabla 14, donde valores mayores a 100 representan expansiones y valores menores, contracciones, además de una desviación porcentual como indicador de magnitud del cambio volumétrico

Tabla 14: Variaciones volumétricas de adoquines

Identificación	Volumen S [cm ³]	Volumen SSS [cm ³]	Relación volumétrica [%]	Variación volumétrica [%]
50 -1	1168,25	1168,87	100,05	0,05
50 - 2	1171,54	1170,86	99,94	-0,06
75 -1	1144,94	1142,39	99,78	-0,22
75 -2	1126,36	1125,29	99,90	-0,10
75 - 3	1157,72	1155,06	99,77	-0,23
88 - 0,84	1151,63	1150,20	99,88	-0,12
88 - 0,8 - 2	1135,87	1131,86	99,65	-0,35
88 - 0,8 -1	1137,57	1135,56	99,82	-0,18

Los resultados obtenidos evidencian, en la mayoría de las probetas, una leve contracción volumétrica aparente al comparar la condición seca con la condición saturada superficie seca. Si bien, intuitivamente, podría esperarse una expansión por ingreso de agua, en materiales compuestos por una matriz fina de alta superficie específica y compactación manual limitada pueden producirse reajustes internos de la estructura porosa durante el ciclo de secado-humectación. En este sentido, el secado en horno puede inducir tensiones internas y retracciones no totalmente reversibles, mientras que la posterior saturación favorece una redistribución de humedad que no necesariamente recupera la geometría inicial. Este comportamiento tiende a acentuarse en las mezclas con mayor contenido de limo, debido al predominio de la fracción fina, su mayor sensibilidad higroscópica y la menor participación del esqueleto granular aportado por el árido reciclado.

La dosificación 50%AR + 50% ML es la que menores variaciones volumétrica entre las condiciones seca y saturada superficie seca presentó. Los valores obtenidos de 0,05% y -0,06% representan una variación volumétrica prácticamente estable ante la presencia de agua. La presencia en misma proporción de la fracción granular es suficiente para desarrollar estabilidad geométrica y limitar reajustes internos inducidos por la humedad.

La dosificación correspondiente al 25%AR + 75%ML es la que mayores contracciones volumétricas presenta, con valores comprendidos entre -0,23% y -0,67%. Estos resultados indican una mayor sensibilidad dimensional frente a la absorción de agua, manifestándose una contracción aparente más pronunciada entre el estado seco y el estado saturado superficie seca. Esto, hace que esta dosificación sea la menos favorable de las tres desde el punto de vista de la estabilidad volumétrica.

Por último, la dosificación de 12%AR + 88%ML registra variaciones volumétricas negativas de magnitud intermedia, comprendidas entre $-0,12\%$ y $-0,37\%$, valores inferiores a los observados en la mezcla 75% ML, aunque superiores a los de la dosificación 50% ML. Esto indica que el material presenta una respuesta dimensional más estable que la dosificación intermedia, aunque con una sensibilidad todavía apreciable frente al ingreso de agua. Este comportamiento puede explicarse por el efecto filler asociado al alto contenido de limo loésico, que tiende a rellenar parcialmente los vacíos entre partículas y a conformar una matriz más continua.

7.3. Ensayo de absorción

El ensayo de absorción se llevó a cabo con el objetivo de cuantificar la capacidad de incorporación de agua de los adoquines colados, siendo estos constituidos por un material de matriz porosa. Por esta razón, dicho parámetro representa un indicador indirecto del grado de porosidad interna con la que cuenta el elemento estructural elaborado, con influencias en la resistencia, la durabilidad y el desgaste superficial que pueden experimentar en su uso.

En base a la normativa, se llevó a cabo el procedimiento del ensayo aplicado en 2 (dos) adoquines de la dosificación 50:50, 3 (tres) adoquines de la dosificación 25:75 y 3 (tres) adoquines de la dosificación 12:88, ensayando un total de 8 (ocho) adoquines. Las probetas seleccionadas fueron previamente curadas y medidas con calibre, para también poder realizar controles de apariencia y dimensionales.

En primer lugar, los adoquines fueron secados en el horno con ventilación forzada, como se puede observar en la Ilustración 44, dispuesto en el laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, a una temperatura de 110°C durante 24 horas para alcanzar masa constante y registrar el peso seco correspondiente.



Ilustración 44: Probetas en el horno

Las probetas fueron extraídas del horno transcurridas las 24 horas y permanecieron a temperatura ambiente hasta su enfriamiento. Se destacó que las probetas con mayor porcentaje de limo tardaban más tiempo en enfriarse. Luego, se las pesó en una balanza con una precisión de 1 [g] (ver Tabla 15).

Tabla 15: Medidas tomadas en condición seca

Identificación	Largo (Ls) [cm]	Ancho (Bs) [cm]	Espesor (Es) [cm]	Peso seco (Ps) [g]
50 - 1	19,57	9,65	6,19	1930
50 - 2	19,53	9,70	6,18	1896
75 - 1	19,51	9,67	6,07	1716
75 - 2	19,50	9,63	6,00	1764
75 - 3	19,52	9,65	6,15	1807
88 - 0,84	19,50	9,65	6,12	1820
88 - 0,8 - 2	19,53	9,59	6,06	1926
88 - 0,8 - 1	19,57	9,61	6,05	1941

Adicionalmente, se realizó una observación experimental complementaria donde se sumergió en agua a los adoquines en estado seco, utilizando un dispositivo confeccionado en base al principio de Arquímedes, para percibir cualitativamente la velocidad con la que el peso aparente sumergido de cada adoquín disminuye debido a la liberación del aire atrapado. Dicho dispositivo fue compuesto por una balanza, un recipiente enrejado sostenido mediante sistema de polea para contener el adoquín inmerso y un recipiente con agua suficiente para cubrir el adoquín suspendido (Ilustración 45).



Ilustración 45: Dispositivo de inmersión

Se observó que los adoquines con menor contenido de limo alcanzaban más rápidamente un peso sumergido estable, mientras que aquellos con mayor proporción de limo presentaban una disminución más gradual del empuje hidrostático. Tanto la velocidad de enfriamiento como la velocidad de absorción de agua reflejan el aumento de la superficie específica y de poros más finos y menos interconectados con la incorporación de la fracción fina de limo. Con esto, se observa como el suelo limo-loésico modifica la estructura porosa del material mediante su efecto filler.

Continuando con el ensayo de absorción, los adoquines enfriados se sumergieron en agua durante 24 horas para lograr una saturación progresiva de los poros. Al finalizar el período de inmersión, los adoquines fueron retirados del agua para disponerlos nuevamente en el dispositivo basado en el Principio de Arquímedes para obtener el peso sumergido real (ver Tabla 16).

Tabla 16: Medidas en condición saturada superficie seca

Identificación	Largo (L _{sss}) [cm]	Ancho (B _{sss}) [cm]	Espesor (E _{sss}) [cm]	Peso sumergido (P _{sum}) [g]
50 -1	19,58	9,64	6,19	1138
50 - 2	19,54	9,70	6,18	1106
75 -1	19,55	9,65	6,06	1061
75 -2	19,52	9,60	6,01	1088
75 - 3	19,54	9,64	6,13	1119
88 - 0,84	19,51	9,65	6,11	1105
88 - 0,8 - 2	19,55	9,63	6,01	1088
88 - 0,8 -1	19,58	9,67	6,00	1076

Luego, fueron secados superficialmente mediante un paño absorbente para alcanzar la condición saturada superficie seca (SSS) y se pesaron nuevamente. Para garantizar la precisión del ensayo, el peso en condición SSS fue determinado mediante dos pesadas consecutivas, verificando que la diferencia entre ambas sea menor a 0,2%, conforme a los criterios establecidos por la norma (ver Tabla 17).

Tabla 17: Verificación de diferencia entre pesos en condición saturada superficie seca

Identificación	1° P _{sss} [g]	2° P _{sss} [g]	ΔP _{sss} [%]	Peso saturado superficie seca (P _{sss}) [g]
50 -1	2244,00	2243,00	0,04	2244
50 -2	2190,00	2189,00	0,05	2190
75 -1	2056,00	2055,00	0,05	2056
75 -2	2106,00	2105,00	0,05	2106
75 -3	2169,00	2169,00	0,00	2169
88 - 0,84	2180,00	2179,00	0,05	2180
88 - 0,8 - 2	2210,00	2210,00	0,00	2210
88 - 0,8 - 1	2184,00	2183,00	0,05	2184

Con los registros obtenidos, se calculó la absorción mediante las Ecuaciones 15 y 16:

$$Aa[kg/m^3] = \left[\frac{P_{sss} - P_s}{P_{sss} - P_{sum}} \right] \cdot 1000 \quad \text{Ecuación 15}$$

$$Aa[\%] = \left[\frac{P_{sss} - P_s}{P_s} \right] \cdot 100 \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- Aa : absorción de los adoquines, en porcentaje
- P_{sss} : peso en condición saturada superficie seca, en gramos
- P_s : peso en condición seca, en gramos
- P_{sum} : peso de adoquín inmerso y suspendido en agua, en gramos
- 1000: densidad del agua, en kilogramos por metro cúbico

Entonces, los valores de absorción obtenidos para cada dosificación fueron los registrados en la Tabla 18:

Tabla 18: Absorción de adoquines

Identificación	P _{SSS} [g]	P _s [g]	P _{sum} [g]	Aa [kg/m ³]	Aa [%]	Aa promedio [%]
50 -1	2243,50	1929,50	1138,00	284,03	16,27	15,89
50 - 2	2189,50	1895,50	1106,00	271,34	15,51	
75 -1	2055,50	1716,00	1061,00	341,38	19,78	19,75
75 -2	2105,50	1763,50	1088,00	336,12	19,39	
75 - 3	2169,00	1806,50	1119,00	345,24	20,07	
88 - 0,84	2179,50	1820,00	1105,00	334,57	19,75	15,68
88 - 0,8 - 2	2210,00	1925,50	1088,00	253,57	14,78	
88 - 0,8 - 1	2183,50	1940,50	1076,00	219,41	12,52	

En relación con la normativa, se exige que la absorción de cada adoquín individualmente no debe superar el 7% y que el promedio de absorción debe ser menor o igual al 5%, con respecto a la masa del adoquín seco.

Los valores obtenidos en el presente trabajo de investigación son superiores a los típicamente exigidos para adoquines de hormigón convencional, lo cual resulta coherente con el carácter experimental de la mezcla. Los factores más influyentes corresponden a la alta absorción del árido reciclado (4,65%), asociada al mortero adherido y su microestructura porosa, y a la elevada fracción de partículas finas del limo loésico (94,3% pasante tamiz N°200), la cual incrementa la superficie específica del sistema y modifica la distribución de poros. Asimismo, la mayor relación de vacíos inicial del limo ($e_0 = 1,133$) y su mayor humedad óptima de compactación ($\omega_{opt} = 19\%$) contribuyen a generar una red capilar más desarrollada en la matriz endurecida.

Los resultados indican que la absorción no depende únicamente del contenido de limo, sino del equilibrio entre fracción fina, relación A/C y eficiencia de compactación. En este sentido, la dosificación intermedia 25%AR + 75%ML fue la que presentó la mayor absorción, lo que sugiere una combinación menos estable desde el punto de vista de la estructura de vacíos. En cambio, la mezcla con 88% ML mostró valores inferiores, posiblemente debido a una mayor continuidad matricial asociada al efecto filler de la fracción fina.

La densidad aparente de los adoquines fue determinada a partir de los pesos en condición seca, en condición SSS y sumergidos (ver Ecuación 17), obtenidos durante el ensayo de absorción, caracterizando la compacidad del material ya endurecido.

$$\rho [kg/m^3] = \left[\frac{P_s}{P_{SSS} - P_{sum}} \right] \cdot 1000$$

Ecuación 17

Donde:

- ρ : densidad del adoquín, en kilogramo por metro cúbico
- P_{SSS} : peso en condición saturada superficie seca, en gramos
- P_s : peso en condición seca, en gramos
- P_{sum} : peso de adoquín inmerso y suspendido en agua, en gramos
- 1000: densidad del agua, en kilogramos por metro cúbico

En la Tabla 19 se observan los pesos en condición seca, en condición SSS y sumergidos, y la densidad particular de los adoquines y promedio de cada dosificación en estudio.

Tabla 19: Densidades de adoquines

Identificación	P _{SSS} [g]	P _s [g]	P _{sum} [g]	ρ [kg/m ³]	ρ promedio [kg/m ³]
50 - 1	2243,50	1929,50	1138,00	1745,36	1747,39
50 - 2	2189,50	1895,50	1106,00	1749,42	
75 - 1	2055,50	1716,00	1061,00	1725,49	1726,38
75 - 2	2105,50	1763,50	1088,00	1733,17	
75 - 3	2169,00	1806,50	1119,00	1720,48	
88 - 0,84	2179,50	1820,00	1105,00	1693,81	1720,70
88 - 0,8 - 2	2210,00	1925,50	1088,00	1716,13	
88 - 0,8 - 1	2183,50	1940,50	1076,00	1752,14	

La dosificación 50% AR + 50% ML presentó la mayor densidad promedio, con un valor de 1747,39 [kg/m³], mientras que las mezclas con mayor contenido de limo mostraron densidades ligeramente inferiores, con valores medios cercanos a 1720 [kg/m³]. Esta disminución se debe a la sensibilidad de la mezcla al contenido de agua y al procedimiento de compactación al estar dominada por la fracción fina, llevando a una presencia mayor de vacíos internos.

Por otro lado, los valores de densidad obtenidos resultan inferiores a los típicos de hormigones convencionales, con densidades del orden de 2000 y 2800 [kg/m³] (Reglamento CIRSOC 200). Las densidades de los adoquines estudiados son del orden de 1700 [kg/m³], por lo que se clasifican como hormigones livianos según el Reglamento CIRSOC 200, teniendo una densidad inferior a 2000 [kg/m³].

Tabla 20: Densidades típicas de distintos tipos de hormigón

Tipo de hormigón	Densidad [kg/m ³]
Convencional	2000 - 2800
Liviano	800 - 2000
Analizado	1700

(Reglamento CIRSOC 200)

7.4. Ensayo de módulo de rotura a la flexión

Se realizó el ensayo de módulo de rotura a la flexión aplicado sobre 3 (tres) adoquines de cada una de las 3 (tres) dosificaciones en estudio, resultando en una cantidad de 9 (nueve) adoquines ensayados. Dicho ensayo constituye un parámetro fundamental al evaluar el comportamiento mecánico de los adoquines frente a la flexión, simulando las tensiones inducidas por las cargas de servicio que le serían transmitidas al constituir el pavimento. Así, se logra estimar la capacidad de resistencia de los elementos ante la fisuración y rotura debidas a la flexión.

Para esto, se utilizó la prensa de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba, debido a su capacidad de aplicación de carga, su debida calibración y su dispositivo de lectura con un error menor al 1% de la carga.



Ilustración 46: Prensa utilizada en el ensayo

La máquina de ensayo fue constituida por 3 (tres) puntos: uno de aplicación de carga en el centro de la luz y dos de apoyo ubicados paralelos entre sí, paralelos al

dispositivo de carga y a 1 cm de cada extremo longitudinal de los adoquines, tomando una longitud de ensayo (L_e) de 18 [cm]. Dichos puntos fueron materializados con elementos cilíndricos para evitar la introducción de esfuerzos torsionales no deseados. Finalmente, se incorporaron láminas de caucho entre el adoquín y los dispositivos de apoyo y carga como se puede ver en la Ilustración 47.

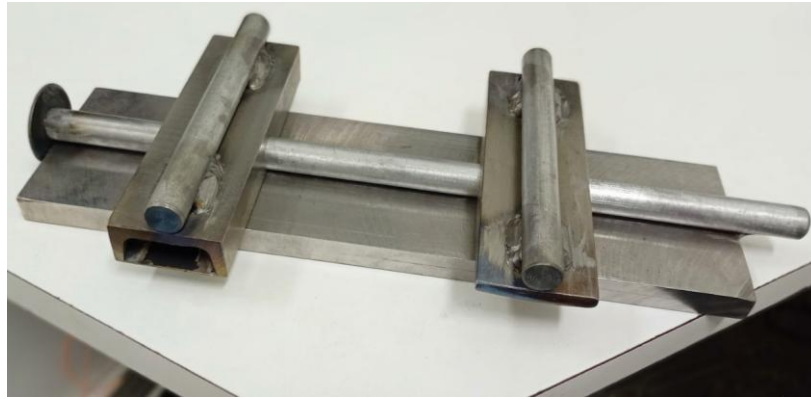


Ilustración 47: Dispositivo de apoyo para ensayo de flexión (IRAM 11656)

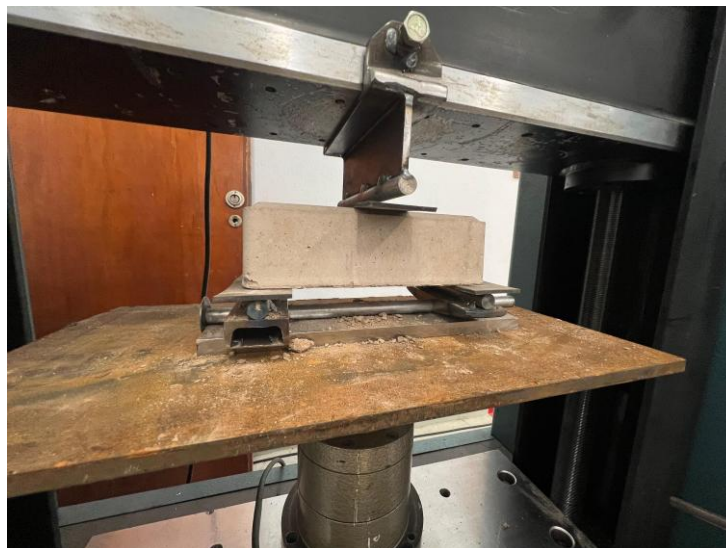


Ilustración 48: Disposición de puntos de aplicación de carga y apoyo con láminas de caucho

El procedimiento del ensayo se llevó a cabo en base a la Norma IRAM 11656:2019. Los adoquines fueron apoyados sobre los dos puntos correspondientes y con la cara de desgaste hacia el punto de aplicación de la carga. La carga se aplicó con un aumento constante y progresivo de $0,10 \pm 0,05$ [MPa/s], hasta la rotura del adoquín sometido al ensayo. Durante el ensayo, se observó un modo de rotura predominante por fractura central de forma vertical, desde la zona inferior de la probeta hacia la zona de carga, comportamiento típico de elementos sometidos a flexión simple en tres puntos. A su vez, se realizaba el registro de las cargas, obteniendo la carga máxima alcanzada en el instante de falla. A partir de la Ecuación 18 se obtuvieron los módulos de rotura a flexión:

$$M_r [Mpa] = \left[\frac{3 * C_{max} * l_e}{2 * ar * er^2} \right]$$

Ecuación 18

Siendo:

- M_r : módulo de rotura a flexión, en megapascal;
- l_e : luz del ensayo, en milímetros;
- ar : ancho real de la probeta, en milímetros;
- er : espesor real de la probeta, en milímetros;
- C_{max} : la carga máxima de rotura, en newton;

Con esto, se resume en la Tabla 21 los valores de módulo de rotura obtenidos y corregidos de cada dosificación:

Tabla 21: Valores obtenidos y corregidos durante el ensayo

Identificación	Escala [kg]	Medición	Carga [kg]	Carga [N]	Mr [MPa]	Mr corregido [MPa]
50 - 1	500,00	3,00	150,00	1470,00	1,10	1,30
50 - 2	500,00	2,55	127,50	1249,50	0,94	1,10
50 - 3	500,00	2,80	140,00	1372,00	1,03	1,21
75 - 1	500,00	2,20	110,00	1078,00	0,81	0,95
75 - 2	500,00	3,10	155,00	1519,00	1,14	1,34
75 - 3	500,00	3,00	150,00	1470,00	1,10	1,30
88 - 1	500,00	2,95	147,50	1445,50	1,08	1,28
88 - 2	500,00	2,25	112,50	1102,50	0,83	0,97
88 - 3	500,00	2,95	147,50	1445,50	1,08	1,28

A partir de los valores registrados, se realiza un análisis estadístico de los valores (ver Tabla 22).

Tabla 22: Análisis de resultados

Identificación	Mr [MPa]	Mr corregido [MPa]	Promedio	R3	R3 [%]	Desvío. Standard
50 - 1	1,10	1,30	1,204	0,19	16,17%	0,08
50 - 2	0,94	1,10				
50 - 3	1,03	1,21				
75 - 1	0,81	0,95	1,196	0,39	32,53%	0,17
75 - 2	1,14	1,34				
75 - 3	1,10	1,30				
88 - 1	1,08	1,28	1,175	0,30	25,77%	0,14
88 - 2	0,83	0,97				
88 - 3	1,08	1,28				

Las tres dosificaciones presentan valores medios de resistencia próximos, de 1,204 MPa para la dosificación 50% AR + 50% ML, 1,196 MPa para la dosificación 25% AR + 75% ML, y 1,175 MPa para la dosificación 12% AR + 88% ML, por lo que la resistencia a flexión dentro del rango de dosificaciones estudiado se mantiene en un orden de 1,10 y 1,30 MPa. Las leves disminuciones registradas coinciden con el aumento en el contenido de limo (ML) y el aumento de la relación agua/cemento (A/C). Esto indica en primera instancia que el limo no provoca caídas significativas de la resistencia a flexión, siempre que se lleve a cabo de forma controlada el proceso de fraguado y de consolidación. En segunda instancia, se concluye en que la relación A/C mejora la trabajabilidad de la mezcla, pero incrementa la porosidad capilar del material ya endurecido, conllevando a futuros impactos negativos en la resistencia mecánica del elemento.

A partir de un análisis estadístico, se logró destacar la variabilidad de los resultados como otro aspecto crítico, mostrando una dispersión de resultados mediante el desvío y R3%. Las mezclas que presentan la mayor dispersión de resultados, un R3% más elevado y mayor desvío estándar son las mezclas correspondientes a una dosificación de 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C, con un R3 del 33%, confirmando la inestabilidad de la dosificación, por más que su resistencia sea próxima a las demás.

Teniendo en cuenta ambos aspectos, de resistencia y estabilidad, la mezcla 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C es la que presenta mejor compromiso entre estas. Debido a esto, se toman los adoquines confeccionados con dicha dosificación para llevar a cabo el Ensayo de Abrasión.

Por otro lado, la norma exige los siguientes valores de módulo de rotura a flexión, que pueden ser observados en la Tabla 23:

Tabla 23: Requisitos del módulo de rotura a la flexión y resistencia a la abrasión

Módulo de rotura (Mr) a los 28 d ¹⁾ , mínimo ²⁾ (MPa)		Resistencia a la abrasión ¹⁾ (largo de la huella (lh) máximo) (mm)
Promedio de 3 especímenes	Individual	Promedio de 3 especímenes
4,2	3,8	23
<p>¹⁾ El módulo de rotura (Mr). La edad mínima se especifica a los 28 d. Sin embargo, los adoquines se pueden utilizar a edades más tempranas, cuando existe un historial sobre la evolución del módulo de rotura (Mr) de adoquines de iguales características, y éste indique que los primeros pueden alcanzar este módulo y además poseen la resistencia necesaria para ser colocados. Lo anterior, no exime de la verificación directa de la calidad de los adoquines mediante ensayos a los 28 d.</p> <p>²⁾ Se pueden especificar módulos de rotura (Mr) mayores, o capas superficiales de características especiales, cuando lo requieran las condiciones de servicio (p. ej. con cargas abrasivas, llantas y orugas metálicas, etc.), en cuyo caso se deben consultar con los proveedores locales para averiguar por la disponibilidad de este tipo de adoquines.</p>		

(IRAM 11656:2019)

Entonces, desde el punto de vista normativo, los adoquines elaborados no cumplen con los requisitos mínimos de módulo de rotura establecidos por la IRAM 11656 para adoquines estructurales. En consecuencia, los resultados obtenidos permiten interpretar estas piezas como desarrollos experimentales con potencial de mejora, pero no como elementos aptos, en su estado actual, para aplicaciones estructurales sometidas a tránsito vehicular pesado.

Esta diferencia resulta esperable y coherente con el enfoque del trabajo debido a que no son adoquines de hormigón convencional, sino una dosificación experimental compuesta de limo loésico y árido reciclado mediante un proceso de compactación manual. En primer lugar, el árido reciclado fino presenta alta absorción ($\approx 4,65\%$) y mayor porosidad interna, producto del mortero adherido proveniente del hormigón original, lo que incrementa la porosidad de la matriz endurecida. En segundo lugar, el limo loésico incorpora una elevada fracción de partículas finas, aumentando la superficie específica del sistema y la demanda de agua de amasado. Finalmente, el proceso de compactación manual empleado en laboratorio introduce una energía de densificación significativamente menor que la vibrocompactación industrial utilizada en la fabricación de adoquines comerciales, lo cual se traduce en una mayor presencia de vacíos internos y, consecuentemente, en menores resistencias mecánicas.

Luego llevar a cabo el ensayo de módulo de rotura, se aprovecharon los elementos partidos para realizar una inspección visual, analizando y evaluando la eficiencia del mezclado, el vertido y la compactación adoptados durante el procedimiento de fabricación.

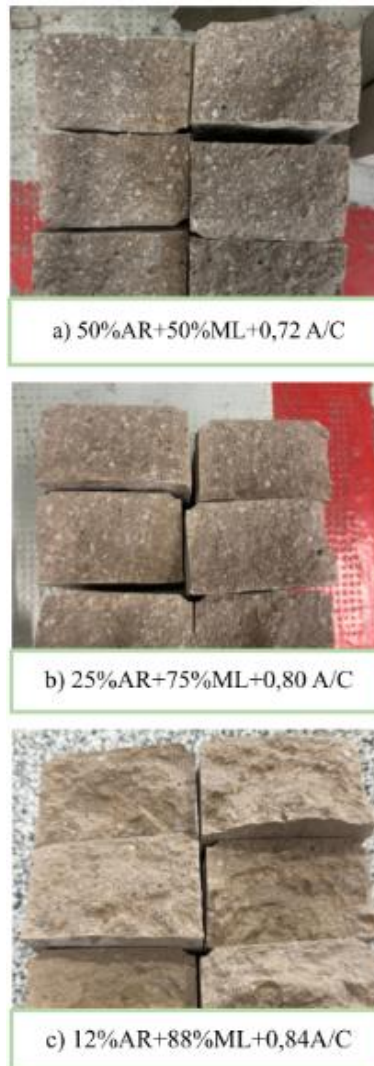


Ilustración 49: Adoquín parametrizado de dosificación (a) 50%AR+50%ML+0,72A/C, (b) 25%AR+75%ML+0,80A/C, (c) 12%AR+88%ML+0,84A/C

En la dosificación 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C (Ilustración 49, a), la superficie de fractura evidenció una textura relativamente homogénea y una distribución equilibrada entre matriz fina y partículas de árido reciclado. Se observó una adecuada integración entre ambas fracciones, sin cambios abruptos de textura ni zonas claramente segregadas. Este comportamiento resulta consistente con los resultados obtenidos en los ensayos físicos y mecánicos, donde esta dosificación presentó el mejor equilibrio entre absorción, estabilidad dimensional, densidad y resistencia a la flexión.

En la dosificación 25%AR + 75%ML + 0,80 A/C (Ilustración 49, b), si bien se observó una mejora respecto de las piezas preliminares, la matriz interna mostró una mayor variabilidad de textura y una estructura menos uniforme que la correspondiente a la mezcla 50:50. Esto puede asociarse a la condición intermedia de esta dosificación, donde el contenido de árido reciclado resulta insuficiente para conformar un esqueleto granular continuo, mientras que la fracción fina aún no domina completamente el comportamiento del material. Esta lectura visual

coincide con el carácter más inestable de dicha mezcla, evidenciado en los ensayos de absorción y en la mayor dispersión de los resultados del módulo de rotura.

La dosificación 12%AR + 88%ML + 0,84 A/C (Ilustración 49, c) presentó una fractura con predominio visual de matriz fina, más continua y compacta en apariencia, con menor participación visible del árido reciclado. Esto responde al carácter más matricial de la mezcla, donde el limo estabilizado con cemento pasa a constituir la fase dominante, mientras que el árido reciclado actúa principalmente como inclusión granular dispersa. No obstante, también se observaron vacíos y pequeñas discontinuidades superficiales, compatibles con la compactación manual y con la elevada sensibilidad de este tipo de mezclas al contenido de humedad.



Ilustración 50: Comparación entre adoquín proceso de fabricación preliminar y con proceso de fabricación parametrizado

La comparación entre las piezas obtenidas durante el proceso preliminar y aquellas fabricadas con el procedimiento parametrizado puso en evidencia la importancia del control del proceso. En las muestras preliminares, se habían observado mayores heterogeneidades internas, con presencia de grumos de limo, concentraciones localizadas de cemento y una distribución menos uniforme de los componentes. En cambio, en las piezas obtenidas luego de parametrizar el mezclado, el vertido y la compactación, la matriz interna presentó una apariencia significativamente más homogénea y continua, indicando una mejora en la calidad del material elaborado.

7.5. Ensayo de resistencia a la abrasión

Este ensayo fue realizado con el objetivo de evaluar el comportamiento superficial de los adoquines ante el desgaste producido por la acción del tránsito y el uso. Se llevó a cabo en la Universidad Nacional de Córdoba debido a que dicha institución dispone del equipamiento requerido por la normativa vigente.

De manera general este consiste en someter al adoquín a la acción de un material abrasivo bajo condiciones estables, midiendo la pérdida del material que se produce. Este es fundamental para los pavimentos mencionados con anterioridad, ya que permiten cuantificar:

- Resistencia al desgaste
- Vida útil
- Durabilidad superficial

De esta forma se busca que no se produzca una baja resistencia al desgaste debido a que además de una pérdida de material y desgaste superficial, se genera una disminución de la seguridad.

Este ensayo se realizó sobre 3 (tres) adoquines de la dosificación correspondiente a 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C, elegida en función de los diversos aspectos y de los resultados de los ensayos mencionados anteriormente, donde se observó que estos valores disminuyen con el aumento del limo (ML) y con el aumento de la relación A/C.

Uno de los criterios más importantes para la elección de la dosificación es la significativa dispersión de resultados asociados a la mezcla correspondiente a 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C, lo cual indica una mayor variabilidad en su comportamiento. Aunque se observan valores de resistencia promedio similares a las demás dosificaciones, todo esto sugiere una menor estabilidad de la misma.

Al momento de evaluar los aspectos de resistencia y estabilidad, se puede observar, que la dosificación compuesta por 50% de árido reciclado (AR) Y 50% de limo (ML), con una relación A/C de 0,72, es la que presenta un mejor equilibrio entre dichos parámetros. A partir de esto se decidió que los adoquines confeccionados con dicha dosificación serán utilizados para llevar a cabo el Ensayo de resistencia a la Abrasión.

A su vez se tuvieron en cuenta factores como los requisitos físicos establecidos y el acabado de los adoquines, debido a que estos tendrán gran influencia en el desgaste superficial.

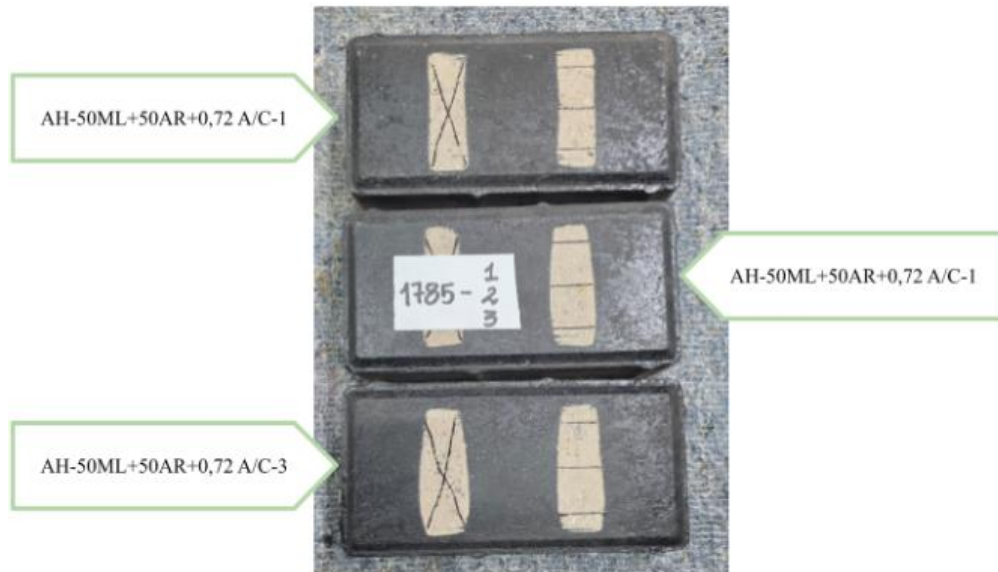


Ilustración 51: Dosificación elegida-Resistencia a la Abrasión



Ilustración 52: Adoquines ensayados a la abrasión

Este ensayo fue realizado conforme a lo establecido en la norma IRAM 11656, el cual consiste en someter la cara del adoquín al desgaste producido por un disco giratorio (abrasivo). En la Ilustración 53 se observa el dispositivo usado para llevar a cabo el ensayo.



Ilustración 53: Dispositivo de ensayo (Resistencia a la Abrasión)



Ilustración 54: Máquina de desgaste y disco de abrasión

Luego debe medirse la huella producida por la abrasión. El resultado de este ensayo, permite determinar el deterioro superficial del adoquín.

La norma establece que el valor promedio del largo de la huella de tres especímenes sometidos al ensayo no debe ser mayor que 23 [mm], como se establece en la Tabla 24.

Tabla 24: Largo Corregido-Resistencia a la Abrasión

Identificación del Adoquín	Fecha de Ensayo	Largo Corregido [mm]	Promedio	Desv. Standard
AH- 50ML + 50AR + 0,72 A/C-1	16/12/25	21,00		
AH- 50ML + 50AR + 0,72 A/C-2	16/12/25	24,50	23,17	1,55
AH- 50ML + 50AR + 0,72 A/C-3	16/12/25	24,00		

Los resultados que se obtuvieron a partir del ensayo de resistencia a la abrasión muestran que los adoquines correspondientes a la dosificación 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C, no cumplen con los límites establecidos por la norma con el largo corregido promedio de la huella de 23,20 [mm], superando levemente el largo de la huella (lh) máximo, donde se presenta una variación en el comportamiento de los adoquines frente al desgaste. Sin embargo, el resultado que se obtuvo se encuentra muy cerca del límite normativo, y por lo tanto puede considerarse técnicamente viable, pero sería conveniente realizar algunos ajustes en cuanto a la dosificación, relación A/C, compactación y de esta forma obtener un mejor comportamiento al desgaste superficial.

7.6. Correlación de resultados

A continuación, se analizan los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos anteriormente desarrollados, con el objetivo de comprender el comportamiento de los adoquines de limo (ML) y árido reciclado (AR), así como las diferencias entre cada una de las dosificaciones evaluadas, donde se establece una correlación entre los parámetros obtenidos de manera experimental.

Para ello, se elaboran gráficos que permiten establecer relaciones entre las variables como la absorción, el módulo de rotura y la dispersión de los resultados. De esta manera podemos definir patrones de comportamiento de cada una de las mezclas, valorar la influencia de su composición sobre sus propiedades mecánicas y físicas, y establecer la dosificación que presenta un mejor comportamiento para futuras aplicaciones.

7.6.1. Relación entre módulo de rotura y absorción

En la Ilustración 55, se planteó la relación entre el módulo de rotura (MR) y la absorción de agua para las tres dosificaciones en estudio.

Mr y Absorción

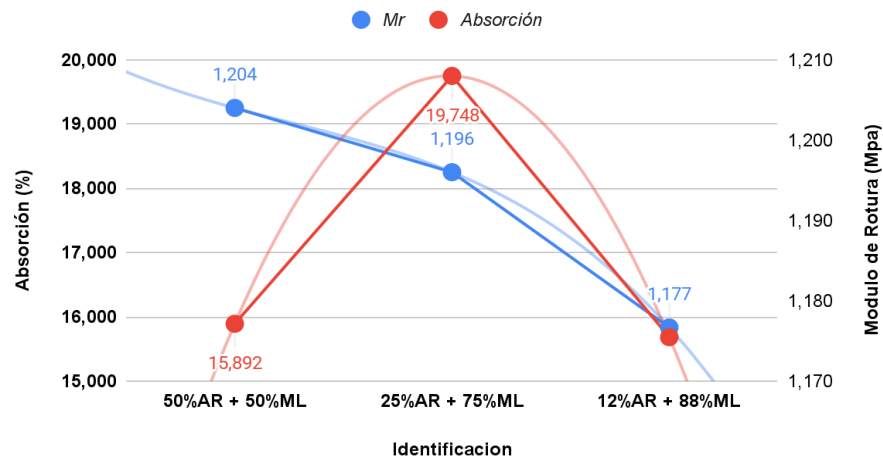


Ilustración 55: Relación entre Módulo de Rotura y Absorción

Se debe destacar que la mezcla 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C, presenta el mayor valor de módulo de rotura ($Mr \approx 1,204$ [MPa]), para un valor intermedio de absorción de agua entre las dosificaciones ($Aa \approx 15,89\%$), por lo que se debe destacar el correcto comportamiento de esta dosificación frente a la flexión, donde a su vez indica una estructura relativamente compacta.

Por otro lado, al analizar la dosificación 25%AR + 75%ML + 0,80 A/C, se visualiza el menor valor de módulo de rotura ($Mr \approx 1,196$ [MPa]) y a su vez el mayor valor de absorción ($Aa \approx 19,75\%$). Esto, puede deberse a la inestabilidad de la dosificación, evidenciado en los ensayos de absorción y en la mayor dispersión de los resultados del módulo de rotura. Este aumento de absorción se puede deber a una mayor cantidad de poros, lo que implica una menor resistencia mecánica.

La dosificación 12%AR + 88%ML + 0,84 A/C presenta el menor valor de absorción ($Aa \approx 15,68\%$), evidenciando una leve disminución del módulo de rotura ($Mr \approx 1,177$ [MPa]). Esto, puede deberse a una granulometría más eficiente, donde las partículas finas, tienden a ocupar los espacios entre las partículas de un tamaño mayor, logrando una mejor densificación y generando una reducción de los vacíos, por lo que puede observarse una disminución en los valores de absorción, en comparación con las otras mezclas.

Por lo que, en términos generales, los resultados indican que, a un mayor valor de absorción, los valores de resistencia mecánica serán menores, lo cual es razonable en este tipo de materiales, donde un aumento en la cantidad de vacíos, provoca una reducción de la resistencia del material.

7.6.2. Relación entre absorción y desvío estándar

En la Ilustración 56, se puede observar la relación entre la absorción de agua (A_a) y el desvío estándar, para cada una de las mezclas evaluadas.

Desvío Estándar y Absorción

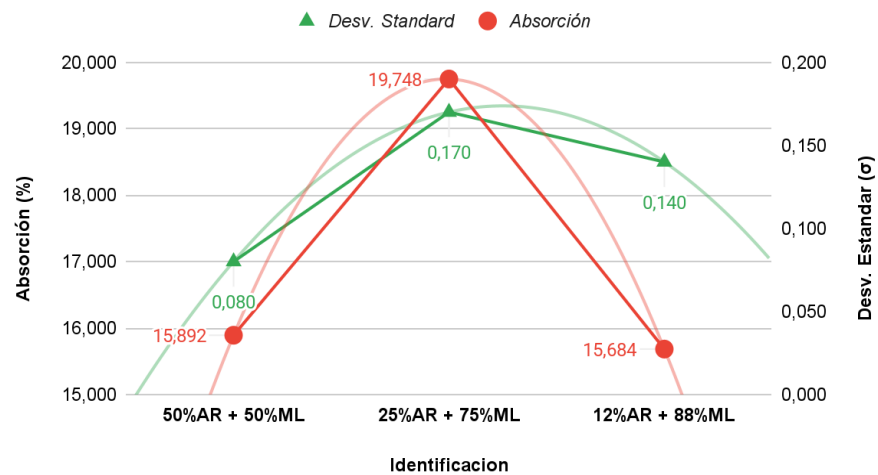


Ilustración 56: Relación entre Absorción y Desvío Estándar

La dosificación 25%AR + 75%ML + 0,80 A/C, presenta el valor más elevado de desvío estándar ($\sigma \approx 0,170$), donde a su vez presenta el mayor valor de absorción registrado en el ensayo. Este resultado muestra una mayor dispersión de los datos, lo que significa una menor estabilidad o homogeneidad de la mezcla. Esto podría estar relacionado con la estructura interna del adoquín debido a la interacción entre el árido reciclado (AR) y el limo (ML), provocando que sea más heterogénea, con modificaciones en la compacidad y presencia de poros.

Por el contrario, las mezclas 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C y 12%AR + 88%ML + 0,84 A/C presentan valores de dispersión menores ($\sigma \approx 0,080$ y $\sigma \approx 0,140$ respectivamente), mostrando una menor variabilidad de los resultados y por lo tanto un comportamiento más homogéneo del material.

7.6.3. Relación entre módulo de rotura y deformación total

En la Ilustración 57, se puede observar la relación entre el módulo de rotura (M_r) y la deformación promedio para cada una de las mezclas evaluadas.

Mr y Deformación total

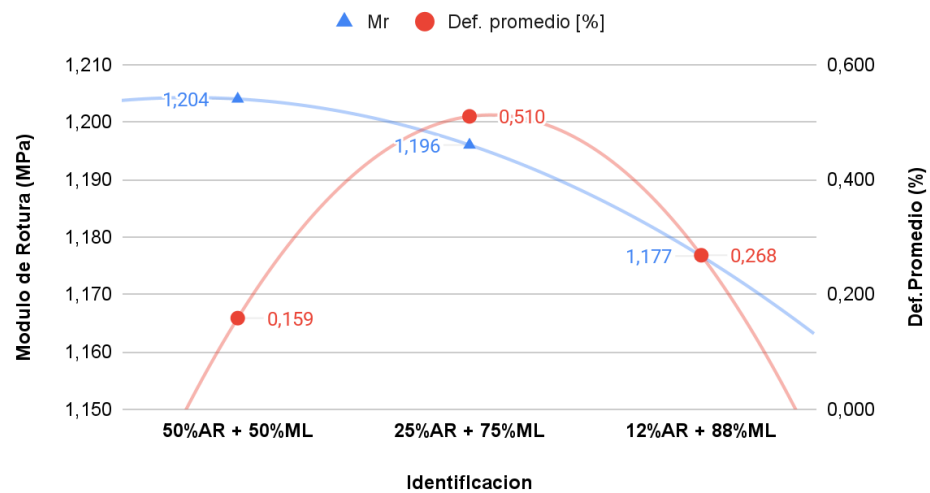


Ilustración 57: Relación entre Módulo de Rotura y Deformación

Se observa que la deformación aumenta con el incremento de la proporción del limo (ML) en cada dosificación, donde la mezcla 12%AR + 88%ML + 0,84 A/C presenta los valores de deformación más elevados entre la condición saturada (SSS) y la seca. Esto se debe a que, al incrementarse el contenido de partículas finas correspondientes al limo, se tiene mayor superficie específica y, por lo tanto, mayor capacidad de retención de agua, provocando estas variaciones en las dimensiones del material.

Con respecto al módulo de rotura, este presenta variaciones poco significativas entre las distintas dosificaciones. Esto, indica que el aumento del limo (ML) y la disminución del árido reciclado (AR), no produce variaciones significativas en la resistencia a flexión del material.

7.6.4. Relación entre deformación volumétrica y deformación lineal

En la Ilustración 58, se puede observar la relación entre la deformación lineal y volumétrica para cada una de las mezclas evaluadas.

Volumetrica y Lineal

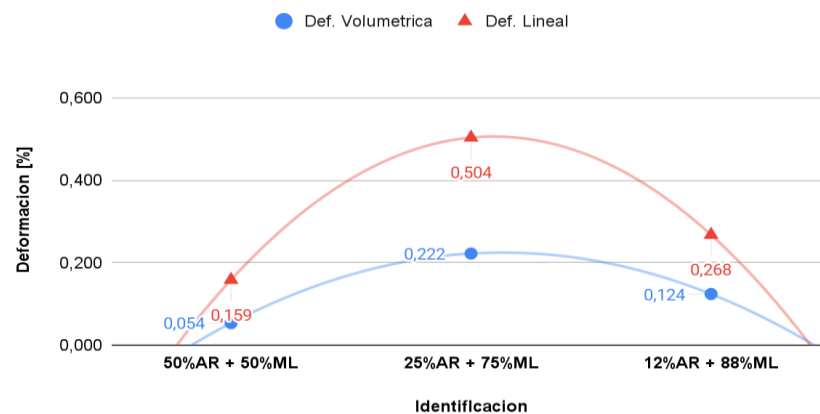


Ilustración 58: Relación entre Deformación lineal y volumétrica

Se observa que ambas deformaciones tienen una tendencia de comportamiento similar, con un incremento inicial al aumentar el contenido de limo, alcanzando la máxima deformación en la dosificación 25%AR + 75%ML + 0,80 A/C, seguido por una disminución en la mezcla 12%AR + 88%ML + 0,80 A/C. Sin embargo, el orden de magnitud de la deformación lineal es superior a la volumétrica en las dosificaciones analizadas.

En particular, la dosificación 25%AR + 75%ML + 0,80 A/C, presenta los valores máximos de deformación con aproximadamente 0,504% para la deformación lineal y 0,222% para la volumétrica. Esto puede deberse al aumento de la fracción fina, favoreciendo la retención de agua y generando una mayor susceptibilidad a las deformaciones durante los distintos procesos.

Por otro lado, la dosificación 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C presenta los valores más bajos de deformación con aproximadamente 0,159% para la deformación lineal y 0,054% para la deformación volumétrica, lo cual indica un comportamiento estable que se debe a una mejor distribución granulométrica y menor contenido de material fino.

Con respecto a la mezcla con mayor contenido de limo 12%AR + 88%ML + 0,80 A/C, se puede observar una reducción en las deformaciones, comparándola con la dosificación intermedia, aunque siguen siendo superiores a los de la dosificación 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C. Esto, puede deberse a una estructura más densa que limita la deformación del elemento prefabricado.



CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

8. CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

A partir de los resultados de los ensayos presentados en el capítulo anterior, se realiza una interpretación integral del comportamiento de los adoquines Holanda colados de las tres principales dosificaciones de AR, ML y CPC. En esta instancia, se buscó identificar las propiedades del producto óptimo y evaluar la viabilidad de fabricar dicho elemento mediante la combinación más favorable de árido reciclado y suelo limo-loésico colapsable.

Con esto, el análisis se organiza a partir de la influencia de la composición de la mezcla sobre el comportamiento físico, mecánico y cualitativo de los adoquines Holanda colados, para finalmente discutir su eficiencia relativa, sus beneficios, sus limitaciones y su posible ámbito de aplicación.

8.1. Influencia de la composición de la mezcla

La composición de la mezcla resultó ser uno de los factores más influyentes en el comportamiento de los adoquines. La interacción entre el árido reciclado fino (AR), el suelo limo-loésico (ML), y el cemento Portland define tanto la estructura interna como las propiedades físicas, mecánicas y la durabilidad, ya que la proporción entre la fracción fina (ML) y la fracción resistente (AR) resultaron determinar cómo se distribuye la resistencia del material y su sensibilidad a los cambios de humedad, temperatura y compactación.

Se observó que, al aumentar la proporción de árido reciclado, hay una transmisión más eficiente de los esfuerzos durante el proceso de compactación. Esto favorece la estabilidad de la mezcla y reduce la sensibilidad frente a pequeñas variaciones en el contenido de agua. En cambio, al aumentar el contenido de limo loésico, el material pasa a estar dominado por la matriz fina, incrementándose la superficie específica de la mezcla y la demanda de agua para el amasado. En consecuencia, el comportamiento del material se vuelve más dependiente del control hídrico y del procedimiento de compactación.

La granulometría aporta la estructura interna del elemento, por lo que los adoquines con una proporción equilibrada de AR y ML presentaron un esqueleto definido que aporta estabilidad dimensional, limitando las deformaciones debidas a la humedad.

Otro aspecto para destacar es el control de contenido de finos, ya que el limo loésico presenta una elevada fracción (94%) pasante por el tamiz N°200, incrementando la superficie específica de la mezcla y, en consecuencia, la demanda de agua necesaria de amasado y compactación. Sin su debido control, se genera gran cantidad de poros interconectados, facilitando la circulación del agua y la absorción, disminuye la densidad y vuelve al adocuin más sensible a la humedad.

En cuanto a la mineralogía y química de los componentes, siendo que el ML presentar baja plasticidad ($IP = 2,8$) y pH alcalino de 9,3, mientras que el AR tiene un pH aún mayor de 11,5 y alto contenido de carbonatos, se produce una mezcla fuertemente alcalina que favorece

la hidratación del cemento. Esto aumenta los niveles de absorción y disminuye la resistencia mecánica en comparación a los hormigones convencionales.

La relación A/C no solo influye en la trabajabilidad de la mezcla, sino que también en la porosidad y resistencia final del material endurecido. Sin embargo, en las mezclas con alto contenido de ML, un leve aumento de esta relación conlleva a un mejor comportamiento ante las expansiones y contracciones del material por los cambios de humedad. Por esta razón, al incorporar limo en los adoquines, es necesario aumentar la relación A/C para una adecuada compactación.

8.2. Comportamiento físico

Con el análisis del comportamiento físico se buscó comprender la variación de las propiedades del material, como la absorción de agua, la densidad y la estabilidad dimensional. Estas propiedades se encuentran directamente relacionadas con la estructura porosa interna del material, la cual depende tanto de la granulometría del sistema como de la proporción relativa entre fracción granular y fracción fina.

8.2.1. Absorción de agua

Los resultados obtenidos en el ensayo de absorción de agua permiten establecer una relación directa, entre el contenido de limo presente en cada una de las dosificaciones establecidas, la capacidad de absorción de agua de los distintos adoquines y la influencia de la relación A/C en la capacidad de absorción.

En los casos donde se presentaba una mayor proporción de limo se obtuvieron valores de absorción más elevados. En donde la dosificación correspondiente a 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C presentó valores menores de absorción ($A_a \approx 15,89\%$), reflejando la opción más viable en este sentido, ya que se encuentra directamente relacionado con la porosidad del material, su durabilidad y una mayor compactación de la matriz cementicia, lo cual condice con su mayor resistencia mecánica (parámetro que se desarrolla en el apartado 8.3.1.).

En las dosificaciones correspondientes a una mayor cantidad de limo, tener mayor superficie específica favorece a una mayor retención de agua dentro del material. A su vez, estas partículas requieren mayor cantidad de agua en el proceso de mezclado y compactación, generando poros. Consecuentemente, estas mezclas dificultan la salida del agua y la disipación del calor durante el secado. En este sentido, las dosificaciones 12% AR + 88% ML + 0,80 A/C ($A_a \approx 15,68\%$) y 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C ($A_a \approx 19,75\%$), presentan una menor porosidad y mayor impermeabilidad, lo que retrasa la eliminación de la humedad

Al momento de realizar el ensayo, también se observó que, durante el proceso de secado de los adoquines en el horno, las muestras correspondientes a dosificaciones con un mayor porcentaje de limo (ML) presentan un comportamiento diferente. Esto se debe a que el limo posee un menor diámetro de partícula, por lo que tienen mayor superficie específica y, en consecuencia, una menor permeabilidad. En cuanto a la dosificación de 25% AR + 75% ML +

0,80 A/C, esta es la que presenta una de las mayores absorciones junto con la correspondiente a la de 12% AR + 88% ML + 0,84 A/C, que tienen una misma absorción del 19,75%. Esto no solo sugiere que a mayor cantidad de limo se contará con mayor absorción, si no que, al observar que la dosificación de 12% AR + 88% ML + 0,80 A/C cuenta con una absorción promedio de 13,65%, podemos observar una gran susceptibilidad de la porosidad con la variación de la relación A/C. Este comportamiento sugiere que, en mezclas con elevado contenido de finos, pequeñas variaciones en el contenido de agua pueden modificar significativamente la estructura de vacíos del material. En este sentido, una relación A/C moderada favorece una matriz más densa y homogénea, mientras que un exceso de agua genera mayor porosidad capilar, exudación y, en consecuencia, una mayor capacidad de absorción.

8.2.2. Densidad

Al momento de obtener las densidades de cada una de las muestras, se presentaron valores de densidades promedios entre los 1720 y los 1750 [kg/m³], en donde estas muestran una variación la cual se puede asociar con el porcentaje de limo usado en cada dosificación.

La dosificación 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C, es la que presenta una mayor densidad promedio en comparación a las otras ($\rho \approx 1747,39$ [kg/m³]). Se puede observar una ligera disminución en los valores a mayor contenido de material fino, como ocurre en las mezclas 12% AR + 88% ML + 0,80 A/C ($\rho \approx 1720,70$ [kg/m³]) y 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C ($\rho \approx 1726,38$ [kg/m³]). Entonces, esta disminución en la densidad del material final se asocia al incremento del limo (ML).

Al analizar los valores obtenidos para cada una de las mezclas, se puede determinar que presentan valores de densidad menores a la de los hormigones convencionales, y por sus valores se ubican dentro de la categoría hormigones livianos (menores de 2000 [kg/m³]). Asimismo, resulta destacable la baja dispersión de los datos, descartando una variabilidad marcada en el proceso de elaboración, demostrando una correcta fabricación y compactación manual de los adoquines.

Por esta razón, los resultados indican que la incorporación de áridos reciclados (AR) y limo (ML), producen densidades moderadamente menores, aunque es importante destacar que no hay una diferencia significativa entre las distintas dosificaciones, por lo tanto el aumento de finos no provoca cambios importantes en la compactación y se mantiene estable la estructura del elemento, siempre que la compactación y el proceso de curado se realicen de manera controlada.

8.2.3. Estabilidad dimensional frente a la humedad

La estabilidad dimensional de los adoquines se evaluó a partir de dos indicadores complementarios: la deformación lineal total y la variación volumétrica. En conjunto, ambos parámetros permiten analizar la sensibilidad de las piezas frente a cambios de humedad, tanto desde una perspectiva direccional como global.

En términos de deformación lineal, la dosificación 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C presentó los menores valores, comprendidos entre 0,139% y 0,178%, evidenciando un comportamiento más estable frente a las variaciones higroscópicas. Por el contrario, las mayores deformaciones se registraron en la mezcla 12% AR + 88% ML + 0,80 A/C, con valores de hasta 1,482%, mientras que la dosificación 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C mostró valores intermedios, aunque claramente superiores a los de la mezcla 50:50. Estos resultados indican que el incremento del contenido de finos tiende a aumentar la sensibilidad deformacional del sistema, aunque dicha respuesta también se encuentra fuertemente condicionada por la relación agua/cemento.

Desde el punto de vista volumétrico, la mayoría de las probetas evidenció una leve contracción aparente al comparar la condición seca con la condición SSS. Nuevamente, la mezcla 50% AR + 50% ML resultó la más estable, con variaciones comprendidas entre +0,05% y -0,06%, mientras que las mayores contracciones se observaron en las probetas de la dosificación 12% AR + 88% ML + 0,80 A/C, con valores de hasta -0,35%. Las mezclas con 75% ML presentaron contracciones intermedias, del orden de -0,10% a -0,23%, y la mezcla 88% ML + 0,84 A/C mostró un comportamiento relativamente moderado (-0,12%).

En conjunto, estos resultados muestran que la mezcla 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C presenta la mejor estabilidad dimensional, tanto lineal como volumétrica. A su vez, evidencian que el comportamiento deformacional no depende únicamente del contenido de limo loésico, sino también de la relación agua/cemento, cuya influencia resulta particularmente significativa en sistemas con predominio de fracción fina. En este sentido, la dosificación 12% AR + 88% ML + 0,80 A/C se comportó como la más sensible a las variaciones de humedad, mientras que la misma mezcla con A/C = 0,84 mostró un desempeño deformacional menos crítico, lo que confirma que el equilibrio hídrico del sistema constituye una variable determinante.

8.3. Comportamiento mecánico

Se evaluó la capacidad resistente de los adoquines frente a solicitaciones que simulaban las propias a las que podrían estar sometidos durante su vida útil de servicio. Se analizaron la resistencia a la flexión mediante el módulo de rotura y la resistencia al desgaste superficial para caracterizar el desempeño estructural de dichos elementos prefabricados utilizados en pavimentos.

Estas resistencias dependen principalmente de la estructura interna del material, la cual está condicionada por la granulometría de la mezcla, la proporción entre árido reciclado y limo-loésico, la relación A/C y el proceso de compactación adoptado durante la fabricación. Los resultados obtenidos permiten identificar tendencias claras respecto a la influencia de la composición de la mezcla sobre la resistencia mecánica de los adoquines, evidenciando además diferencias en la estabilidad estructural entre las distintas dosificaciones analizadas.

8.3.1. Resistencia a la flexión

Mediante el ensayo de módulo de rotura se obtuvo la resistencia de los adoquines frente a solicitaciones de flexión, simulando las tensiones que se generan en los elementos durante su funcionamiento como parte de un pavimento. Los resultados obtenidos muestran que las tres dosificaciones estudiadas presentan valores medios de resistencia relativamente próximos, con módulos de rotura promedio del orden de 1 MPa. Sin embargo, se observaron diferencias significativas en cuanto a la dispersión de los resultados y la estabilidad estructural de cada mezcla.

La dosificación 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C presentó el comportamiento más estable, con un módulo de rotura promedio cercano a 1,20 [MPa] y una dispersión relativamente baja entre los valores individuales. Este comportamiento puede atribuirse al equilibrio existente entre la fracción granular del árido reciclado y la matriz fina generada por el limo loésico estabilizado con cemento, lo que permite conformar una estructura interna relativamente homogénea.

En contraste, la dosificación 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C ($M_r \approx 1,196$ [MPa]) presentó la mayor variabilidad en los resultados, con un valor elevado del parámetro R3% y un mayor desvío estándar. Este comportamiento muestra una estructura interna menos estable, asociada a una condición intermedia en la cual el contenido de árido reciclado resulta insuficiente para generar un esqueleto granular continuo, mientras que el contenido de limo aún no es lo suficientemente dominante como para consolidar una matriz fina homogénea.

La dosificación 12% AR + 88% ML + 0,84 A/C mostró valores de resistencia similares a los obtenidos en las otras mezclas ($M_r \approx 1,177$ [MPa]), pero con una dispersión menor que la observada en la dosificación de 75% ML. Este comportamiento sugiere que, al aumentar significativamente el contenido de limo, el material comienza a comportarse como una matriz fina estabilizada con cemento, donde el árido reciclado actúa como inclusión granular dentro de dicha matriz. Dicho comportamiento se asemeja a la estabilidad dimensional de los adoquines, evidenciando la relación directa con la resistencia mecánica de los elementos.

8.3.2. Resistencia al desgaste superficial

El comportamiento de los adoquines frente a la abrasión producida por la acción mecánica del tránsito y el contacto con partículas abrasivas presentes en la superficie del pavimento indicó que los adoquines presentan valores de desgaste relativamente elevados, lo cual se encuentra directamente relacionado con la estructura interna del material y con la elevada porosidad asociada al uso de áridos reciclados y limo loésico.

En particular, la presencia de partículas finas de limo genera una matriz cementicia con una mayor proporción de microporos, mientras que el árido reciclado presenta una superficie más irregular y porosa debido a la presencia de mortero adherido proveniente del hormigón original. Esta combinación favorece la aparición de micro-desprendimientos superficiales durante la acción abrasiva. Asimismo, el proceso de compactación manual utilizado en la

fabricación de las probetas introduce una energía de densificación considerablemente menor que la empleada en procesos industriales de vibrocompactación, lo cual contribuye a la formación de una estructura interna menos compacta y, por lo tanto, más susceptible al desgaste superficial. Donde el ensayo arroja un valor de longitud corregida de 23,17 [cm].

8.4. Comparación con requisitos normativos

Los adoquines colados elaborados a partir de la incorporación de árido reciclado (AR) y limo (ML), fueron evaluados y analizados en función de las normativas vigentes, como la norma IRAM 11656, la cual define los valores mínimos establecidos de resistencia mecánica, absorción de agua y durabilidad.

En relación al módulo de rotura a flexión (MR), los resultados obtenidos evidencian que los adoquines presentan valores inferiores respecto a los valores mínimos exigidos por la normativa para tránsito vehicular o uso estructural. Sin embargo, los valores cumplen con los requisitos establecidos para aplicaciones de tránsito liviano y peatonal

En cuanto a la absorción de agua, estos superan ampliamente los valores máximos establecidos por la norma, donde este aspecto constituye uno de las principales limitantes normativos, donde estos tienen el objetivo de garantizar una adecuada durabilidad frente a agentes externos. Por esta razón, la absorción podemos decir que representa un indicador indirecto del grado de porosidad interna con la que cuenta el elemento estructural elaborado, con influencias en la resistencia, la durabilidad y el desgaste superficial que pueden experimentar en su uso.

Respecto a la resistencia a la abrasión, aunque no se realizó para todas las dosificaciones establecidas, se puede determinar que, a una menor densidad y a una mayor porosidad, los adoquines tendrán una menor resistencia que los adoquines convencionales, siendo un indicador importante para todas aquellas aplicaciones que involucren un tránsito intenso, el cual permite evaluar el comportamiento superficial de los adoquines ante el desgaste producido por la acción del tránsito y el uso.

Para los requisitos normativos asociados a las tolerancias y dimensiones, se presentaron algunas dificultades para cumplir con la precisión exigida por la norma para los elementos prefabricados, donde la norma establece límites en cuanto a la variación de las dimensiones, la regularidad de las aristas y caras, con el fin de lograr una adecuada trabazón entre las caras de las distintas piezas, lograr una distribución uniforme de cargas, etc.

En el proceso de fabricación de los adoquines colados, se presentaron desviaciones que se relacionan con las características del suelo limo-loésico (ML) y del árido reciclado (AR). Donde como consecuencia, se observaron defectos como bordes irregulares, pequeñas faltas de material en esquinas y bordes, y pequeñas variaciones en las alturas de las piezas.

Uno de los factores que tuvo gran influencia, fue la adherencia de la mezcla al molde, dificultando el proceso de desmolde, generando desprendimientos parciales o irregularidades superficiales.

A su vez se identificaron que todos los efectos anteriormente mencionados pueden mitigarse mediante, el uso correcto de desmoldante, control del contenido del agua, aumento de la energía de compactación, etc.

8.5. Comportamiento cualitativo

En relación con el comportamiento cualitativo del producto final, estos presentan una terminación más heterogénea y rugosa, que aquellos que se encuentran formados por áridos naturales. Las caras de los mismos no resultan perfectamente uniformes, en algunos casos mostrando una distribución heterogénea de la pasta cementicia.

Respecto a las aristas y vértices, se presentaron irregularidades, falta de material, bordes poco definidos y desprendimientos en algunas zonas del producto, donde estas se encuentran relacionadas con la baja trabajabilidad de la mezcla, falta de compactación y una excesiva adherencia de la mezcla al molde.

Para la fisuración, en las dosificaciones elegidas no se observaron fisuras de gran magnitud en los adoquines obtenidos, sin embargo, se debe tener precaución con la aparición de microfisuras en etapas tempranas, relacionadas al proceso de retracción.

Por lo que la calidad de los adoquines depende en gran medida de la trabajabilidad de la mezcla, del proceso de fabricación, y de las propiedades de los materiales constituyentes.

8.6. Eficiencia de dosificaciones

El análisis conjunto de los resultados obtenidos en los ensayos permitió identificar diferencias claras en el comportamiento de las tres dosificaciones estudiadas. La comparación de los parámetros de absorción de agua, módulo de rotura a flexión, densidad, estabilidad dimensional y resistencia al desgaste superficial evidenció que el desempeño de los adoquines se encuentra fuertemente condicionado por la proporción relativa entre el árido reciclado (AR) y el limo loésico (ML) presente en la mezcla.

En términos generales, se observó que la dosificación 50% AR + 50% ML + 0,72 A/C presenta el comportamiento más equilibrado entre estabilidad estructural, resistencia mecánica y comportamiento físico, constituyendo la configuración más eficiente dentro de las combinaciones analizadas. Esta mezcla mostró los menores valores de absorción de agua, las mayores densidades promedio, menor dispersión en los resultados de resistencia a flexión y una mayor estabilidad dimensional frente a variaciones de humedad, lo que indica una estructura interna más homogénea y compacta.

Desde el punto de vista estructural, este comportamiento puede explicarse por el equilibrio granulométrico existente entre la fracción granular aportada por el árido reciclado y la matriz fina constituida por el limo loésico estabilizado con cemento. En esta condición, el árido reciclado permite conformar un esqueleto granular capaz de transmitir esfuerzos de manera más eficiente, mientras que el limo actúa como material de relleno (filler) que contribuye a densificar la matriz cementicia y mejorar la cohesión del sistema.

Por otro lado, la dosificación 25% AR + 75% ML + 0,80 A/C presentó simultáneamente los mayores valores de absorción y la mayor dispersión en los resultados de módulo de rotura, lo que indica una menor estabilidad estructural. Este comportamiento puede interpretarse como un punto de transición granulométrica, en el cual el contenido de árido reciclado resulta insuficiente para formar un esqueleto granular continuo, mientras que la fracción fina aún no domina completamente el comportamiento del material. Como consecuencia, se genera una estructura interna menos estable y más sensible a las variaciones de humedad.

En el caso de la dosificación 12% AR + 88% ML + 0,84 A/C, el material comienza a comportarse como una matriz fina estabilizada con cemento, donde el limo loésico constituye la fase dominante y el árido reciclado actúa principalmente como inclusión granular. Si bien esta mezcla presenta un comportamiento más homogéneo que la dosificación intermedia, su elevada proporción de finos favorece una mayor retención de agua y una mayor dependencia de la relación agua/cemento durante el proceso de fabricación.

En función de estos resultados, se concluye que la dosificación 50% AR + 50% ML constituye la alternativa más eficiente dentro de las configuraciones analizadas, ya que logra el mejor compromiso entre comportamiento físico, estabilidad estructural y resistencia mecánica del material.

8.6.1. Beneficios del elemento fabricado

El desarrollo de adoquines elaborados a partir de áridos reciclados y suelo limo loésico presenta múltiples beneficios desde el punto de vista técnico, ambiental y constructivo.

- Valorización de materiales destinados a disposición final: incorporación de áridos reciclados provenientes de residuos de construcción y demolición contribuye a la reducción del consumo de agregados naturales y promoviendo prácticas de construcción más sostenibles.
- Aprovechamiento de recursos naturales locales como estabilizador: el limo loésico local, ampliamente disponible en la región de Córdoba, de bajo costo y combinado con el cemento y el árido reciclado puede actuar como fracción fina estabilizadora dentro de la mezcla.
- Comportamiento físico y mecánico relativamente estable: la dosificación óptima identificada (50% AR – 50% ML) es capaz de desarrollar una estructura

interna suficientemente homogénea para aplicaciones de baja sollicitación estructural.

- Procedimiento de moldeo simple: el proceso de fabricación adoptado demuestra que es posible elaborar este tipo de elementos sin equipamientos industriales complejos.
- Solución constructiva de bajo impacto ambiental y baja exigencia estructural: potencial del elemento en contextos urbanos donde se busca incorporar materiales alternativos y sostenibles.

8.6.2. Limitaciones del elemento fabricado

El material desarrollado presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al momento de evaluar su posible aplicación en obras de infraestructura.

- Alta absorción de agua: relacionado con la mayor porosidad del material, producto del uso de áridos reciclados y de la elevada proporción de partículas finas provenientes del limo loésico.
- Aplicación limitada a pavimentos de cargas moderadas y livianas: los valores de módulo de rotura a flexión obtenidos resultan inferiores a los requeridos para adoquines estructurales destinados a tránsito vehicular, lo que limita su aplicación en pavimentos sometidos a cargas elevadas o a tránsito pesado.
- Baja energía de compactación durante proceso manual: genera una estructura interna menos densa y una mayor variabilidad en las propiedades mecánicas del material que con la compactación empleada en procesos industriales.
- No resultan adecuados para pavimentos de tránsito vehicular.

8.7. Consideraciones finales

A fin de sintetizar los resultados más relevantes obtenidos en los ensayos físicos, geométricos y mecánicos, en la Tabla 25 se presenta una comparación integral del desempeño de las dosificaciones estudiadas. Para facilitar su interpretación, se empleó una escala cromática de tres niveles: verde para los resultados más favorables, amarillo para comportamientos intermedios y rojo para los menos favorables dentro del conjunto analizado. Esta clasificación expresa el desempeño relativo de cada dosificación respecto de las demás, y no implica por sí misma un cumplimiento normativo absoluto.

Tabla 25: Comparativa integral del desempeño de las dosificaciones estudiadas

Dosificación	50% AR + 50% ML + 0,72 A/C	25% AR + 75% ML + 0,80 A/C	12% AR + 88% ML + 0,80 A/C	12% AR + 88% ML + 0,84 A/C
Absorción	15,89 %	19,75%	13,65%	19,75%
Densidad	1747,36 kg/m ³	1726,38 kg/m ³	1734,14 kg/m ³	1693,81 kg/m ³
Def. lineal	0,159%	0,504%	0,268%	1,435%
Def. volumétrica	0,054%	0,222%	0,265%	0,124%
Mr	1,204 MPa	1,196 MPa	-	1,177 MPa
Abrasión	23,20 mm	-	-	-
Valoración global	MÁS FAVORABLE	INESTABLE	DESFAVORABLE	DESFAVORABLE

En función de esta comparación integral, pueden destacarse las siguientes conclusiones principales:

- 25%AR + 75%ML + 0,80 A/C: presentó el comportamiento más inestable, con elevados valores de absorción, una gran dispersión en los resultados experimentales y un desempeño general menos favorable. Esta respuesta puede asociarse a una condición intermedia poco eficiente, en la cual el árido reciclado no alcanza a conformar un esqueleto granular suficientemente estable y la fracción fina aún no domina completamente el sistema.
- 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C: fue la dosificación que mostró el comportamiento más equilibrado entre las mezclas evaluadas. En esta configuración se obtuvieron los mayores valores de resistencia, menor deformación lineal, mejor estabilidad volumétrica y menor variabilidad de resultados, por lo que puede considerarse la alternativa más favorable desde el punto de vista técnico dentro del conjunto estudiado.
- 12% AR + 88% ML + 0,84 A/C: mostró una fuerte influencia de la relación agua/cemento sobre el comportamiento final del material. Si bien presentó una deformación volumétrica menos desfavorable que la mezcla anterior, registró elevados valores de absorción, la menor densidad y bajos valores de resistencia mecánica, lo que confirma que un incremento de la relación A/C en sistemas dominados por finos puede afectar negativamente la estructura interna del adoquín.

A partir de esto, se puede concluir que la dosificación 50%AR + 50%ML + 0,72 A/C es la que presenta un mejor equilibrio entre todos los parámetros analizados, con una menor



variabilidad de los resultados experimentales. Esta se caracteriza a su vez por presentar los mayores valores de resistencia, lo que es fundamental para mantener un adecuado funcionamiento según su uso. En consecuencia, se considera como la alternativa óptima desde el punto de vista técnico dentro de las configuraciones ensayadas.

Finalmente, para una descripción más detallada de las propiedades técnico-constructivas de cada una de estas tres dosificaciones puede consultarse las fichas técnicas incluidas en el Anexo II.



CAPÍTULO 9

APLICACIONES DE ADOQUINES PERMEABLES

9. APLICACIONES

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos realizados, se concluyó que los adoquines fabricados con árido reciclado y limo loésico mediante método de compactación manual no cumplen con los requisitos impuestos por la norma IRAM 11656 para su empleo como adoquines vehiculares convencionales. Sin embargo, a partir de un análisis bibliográfico se descubrió su aplicación para pavimentos permeables de adoquines de hormigón de baja y media solicitaciones, donde se permite la infiltración del agua de lluvia a través de la superficie hacia el terreno natural (subrasante), disminuyendo la escorrentía superficial, la probabilidad de inundaciones y favoreciendo la recarga de acuíferos y la recolección de agua para distintos aprovechamientos. En este tipo de pavimentos, el desempeño depende tanto de la pieza individual como del paquete estructural, el mantenimiento y el suelo de fundación.

Los pavimentos permeables de adoquines de hormigón, o PICP por sus siglas en inglés (Permeable Interlocking Concrete Pavers), son recomendados para veredas, entradas para vehículos, estacionamientos, calles peatonales, vías de baja velocidad y ciclovías. En estas aplicaciones, la velocidad no supera los 50 [km/h] y solicitaciones generales inferiores a 1 millón de ESAL (Ejes Equivalentes Estándar) de 80 [kN] durante la vida útil. Además, se determina que los espesores típicos de los PICP en áreas vehiculares deben ser de 80 [mm], mientras que en áreas peatonales y de vehículos livianos se establecen espesores de 60 [mm], que sería el caso de los adoquines fabricados en el marco de este trabajo de investigación.

Adicionalmente, el pavimento permeable tiene influencia directa sobre la infiltración de la carpeta completa (adoquín - junta - cama de asiento - base - subbase). Entonces, desde el punto de vista hidráulico, la aceptación de este pavimento depende de la porosidad, la absorción y la capacidad de infiltración de la carpeta construida. La norma brasileña ABNT NBR 16416 toma como referencia un comportamiento permeable con un coeficiente de infiltración de $k = 10^{-3}$ [m/s], equivalente aproximadamente a 60 [mm/min] o 60 [L/min·m²]. En el caso de pavimentos nuevos, se toman como una tasa mínima de infiltración de aproximadamente de 2.500 [mm/h], valor que en condición de servicio baja con el tiempo, llegando a una condición de necesidad de mantenimiento cuando el valor es cercano a 250 [mm/h] (Woods Ballard et al., 2015).

Desde el punto de vista hidráulico, el diseño de un pavimento permeable requiere además considerar una serie de condiciones generales de implantación y funcionamiento. La bibliografía técnica indica que la pendiente superficial del sistema debe mantenerse, en términos generales, por debajo del 5%, mientras que la pendiente de subrasante debería ser inferior al 1% en diseños de infiltración total o parcial. En caso de que la subrasante presente pendientes superiores al 3%, se recomienda la incorporación de bermas u otras estructuras intermedias de control. Asimismo, el diseño debe contemplar la tormenta de diseño, la infiltración inicial y a largo plazo, las áreas aportantes, la necesidad de drenaje superficial complementario, la posible incorporación de subdrenes, la disposición de un pozo de observación y, cuando corresponda, el uso de geotextiles, geogrillas o geomembranas (FHWA, 2019).

A partir de estas consideraciones, y dado que la dosificación 50%AR + 50%ML + 0,72A/C fue la que presentó mejor equilibrio entre absorción, densidad, estabilidad dimensional y resistencia mecánica, se proponen tres aplicaciones del material desarrollado

1. Estacionamiento de vehículos livianos
2. Ciclovías
3. Sendas/veredas peatonales

Dado que las aplicaciones proyectadas corresponden a usos de baja sollicitación, el tránsito de diseño resulta notablemente menor al umbral de 1 millón de ESALs. En consecuencia, el dimensionamiento queda gobernado principalmente por el criterio hidráulico (almacenamiento y permeabilidad), mientras que la verificación estructural AASHTO 93 cumple una función de comprobación de suficiencia, demostrando que los paquetes propuestos superan con el número estructural requerido (SN). Además, la Federal Highway Administration (FHWA) señala que el diseño estructural específico para PICP se apoya en el método desarrollado por la University of California Pavement Research Center, posteriormente incorporado en ASCE/ANSI 68-18, y que AASHTO 1993 puede emplearse como alternativa conservadora.

La Ecuación 19 corresponde a la ecuación utilizada por el método AASHTO 93 para pavimentos flexibles:

$$\log_{10}(W_{18}) = ZR \cdot S_0 + 9,36 \cdot \log_{10}(SN+1) - 0,20 + \log_{10}[\Delta PSI / (4,2 - 1,5)] / [0,40 + 1094 / (SN+1)^{5,19}] + 2,32 \cdot \log_{10}(MR) - 8,07 \quad \text{Ecuación 19}$$

El número estructural aportado por el paquete se calcula por medio de la Ecuación 20:

$$SN = \alpha_1 D_1 + \alpha_2 m_2 D_2 + \alpha_3 m_3 D_3 + \dots \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

- α_i : coeficientes estructurales de las capas
- m_i : coeficientes de drenaje
- D_i : espesores, en pulgadas

En base a esto, en la Tabla 26 se adoptan los siguientes valores para los parámetros generales del diseño del paquete, junto con las justificaciones y criterios de adopción.

Tabla 26: Parámetros generales y criterios de adopción para diseño de paquetes estructurales

Parámetro	Valor	Criterio de adopción
Período de diseño	20 años	
Servicialidad inicial (π_i)	4,2	Valor estándar AASHTO para pavimentos flexibles nuevos
Servicialidad final (π_f)	2,0	Caminos de bajo volumen, AASHTO 1993 pág. II-9
Δ PSI ($\pi_i - \pi_f$)	2,2	
Desviación estándar total (S_0)	0,45	Construcción nueva, AASHTO 1993
Conversión CBR \rightarrow MR	$MR[\text{psi}] = 1500 \times \text{CBR}$	Para suelos finos con CBR menores a 10%
α_1 (adoquín PICP + cama asiento)	0,30	adoptado según FHWA 2019 y Gordillo 2023 para PICP
α_2 (base granular drenante)	0,14	Grava clasificada compactada, AASHTO Table 2.4
α_3 (subbase granular drenante)	0,11	Material granular de subbase, AASHTO Table 2.4
m_2, m_3 (coef. de drenaje)	0,80	Drenaje bueno, tiempo de exposición a saturación $> 25\%$ del año, AASHTO Tabla 2.5

Se adopta como coeficiente estructural de la capa $\alpha = 0,3$ para el conjunto conformado por los adoquines permeables y la cama de asiento, considerándolas como una única capa estructural dentro del paquete. Dicho valor es conservador respecto a un asfalto denso ($\alpha = 0,44$) pero apropiado para un pavimento modular sin ligante asfáltico continuo. Además, se adopta una confiabilidad del 80%, aceptando un margen de incertidumbre adecuado con el tipo de pavimento proyectado (FHWA, 2019).

Asimismo, para su implementación efectiva, el sistema deberá verificarse hidráulicamente considerando pendiente superficial, pendiente de subrasante, tormenta de diseño, drenaje complementario, necesidad de subdrenes y eventual incorporación de geosintéticos, de acuerdo con las condiciones particulares del sitio (FHWA, 2019).

9.1. Estacionamiento de vehículos livianos

En primer lugar, se evalúa la posibilidad de aplicación en estacionamientos de vehículos livianos, donde las cargas son aplicadas a baja velocidad y con menos frecuencia que en pavimentos de tránsito continuo, reduciendo las sollicitaciones dinámicas sobre los adoquines. Sin embargo, es la aplicación más exigente, en relación con la ciclovía y la senda peatonal, por lo que es necesario adoptar criterios más conservadores.

Por más que la normativa actual define que los adoquines para uso vehicular deben contar con un espesor de 80 [mm], ciertos antecedentes, como el caso de Wits University -

Empire Road, Johannesburg, muestra la aplicación de adoquines de 60 [mm] de espesor en un estacionamiento de 13.000 [m²]. Con sustento en este antecedente, se demuestra que la viabilidad depende de la totalidad del paquete estructural, no exclusivamente del adoquín individualmente, y se propone un paquete estructural de PCIP destinado a una playa de estacionamiento, con una velocidad máxima de 30 [km/h] y maniobras moderadas.

Con esto, la aplicación de los adoquines se plantea para un estacionamiento de vehículos livianos, con velocidades máximas de 30 [km/h] y maniobras moderadas. De todos modos, las sollicitaciones por frenado, giro, punzonado local y esfuerzos cortantes siguen siendo relevantes, por lo que se adopta una estructura más robusta, considerando una subrasante de diseño mejorada con CBR = 8% y proponiendo un paquete estructural preliminar configurada como muestra la Tabla 27, tomando como criterios de verificación la capacidad estructural y la infiltración en estado compactado:

Tabla 27: Paquete estructural de pavimento de PCIP para estacionamiento de vehículos livianos

Capa	Espesor	Agregado	Granulometría
PICP	6 cm	-	-
Cama de asiento	3 cm	Fino, lavado, angular y abierto	2 a 5 mm
Base granular drenante	15 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	10 a 25 mm
Subbase granular drenante	20 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	25 a 40 mm
Subrasante con CBR = 8%	20 cm	Suelo mejorado	-

En la Ilustración 59, se puede observar el paquete estructural propuesto para el estacionamiento destinado a vehículos livianos.

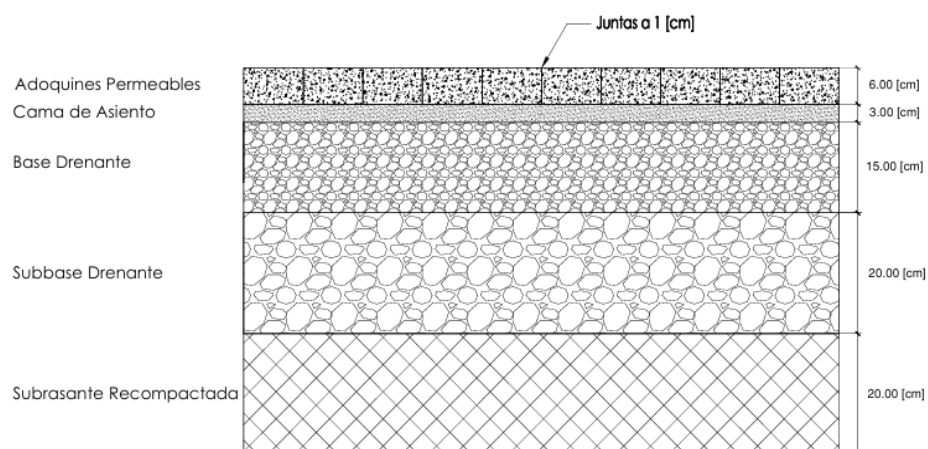


Ilustración 59: Paquete estructural de vehículos livianos

Con esto, el espesor total sobre subrasante resulta de 44 [cm], compatibilizando la función estructural y la función hidráulica del pavimento. Entre cada adoquín, es necesario dejar juntas cada 1 [cm], rellenas con arena lavada y de granulometría abierta de 2 a 5 mm para aportar a la infiltración del agua. Es importante que los agregados empleados en cada capa y en las juntas tengan una resistencia al desgaste Los Ángeles inferior a 40 y menos del 2% de contenido de fino pasante por tamiz N°200 (0,075 [mm]), debido a que uno de los principales problemas de los pavimentos permeables es la colmatación por la presencia de finos (FHWA, 2019).

Aplicando la Ecuación 20, vista anteriormente, se obtiene el número estructural del paquete adoptado, considerando los espesores en pulgadas y los coeficientes de estructurales y de drenaje (ver Tabla 28).

Tabla 28: Contribución de cada capa del estacionamiento para vehículos livianos

Capa	Espesor	α	m	Contribución al SN
PICP + cama de asiento	9 cm = 3,54 in	0,30	-	1,063
Base granular	15 cm = 5,91 in	0,14	0,80	0,661
Subbase granular	20 cm = 7,87 in	0,11	0,80	0,693

Resultando en un número estructural de 2,42.

Tomando que los vehículos livianos tienen un factor de equivalencia de 0,0005 respecto al eje patrón de 80 kN, se realiza la siguiente estimación del tránsito de diseño:

$$50 \text{ veh/día} \times 365 \text{ días} \times 20 \text{ años} \times FE \approx 183 \text{ 000 ESALs}$$

Ecuación 21

Luego, se adoptan los siguientes factores de diseño en base los establecido por AASHTO 93, para obtener el número estructural requerido (Ilustración 60):

- Confiabilidad R = 80%
- Desviación estandar total $S_o = 0,45$
- $\Delta\text{PSI} = 2,2$
- MR = 12.000 psi

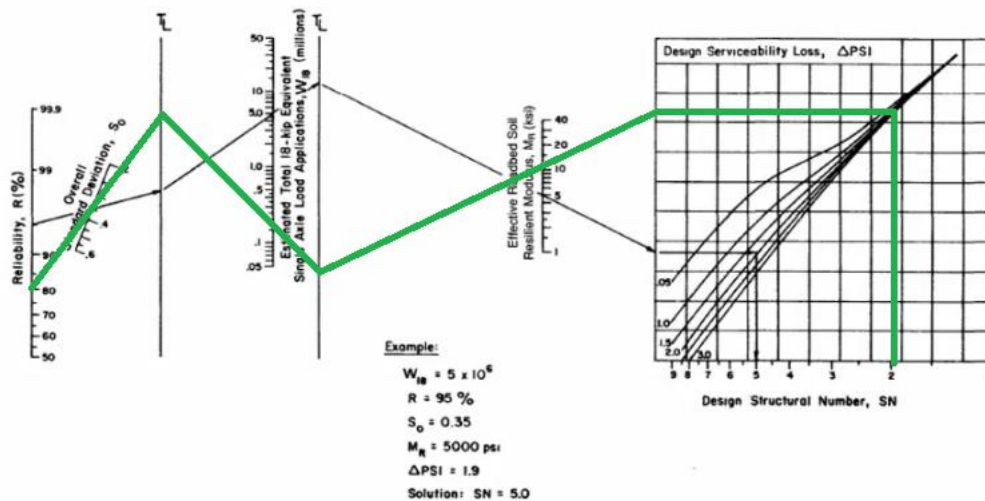


Figure 3.1. Design Chart for Flexible Pavements Based on Using Mean Values for Each Input

Ilustración 60: Determinación de SN requerido

El paquete estructural para el estacionamiento de vehículos estructurales con un número estructural de 2,42 verifica al superar el número estructural requerido aproximado de 1,98.

9.2. Ciclovía

En segundo lugar, se propone la aplicación del pavimento permeable en ciclovías, donde las solicitaciones son de un orden de magnitud menor que en pavimentos destinados al tránsito vehicular pero mayores que a los destinados a uso peatonal, representando una condición intermedia. En estas, las cargas son transmitidas principalmente por bicicletas, y en menor medida por vehículos de mantenimiento o reparación.

La circulación se desarrolla a velocidades intermedias y con maniobras menos bruscas, por lo que todas aquellas maniobras relacionadas al frenado, giro y cortante resultan mucho menores al caso anterior. Por lo tanto, el sistema estructural, puede diseñarse con espesores reducidos, conservando la capacidad necesaria y permitiendo el funcionamiento. Bajo este mismo criterio, se adopta una subrasante de diseño mejorada con CBR = 5%. y se propone el siguiente paquete estructural, como se puede observar en la Tabla 30.

Tabla 29: Paquete estructural de pavimento de PCIP para ciclovías

Capa	Espesor	Agregado	Granulometría
PICP	6 cm	-	-
Cama de asiento	3 cm	Fino, lavado, angular y abierto	2 a 5 mm
Base granular drenante	10 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	10 a 25 mm
Subbase granular drenante	20 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	25 a 40 mm
Subrasante con CBR = 5%	20 cm	Suelo mejorado	-

En la Ilustración 61, se puede observar el paquete estructural propuesto para las ciclovías, destinadas al movimiento de bicicletas y vehículos de mantenimiento.

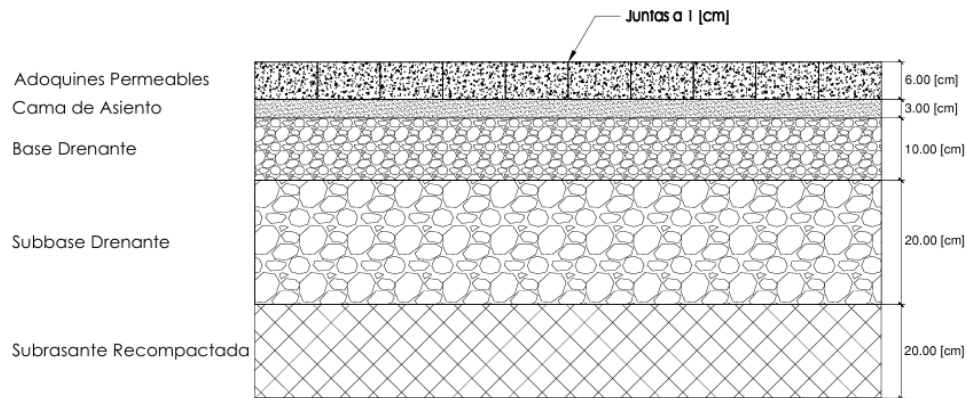


Ilustración 61: Paquete estructural ciclovías

En esta aplicación, el espesor total sobre subrasante es de 39 [cm]. En la Ilustración 60, se puede observar que el paquete cuenta con base y subbase para garantizar un desempeño adecuado en aplicaciones de ciclovías, aportando una resistencia adecuada y contribuyendo al drenaje urbano con una capacidad de infiltración eficiente. Además, se observa entre cada adoquín juntas cada 1 [cm], rellenas con arena lavada y de granulometría abierta de 2 a 5 mm que contribuyen a infiltración del agua y a las pequeñas variaciones dimensionales que el paquete puede experimentar bajo solicitaciones moderadas o cambios de temperatura y humedad. Al igual que en el caso del estacionamiento, se recomienda que los materiales empleados en las juntas, la cama de asiento, la base y la subbase sean triturados, durables y limpios, con desgaste Los Ángeles inferior a 40 y con menos del 2% de material fino pasante por tamiz N°200 (0,075 [mm]), a fin de minimizar la degradación mecánica y reducir el riesgo de colmatación del sistema.

Su aplicación deberá complementarse con una verificación hidráulica del sitio, considerando tormenta de diseño, áreas aportantes, pendientes, drenaje superficial y eventual necesidad de subdrenes o geosintéticos (FHWA, 2019).

Mediante la Ecuación 20, vista anteriormente, se obtiene el número estructural del paquete adoptado, considerando los espesores en pulgadas y los coeficientes de estructurales y de drenaje (ver Tabla 28).

Tabla 30: Contribución de cada capa del estacionamiento para vehículos livianos

Capa	Espesor	α	m	Contribución al SN
PICP + cama de asiento	9 cm = 3,54 in	0,30	-	1,063
Base granular	10 cm = 3,94 in	0,14	0,80	0,661
Subbase granular	20 cm = 7,87 in	0,11	0,80	0,693

Resultando en un número estructural de 2,20.

Tomando que las bicicletas tienen un factor de equivalencia de 0,0001 respecto al eje patrón de 80 kN, se realiza la siguiente estimación del tránsito de diseño:

$$50 \text{ veh/día} \times 365 \text{ días} \times 20 \text{ años} \times FE \approx 14\,600 \text{ ESALs}$$

Ecuación 22

Luego, se adoptan los siguientes factores de diseño en base los establecido por AASHTO 93, para obtener el número estructural requerido (Ilustración 62):

- Confiabilidad $R = 75\%$
- Desviación estandar total $S_0 = 0,45$
- $\Delta\text{PSI} = 2,2$
- $\text{MR} = 7.500 \text{ psi}$

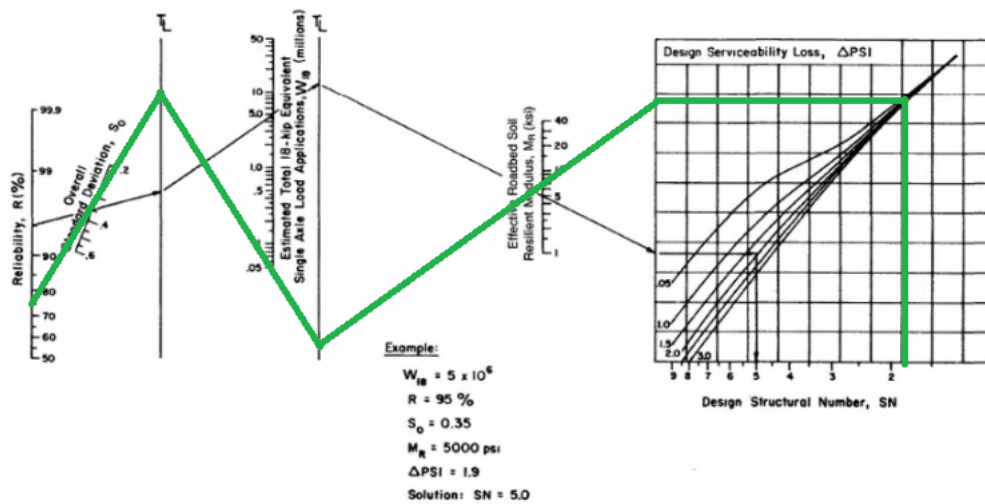


Figure 3.1. Design Chart for Flexible Pavements Based on Using Mean Values for Each Input

Ilustración 62: Determinación de SN requerido

El paquete estructural para el estacionamiento de vehículos estructurales con un número estructural de 2,20 verifica al superar el número estructural requerido aproximado de 1,90.

9.3. Sendas peatonales

Cómo última propuesta, se evalúa la aplicación de los adoquines fabricados en veredas, sendas o calles peatonales, la cuál es consistente con las propiedades físicas y mecánicas de los adoquines al ser sometidas a cargas bajas, sin esfuerzos críticos de giro o frenado propios de los vehículos. Debido a esto, no es necesario adoptar diseños tan conservadores, como en el caso de la implementación de los PCIP en estacionamientos de vehículos livianos.

Tanto la bibliografía internacional consultada como la normativa vigente a nivel nacional asocian a los adoquines de 60 [mm] de espesor al uso peatonal. Además, en este caso no se requiere de una estructura con subbase, siempre que la base sea suficiente para cumplir con la función estructural y de almacenamiento del agua. Bajo dichos criterios y adoptando una subrasante de diseño mejorada con CBR = 5%, se propone un paquete estructural conformado como en la Tabla 29:

Tabla 31: Paquete estructural de pavimento de PCIP para sendas peatonales

Capa	Espesor	Agregado	Granulometría
PICP	6 cm	-	-
Cama de asiento	3 cm	Fino, lavado, angular y abierto	2 a 5 mm
Base granular drenante	20 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	10 a 25 mm
Subrasante con CBR = 5%	20 cm	Suelo mejorado	-

En la Ilustración 61, se puede observar el paquete estructural propuesto para las sendas peatonales, destinadas al movimiento de personas.

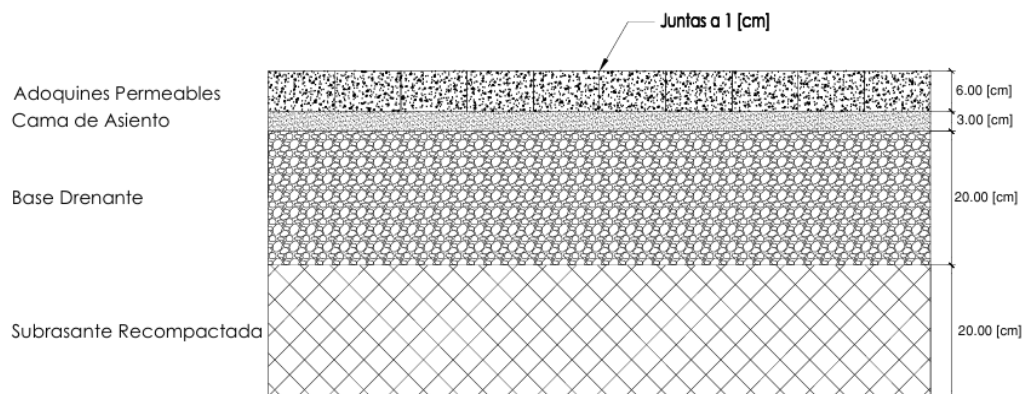


Ilustración 63: Paquete estructural sendas peatonales

Al no incorporar una subbase, se incrementa el espesor de la base a 20 [cm] para que cumpla simultáneamente la función estructural y de almacenamiento hidráulico temporal. Con esto, el paquete estructural sobre subrasante resulta de un espesor total de 29 [cm]. Entre cada adoquín se proponen juntas de 1 [cm], rellenas con agregado fino lavado, angular y de granulometría abierta de 2 a 5 [mm], para favorecer la infiltración del agua hacia las capas

inferiores, mantener el intertrabado de las piezas y absorber pequeñas variaciones dimensionales o deformaciones superficiales del conjunto. Al igual que en las aplicaciones anteriores, se recomienda que tanto los agregados de juntas como los empleados en la cama de asiento y en la base presenten desgaste Los Ángeles menor a 40 y menos del 2% de material pasante por tamiz N°200 (0,075 [mm]), para reducir la degradación del esqueleto granular y minimizar el riesgo de colmatación.

En aplicaciones peatonales, estas verificaciones hidráulicas también resultan necesarias, aunque la menor exigencia estructural puede permitir soluciones más simples, siempre que se controlen adecuadamente la pendiente, las áreas aportantes y el drenaje superficial del sistema (FHWA, 2019).

Utilizando la Ecuación 20, vista anteriormente, se obtiene el número estructural del paquete adoptado, considerando los espesores en pulgadas y los coeficientes de estructurales y de drenaje (ver Tabla 31).

Tabla 32: Contribución de cada capa del estacionamiento para vehículos livianos

Capa	Espesor	α	m	Contribución al SN
PICP + cama de asiento	9 cm = 3,54 in	0,30	-	1,063
Bbase granular	20 cm = 7,87 in	0,14	0,80	0,882

Resultando en un número estructural de 1,95.

Considerando que en las sendas transitarán vehículos de mantenimiento ($FE = 0,0005$) semanalmente:

$$2 \text{ veh/semana} \times 52 \text{ semanas} \times 20 \text{ años} \times FE \approx 1\,040 \text{ ESALs}$$

Ecuación 23

Luego, se adoptan los siguientes factores de diseño en base los establecido por AASHTO 93, para obtener el número estructural requerido (Ilustración 64):

- Confiabilidad $R = 70\%$
- Desviación estandar total $S_o = 0,45$
- $\Delta PSI = 2,2$
- $MR = 7.500 \text{ psi}$

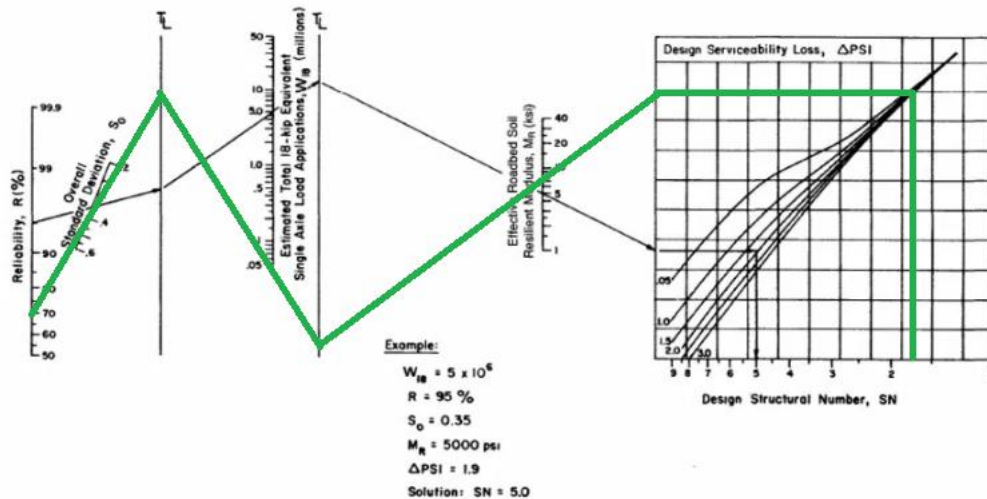


Figure 3.1. Design Chart for Flexible Pavements Based on Using Mean Values for Each Input

Ilustración 64: Determinación de SN requerido

El paquete estructural para el estacionamiento de vehículos estructurales con un número estructural de 1,95 verifica al superar el número estructural requerido, el cual tiene un valor menor a 1,80.

En la Tabla 33, se puede observar un resumen de los valores obtenidos para los tres casos de aplicación:

Tabla 33: Resumen de aplicaciones analizadas

Parámetro	Estacionamiento	Ciclovía	Senda peatonal
Espesor total sobre subrasante	44 cm	39 cm	29 cm
CBR subrasante	8%	5%	5%
MR	12.000	7.500	7.500
Confiableidad	80%	75%	70%
SN requerido	1,98	1,90	1,80
SN aportado	2,42	2,20	1,95
Sobredimensionado	20%	16%	11%
Verificación	SI	SI	SI

En los tres casos analizados, el método AASHTO 93 confirma que los paquetes estructurales propuestos superan ampliamente el Número Estructural requerido. Queda evidenciado que la exigencia estructural para estas aplicaciones es mínima y que el diseño de los espesores responde principalmente al criterio hidráulico de la ASCE/ICPI 68-18. Esta sobredimensión estructural es característica y deseable en pavimentos PICP, ya que las capas granulares drenantes necesarias para el almacenamiento y percolación del agua resultan estructuralmente más robustas que lo estrictamente necesario para resistir las cargas de tránsito liviano.

9.4. Proyección de estacionamiento para motos y bicicletas con adoquines

Con el objetivo de trasladar los resultados experimentales obtenidos a una aplicación real, se desarrolló la proyección de un estacionamiento para motocicletas y bicicletas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba.



Ilustración 65: Estudiantes haciendo uso de espacio verde para estacionar motocicletas

Las observaciones de campo permitieron verificar que existe una necesidad funcional vigente dentro del predio universitario, debido a no disponer de una superficie específica acondicionada para el estacionamiento de este tipo de vehículos. El uso reiterado del lugar produce deterioro del manto vegetal y una ocupación desordenada e incómoda del espacio exterior, sumado a que el espacio queda sin posibilidad de uso en días de lluvia.

A partir del relevamiento, se determinó que el estacionamiento se emplazaría frente a los estacionamientos vehiculares del Edificio Matteo Ricci SJ (Facultad de Ingeniería), espacio verde que actualmente es utilizado de forma espontánea por los estudiantes que asisten a clase en motocicletas. Esta área de 39,50 [m²] cuenta con una topografía prácticamente horizontal, con cotas entre 475,48 [m] y 475,55 [m] de altitud según Google Earth, condición óptima para realizar una plataforma de adoquines sin requerir movimiento de suelo significativo. Adicionalmente, este estacionamiento se conectará de forma directa con la calle vehicular que se extiende por el frente de la Facultad de Ingeniería mediante un corredor de 10 [m] de largo y 1,20 [m] de ancho, desarrollando una pendiente ascendente de 1,5% desde la calle hacia el estacionamiento.



Ilustración 66: Vista satelital del de emplazamiento del estacionamiento (rojo) y rampa (amarillo) de acceso de adoquines permeables para motos y bicicletas



Ilustración 67: Lugar de emplazamiento del estacionamiento de adoquines permeables para motos y bicicletas

Tomando como referencia las dimensiones de una motocicleta promedio, se dimensiona el estacionamiento con una longitud total aproximada de 10,67 [m] y un ancho de 3,70 [m], dentro del cual se disponen 10 (diez) plazas para motocicletas. La plaza tipo presenta un ancho total de 1,15 [m], un ancho útil interior de 0,955 [m] y una longitud aproximada de 2,50 [m], dimensiones adecuadas para el estacionamiento ordenado de motocicletas. Una ventaja de la implementación de dichos adoquines es que existe la posibilidad de incorporar

colorante en el amasado, pudiendo fabricar adoquines de otros colores para demarcar las distintas plazas. Asimismo, se prevé la ejecución del pavimento mediante adoquines colocados con juntas de 1 [cm], favoreciendo el intertrabado y el funcionamiento hidráulico del sistema.

Para el estacionamiento se adopta el pavimento intertrabado permeable, compuesto por los adoquines de AR y ML como capa superficial y apoyado sobre un paquete granular adecuado al uso previsto. Dado que se trata de una superficie de tránsito liviano, el sistema puede resolverse con una estructura simplificada respecto de la utilizada para estacionamientos automotores, conformada como se observa en la Tabla 30.

Tabla 34: Paquete estructural de estacionamiento para motocicletas y bicicletas

Capa	Espesor	Agregado	Granulometría
PICP	6 cm	-	-
Cama de asiento	3 cm	Fino, lavado, angular y abierto	2 a 5 mm
Base granular drenante	10 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	10 a 25 mm
Subbase granular drenante	10 cm	Grueso, lavado, angular y abierto	25 a 40 mm
Subrasante con CBR = 8%	20 cm	Suelo mejorado	-

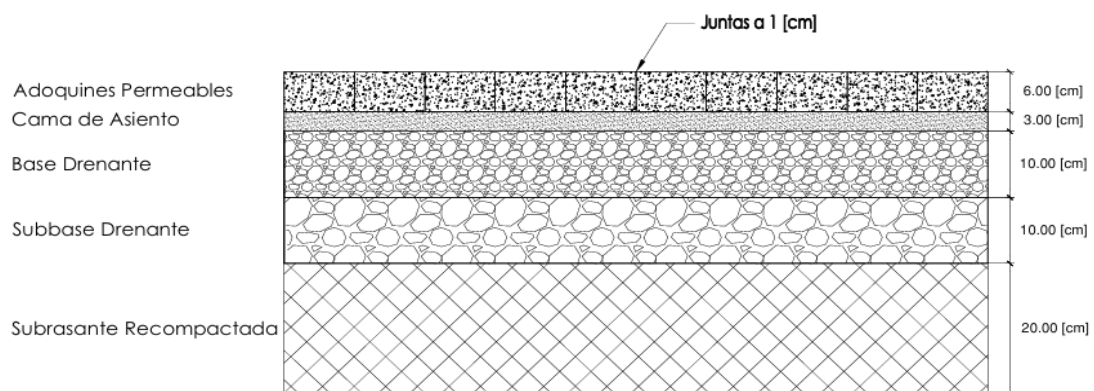


Ilustración 68: Paquete estructural de estacionamiento de motocicletas y bicicletas

De este modo, el espesor total estimado del sistema sería de 49 [cm], resultando una sección compatible con una aplicación institucional de tránsito restringido a motos y bicicletas.

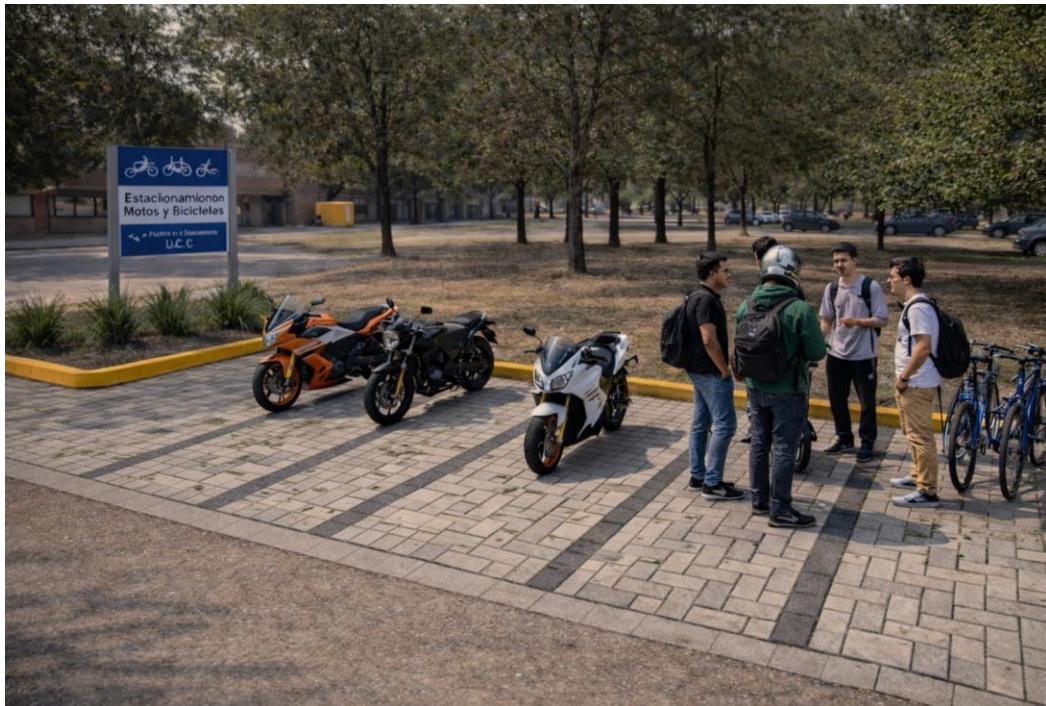


Ilustración 69: Representación de estacionamiento de motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería de la UCC



CAPÍTULO 10

ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL

10. ANÁLISIS ECONÓMICO Y AMBIENTAL

La propuesta elaborada en el presente trabajo adquiere interés por su comportamiento técnico y la incorporación de material de bajo costo relativo, con disponibilidad local y provenientes de residuos aprovechados. En este sentido, se busca analizar la propuesta desde una doble perspectiva: por un lado, su conveniencia económica en relación a una alternativa convencional implementando adoquines macizos y, por otro lado, su aporte a la sostenibilidad mediante la valorización de los sobrantes de hormigón procesados, provenientes de RCD, como árido reciclado fino.

10.1. Análisis económico

Se elaboró un presupuesto preliminar para la ejecución del estacionamiento de motos y bicicletas proyectado en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba con adoquines permeables fabricados con árido reciclado y limo, y una segunda opción ejecutada con adoquines macizos prefabricados comerciales. En el análisis se desarrolló una plataforma de estacionamiento con idéntica geometría, superficie y localización, para que la comparación esté centrada en las diferencias propias del material y del sistema constructivo adoptado.

El cómputo métrico incluyó tareas preliminares, movimiento de suelos, mejoramiento de subrasante, ejecución de capas estructurales, colocación de adoquines, terminaciones, señalización, mobiliario complementario y parqueización. Posteriormente, se asignaron precios unitarios de referencia a cada uno de los ítems, con el objeto de obtener un costo total estimado para ambas alternativas.

En el caso de los adoquines permeables, el costo de la capa superficial se vinculó principalmente a la fabricación propia de las piezas, considerando el uso de limo de costo nulo por su disponibilidad local, árido reciclado de bajo valor relativo y cemento Portland como insumo principal de estabilización. Esta condición permitió disminuir de manera significativa el costo unitario del adoquín respecto de una pieza comercial prefabricada. A su vez, debe considerarse que el pavimento permeable requiere un paquete estructural con capas granulares más abiertas y, en algunos casos, de mayor espesor, debido a la necesidad de asegurar tanto la capacidad de soporte como el funcionamiento hidráulico del sistema.

Tabla 35: Presupuesto de ejecución del proyecto de estacionamiento adoquinado permeable para motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería, Campus UCC

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	TAREAS PRELIMINARES	Gl	1		
TOTAL					\$385.526,23
2	ADOQUINES PERMEABLES	Un	2229		
TOTAL					\$435.144,42
3	EXCAVACIONES	m3	30,37		
TOTAL					\$1.023.757,66
4	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	Gl	1		
TOTAL					\$2.477.661,38

TOTAL DE LA OBRA	\$4.322.089,69
-------------------------	----------------

El cómputo y presupuesto del proyecto de estacionamiento para motos y bicicletas con adoquines permeable en la Facultad de Ingeniería, Campus UCC, se encuentra detallado en el Anexo III.

El pavimento con adoquines macizos admite una estructura más convencional, en la que las capas se diseñan principalmente con criterio estructural y no hidráulico. En consecuencia, mientras que la solución permeable tiende a reducir el costo de la capa superficial, la alternativa maciza puede presentar una ventaja parcial en la simplicidad de algunas capas inferiores. Por ello, la comparación económica no debe centrarse solo en el precio unitario del adoquín, sino en el costo total del sistema terminado. Además, en la alternativa con adoquines macizos, la capa superficial se valorizó a partir de precios de mercado de adoquines prefabricados de hormigón, lo que generó una incidencia económica mayor en el total de la obra.

Tabla 36: Presupuesto de ejecución del proyecto de estacionamiento adoquinado convencional para motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería, Campus UCC

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	TAREAS PRELIMINARES	Gl	1		
TOTAL					\$385.526,23
2	ADOQUINES MACIZOS	Un	2229		
TOTAL					\$1.257.935,00
3	EXCAVACIONES	m3	30,37		
TOTAL					\$1.023.757,66
4	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	Gl	1		
TOTAL					\$2.682.341,54

TOTAL DE LA OBRA	\$5.349.560,43
-------------------------	----------------

El cómputo y presupuesto del proyecto de estacionamiento para motos y bicicletas con adoquines macizos en la Facultad de Ingeniería, Campus UCC, se encuentra detallado en el Anexo III.

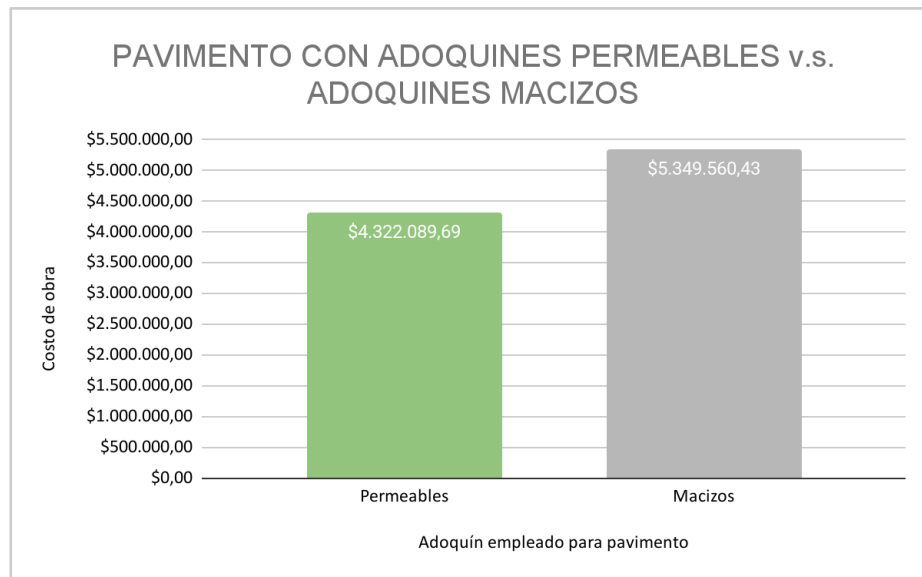


Ilustración 70: Gráfico de comparación entre costos de obra empleando adoquines permeables y macizos

En conclusión, aplicar la alternativa de los adoquines permeables significa un ahorro de más de un 19% en el costo total de la obra.

10.2. Análisis ambiental

Se elaboró una valoración ambiental del impacto generado por el proyecto del estacionamiento de motos y bicicletas en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Católica de Córdoba con adoquines permeables, donde considera distintas acciones, como la producción de adoquines con árido reciclado, la limpieza de la cubierta vegetal, la ejecución de las distintas capas y todas aquellas tareas que forman parte de la etapa constructiva o de operación.

Tabla 37: Escala de valoración de impactos

VALORIZACIÓN DE IMPACTOS	
Impacto Bajo	1 - 30
Impacto Medio	31 - 61
Impacto Severo	61 - 92
Impacto Crítico	> 93

Para realizar esta valoración se utiliza la Matriz de Leopold, una herramienta metodológica utilizada para identificar, analizar y valorar cualitativamente los impactos ambientales generados por un proyecto o actividad. Fue desarrollada por Luna B. Leopold en la década de 1970 y se ha consolidado como un instrumento fundamental en los estudios de impacto ambiental debido a su capacidad para organizar y sistematizar la información de manera clara y visual.

Esta matriz se presenta como una tabla de doble entrada en la que se listan las acciones o actividades del proyecto y los factores ambientales susceptibles de ser afectados (físicos, biológicos y socioeconómicos). En los entrecruzamientos se asignan notas del 0 al 10. La nota de la izquierda indica la magnitud de afectación, acompañada del signo + (impacto positivo) o - (impacto negativo), mientras que la de la derecha indica el alcance.

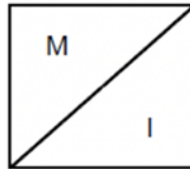


Ilustración 71: Formato Matriz de Leopold

Posteriormente, se pueden realizar sumas ponderadas de las filas y columnas para identificar cuáles son los factores ambientales más afectados y cuáles son las acciones del proyecto que generan mayores impactos. Este análisis facilita la priorización de los aspectos que requieren atención inmediata y orienta el diseño de las medidas de mitigación más efectivas. Es importante destacar que la valoración realizada en la matriz es cualitativa, aunque presenta un formato que simula ser cuantitativo.

Los indicadores utilizados para evaluar la magnitud e importancia de los impactos se seleccionan de manera subjetiva, basándose en la experiencia y criterio técnico de los evaluadores.

A partir de la Matriz de Leopold (Anexo III), se realiza la evaluación con respecto al impacto ambiental que esta produce, donde se buscó una solución, ya que como mencionamos anteriormente existe una necesidad, debido a no existe una superficie específica acondicionada para el estacionamiento de este tipo de vehículos (Bicicletas y Motos).

10.2.1. Medidas de mitigación durante la etapa de construcción

Las medidas de mitigación ambiental se definen como acciones preventivas, correctivas o de compensación destinadas a minimizar los impactos negativos de proyectos o actividades humanas sobre el ecosistema, a partir del análisis de la matriz, se propone una serie de medidas de mitigación durante la etapa de ejecución del proyecto y de operación, con el objetivo de que los impactos sean mitigados de manera efectiva.

- **Control de ruido:** todas aquellas tareas que generen ruidos elevados tendrán restricciones horarias con el fin de reducir la exposición de la población a elevados niveles de presión sonora, durante actividades como compactación, corte de adoquines y movimiento de maquinaria, buscando evitar horarios sensibles (actividades académicas). A su vez toda maquinaria empleada durante el proceso de construcción deberá cumplir con un mantenimiento adecuado y

poseer dispositivos de reducción de ruido, buscando disminuir los niveles sonoros.

- **Emisión de polvos:** para su correcto control, se aplicará agua sobre todos aquellos suelos expuestos y en el acopio de materiales, con el fin de evitar material en suspensión, mejorando la calidad del aire y la salud de las personas.
- **Emisión de gases contaminantes:** Se deberá controlar que toda maquinaria utilizada en el proceso constructivo se haya sometido al mantenimiento adecuado, con el fin de disminuir la combustión emitida, también se debe evitar que estas se encuentren prendidas en periodos de tiempo donde no estén realizando un trabajo efectivo.
- **Erosión:** se deberá delimitar estrictamente el área en donde se llevará a cabo la obra, con el objetivo de reducir los procesos de erosión, todo el material acopiado debe poseer una ubicación controlada y cobertura para evitar que sean erosionados y transportados fuera del lugar y evitar todas aquellas afectaciones innecesarias. A su vez una compactación controlada, permite reducir el proceso de erosión superficial.

10.2.2. Medidas de mitigación durante la etapa de operación

Una vez terminada la obra, es necesario adoptar medidas de mitigación para evitar que, durante su funcionamiento y uso, no se generen impactos ambientales negativos para la comunidad de la facultad ni para el entorno.

- **Eficiencia y durabilidad del pavimento permeable:** Se realizarán mantenimientos rutinarios y correctivos anualmente para evitar el deterioro del pavimento, la colmatación de los finos y la pérdida de infiltración eficiente del agua de escurrimiento.
- En cuanto al mantenimiento rutinario, los agregados de las juntas serán repuestos si hay un faltante de más de 13 [mm] respecto al fondo (6 [cm]). Además, se repararán las deformaciones mayores a los 13 [mm] y se corregirán desniveles que excedan los 6 mm respecto a los adoquines contiguos.
- Se realizará un mantenimiento correctivo cuando la infiltración del sistema se encuentre por debajo de 250 [mm/h]. De ser así, será necesario un barrido al vacío para retirar y reemplazar el agregado de las juntas.
- **Seguridad de peatones y conductores:** Se dispondrá de la señalización correspondiente, demarcando el lugar disponible y permitido para el estacionamiento de vehículos, evitando una ocupación desordenada del espacio

y entrecruzamiento entre un vehículo con otro vehículo o con peatones. Dicha señalización contará con un cartel legible para que los conductores detecten el lugar destinado al estacionamiento de sus vehículos y demarcaciones horizontales para que distingan cada una de las plazas disponibles.

10.2.3. Balance económico-ambiental del proyecto

Una vez realizado el análisis ambiental, mediante la Matriz de Leopold, se determina que el proyecto es técnicamente viable desde lo ambiental y, a su vez, se puede ver la compatibilidad con el entorno donde se emplaza. En la matriz, se puede apreciar que en la fase constructiva se concentran principalmente la mayoría de los impactos negativos, como la alteración del suelo, ruidos elevados y emisión de gases de efecto invernadero, donde estos se presentan con una magnitud baja-moderada, y son de carácter localizado, por lo que pueden ser controlados mediante la implementación de medidas de mitigación y con buenas prácticas en la ejecución de la obra. A su vez, en la fase operativa se producen impactos positivos, logrando una mejora en la infiltración, valorización de residuos (RCD) y un mejor ordenamiento del espacio.

A partir del análisis, se puede observar que los impactos positivos son superiores a los negativos, logrando una buena integración con el ambiente. Por esta razón, el proyecto es una solución técnica eficiente y ambientalmente responsable dentro de este ámbito, incorporando criterios de sustentabilidad ambiental.

A su vez, este proyecto se identifica con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), que son una herramienta de planificación y seguimiento para los países, tanto a nivel nacional como local. Debido a su visión a largo plazo, que conducen a cada país en su camino a un desarrollo sostenible y en armonía con el medio ambiente, a través de políticas e instrumentos de presupuesto, monitoreo y evaluación. En este caso particular, se identifica con los siguientes objetivos:

- “Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación” (ODS N°9): desde el punto de vista geotécnico-vial, el loess de Córdoba es un suelo problemático, el cual se caracteriza por perder volumen y resistencia al saturarse, lo que genera fallas y asentamientos diferenciales en terraplenes y estructuras viales. La estabilización del loess con árido reciclado fino (ARF) que se caracterizó durante el periodo investigado entre 2023-2025, garantiza una importante mejora en sus características geotécnicas, reduciendo el potencial de colapsabilidad al modificarse la estructura macroporosa, incrementa el peso unitario seco máximo y disminuye la cantidad del agua de amasado durante la estabilización a nivel de subrasantes. Esto se traduce de manera directa en infraestructuras de terraplenes más resilientes.



Ilustración 72: ODS N°9

- “Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (ODS N°11): desde el punto de vista geotécnico-ambiental, hemos visto que los adoquines colados compiten de forma directa con los adoquines industrializados en el mercado. El adoquín colado presenta un menor peso unitario, produciendo un mejor rendimiento de la mano de obra, una mayor rapidez en el montaje y garantiza un mejor comportamiento técnico-constructivo como ambiental. Esto generará una gran variedad de aplicaciones para los residuos de demolición provenientes de hormigones en desuso o descarte, ofreciendo una gran variedad de ventajas como minimizar el impacto ambiental negativo de la zona, reduce sustancialmente el volumen de RCD que debe disponerse en vertederos y mejora la eficiencia energética del hábitat construido.



Ilustración 73: ODS N°11

También, es fundamental destacar que la utilización de adoquines de AR y ML, además de ser una alternativa ambientalmente favorable, es económicamente competitiva frente a los adoquines convencionales, esto se debe a un menor costo asociado al uso de materiales reciclados, y a una mayor facilidad de mantenimiento, evitando una intervención de mayor magnitud, por lo que podemos ver que el proyecto optimiza la relación costo-beneficio ambiental.



BIBLIOGRAFÍA

11. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures. AASHTO, Washington D.C.

ASCE/T&DI/ICPI. (2018). *Permeable Interlocking Concrete Pavement*, Standard 68-18. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia.

Agurto Medina, C. J. (2023). Evaluación de las propiedades físico-mecánicas de los adoquines empleando agregado reciclado y agregado natural, Lambayeque-2020.

Amato, C. N., et al. (2022). Economía circular: mapeo de cadenas de valor de materiales reciclables de la ciudad de Córdoba. Córdoba: Editorial de la Facultad de Ciencias Económicas.

Asociación Española de Gestores de Residuos de Construcción y Demolición (GERD). (2012). Guía española de áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD).

Asociación Española de Normalización y Certificación. (2004). UNE-EN 1338:2004. Adoquines de hormigón. Especificaciones y métodos de ensayo. AENOR.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2021). ABNT NBR 15116:2021. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. ABNT.

Boogaard, F., & Lucke, T. (2019). Long-Term Infiltration Performance Evaluation of Dutch Permeable Pavements Using the Full-Scale Infiltration Method. *Water*, 11(2), 320.

Contreras Llanes, M., Romero Pérez, M., Gázquez González, M.J. et al. Construction and demolition waste as recycled aggregate for environmentally friendly concrete paving.

Das, B. M. (2001). Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (4ª edición). Thomson Learning, México.

Deutsches Institut für Normung. (2002). DIN 4226-100:2002-02. Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen [Áridos para hormigón y mortero – Parte 100: Áridos reciclados]. Beuth Verlag.

Deutsches Institut für Normung. (2017). DIN 4226-102:2017-08. Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton – Teil 102 [Áridos reciclados para hormigón – Parte 102]. Beuth Verlag.

Eguia, B., & Feryala, I. (2025). Caracterización de áridos reciclados en Córdoba.



FHWA (2019). Permeable Interlocking Concrete Pavement — TechBrief HIF-15-007. Federal Highway Administration.

Gordillo, T. (2023). Diseño y Construcción de Pavimentos Permeables de Adoquines de Hormigón. Legatec SRL.

Hansen, T. C. (1992). Recycling of demolished concrete and masonry. Taylor & Francis.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2016). Analizan reciclado de residuos de construcción y demolición. Portal de Noticias INTI.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial. (2017). Residuos de construcción y demolición en Córdoba. Soluciones dinamizadas por el INTI.

Interlocking Concrete Pavement Institute (ICPI). (2015, 5ª ed.). *Permeable Interlocking Concrete Pavement: Design, Specification, Construction and Maintenance*. ICPI, Chantilly, VA.

IRAM. (2019). IRAM 11656:2019 Adoquines de hormigón para pavimentos intertrabados. Requisitos y métodos de ensayo.

Merlo, P. S. (2022). Fabricación de adoquines hexagonales a base de reciclado de escombros y/o restos cementicios de obra.

Moretti, L., Altobelli, L., Cantisani, G., & Del Serrone, G. (2025). Permeable Interlocking Concrete Pavements: A Sustainable Solution for Urban and Industrial Water Management. *Water*, 17(6), 829.

Municipalidad de Córdoba (2026). La Municipalidad retiró 4.194 toneladas de residuos en distintos basurales de la ciudad. Municipalidad de Córdoba.

Naciones Unidas. (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-P/Rev.3). Santiago: CEPAL.

NCDOT (2024). Permeable Interlocking Concrete Pavement Guidelines.

Rosero Álvarez, D. M. (2019). Propuesta de guía de uso de los agregados reciclados en Colombia provenientes de RCD.

Sánchez Rodríguez, A. (2011). Análisis de la aplicabilidad de los áridos reciclados mixtos en hormigones



Smith, D. R. (2011). *Permeable Interlocking Concrete Pavements: Selection, Design, Construction, Maintenance* (4^a ed.). Interlocking Concrete Pavement Institute, Herndon, VA.



Woods Ballard, B., Wilson, S., Udale-Clarke, H., Illman, S., Scott, T., Ashley, R., & Kellagher, R. (2015). *The SUDS Manual (C753)*. CIRIA, London.

Xu, R., & Huang, T. (2024). Comparison of the Use of Excavated Soil Recycled Fine Aggregate as a Substitute for River Sand in Mortar Mixing. *Buildings*, 14(7), 1917.







ANEXO I

PLANILLAS DE ENSAYOS

	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores:	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	19/06/2025	
Norma:	IRAM 11656	
"Evaluación inicial de dosificaciones experimentales"		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		
Características		
Tipo de Mezcla	Indicar con X	
Con Cohesión sin AR (ML)		
Sin Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"	X	
Con Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		50% ML + 50% AR + 24% H2O
Sin Cohesión con cemento (AR)		
Sin Cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador	Indicar con X	
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto	X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		Mejorar la cantidad de desmoldante en los laterales
Tiempo de desmolde	Indicar con X	
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]	X	
14[días]		
28 [días]		
Método de Desmolde	Indicar con X	
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción(+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral	X	
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar	Indicar con X	
Separación lateral longitudinal	X	
Separación lateral transversal	X	
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda	X	
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)	Indicar con X	
100%	X	
75%		
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)	Indicar con X	
100%		
75%	X	
50%		
25%		
<25%		
Observaciones Generales		

Boiero, Lucia Abril
Vassallo Santiago Francisco

	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	04/07/2025	
Norma:	IRAM 11656	
"Revisión del desempeño del desmoldante en moldes de adoquines"		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Se observa porosidad en la cara no vista, se debe mejorar el proceso de vibrado correspondiente para mejorar esta situación.
Características		
Tipo de Mezcla	Indicar con X	
Con Cohesión sin AR (ML)		
Sin Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"	X	
Con Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Sin Cohesión con cemento (AR)		
Sin Cohesión sin cemento (AR)		
50% ML + 50% AR + 24% H2O		
Tipo de desmoldador	Indicar con X	
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto	X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Mejorar la cantidad de desmoldante en los laterales		
Tiempo de desmolde	Indicar con X	
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]	X	
28 [días]		
Método de Desmolde	Indicar con X	
Apertura por contracción	X	
Apertura por esfuerzos de tracción(+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Se observa una gran facilidad de desmolde , en relación a los anteriores con menor tiempo de desmolde		
Condición de borde al desmoldar	Indicar con X	
Separación lateral longitudinal	X	
Separación lateral transversal	X	
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda	X	
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)	Indicar con X	
100%		
75%	X	
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)	Indicar con X	
100%		
75%		
50%	X	
25%		
<25%		
Observaciones Generales		

	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	04/07/2025	
Norma	IRAM 11656	
"Revisión del proceso de desmolde de adoquines sin desmoldante"		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Se ha podido observar que cuando no se ha utilizado el desmoldante, se ha dificultado en gran medida el proceso de desmolde, afectando la calidad del adocuin.
Características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con Cohesión sin AR (ML)		
Sin Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X
Con Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Sin Cohesión con cemento (AR)		
Sin Cohesión sin cemento (AR)		
Sin Cohesión con cemento (AR)		50% ML + 50% AR + 24% H2O
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		No se ha utilizado desmoldante. Se puede observar que la falta de desmoldante, dificulta en gran medida el desmolde.
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21[días]		X
28 [días]		
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		X
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		
75%		
50%		
25%		
<25%		X
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		
75%		
50%		
25%		
<25%		X
Observaciones Generales		



Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco
Fecha:	05/06/2025
Norma:	IRAM 11656



"Evaluación inicial de dosificaciones experimentales"



"Imagen de la muestra"	"Observaciones"
	No se ha podido desmoldar

Características		
Tipo de Mezcla	Indicar con X	
Con Cohesión sin AR (ML)		
Sin Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con Cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		100% AR + 5% C
Sin cohesión con cemento (AR)	X	
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador	Indicar con X	
Aceite + Alcohol	X	
Aceite de auto		
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde	Indicar con X	
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]	X	
14[días]		
21 [días]		
28 [días]		
Método de Desmolde	Indicar con X	
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede	X	
Otra		
Condición de borde al desmoldar	Indicar con X	
Separación lateral longitudinal		
Separación lateral transversal		
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		
Superficie en condición saturada	X	
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)	X	
Calidad de Superficie (Vista)	Indicar con X	
100%		
75%		
50%		
25%		
<25%	X	
Calidad de Desmolde (Aristas)	Indicar con X	
100%		
75%		
50%		
25%		
<25%	X	No se puede determinar


Observaciones Generales



--



	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería <small>Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017</small>	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucía Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	12/05/2025	
Norma:	IRAM 11656	
"Evaluación inicial de dosificaciones experimentales"		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Cohesión insuficiente a edades tempranas
Características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Sin cohesión con cemento (AR)		X
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
4 [días]		X
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]		
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		X
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		X
Desmolde con vuelco		X
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		X
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		X
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		
75%		
50%		X
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		
75%		
50%		
25%		
<25%		X
Observaciones Generales		
<p>La mezcla con árido reciclado y bajo contenido de cemento presentó elevada adherencia al molde. La ausencia de desmoldante resultó determinante en el fallo del proceso de desmolde. No hubo efecto lubricante ni facilidad de desprendimiento.</p> <p>La rugosidad y porosidad del árido reciclado incrementaron la fricción con las paredes del molde.</p> <p>El sistema de moldeo es adecuado desde el punto de vista geométrico, pero la dosificación no resulta apta para desmolde temprano sin desmoldante.</p>		



	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucía Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	22/05/2025	
Norma:	IRAM 11656	
"Revisión del proceso de desmolde de adoquines sin desmoldante"		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Los adoquines muestran microfisuras, pero se mantienen cohesivos.
Características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		X
21 [días]		
28 [días]		
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		X
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		
Superficie en condición saturada		X
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		X
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		
75%		
50%		X
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		
75%		X
50%		
25%		
<25%		
Observaciones Generales		
<p>El limo loésico favorece el desmolde por a su alta finura y a la retracción homogénea durante el secado. La ausencia de desmoldante no impidió el desmolde, indicando <u>baja adherencia inicial al molde</u>. La elevada relación A/C mejoró la trabajabilidad, pero generó segregación inicial del agua, contribuyendo a la aparición de microfisuras superficiales.</p> <p>El árido reciclado poroso absorbió parte del agua excedente, favoreciendo la decantación de la mezcla.</p> <p>El resultado se considera aceptable desde el punto de vista experimental, pero se debe controlar la A/C y el método de compactación para reducir fisuración.</p>		







Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	01/09/2025	
Norma:	IRAM 11656	
"Producción de adoquines con dosificaciones establecidas (sin parametrizar)"		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		<p>El retraso en el desmolde (21 días) permitió:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Una mayor resistencia inicial del adoquín, evitando la rotura de aristas y superficies que había ocurrido en otros casos. -Que las retracciones laterales trabajaran a favor del desmolde, reduciendo la adherencia con el molde.
Características		
Tipo de Mezcla	Indicar con X	
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"	X	50% ML + 50% AR + 0,80A/C
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador	Indicar con X	
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto	X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde	Indicar con X	
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]	X	El adoquín que había quedado adherido cuando se lo intentó desmoldar a los 14 días, salió luego de 21 días con golpes de martillo de goma en la contracara del molde.
28 [días]		
Método de Desmolde	Indicar con X	
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma	X	
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar	Indicar con X	
Separación lateral longitudinal	X	
Separación lateral transversal	X	
Superficie en condición seca	X	Al desmoldar, el adoquín presentaba superficies bien lisas, con presencia de algunas pequeñas burbujas y coloraciones más oscuras en sus laterales.
Superficie en condición húmeda		
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)	Indicar con X	
100%	X	
75%		
50%		Superficie más homogénea, con menor cantidad de burbujas visibles.
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)	Indicar con X	
100%	X	
75%		
50%		En este caso se conservan las aristas y los bordes son bien definidos.
25%		
<25%		
Observaciones Generales		

	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	03/03/2026	
Norma:	IRAM 11656	
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr) - Resistencia a la Abrasión		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656
Características		
Tipo de Mezcla	Indicar con X	
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"	X	50% ML + 50% AR + 0,72A/C-1
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador	Indicar con X	
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto	X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde	Indicar con X	
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]	X	
Método de Desmolde	Indicar con X	
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción(+ espátula)		
Desmolde con vuelco	X	
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		
Vuelco , martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar	Indicar con X	
Separación lateral longitudinal	X	
Separación lateral transversal	X	
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda	X	
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)	Indicar con X	
100%	X	
75%		
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)	Indicar con X	
100%	X	
75%		
50%		
25%		
<25%		
Al desmoldar, el adoquín presentaba superficies bien lisas, con presencia de algunas pequeñas burbujas y coloraciones más oscuras en sus laterales.		
Superficie homogénea y se logró una reducción en la cantidad de poros por mejora en el proceso de compactación manual.		
Buen comportamiento con desmoldante. Adoquín se libera sin daños, evidencia aporte del limo en la reducción de la adherencia al molde.		
Observaciones Generales		


	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	03/03/2026	
Norma:	IRAM 11656	
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr) - Resistencia a la Abrasión		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656
Características		
Tipo de Mezcla	Indicar con X	
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"	X	50% ML + 50% AR + 0,72A/C-2
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador	Indicar con X	
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto	X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde	Indicar con X	
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]	X	
Método de Desmolde	Indicar con X	
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco	X	
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar	Indicar con X	
Separación lateral longitudinal	X	
Separación lateral transversal	X	
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda	X	Al desmoldar, el adoquín presentaba superficies bien lisas, con presencia de algunas pequeñas burbujas y coloraciones más oscuras en sus laterales.
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)	Indicar con X	
100%		
75%	X	Superficie casi homogénea y presencia de pequeñas fisuras superficiales
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)	Indicar con X	
100%		
75%	X	Presencia de aristas bien definidas, con pequeñas irregularidades producidas al momento de desmoldar
50%		
25%		
<25%		
Observaciones Generales		



		Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería <small>Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017</small>	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"		
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba		
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco		
Fecha:	03/03/2026		
Norma:	IRAM 11656		
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr)			
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"	
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656	
Características			
Tipo de Mezcla		Indicar con X	
Con cohesión sin AR (ML)			
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"			
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X	
Sin cohesión con cemento (AR)			
Sin cohesión sin cemento (AR)			
Tipo de desmoldador		Indicar con X	
Aceite + Alcohol			
Aceite de auto		X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)			
Pintura asfáltica (Condición Seca)			
Tiempo de desmolde		Indicar con X	
24 [hs]			
48[hs]			
72 [hs]			
5 [días]			
7 [días]			
14[días]			
21 [días]			
28 [días]		X	
Método de Desmolde		Indicar con X	
Apertura por contracción			
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)			
Desmolde con vuelco			
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X	
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral			
No se puede			
Otra			
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X	
Separación lateral longitudinal		X	
Separación lateral transversal		X	
Superficie en condición seca			
Superficie en condición húmeda		X	
Superficie en condición saturada			
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras,etc)			
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X	
100%		X	
75%			
50%			
25%			
<25%			
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X	
100%		X	
75%			
50%			
25%			
<25%			
Observaciones Generales			
<p>Al tener mayor porcentaje de ML, son menos porosos, ya que, al tener un diámetro de partícula más pequeño, es más impermeable. Por lo que se observó que al tener mayor superficie específica, ingresa menor cantidad de agua y también se dificulta sacar el agua o que se produzca su enfriamiento luego de sacado del horno</p>			



	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	03/03/2026	
Norma:	IRAM 11656	
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr)		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656
Características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
88% ML + 12% AR + 0,80A/C-2		
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		X
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]		X
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		X
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		X
75%		
50%		
25%		
<25%		
Superficie homogénea y presencia de pequeños poros superficiales.		
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		X
75%		
50%		
25%		
<25%		
Presencia de aristas bien definidas, sin mostrar defectos superficiales.		
Observaciones Generales		
<p>Al tener mayor porcentaje de ML, son menos porosos, ya que, al tener un diámetro de partícula más pequeño, es más impermeable. Por lo que se observó que al tener mayor superficie específica, ingresa menor cantidad de agua y también se dificulta sacar el agua o que se produzca su enfriamiento luego de sacado del horno</p>		

	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	03/03/2026	
Norma:	IRAM 11656	
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr)		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656
Características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		X
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]		X
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción(+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		X
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		X
75%		
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		X
75%		
50%		
25%		
<25%		
Observaciones Generales		
<p>Al tener mayor porcentaje de ML, son menos porosos, ya que, al tener un diámetro de partícula más pequeño, es más impermeable. Por lo que se observó que al tener mayor superficie específica, ingresa menor cantidad de agua y también se dificulta sacar el agua o que se produzca su enfriamiento luego de sacado del horno.</p> <p>A diferencia de las anteriores muestras, esta presenta una relación A/C de 0,84.</p>		



Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	03/03/2026	
Norma:	IRAM 11656	
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr)		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656
Características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		X
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]		X
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		X
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		X
75%		
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		
75%		X
50%		
25%		
<25%		
Observaciones Generales		
En la dosificación 25% AR + 75% ML se identificaron zonas con mayor concentración de cemento.		

		Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería <small>Campus universitario - Av. Armada Argentina Nº 3555 - CP 5017</small>	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"		
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba		
Operadores:	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco		
Fecha:	03/03/2026		
Norma:	IRAM 11656		
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr)			
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"	
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656	
Características			
Tipo de Mezcla		Indicar con X	
Con cohesión sin AR (ML)			
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"			
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X	75% ML + 25% AR + 0,80A/C-2
Sin cohesión con cemento (AR)			
Sin cohesión sin cemento (AR)			
Tipo de desmoldador		Indicar con X	
Aceite + Alcohol			
Aceite de auto		X	
Pintura asfáltica (Condición Saturada)			
Pintura asfáltica (Condición Seca)			
Tiempo de desmolde		Indicar con X	
24 [hs]			
48[hs]			
72 [hs]			
5 [días]			
7 [días]			
14[días]			
21 [días]			
28 [días]		X	
Método de Desmolde		Indicar con X	
Apertura por contracción			
Apertura por esfuerzos de tracción(+ espátula)			
Desmolde con vuelco			
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X	
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral			
No se puede			
Otra			
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X	
Separación lateral longitudinal		X	
Separación lateral transversal		X	
Superficie en condición seca			
Superficie en condición húmeda		X	Presencia de contracción en los bordes.
Superficie en condición saturada			
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)			
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X	
100%		X	
75%			
50%			
25%			
<25%			La cara expuesta mostraba irregularidades propias de la compactación manual, que se hicieron más notorias al secar.
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X	
100%		X	
75%			
50%			
25%			
<25%			Al desmoldar, la cara inferior presentaba irregularidades, todas las caras tenían más cantidad de burbujas y de mayor tamaño y a su vez presencia de pequeñas fisuras en sus caras.
Observaciones Generales			
En la dosificación 25% AR + 75% ML se identificaron zonas con mayor concentración de cemento.			

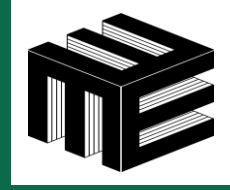
	Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería Campus universitario - Av. Armada Argentina N° 3555 - CP 5017	Laboratorio de suelos
Proyecto:	"Suelos estabilizados y reciclados en Córdoba"	
Ubicación:	Universidad Católica de Córdoba	
Operadores:	Boiero Lucia Abril-Vassallo Santiago Francisco	
Fecha:	03/03/2026	
Norma:	IRAM 11656	
Ensayo de Absorción - Modulo de Rotura a Flexión (Mr)		
"Imagen de la muestra"		"Observaciones"
		Adoquines utilizados para la realización del ensayo de "Absorción"- IRAM 11656
características		
Tipo de Mezcla		Indicar con X
Con cohesión sin AR (ML)		
Sin cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		
Con cohesión con AR (ML) "Indicar dosificación (Observaciones)"		X
Sin cohesión con cemento (AR)		
Sin cohesión sin cemento (AR)		
Tipo de desmoldador		Indicar con X
Aceite + Alcohol		
Aceite de auto		X
Pintura asfáltica (Condición Saturada)		
Pintura asfáltica (Condición Seca)		
Tiempo de desmolde		Indicar con X
24 [hs]		
48[hs]		
72 [hs]		
5 [días]		
7 [días]		
14[días]		
21 [días]		
28 [días]		X
Método de Desmolde		Indicar con X
Apertura por contracción		
Apertura por esfuerzos de tracción (+ espátula)		
Desmolde con vuelco		
Desmolde con vuelco y golpes con martillo de goma		X
Vuelco, martillo de goma y destornillador lateral		
No se puede		
Otra		
Condición de borde al desmoldar		Indicar con X
Separación lateral longitudinal		X
Separación lateral transversal		X
Superficie en condición seca		
Superficie en condición húmeda		X
Superficie en condición saturada		
Otro (Fracturas superficiales, microfisuras, etc)		
Calidad de Superficie (Vista)		Indicar con X
100%		
75%		X
50%		
25%		
<25%		
Calidad de Desmolde (Aristas)		Indicar con X
100%		
75%		X
50%		
25%		
<25%		
Observaciones Generales		
En la dosificación 25% AR + 75% ML se identificaron zonas con mayor concentración de cemento.		

LABORATORIO DE ESTRUCTURAS

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Av. Vélez Sarsfield 1611 - C.P. 5000
Ciudad Universitaria - Córdoba
Tel. 351 - 5353800 - int. 710
351 - 4334145 - int. 32
e-mail: lestructuras.info@cefyn.unc.edu.ar



INFORME DE LABORATORIO

RG05-13-01
Emitido: 04-05-20
Revisión: 002

Solicitante: Universidad Católica Córdoba

Córdoba, 16 de diciembre de 2025

Obra: Trabajo Final adoquines colado con AR

Informe N° 689-25

Hoja 1 de 2

Ensayo:

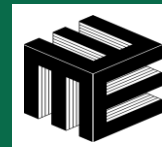
**RESISTENCIA A LA ABRASIÓN EN ADOQUINES DE HORMIGÓN
PARA PAVIMENTOS INTERTRABADOS
NORMA IRAM 11656-2019**

Materiales:

**03 (TRES) ADOQUINES PARA PAVIMENTOS
INTERTRABADOS - TIPO HOLANDA**

Responsable por el Laboratorio:

Salvo aclaración explícita en contrario, los resultados consignados refieren exclusivamente a muestra recibida. No cabe a este laboratorio responsabilidad alguna por el uso indebido o incorrecto que se hiciera de este informe.



Informe N°: 689-25

Fecha: 16 de diciembre de 2025

Hoja: 2 de 2


III - RESISTENCIA A LA ABRASIÓN EN ADOQUINES DE H° PARA PAVIMENTO INTERTRABADO NORMA IRAM 11656-2019

ADOQUÍN TIPO 1, RECTANGULAR RECTO (HOLANDA)

Identificación de Adoquín		Fecha de Ensayo	Largo Corregido [mm]
Según Lab.	Según Solicitante		
1785-1	AH-5OML+5OAR+0,72 A/C-1	16/12/25	21,0
1785-2	AH-5OML+5OAR+0,72 A/C-2	16/12/25	24,5
1785-3	AH-5OML+5OAR+0,72 A/C-3	16/12/25	24,0
		Promedio	23,2

Requisito de aceptación IRAM 11656: El adoquín se acepta si el Largo corregido promedio de 3 especímenes $\leq 23\text{mm}$



Laboratorio de suelos			Ensayo de rotura							Ensayo de absorcion					DENSIDAD	Desgaste de adoquines	Apariencia					Muestra N°	Producto	Fecha de produccion	Dimensiones de producto terminado (ADOQUINES) (mm)			
	DOSIFICACIÓN	A/C	Fecha de Ensayo	Carga					Peso inicial	Peso seco	Peso Sat.	Peso Sum	Absorcion	Visual (Calidad) %					Muestra a 28 dias									
				ESCALA (Kg)	Medicion	Kg	Newton	Mpa						Mr corregido			(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	%				(kg/m3)	l(mm)	Rot	Fis
 Universidad Católica de Córdoba Facultad de Ingeniería <small>Campus Universitario - Av. Armada Argentina N° 3585 - CP 5017</small>	50%AR+50%ML	0,72	23/10/2025	500,00	3,00	150,00	1470,00	1,10	1,30	2059,50	1929,50	2243,50	1138,00	16,27	1745,36	21,00	100%	100%	90%	100%	100%	1	ADH	23/10/2025	195,68	96,52	61,81	61,81
				500,00	2,55	127,50	1249,50	0,94	1,10	2009,00	1895,50	2189,50	1106,00	15,51	1749,42	24,50	100%	90%	95%	80%	90%	2	ADH	23/10/2025	195,28	97,00	61,85	61,85
				500,00	2,80	140,00	1372,00	1,03	1,21	-	-	-	-	-	-	-	-	24,00	100%	95%	90%	95%	100%	3	ADH	23/10/2025	200,00	100,00
	ESTADÍSTICA	PROMEDIO			139,17	1363,83	1,02	1,20	2034,25	1912,50	2216,50	1122,00	15,89	1747,39	23,17	100,00%	95,00%	91,67%	91,67%	96,67%	PROMEDIO				196,99	97,84	61,22	
		R3			-	-	-	0,19	-	-	-	-	0,76	4,06	3,50	0,00	0,10	0,05	0,20	0,10	R3				4,72	3,48	1,85	
		R3%			-	-	-	16,17%	-	-	-	-	4,80%	0,23%	15,11%	0,00%	10,53%	5,45%	21,82%	10,34%	R3%				2,40%	3,56%	3,02%	
		R2			-	-	-	0,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R2				-	-	-
		Desvio			9,20	90,20	0,07	0,08	25,25	17,00	27,00	16,00	0,38	2,03	1,55	0,00	0,04	0,02	0,08	0,05	Desvio				2,14	1,54	0,86	
	25%AR+75%ML	0,80	23/8/2025	500	2,20	110,0	1078,00	0,81	0,95	1843,50	1716	2055,5	1061	19,78	1725,49	-	95%	95%	100%	100%	100%	1	ADH	23/8/2025	195,10	96,68	59,71	59,71
				500	3,10	155,0	1519,00	1,14	1,34	1892,00	1763,5	2105,5	1088	19,39	1733,17	-	100%	80%	85%	80%	85%	2	ADH	23/8/2025	194,98	96,28	59,53	59,53
				500	3,00	150,0	1470,00	1,10	1,30	1944,50	1806,5	2169	1119	20,07	1720,48	-	100%	90%	95%	95%	95%	3	ADH	23/8/2025	195,18	96,48	61,43	61,43
	ESTADÍSTICA	PROMEDIO			138,3	1355,67	1,017	1,20	1893,33	1762,00	2110,00	1089,33	19,75	1726,38	-	98,33%	88,33%	93,33%	91,67%	93,33%	PROMEDIO				195,09	96,48	60,22	
		R3			-	-	-	0,39	-	-	-	-	0,67	12,69	-	0,05	0,15	0,15	0,20	0,15	R3				0,20	0,40	1,90	
		R3%			-	-	-	33%	-	-	-	-	3,41%	0,74%	-	5,08%	16,98%	16,07%	21,82%	16,07%	R3%				0,10%	0,41%	3,15%	
		R2			-	-	-	0,66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R2				-	-	-
Desvio			20,14	197,36	0,15	0,17	41,24	36,96	46,45	23,70	0,28	5,22	-	0,02	0,06	0,06	0,08	0,06	Desvio				0,08	0,16	0,86			
12%AR+88%ML	0,84	4/12/2025	500	2,95	147,5	1445,50	1,08	1,28	2048,00	1940,5	2183,5	1076	12,52	1752,14	-	100%	100%	75%	100%	85%	1	ADH	4/12/2025	195,30	95,90	59,65	59,65	
			500	2,25	112,5	1102,50	0,83	0,97	1967,50	1820	2179,5	1105	19,75	1693,81	-	100%	100%	70%	100%	80%	2	ADH	4/12/2025	195,00	96,50	61,18	61,18	
			500	2,95	147,5	1445,50	1,08	1,28	2078,50	1925,5	2210	1088	14,78	1716,13	-	100%	100%	100%	100%	100%	3	ADH	4/12/2025	195,74	96,06	60,57	60,57	
ESTADÍSTICA	PROMEDIO			135,8	1331,17	0,998	1,17	2031,33	1895,33	2191,00	1089,67	15,68	1720,70	-	100,00%	100,00%	81,67%	100,00%	88,33%	PROMEDIO				195,35	96,15	60,47		
	R3			-	-	-	0,30	-	-	-	-	7,23	58,33	-	0,00	0,00	0,30	0,00	0,20	R3				0,74	0,60	1,53		
	R3%			-	-	-	25,77%	-	-	-	-	46,10%	3,39%	-	0,00%	0,00%	36,73%	0,00%	22,64%	R3%				0,38%	0,62%	2,53%		
	R2			-	-	-	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	R2				-	-	-	
	Desvio			16,50	161,69	0,12	0,14	46,82	53,62	13,53	11,90	3,02	24,03	-	0,00	0,00	0,13	0,00	0,08	Desvio				0,30	0,25	0,63		



ANEXO II

FICHAS TÉCNICAS

FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN EXPERIMENTAL AR-ML (50% AR – 50% ML)

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Adoquín experimental elaborado con árido reciclado fino ($\phi=6$ mm) proveniente de residuos de hormigón y suelo limo loésico, estabilizados con cemento Portland y compactados manualmente.

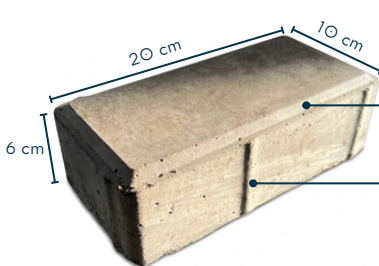
La mezcla corresponde a una **dosificación equilibrada entre fracción granular y fracción fina**, generando una estructura interna relativamente estable dentro del sistema AR-ML.

COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

Árido reciclado fino (AR)	50 %
Limo loésico (ML)	50 %
Relación agua/cemento (A/C)	0,72
Tipo de mezcla	Seca colada

DIMENSIONES

Largo nominal	200 mm
Ancho nominal	100 mm
Espesor nominal	60 mm
Bisel	1 cm de long. a 45°



BISEL

Disminuye el riesgo de rotura local de bordes

SEPARADORES

Garantizan ancho mínimo de junta entre piezas al momento de colocarlas.



CARACTERÍSTICAS

- equilibrio entre esqueleto granular y matriz fina
- estructura interna relativamente estable
- menor deformación higroscópica
- distribución de poros más homogénea
- menores costos en fabricación y colocación

APLICACIONES

- pavimentos peatonales
- senderos o ciclovías
- superficies de tránsito liviano
- espacios urbanos de baja sollicitación mecánica
- sistemas de pavimento permeable o drenante

VARIACIÓN DIMENSIONAL

Largo	$> \pm 0,4$ mm
Ancho	$> \pm 0,5$ mm
Espesor	$> \pm 0,1$ mm

FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN EXPERIMENTAL AR-ML (50% AR – 50% ML)

COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA

Método de compactación	Manual
Energía de compactación	1100 J

PROPIEDADES FÍSICAS

Peso	1,90 kg
Absorción	15,90 %
Densidad	1,75 g/cm ³
Clasificación (CIRSOC 201)	Hormigón liviano
Estabilidad volumétrica	99,95%

VARIACIÓN DIMENSIONAL POR HUMEDAD

Largo	0,046 %
Ancho	- 0,004 %
Espesor	- 0,003 %

PROPIEDADES MECÁNICAS

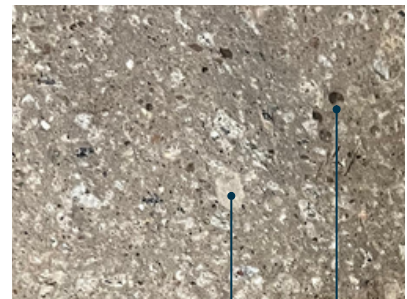
Módulo de rotura promedio	1,20 MPa
Rango de resistencia	1,10 - 1,30 MPa
Desgaste superficial	23,17 mm

RENDIMIENTO POR METRO CUADRADO

Unidades	50
Tiempo de cobertura	40 minutos

FABRICACIÓN

- compactación manual adecuada
- buena estabilidad geométrica durante el fraguado
- menor retracción superficial
- desmolde satisfactorio



MATRIZ INTERNA

Homogénea, continua, con buena dispersión de AR, sin aglomerados visibles.
Color grisaseo.

POROSIDAD

Uniforme, de cavidades pequeñas, garantizando permeabilidad sin comprometer consolidación.



FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN EXPERIMENTAL AR-ML (25% AR – 75% ML)

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Adoquín experimental elaborado con árido reciclado fino ($\phi=6$ mm) proveniente de residuos de hormigón y suelo limo loésico, estabilizados con cemento Portland y compactados manualmente.

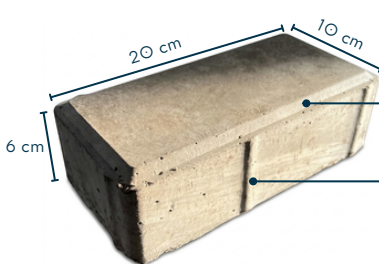
La mezcla contiene **un alto contenido de fracción fina** que modifica la estructura interna del material y genera una mayor sensibilidad frente a variaciones de humedad y condiciones de compactación.

COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

Árido reciclado fino (AR)	25 %
Limo loésico (ML)	75 %
Relación agua/cemento (A/C)	0,80
Tipo de mezcla	Seca colada

DIMENSIONES

Largo nominal	200 mm
Ancho nominal	100 mm
Espesor nominal	60 mm
Bisel	1 cm de long. a 45°



BISEL

Disminuye el riesgo de rotura local de bordes

SEPARADORES

Garantizan ancho mínimo de junta entre piezas al momento de colocarlas.



CARACTERÍSTICAS

- alta proporción de fracción fina
- pérdida parcial del esqueleto granular
- estructura interna menos estable
- mayor sensibilidad frente a cambios de humedad
- mayor dispersión en propiedades físicas y mecánicas

APLICACIONES

- pavimentos peatonales
- usos residenciales
- espacios urbanos de baja sollicitación mecánica

VARIACIÓN DIMENSIONAL

Largo	$> \pm 0,2$ mm
Ancho	$> \pm 0,3$ mm
Espesor	$> \pm 0,8$ mm

FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN EXPERIMENTAL AR-ML (25% AR – 75% ML)

COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA

Método de compactación	Manual
Energía de compactación	1100 J

PROPIEDADES FÍSICAS

Peso	1,76 kg
Absorción	19,75%
Densidad	1,73 g/cm ³
Clasificación (CIRSOC 201)	Hormigón liviano
Estabilidad volumétrica	99,78%

VARIACIÓN DIMENSIONAL POR HUMEDAD

Largo	0,133 %
Ancho	- 0,194 %
Espesor	- 0,320 %

PROPIEDADES MECÁNICAS

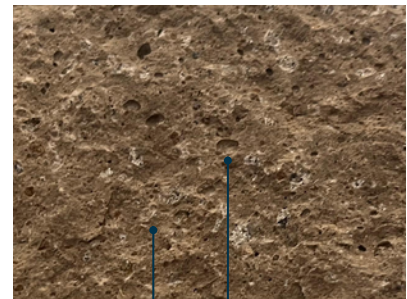
Módulo de rotura promedio	1,19 MPa
Rango de resistencia	0,95 - 1,34 MPa
Desgaste superficial	-

RENDIMIENTO POR METRO CUADRADO

Unidades	50
Tiempo de cobertura	40 minutos

FABRICACIÓN

- compactación manual adecuada
- buena estabilidad geométrica durante el fraguado
- menor retracción superficial
- desmolde satisfactorio



MATRIZ INTERNA

Homogénea, continua, con buena dispersión de AR, sin aglomerados visibles. Color marrón rojizo.

POROSIDAD

Variable, de cavidades pequeñas y grandes, causando comportamiento variable ante permeabilidad y consolidación.



FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN EXPERIMENTAL AR-ML (12% AR – 88% ML)

DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

Adoquín experimental elaborado con árido reciclado fino ($\phi=6$ mm) proveniente de residuos de hormigón y suelo limo loésico, estabilizados con cemento Portland y compactados manualmente.

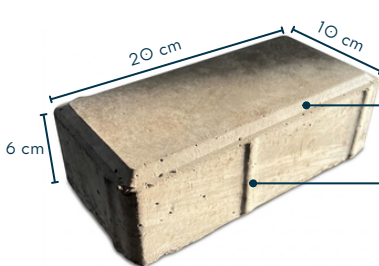
La mezcla presenta **predominio de la fracción fina**, generando una estructura interna dominada por la matriz de limo estabilizado con cemento, donde el árido reciclado actúa como inclusión granular.

COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA

Árido reciclado fino (AR)	12 %
Limo loésico (ML)	88 %
Relación agua/cemento (A/C)	0,84
Tipo de mezcla	Seca colada

DIMENSIONES

Largo nominal	200 mm
Ancho nominal	100 mm
Espesor nominal	60 mm
Bisel	1 cm de long. a 45°



BISEL

Disminuye el riesgo de rotura local de bordes

SEPARADORES

Garantizan ancho mínimo de junta entre piezas al momento de colocarlas.



CARACTERÍSTICAS

- comportamiento homogéneo
- estructura interna dominada por limo estabilizado con cemento
- retención inicial de humedad
- estabilidad definida por relación A/C

APLICACIONES

- superficies peatonales
- senderos de bajo tránsito
- elementos prefabricados livianos
- superficies urbanas de baja sollicitación mecánica
- usos residenciales

VARIACIÓN DIMENSIONAL

Largo	$> \pm 0,4$ mm
Ancho	$> \pm 0,2$ mm
Espesor	$> \pm 0,1$ mm

FICHA TÉCNICA

ADOQUÍN EXPERIMENTAL AR-ML (12% AR – 88% ML)

COMPACTACIÓN DE LA MEZCLA

Método de compactación	Manual
Energía de compactación	1100 J

PROPIEDADES FÍSICAS

Peso	1,85 kg
Absorción	15,68 %
Densidad	1,72 g/cm ³
Clasificación (CIRSOC 201)	Hormigón liviano
Estabilidad volumétrica	99,88%

VARIACIÓN DIMENSIONAL POR HUMEDAD

Largo	0,051 %
Ancho	0,021 %
Espesor	- 0,196%

PROPIEDADES MECÁNICAS

Módulo de rotura promedio	1,18 MPa
Rango de resistencia	0,83 - 1,08 MPa
Desgaste superficial	-

RENDIMIENTO POR METRO CUADRADO

Unidades	50
Tiempo de cobertura	40 minutos



FABRICACIÓN

- compactación manual adecuada
- buena estabilidad geométrica durante el fraguado
- menor retracción superficial
- desmolde satisfactorio



MATRIZ INTERNA

Homogénea, continua, con buena dispersión de AR, sin aglomerados visibles
Color marrón rojizo.

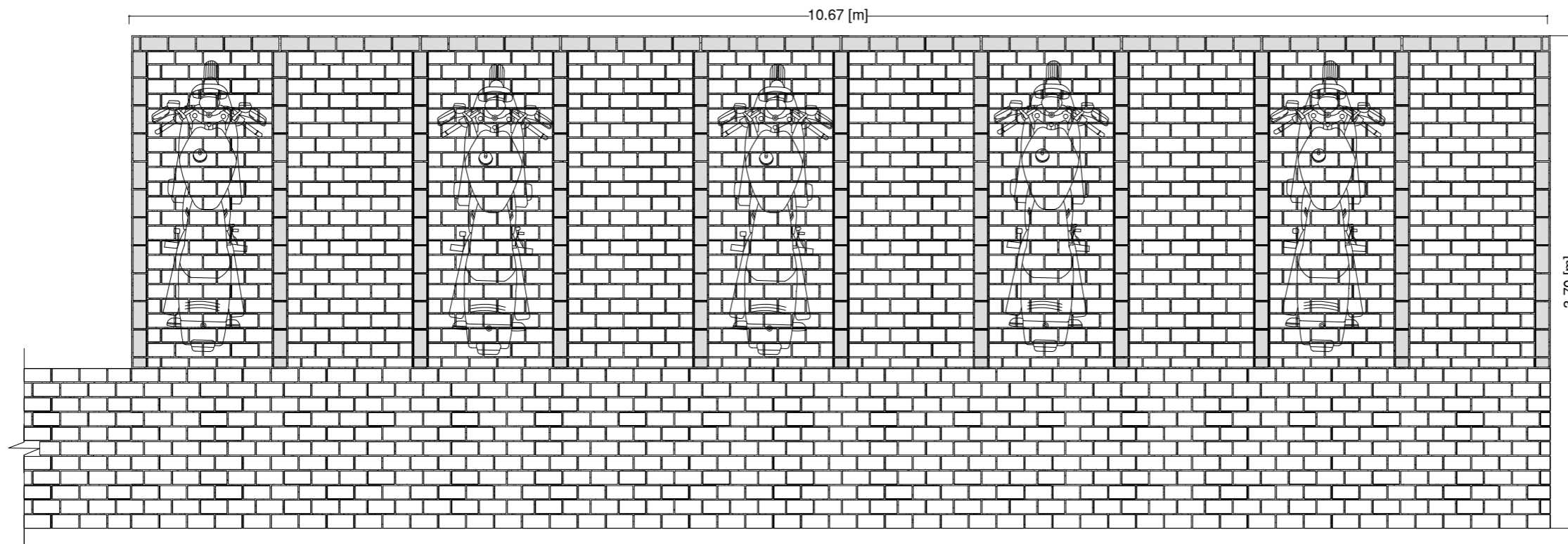
POROSIDAD

Homogénea, de pocas cavidades pequeñas debido al efecto filler del limo, reduciendo la permeabilidad..

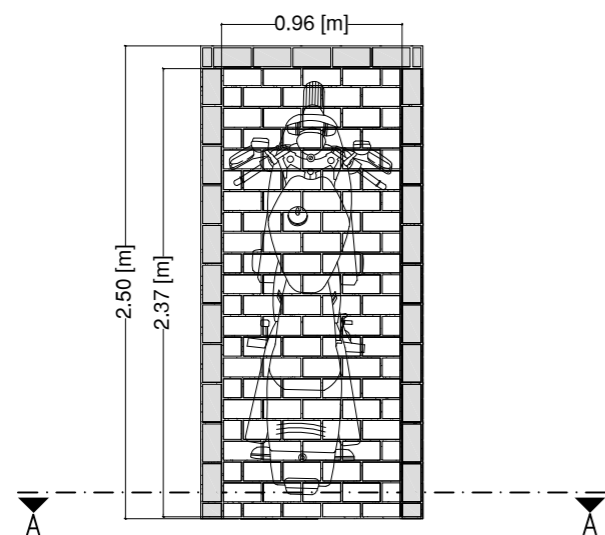


ANEXO III

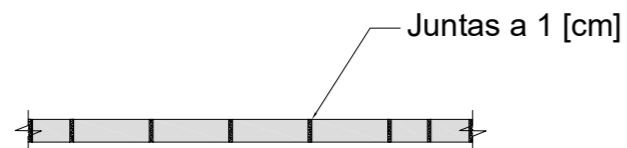
PROYECTO DE ESTACIONAMIENTO PARA MOTOS Y BICICLETAS



Detalle de Estacionamiento de Adoquines
Escala 1:4

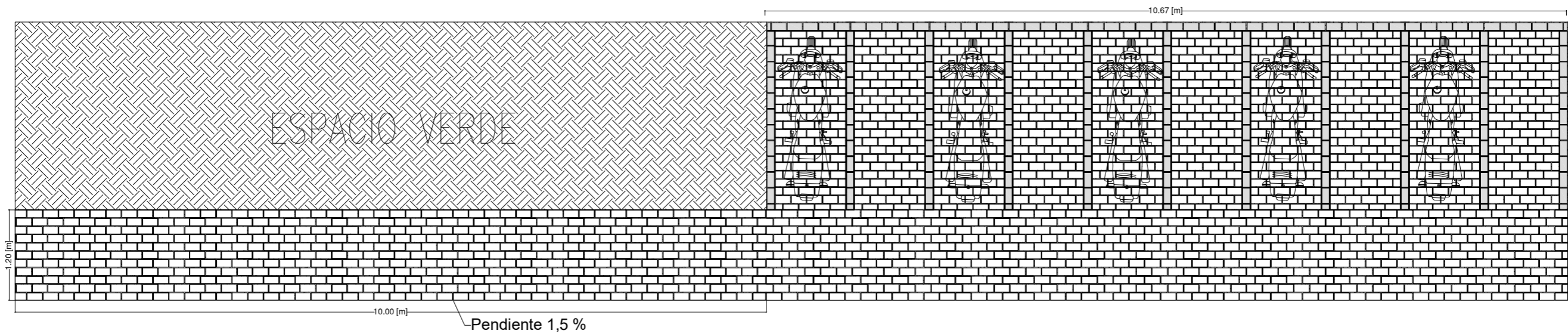


Estacionamiento Tipo
Escala 1:2



Corte A-A
Escala 1:2

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA		FACULTAD DE INGENIERÍA
SUELOS ESTABILIZADOS Y RECICLADOS EN CÓRDOBA (ARGENTINA)		FECHA: 15/03/2026
INTEGRANTES: Boiero Lucia Abril y Vassallo Santiago Francisco	PROFESOR: Ing. Cruz, María Pía	Detalle de Estacionamiento ESC: 1:4



Estacionamiento de Adoquines
Escala 1:6

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CÓRDOBA		FACULTAD DE INGENIERÍA
SUELOS ESTABILIZADOS Y RECICLADOS EN CÓRDOBA (ARGENTINA)		FECHA: 15/03/2026
INTEGRANTES: Boiero Lucia Abril y Vassallo Santiago Francisco	PROFESOR: Ing. Cruz, María Pía	Estacionamiento de adoquines ESC: 1:6

PRESUPUESTO DE ESTACIONAMIENTO ADOQUINADO PERMEABLE PARA MOTOS Y BICICLETAS - Marzo del 2026

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	Un	Cantidad	Comentarios	Precio Unitario	Precio Total
1	TAREAS PRELIMINARES	GI	1			
1.1	Replanteo y nivelación de obra	m2	51,48	Replanteo planimétrico del área de intervención, demarcación de ejes, límites de excavación, cotas de proyecto, niveles.	\$3.871,00	\$199.275,21
1.2	Limpieza de terreno	m2	51,48		\$3.618,00	\$186.251,02
1.3	VARIOS	GI	-		-	-
TOTAL						\$385.526,23
2	ADOQUINES PERMEABLES	Un	2229			
2.1	Suelo limo - loessico	Tn	1,67	Limo extraído del campus de la universidad	\$0,00	\$0,00
2.2	Árido reciclado proveniente de residuos de construcción y demolición de obras	Tn	1,67		\$14.320,00	\$23.939,46
2.3	Bolsa Cemento Portland Normal CPN 40	Un	33	Bolsas de 50 kg	\$12.039,00	\$402.523,97
2.3	Agua de amasado	m3	1,20		\$648,85	\$780,99
2.4	Pigmento para adoquines divisores de plazas	GI	-		\$7.900,00	\$7.900,00
2.5	VARIOS	GI	-		-	-
TOTAL						\$435.144,42
3	EXCAVACIONES	m3	30,37			
3.1	Excavación en caja	m3	30,37	Correspondiente al área superficial de la plataforma (41,07 m2) hasta la profundidad correspondiente con el espesor del paquete estructural total (0,64 m)	\$22.300,00	\$677.309,20
3.2	Carga y retiro de excedentes	m3	21,22	7,30 m3 del material extraído serán utilizados para confeccionar el suelo mejorado de la subrasante	\$16.325,90	\$346.448,46
3.3	VARIOS	GI	-		-	-
TOTAL						\$1.023.757,66
4	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	GI	1			
4.1	Subrasante mejorada					
4.1.1	Perfilado, humectación y compactado de superficie de apoyo	m2	51,48		\$4.000,00	\$205.916,00
4.1.2	Suelo extraído para suelo-cemento 8:1	m3	9,15		\$0,00	\$0,00
4.1.3	Cemento Portland de uso general para suelo-cemento 8:1	bolsa	1	22,42 kg de cemento necesarios y adquiriendo bolsas de 25kg de cemento	\$7.864,00	\$7.864,00
4.1.4	Ejecución de subrasante mejorada con suelo-cemento 8:1	m3	10,30		\$25.000,00	\$257.395,00
4.1.5	Compactación y curado	m2	51,48	Se realiza con CBR de diseño de 8%	\$2.500,00	\$128.697,50
4.2	Subbase drenante					
4.2.1	Provisión, extendido y compactación	m3	10,30	Capa de 20 cm de espesor de agregado grueso, lavado, angular y abierto de 25 a 40 mm	\$58.000,00	\$597.156,40
4.3	Base drenante					
4.3.1	Provisión, extendido y compactación	m3	5,15	Capa de 10 cm de espesor de agregado grueso, lavado, angular y abierto de 10 a 25 mm	\$52.170,00	\$268.565,94
4.4	Cama de asiento					
4.4.1	Provisión, extendido y compactación	m3	1,54	Capa de 3 cm de espesor de agregado fino, lavado, angular y abierto de 2 a 5 mm	\$70.084,42	\$108.236,28
4.5	Superficie adoquinada					
4.5.1	Colocación de adoquines permeables	un	1709		\$350,00	\$598.150,00
4.5.2	Relleno de juntas	m3	0,32	Agregado fino, lavado, angular y abierto de 2 a 5 mm	\$70.100,00	\$22.287,59
4.5.3	Compactación y terminación superficial	m2	5,15	Realizando pendiente del 2% para drenaje eficiente	\$20.826,00	\$107.210,17
4.6	Confinamiento lateral					
4.6.1	Cordones de mortero	m3	0,27	Perimetro de 18,07 m (un lado longitudinal de 10,67 m y ambos anchos de 3,70 m) con una altura de 15 cm y ancho de 10 cm	\$650.000,00	\$176.182,50
4.7	VARIOS	GI	-		-	-
TOTAL						\$2.477.661,38

TOTAL DE LA OBRA \$4.322.089,69

PRESUPUESTO DE ESTACIONAMIENTO ADOQUINADO CONVENCIONAL PARA MOTOS Y BICICLETAS - Marzo del 2026

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	Un	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
1	TAREAS PRELIMINARES	Gl	1		
1.1	Replanteo y nivelación de obra	m2	51,48	\$3.871,00	\$199.275,21
1.2	Limpieza de terreno	m2	51,48	\$3.618,00	\$186.251,02
1.3	VARIOS	Gl	-	-	-
TOTAL					\$385.526,23
2	ADOQUINES MACIZOS	Un	2229		
2.1	Cómputo	un	2229	\$515,00	\$1.147.935,00
2.2	Transporte y acopio	Gl	-	\$110.000,00	\$110.000,00
2.3	VARIOS	Gl	-	-	-
TOTAL					\$1.257.935,00
3	EXCAVACIONES	m3	30,37		
3.1	Excavación en caja	m3	30,37	\$22.300,00	\$677.309,20
3.2	Carga y retiro de excedentes	m3	21,22	\$16.325,90	\$346.448,46
3.3	VARIOS	Gl	-	-	-
TOTAL					\$1.023.757,66
4	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	Gl	1		
4.1	Subrasante mejorada				
4.1.1	Perfilado, humectación y compactado de superficie de apoyo	m2	51,48	\$4.000,00	\$205.916,00
4.1.2	Suelo extraído para suelo-cemento 8:1	m3	9,15	\$0,00	\$0,00
4.1.3	Cemento Portland de uso general para suelo-cemento 8:1	bolsa	1	\$7.864,00	\$7.864,00
4.1.4	Ejecución de subrasante mejorada con suelo-cemento 8:1	m3	10,30	\$25.000,00	\$257.395,00
4.1.5	Compactación y curado	m2	51,48	\$2.500,00	\$128.697,50
4.2	Subbase compactada				
4.2.1	Provisión, extendido y compactación	m3	10,30	\$58.000,00	\$597.156,40
4.3	Base compactada				
4.3.1	Provisión, extendido y compactación	m3	5,15	\$62.070,00	\$319.530,15
4.4	Cama de asiento				
4.4.1	Provisión, extendido y compactación	m3	1,54	\$70.084,42	\$108.236,28
4.5	Superficie adoquinada				
4.5.1	Colocación de adoquines permeables	un	1709	\$350,00	\$598.150,00
4.5.2	Relleno de juntas	m3	0,32	\$70.100,00	\$22.287,59
4.5.3	Vibrado con placa	m2	51,48	\$2.407,00	\$123.909,95
4.5.4	Compactación y terminación superficial	m2	5,15	\$20.826,00	\$107.210,17
4.5.5	Pintura para demarcaciones de plazas	l	2	\$14.903,00	\$29.806,00
4.6	Confinamiento lateral				
4.6.1	Cordones de mortero	m3	0,27	\$650.000,00	\$176.182,50
4.7	VARIOS	Gl	-	-	-
TOTAL					\$2.682.341,54

TOTAL DE LA OBRA	\$5.349.560,43
-------------------------	-----------------------

